

Destilador solar

Por DIEGO ALFONSO MOLINA RAMIREZ



DESTILADOR SOLAR

Destilador Solar

DIEGO ALFONSO MOLINA RAMIREZ

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:

Desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de Fuentes de Energía Solar y Eólica

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2020

Dedicatoria

En momentos ha sido fuerte el seguir adelante con caídas y tropiezos, pero siempre con el apoyo de Dios y el agradecimiento a mis padres que siempre han estado dándome buenos ejemplos y fortaleciendo mi ser de poder hacer las cosas sin importar que obstáculos encuentre.

Un propósito noble inspira sacrificio, estimula la innovación y anima la perseverancia.

Gary Hamel

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en este pequeño párrafo la gran ayuda que nos han brindado familiares y amigos durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primera instancia, agradezco a mis padres y hermana ya que sin ellos la posibilidad de estudiar no habría sido posible, por su apoyo económico y moral que me han brindado y sus enseñanzas, a mi tutor de proyecto Carlos Ramón Batista por haberme colaborado y orientado en el proceso de investigación; al ingeniero evaluador Omar Rojas por su apoyo y ayuda que me brindo en el proceso. Por otro lado, personal agradecer a Dios por darme esa esposa e hijos que siempre me brinda su apoyo y son el motor de mi vida para seguir y alcanzar mis metas. Así mismo, quiero expresar mi reconocimiento a Santiago Bohórquez que me ayudó y me dio ánimo a lo largo de la carrera para seguir con ella, gracias a familiares que también me ayudaron el proceso de formación.

Resumen

Según cifras del DANE, la cobertura de agua potable es de 92,3%, es decir, hay más de 3,6 millones de personas sin acceso al líquido vital de uso diario. Y ni hablar de las zonas rurales, donde el desabastecimiento de agua supera el 75% de cobertura, los efectos del cambio climático provocan escases de agua y con ello nos lleva a buscar alternativas con energías renovables para poder procesar el agua por medio del método de evaporación y condensación. Con el fin de ayudar con esta problemática en este proyecto se presenta un tipo de destilador solar para generar agua destilada, se quiere aumentar su eficiencia y rendimiento en litros de agua por día con la ayuda de un concentrador solar parabólico compuesto desarrollado en las instalaciones de la universidad Antonio Nariño en Tunja en el año 2019. Para alcanzar el objetivo se realizó una revisión bibliográfica sobre tecnologías en destiladores solares, y se determinó el fácil funcionamiento de este método pero con bajas eficiencias.

El proyecto consta de una fuente de energía que es el concentrador parabólico; un evaporador de envase de vidrio resistente al calor, en su interior un conducto de cobre en forma de espiral; un condensador que es un tanque de acero aislado térmicamente y un intercambiador de calor de cobre en su interior; y así poder obtener agua destilada a partir del agua con cloruro de sodio. Según los resultados obtenidos en la tesis “Desarrollo de un Concentrador Solar tipo Parabólico Compuesto” es de 110°C en el punto focal y por lo tanto debido a los cálculos hechos esta temperatura no es suficiente para que el sistema funcione en condiciones de buen rendimiento de destilación y se llega a la conclusión de que el destilador necesita una fuente de calor más amplia.

PALABRAS CLAVE: colector parabólico compuesto, destilador solar, radiación, calor, temperatura, transferencia, evaporación, condensación.

Índice

	Pág.
Introducción	12
Capítulo 1.....	14
MARCO REFERENCIAL	14
1.1 Marco teórico	14
1.1.1 Energía solar	14
1.1.2 Evaporación	15
1.1.2.1 Calor específico	15
1.1.2.2 Calor latente de evaporación	16
1.1.3 Calor y temperatura.....	16
1.1.3.1 Medición del calor	17
1.1.3.2 Temperatura: cambios de estado.....	18
1.1.4 Condensación	18
1.1.4.1 Temperatura de la condensación del agua	18
1.1.5 Radiación Térmica.....	19
1.1.5.1 Características de la radiación térmica	20
1.1.5.2 Cuerpo negro	21
1.1.6 Energía solar térmica	21
1.1.6.1 Sistema de captación solar	22
1.1.6.2 Constante solar	23
1.1.7 Flujo volumétrico	23

1.1.7.1	La incompresibilidad de los líquidos.....	24
1.1.8	Eficiencia térmica de una máquina.....	24
1.2	Marco conceptual	25
1.2.1	Irradiancia.....	25
1.2.2	Caudal	25
1.2.3	Presión	25
1.2.4	Humedad.....	26
1.2.5	Condensación	26
1.2.6	Evaporación	26
1.2.7	Temperatura.....	26
1.3	Estado del arte.....	26
1.3.1	Tecnologías en destiladores solares	26
1.3.2	Concentradores solares	32
Capítulo 2.....	37	
DISEÑO DE DESTILADOR SOLAR	37	
2.1	Diseño conceptual del Destilador Solar	38
2.1.1	Breve descripción del proceso de destilación en una etapa.....	41
2.1.2.	Cálculos preliminares del evaporador	42
2.1.3.	Cálculos preliminares del condensador.....	52
2.1.4.	Dimensionamiento del prototipo de Destilador Solar.....	58

Lista de figuras

	pág.
Figura 1-1. Presión por calor eleva la temperatura.....	15
Figura 1-2. Temperatura de condensación del agua.....	17
Figura 1-3. Formas de transferencia de calor.....	18
Figura 1-4. Características de la radiación.....	19
Figura 1-5. Colector de baja temperatura.....	20
Figura 1-6. Tasa de flujo volumétrico.....	22
Figura 1-7. Eficiencia térmica.....	23
Figura 1-8. Maquina destiladora charles Wilson.....	25
Figura 1-9. Destilador de una vertiente.....	26
Figura 1-10. Destilador de dos vertientes.....	26
Figura 1-11. Destilador tipo invernadero.....	27
Figura 1-12. Destilador tipo cascada.....	27
Figura 1-13. Destilador solar esférico de barredera.....	28
Figura 1-14. Disco Solar Parabólico Concentrador.....	31
Figura 1-15. Canal Parabólico Concentrador.....	31
Figura 1-16. Canal Parabólico Concentrador.....	31
Figura 1-17. Concentradores semiesféricos.....	31
Figura 1-18. Concentrador Lineal Fresnel.....	32
Figura 1-19. Concentrador Circular Fresnel.....	32
Figura 2-20. Concentrador Solar Parabólico tipo Compuesto.....	36
Figura 2-21. Evaporador.....	37
Figura 2-22. Condensador.....	37
Figura 2-23. Tanque condensador.....	38
Figura 2-24. Destilador solar.....	39

Figura 2-25: diagrama T_s vs dT_e	44
Figura 2-26: diagrama dT_e vs q''_s	45
Figura 2-27: diagrama q''_s vs q_s	47
Figura 2-28: diagrama q_s vs \dot{m}	48
Figura 2-29 diagrama J_a vs T_s	52
Figura 2-30: diagrama J_a vs h'_{fg}	53
Figura 2-31: diagrama \bar{h}_L vs h'_{fg}	54
Figura 2-32 diagrama del área determinada respecto al coeficiente de convección.....	55
Figura 2-33. Dimensiones del concentrador parabólico Compuesto.....	58
Figura 2-34. Dimensiones del recipiente de vidrio del evaporador.....	60
Figura 2-35. Dimensiones de la espiral del evaporador.....	62
Figura 2-36. Dimensiones del depósito del condensador.....	64
Figura 2-37. Dimensiones de la espiral del condensador.....	66
Figura 2-38. Dimensiones del depósito de agua destilada.....	68

Lista de tablas

	pág.
Tabla 2-1. Parámetros del paraboloide diseñado y construido.....	35
Tabla 2-2: exceso de temperatura para diferentes T_s	43
Tabla 2-3: flujo de calor superficial a diferentes dT_e	44
Tabla 2-4: flujo de calor q_s en función del tiempo para su respectivo flujo de calor superficial q''_s	46
Tabla 2-5: razón de evaporación \dot{m} , respecto al flujo de calor q_s	47
Tabla 2-6: temperatura superficial y número de Jakob.....	52
Tabla 2-7: número de Jakob y calor latente modificado.....	53
Tabla 2-8 coeficiente de convección.....	54
Tabla 2-9 área necesaria para la condensación del vapor de agua.....	55
Tabla 2-10 Para diferentes áreas existen distintos diámetros.....	56
Tabla A.6. Propiedades termodinámicas de agua saturada	

Introducción

El agua es indispensable para los seres vivos llámense humano, animal o planta por ello se necesita para el consumo agua dulce, agua potable y pura; el agua es básica para el correcto funcionamiento de todo el organismo humano. La composición del agua de lluvia está determinada por la fuente de vapor de agua y la composición iónica adquirida o perdida por este agua en su viaje a través de la atmósfera. La importancia de la contribución del agua de mar en la composición del agua de lluvia se puede observar a través de la concentración de Cloruros (sales marinas).

El agua destilada es un proceso, el mismo que usa la naturaleza para purificar el agua en lo que se conoce como el ciclo del agua; pero dicha purificación ya no es tan eficaz en la atmosfera debido a la contaminación y proliferación de virus y polvos contaminantes del medio. “Este método de purificación es muy sencillo, se hierve el agua hasta que se convierte en vapor se traslada el vapor a un nuevo recipiente limpio donde se condensa para volver a convertirse en agua líquida y purificada.

En el departamento de Boyacá han existido fenómenos naturales como los fue hace poco tiempo con el fenómeno del niño y la niña, este fenómeno consecuentemente se puede aprovechar dando tratamiento a las aguas lluvias Llevando a cabo un proceso de destilación o desalinización con energías renovables (radiación solar).

Para disminuir la falta de agua potable en dichas zonas y mejorar la calidad del agua de dicho proceso se plantea como una posible solución la incorporación de un destilador solar de evaporación y condensación del agua, y así generar algunos litros diarios depende de la temperatura ambiente y radiación solar que se vaya produciendo diariamente. Para ello se da paso a un proceso que se denomina destilación; es un método muy eficaz ya que elimina la mayoría de las impurezas existentes en el agua.

Los concentradores parabólicos compuestos son dispositivos que a través de superficies reflectantes (espejos) concentran la radiación solar captada en un área muy reducida llamada foco, donde se pueden alcanzar altas temperaturas.

En el **objetivo general** es modelar el prototipo para destilación usando resultados obtenidos en prototipo del concentrador parabólico compuesto y radiación solar.

En los **objetivos específicos** se encuentra diseñar el destilador solar usando herramientas CAD y selección de componentes, modelar el prototipo de destilador solar según el diseño y componente seleccionados de tiempo y temperatura, analizar los resultados obtenidos del destilador solar modelado referente a las temperaturas obtenidas en el concentrador parabólico compuesto.

El departamento presenta una alta variabilidad territorial en la distribución de la precipitación de aguas lluvias, “el clima del departamento de Boyacá está determinado principalmente por su relieve y posición geográfica, dando como resultado, que se presenten todos los pisos térmicos desde el nival.

Se plantea el siguiente cuestionamiento ¿Cómo se puede aprovechar la radiación solar en la destilación de aguas de manera que sea apta para consumo en sectores vulnerables?

Como parámetros definidos, se establecieron el alcance y las limitaciones.

Alcance:

El proyecto comprende el diseño y modelamiento del prototipo de destilador usando energía renovable, radiación solar y temperatura incidente en el foco; para mejorar su eficiencia se hará en conjunto con un prototipo experimental de concentrador parabólico ya existente en las instalaciones de la universidad Antonio Nariño. Esto para calcular y analizar qué beneficio se puede obtener en la implementación del concentrador parabólico en el destilador solar, para que el destilador llegue a ser más eficiente y aumentar la rapidez de la cantidad de litros de agua destilada diariamente, aprovechando al máximo la energía solar y el calor almacenado en el punto focal.

Limitaciones:

Se limita al diseño del destilador solar, modelando la eficiencia del sistema con ayuda de los resultados de temperatura en función del tiempo del concentrador solar parabólico compuesto.

Capítulo 1

MARCO REFERENCIAL

1.1 Marco teórico

A través de la energía solar puede obtenerse una cierta cantidad de agua potable, esto es posible gracias al proceso natural como lo es la evaporación y condensación de un líquido, en este caso, el agua. Dicho sistema o prototipo se denomina destilador solar que se puede implementar de varias formas, siempre con el mismo principio.

Los prototipos de destiladores solares son los siguientes: destilador de Charles Wilson, destilador solar de una vertiente, destilador solar de dos vertientes, destilador solar de invernadero, destilador solar de cascada, destilador esférico de barredera, destilador solar tubular, destilador concentrador solar parabólico con la potencia de un panel fotovoltaico y los diferentes modelos citados.

Por lo anterior puede decirse que es una fuente alternativa de conseguir el líquido vital, que no reemplaza las tradicionales formas de conseguir agua potable.

1.1.1 Energía solar

Es un tipo de energía renovable y limpia que aporta beneficios al ambiente ya que no es una fuente de emisiones contaminantes, el aprovechamiento de la energía que viene del sol es abundante e inagotable. El Sol lleva cinco mil millones de años emitiendo radiación solar y se calcula que todavía no ha llegado al 50% de su existencia.¹

La energía solar llega a la tierra en forma de luz, calor y rayos ultravioleta principalmente y se denomina energía electromagnética. Su empleo se puede realizar de dos formas: por conversión térmica de alta temperatura (sistema foto térmico) y por conversión fotovoltaica (sistema fotovoltaico).

¹ «energía solar».

La conversión térmica de alta temperatura consiste en transformar la energía solar en energía térmica que se almacena en un fluido. Se puede llevar a cabo por medio de dispositivos llamados colectores.

La conversión fotovoltaica consiste en la transformación directa de la energía luminosa en energía eléctrica. Para ello se emplean unas placas solares formadas por células fotovoltaicas (de silicio o de germanio).

Una desventaja de esta energía limpia se da por su bajo rendimiento energético, es una fuente de energía intermitente y varía mucho en su capacidad de producción debido a su dependencia del clima y del número de horas de sol al año.²

1.1.2 Evaporación

La evaporación ocurre en la interfase vapor-líquido, cuando la presión de vapor es menor que la de saturación del líquido a una temperatura dada. Cuando llegan a la superficie aumenta su temperatura por efecto de una fuente como la radiación solar, creciendo por tanto su energía cinética hasta que algunas consiguen liberarse de la atracción de las moléculas adyacentes y atravesar la interfaz líquido-gas, convirtiéndose en vapor; note que la evaporación no comprende el movimiento de las burbujas o la formación de estas.³

1.1.2.1 Calor específico

Su definición será dada respecto a la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia o líquido, la energía requerida es definida depende de la manera que se vaya a ejecutar dicho proceso. El calor específico cambia con respecto a una variación de temperatura en derivación del tiempo y por ello depende de la temperatura inicial, la masa y la capacidad calorífica (coeficiente de incremento de temperatura en una unidad), el vapor de agua suele estar cercano a un estado de saturación, es un gas denso. El calor específico a volumen constante nace como la energía que se requiere para elevar la temperatura en unidad de masa mientras el volumen es constante.⁴

² Joaquín Recio Miñarro, «ENERGIA SOLAR EN LA TIERRA».

³ Samoa, «Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel».

⁴ Samoa.

1.1.2.2 Calor latente de evaporación

La medición del calor de evaporación se obtiene dejando en un recipiente agua y dándole una fuente de calor hasta llegar a los 100°C, su punto de ebullición, dando un diferencial de temperatura de tiempo final menos tiempo inicial y así determinar el cambio de temperatura que ocurre en dichas sustancias. A medida que el agua se va evaporando el nivel en el recipiente va disminuyendo.

La medida del calor latente de evaporación es compleja, ya que no se sabe exactamente cuándo la sustancia entra en su punto de ebullición y cuándo se está evaporando. Las pérdidas de calor son importantes, estas pérdidas se pueden dar por el calor absorbido por el recipiente, por el agua evaporada por el proceso de calentamiento o por el agua que se condensa en las paredes del recipiente.⁵

1.1.3 Calor y temperatura

El calor es la energía cinética que posee un sistema debido a las moléculas en movimiento, la temperatura varía respecto a la velocidad y al grado de actividad de las moléculas, cuando el calor en el movimiento de moléculas empieza actuar en un sistema las temperaturas se elevan y dicho cuerpo en su interior eleva su energía producida, la cantidad de calor transferido durante el proceso se denota por Q y a partir de una unidad de tiempo el calor transferido varía y se denota como razón de transferencia de calor Q' .

La temperatura que varía en un sistema respecto a la energía de fuente de calor recibida es la capacidad de medición en un cuerpo o sustancia, y debido a las fuerzas moleculares pasa a ser un sistema en estado de fase transitorio de líquido a gaseoso. Ver Figura 1-1.

⁵ Angel Franco Garcia, «calor latente de vaporacion».

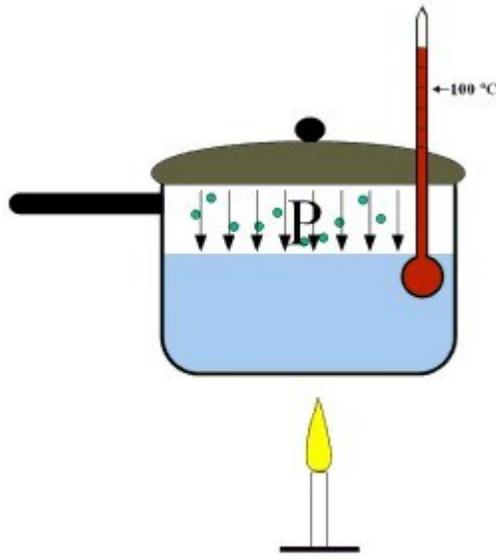


Figura 1-1 Presión por calor eleva la temperatura. Fuente: referencia⁶

1.1.3.1 Medición del calor

La calorimetría es todo lo relativo a la medición del calor que sale o entra en los procesos. Dicho calor representa la cantidad de energía que se transmite de un cuerpo a otro, la energía térmica es uno de los fenómenos caloríficos que está en juego en el proceso o sistema. Este fenómeno energético se puede convertir en un trabajo mecánico, pero solo una fracción de calor se puede aprovechar como trabajo útil en el proceso.

1.1.3.2 Temperatura de saturación

La temperatura a la que una sustancia obtiene su cambio de fase se denomina temperatura de saturación (T_{sat}). Las sustancias o líquidos cambian de fase a diferentes atmosferas de presión, por ejemplo: el agua hierve a 100°C y a 1 atm de presión; para vaporizar un líquido se requiere de una gran cantidad de energía, la cantidad de energía absorbida durante el proceso de cambio de fase se llama calor latente.⁷

⁶ Samoa, «Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel».

⁷ Samoa.

1.1.3.3 Temperatura: cambios de estado

En la Naturaleza la materia se presenta usualmente en uno de tres estados: sólido, líquido y gaseoso. La materia cambia de estado a partir de la temperatura a que está expuesta la sustancia. Estos cambios de temperatura a que se expone un elemento o sustancia tienen un determinado nombre y reciben distintas denominaciones, en dependencia del cambio de estado en la materia:

- Fusión: estado sólido a líquido,
- Solidificación: líquido a sólido,
- Evaporación: líquido a gaseoso,
- Condensación: gaseoso a líquido,
- Sublimación progresiva: sólido a gaseoso,
- Sublimación regresiva: gaseoso a sólido.

1.1.4 Condensación

Es el proceso por el cual se lleva a cabo la fase gaseosa de una sustancia a precipitaciones de bajas temperaturas en contacto con una superficie que están por debajo de la temperatura crítica y con ello poder lograr cambio de fase de vapor a líquido, que se encuentra cerca de la región de saturación. Este proceso es inverso a la evaporación y aunque es un proceso que se da naturalmente se puede implementar artificialmente para industrias y destiladores que realizan la misma causa y efecto.

Para que ocurra el cambio de fase del agua gaseoso líquido las moléculas de vapor deben perder energía, cuando está en fase gaseoso, las moléculas tienden a distanciarse; por el contrario, cuando estas moléculas de vapor pierden energía por enfriamiento o pérdida de energía térmica se unen, quedando en estado líquido para formar gotas de agua.⁸

1.1.4.1 Temperatura de la condensación del agua

La condensación depende de la temperatura, la saturación y la presión.

La temperatura debe disminuir de forma directa y así evitar que las moléculas tengan movimiento, esto se debe llevar hasta una baja temperatura que se denomina punto de rocío, que depende de la presión.

⁸ Villegas, «Termodinámica, 6ta Edición - Yunus A. Çengel y Michael A. Boles».

La saturación varía en dependencia de la presión y la temperatura. Se denomina humedad relativa a la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire en comparación con el total de vapor. Cuando el aire del ambiente se satura hay una humedad relativa al 100% y con esto llegando al punto de rocío (vapor del ambiente que choca con superficies frías y las humedece).

La presión es uno de los factores más importantes de la condensación del vapor de agua, ya que entre más presión exista en el aire la posibilidad de que las moléculas se dispersen es menor y por tanto el vapor se condensa con mayor facilidad. En espacios confinados se da mejor esta presión para la condensación.



Figura 1-2 Temperatura de condensación del agua. Fuente: referencia⁹

1.1.5 Radiación Térmica

La radiación térmica es uno de los mecanismos de ondas o partículas que llegan a determinado espacio o punto determinado, y en consecuencia también es un análisis termodinámico que se refiere a la transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro cuando se eleva la temperatura en un cuerpo las partículas u ondas van a tener más energía cinética y aumento de calor que se puede transferir de diferentes modos.¹⁰

Conducción. Es la forma en la cual se transmite energía cinética de un cuerpo que tiene más partículas energéticas a otro que carece de ellas, en los gases y líquidos la conducción se asocia a las colisiones y a la difusión de las

⁹ Cristina Novillo, «que es la condensación del agua».

¹⁰ Samoa, «Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel».

moléculas durante el movimiento aleatorio, es decir, se transportan moléculas caloríficas pero no hay transporte de materia.

Difusividad térmica. Se denomina capacidad calorífica de un material se expresa por unidad de volumen en unidades de (J/Kg), la cual determina cuán rápido se difunde el calor por un material.

Convección. En este modo la transferencia de energía se da mediante una superficie sólida en contacto con un líquido o un gas, que está en movimiento combinando conducción y movimiento del fluido, entre más rápido se mueva el fluido mejor será su transferencia de calor por conducción. Este proceso transforma materia con variación de temperatura que determina la densidad del fluido, ya que la densidad varía dependiendo de la temperatura.

Radiación. La radiación es la energía que emite la materia en forma de ondas electromagnéticas y como resultado el cambio de configuraciones en átomos y moléculas, la radiación no sufre atenuación en el vacío. En el estudio de transferencia de calor es de interés la radiación térmica ya que es la emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Este fenómeno se da en presencia de la materia o en ausencia de ella, se denomina radiación térmica a la que resulta exclusivamente de la temperatura es un fenómeno volumétrico y que todos los sólidos, líquidos y gases transmiten radiación en distintos grados.

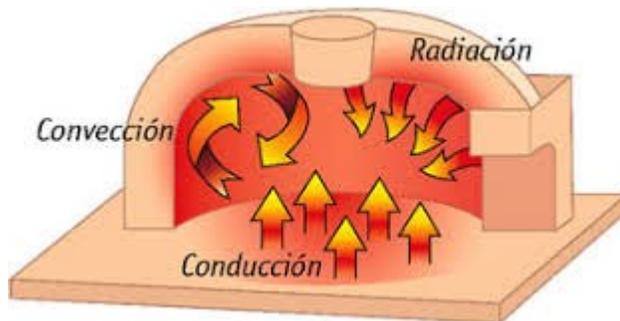


Figura 1-3 Formas de transferencia de calor. Fuente: referencia¹¹

1.1.5.1 Características de la radiación térmica

¹¹ Samoa.



Figura 1-4 Características de la radiación

1.1.5.2 Cuerpo negro

El cuerpo negro la radiación se considera como un fenómeno superficial, en el interior de un cuerpo las radiaciones emitidas no pueden llegar a la superficie y la radiación incidente en dichos cuerpos negros suele absorberse en unas cuantas micras dentro del cuerpo. La razón máxima de radiación que se emite desde la superficie está a una temperatura termodinámica (T_s).¹²

1.1.6 Energía solar térmica

Es una forma de generar energía sostenible y amigable con el medio ambiente, por medio de la energía proveniente del sol se transmite a un medio portador de calor usualmente agua o aire. Existen varias aplicaciones de la energía solar para generar electricidad, como el calentamiento de agua hasta llegar a la evaporación, con dicho vapor mueve una turbina hasta llegar a conseguir energía.

El uso de la energía solar para generar electricidad en una central denomina central termo solar tiene el principio de concentrar la radiación solar en un punto y así poder generar vapor de agua que llegara a una turbina que está conectada a un generador eléctrico. Una central térmica funciona similarmente a una central termo solar, ambas cumplen con el mismo principio de generar electricidad con calor, solo que una funciona con combustibles fósiles como el carbón (no amigable con el ambiente), y la otra funciona con energía solar.

¹² Samoa.

Existen colectores de energía térmica que provienen de la radiación del sol y dependiendo de su forma de captación se clasifican en colectores de baja, media, y alta concentración

Colectores de baja concentración. Proveen energía útil y trabajan a temperaturas menores a 65°C, ver Figura 1-5.

Colectores de media concentración. Entrega calor útil a mayor temperatura, estándares entre 100°C y 300°C.

Colectores de alta concentración. Realiza trabajo a temperaturas superiores de 500°C, utilizado en plantas de generación eléctrica a gran escala.

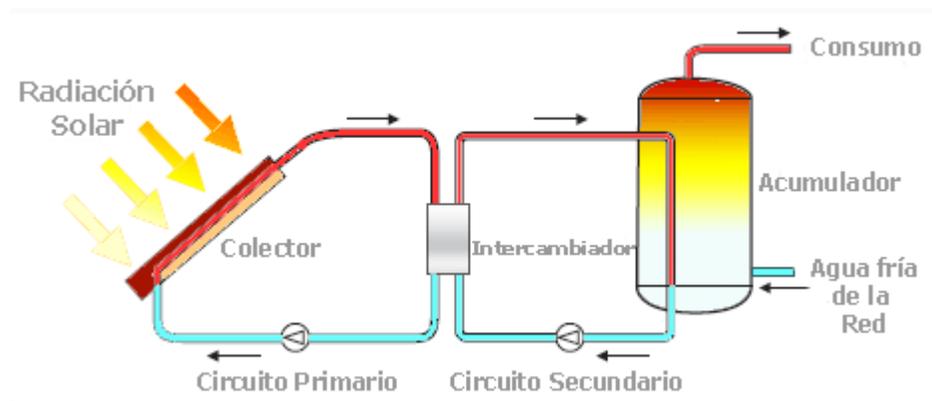


Figura 1-5 Colector de baja concentración. Fuente: referencia ¹³

1.1.6.1 Sistema de captación solar

El sistema de captación está formado por fuentes o paneles que transforman la radiación solar en energía térmica, aumentando la temperatura de la sustancia en el lugar por donde se localiza la instalación. El sistema dependerá principalmente si se trata de un captador de baja, media o alta concentración de energía térmica.

Existen distintos tipos de captadores y se implementan en captaciones solares de baja, media o alta concentración; dependiendo de donde se vayan a emplear y son: captador solar plano, captador solar térmico no vidriado, captador solar de vacío, captador solar con sistema de concentración de la radiación y captador solar térmico.

¹³ «energía solar».

1.1.6.2 Constante solar

La constante solar es una densidad de flujo energético que atraviesa una unidad de área, se mide la radiación solar media electromagnética (Irradiancia solar). Se toma la muestra en una superficie perpendicular a los rayos, una unidad astronómica (AU) desde el Sol (aproximadamente la distancia desde el Sol hasta la Tierra).

La “constante” solar no es una constante física; es decir, no es como la constante de Planck o la velocidad de la luz que son absolutamente constantes en Física. La constante solar es un promedio de un valor ya que varía la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera. En los últimos años ha variado menos de 0.2% ¹⁴.

$$G_s = 1353 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

1.1.7 Flujo volumétrico

Se denota por Q al flujo volumétrico de un líquido que circula por un área transversal longitudinalmente en una unidad de tiempo. $Q=V/t$, donde V - volumen del cilindro; t - tiempo que transcurre en recorrer el fluido en la superficie; Q - flujo volumétrico.

También se puede expresar en condiciones de volumen de una proporción de fluido que atraviesa una tubería como $V=Ad$, donde A - sección transversal del fluido y d - ancho de la porción de fluido; y si se sustituye en la expresión de la tasa de flujo volumétrico se obtendrá:

$$Q= V/t= (A*d)/t= A(d/t)$$

Aquí d/t es la longitud de fluido dividida entre el tiempo, que es la rapidez del fluido y velocidad ($v=d/t$). Entonces queda que el caudal $Q=Av$. Véase Figura 1-6.

¹⁴ Michael Torbert de Semper, «Constante Solar | Eficiencia Energética».

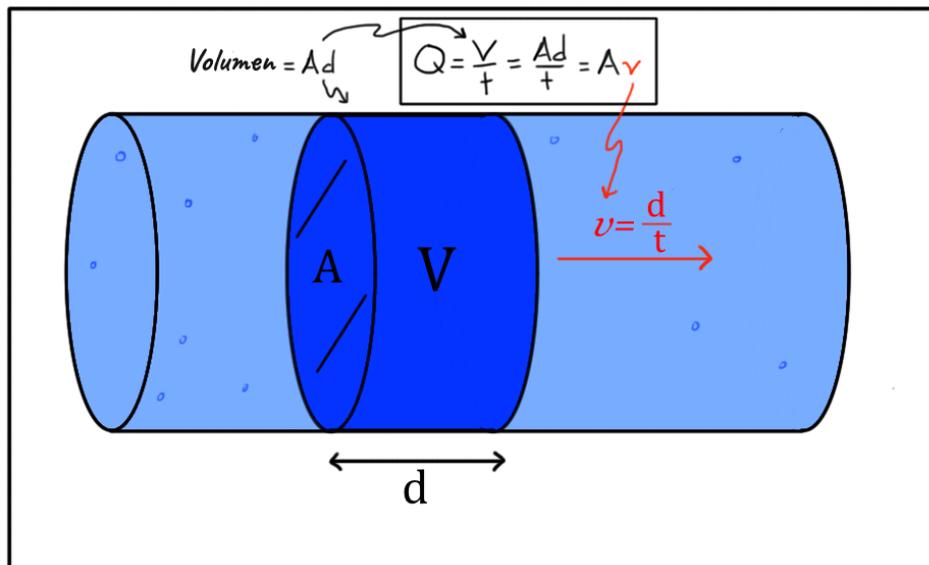


Figura 1-6. Tasa de flujo volumétrico $Q=Av$. Fuente: referencia ¹⁵

1.1.7.1 La incompresibilidad de los líquidos

Los líquidos son incompresibles, el volumen de dicho líquido permanece constante incluso si existe una variación o diferencia de la cavidad en el cual valla el flujo. El líquido cambia conforme entra a una sección de mayor o menor diámetro, esto se da en tuberías.¹⁶

1.1.8 Eficiencia térmica de una máquina

La eficiencia térmica (η) se define como la relación entre el trabajo que va a desarrollar la máquina y el calor absorbido. Figura 1-7. La fórmula de eficiencia térmica es:

$$\eta = \frac{W}{Q_c} = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

La eficiencia se da en porcentos, determina el porcentaje de aprovechamiento del calor suministrado al sistema para realizar dicho trabajo.

¹⁵ khan academy, «¿Qué es la tasa de flujo volumétrico?»

¹⁶ Navarro, *Mecánica de Fluidos - 6ta Edición - Robert L. Mott.pdf*.

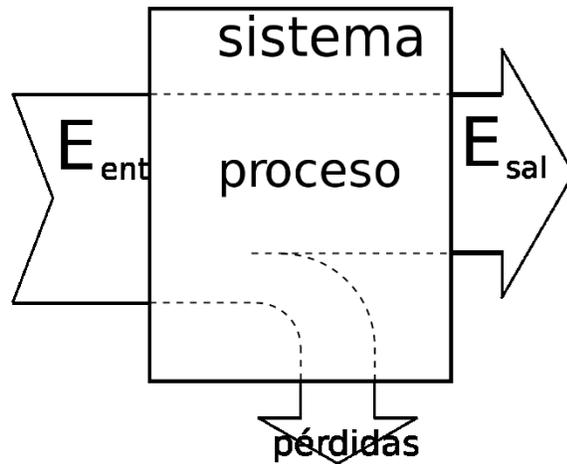


Figura 1-7 Eficiencia térmica. Fuente: referencia ¹⁷

1.2 Marco conceptual

1.2.1 Irradiancia

Es el coeficiente de magnitud entre la potencia y el área que recibe la radiación solar, es decir, permite conocer cuánta energía es emitida en un área o punto pasado determinado tiempo. La Irradiación se calcula por la expresión P/A ¹⁸, donde P - potencia medida en watts(w); A - área en metros cuadrados (m^2).

1.2.2 Caudal

Caudal Q es el volumen de fluido por unidad de tiempo que atraviesa una sección transversal a la corriente (ej. En una tubería los litros de agua que circulan a través del plano de transversal.). Usualmente se determina por el flujo volumétrico.¹⁹

1.2.3 Presión

Es la cantidad de fuerza que es ejercida en una unidad de área de una sustancia, $P = F/A$.²⁰

¹⁷ nikolas buitrago, «EFICIENCIA».

¹⁸ educar chile, «IRRADIANCIA».

¹⁹ Velásquez, «Ingeniería Claudio Mataix Mecánica de fluidos y maquinas hidraulicas».

²⁰ Navarro, *Mecánica de Fluidos - 6ta Edición - Robert L. Mott.pdf*.

1.2.4 Humedad

Se define como la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera, lo pertinente precisar directamente la masa de vapor de agua que está presente en una unidad de aire seco y se denomina humedad absoluta o humedad específica.²¹

1.2.5 Condensación

Es el proceso por el cual se lleva a cabo un proceso de cambio de fase gaseoso-líquido de una sustancia a precipitaciones de bajas temperaturas, se realiza cuando el gas o vapor se somete al contacto con una superficie por debajo de la temperatura crítica.²²

1.2.6 Evaporación

Es un proceso de transición de fase, lo experimenta una sustancia a partir de un cambio de estado líquido a un estado de vapor o gas. La evaporación se diferencia de la ebullición en términos de proceso. La evaporación ocurre solamente en la superficie del líquido o sustancia, mientras que la ebullición ocurre dentro de la masa líquida. El proceso de evaporación depende de la intensidad del movimiento térmico de las moléculas: cuanto más rápido se mueven las moléculas, más rápida se produce la evaporación. El otro factor influyente es la densidad o componentes de la sustancia a destilar (por ejemplo, el alcohol es menos pesado que el agua, por tanto, tiene un proceso de evaporación más rápido).²³

1.2.7 Temperatura

La temperatura se define como la cantidad de energía cinética de las partículas presentadas en estados de una masa gaseosa, líquida o sólida. A mayor velocidad en que las partículas se transporten, aumentará su temperatura de manera gradual y viceversa.

1.3 Estado del arte

1.3.1 Tecnologías en destiladores solares

En la actualidad se han desarrollado tecnologías que permiten el proceso de purificación de sustancias con ayuda de la radiación solar. Gracias al proceso

²¹ Villegas, «Termodinámica, 6ta Edición - Yunus A. Çengel y Michael A. Boles».

²² Samoa, «Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel».

²³ Laboratorio Químico, «Qué es la Evaporación?»

natural de evaporación y condensación de fluidos se produce en un prototipo de espacio reducido y artificial.

Existen destiladores solares a gran escala y a baja escala, eso lo determina el sitio en el cual funcione el prototipo dependiendo de la radiación del sol, de la necesidad que tiene el beneficiado, y también el tipo de destilador a emplear.

El primer destilador solar de Charles Wilson. Desarrollado en el desierto de Atacama ubicado en el norte de Chile, en la región de Antofagasta en 1872, hecho por el ingeniero sueco Charles Wilson. Fue la primera planta destiladora fundada para proveer de agua en un lugar donde abunda el agua, pero no es consumible al humano por sus bacterias y sales. Con una longitud de 4.000 metros cuadrados, el agua era elevada desde los pozos mediante una bomba de molino de viento hasta un estanque, el sol calentaba el agua de las arcas por los rayos que pasaban a través de los vidrios. De esta manera, se producía vapor que se condensaba y era conducido a través de cañerías hasta un tanque que almacena el líquido potable. La máquina llegó a producir en verano más de 20.000 litros de agua fresca diaria. Ver Figura 1-8.

Destilador solar de una vertiente. Es el prototipo más sencillo en estructura y producción, se trata de una caja cubierta con un vidrio inclinado a cierto grado, se divide en dos componentes básicos: una batea pintada de color negro y una pequeña canaleta de salida que almacena el agua destilada. Ver Figura 1-9.

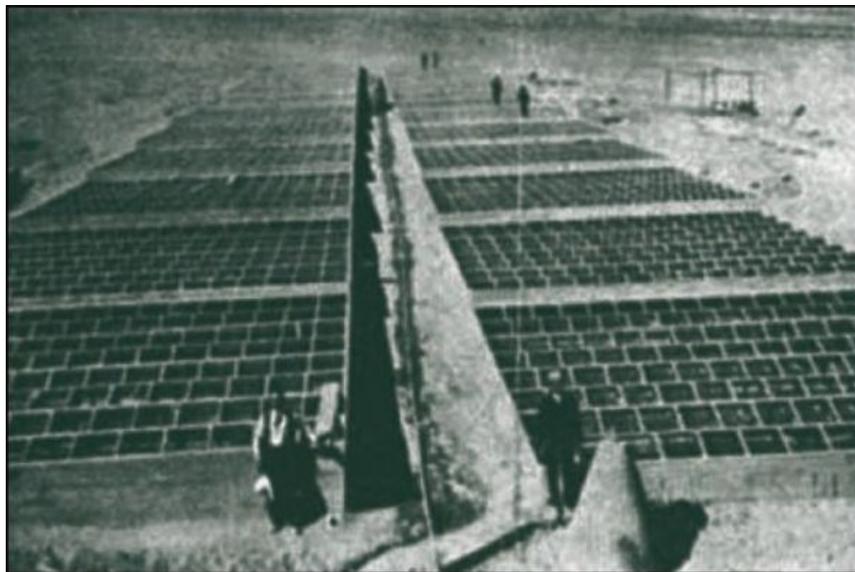


Figura 1-8 Máquina destiladora de Charles Wilson. Fuente: Referencia ²⁴

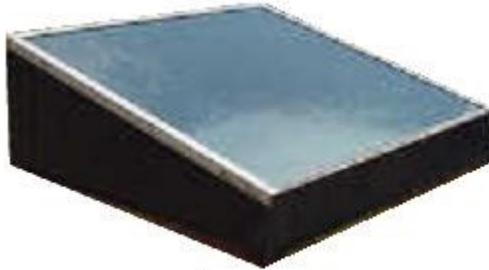


Figura 1-9 Destilador de una vertiente. Fuente: Referencia ²⁵

Destilador solar de dos vertientes. En estructura y producción es más complejo y eficiente. Consta de un tejado con doble inclinación y tiene el mismo principio de evaporación y condensación, se extrae el líquido por medio de una válvula. Ver Figura 1-10.



Figura 1-10 Destilador de dos vertientes. Fuente: Referencia ²⁶

Destilador solar tipo invernadero. Prototipo con gran capacidad de destilación. El agua destilada se condensa en las paredes del invernadero y llega a sus canales de base de recolección, es el mismo modelo de

²⁴ word press, «El primer destilador solar de Charles Wilson».

²⁵ Michael Torbert de Semper, «los destiladores solares II».

²⁶ Michael Torbert de Semper.

destilado de dos vertientes, pero en grandes proporciones. Ver Figura 1-11.

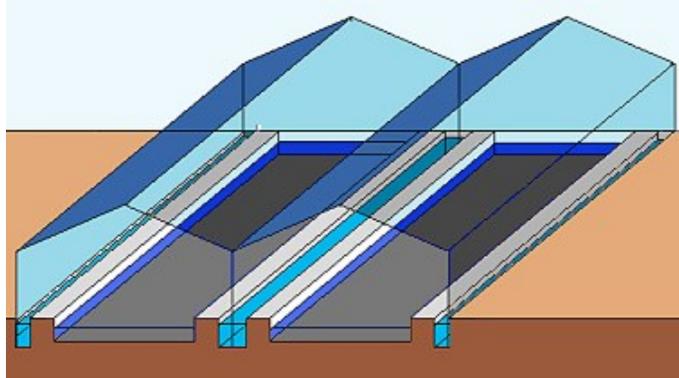
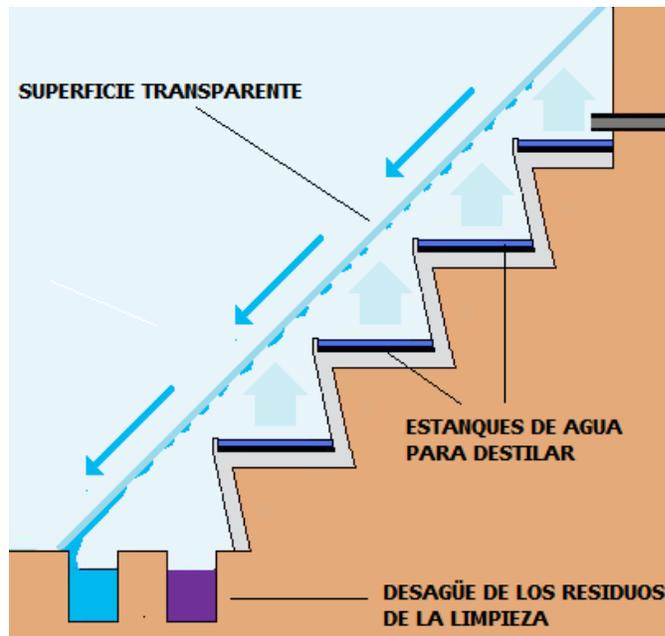


Figura 1-11 Destilador tipo invernadero. Fuente: Referencia ²⁷

Destilador solar de cascada. Modelo así denominado por sus escalones en descenso, en cada escalón en su forma horizontal se sitúan las bateas pintadas de color negro, el vidrio debe estar de forma inclinada y el agua destilada desciende hasta llegar al punto de la parte inferior, allí se encuentra el receptor de agua. En la base del destilador hay un desagüe para recoger residuos o salmuera por el efecto de la evaporación. Ver Figura 1-12.



²⁷ Michael Torbert de Semper.

Figura 1-12 Destilador tipo cascada. Fuente: Referencia ²⁸

Destilador solar esférico de barredera. La diferencia que se encuentra en este prototipo es su forma esférica, todas sus paredes o superficies son transparentes y no hay sombra que obstruya la radiación solar, por tanto, es uno de los prototipos más eficientes en producción de agua destilada. Adicionalmente cuenta con una barredera que limpia las paredes interiores del destilador, accionada por un pequeño motor y en una bandeja situada en la parte media del sólido esférico se coloca el agua a destilar.

Además, la forma esférica logra mantener una mayor inercia térmica facilitando un mayor aprovechamiento del calor producido por la energía solar. El sistema de barredera permite que el agua en estado gaseoso se condense más rápido y evita que las gotas reflejen la radiación solar. Es dependiente de energía eléctrica para poder mover el motor y así accionar la barredera. Ver Figura 1-13.

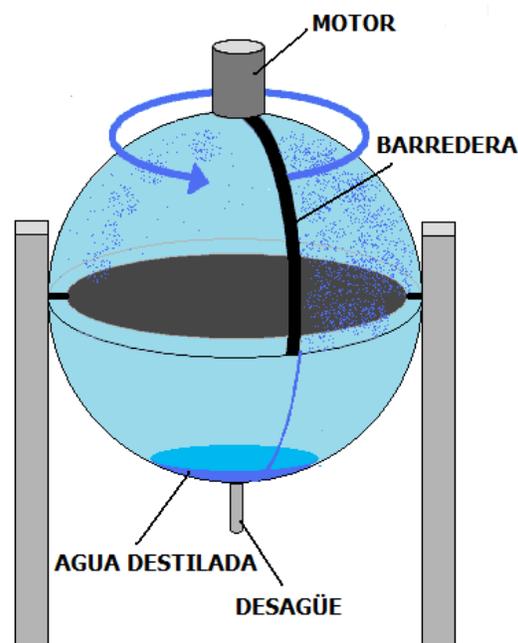


Figura 1-13 Destilador solar esférico de barredera. Fuente: Referencia ²⁹

²⁸ Michael Torbert de Semper.

²⁹ Michael Torbert de Semper.

Destilador solar multietapa. Modelo destilador más eficiente, pero a la vez más complicado. Utiliza sistemas de concentradores solares complejos (concentradores parabólicos, tubos de vacío, también sistemas de placa plana de alta eficiencia), con el fin de aumentar su eficiencia en evaporación. En la condensación se ayuda de un refrigerante para así obtener la precipitación del agua en estado líquido.

En el artículo “Sistema de tratamiento de agua de lluvia con energía solar” se realiza en ciudad de México en la zona donde se desarrolla este prototipo de destilador hay abundancia de lluvias y debido a la polución del aire las gotas de lluvia se vuelven ácidas y no es adecuada para el uso humano, sin su debido tratamiento. Un concentrador solar parabólico lo hace más eficiente para generar altas temperaturas con el fin de evaporar y condensar el agua y así eliminar contaminantes. Tiene una eficacia de producción de 50 a 60 litros de agua destilada diarios, el sistema de seguimiento solar determina la posición del sol a través de sensores fotoeléctricos para la captación solar de forma automática³⁰.

Este proyecto se desarrolla en la ciudad de Tacna, Perú se trata de un destilador solar tubular con capacidad de producir un volumen de agua destilada diaria: en días soleados el valor promedio es de 2950 ml/m²; en días semi-nublados 1600 ml/m²; en días nublados 200 ml/m², con eficiencias promedio de 62%, 47% y 18%, respectivamente. El rendimiento del DTS depende de la combinación de condiciones meteorológicas como irradiancia, temperatura y humedad³¹.

Desarrollo de proyecto de destilación de agua marina por el instituto de ingeniería de la UNAM para el abastecimiento de agua potable a pequeñas poblaciones de la región. Funciona con la energía proveniente del viento y del sol, donde el viento acciona una bomba que lleva agua a un tanque el cual tienen nivel de líquido con una válvula de paso de agua. La producción diaria destilada del modelo fue 265 L/m² que se divide entre 60 m² que corresponden al área del prototipo, lo cual resultaría en una eficiencia diaria de 4.42 L/m²³².

En esta tesis se desarrolló un proyecto implementado por un estudiante para el abastecimiento de laboratorios en CIVABI con el fin de implementar un nuevo

³⁰ Ismael Montiel Hernández, «México- Alumno del Instituto Politécnico Nacional crea sistema de tratamiento de agua de lluvia con energía solar».

³¹ Polo bravo carlos, «Polo bravo carlos diseño, construcción y caracterización de un destilador solar tubular».

³² Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Ciencias, «Destiladores Solares-revista de cultura científica».

proceso de agua destilada que utiliza el 50% de energía solar (SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES) con una eficiencia que produce 0.5 L de agua destilada en 4 horas y posee el mismo principio de evaporación y condensación del agua³³.

1.3.2 Concentradores solares

Las tecnologías actuales de aprovechamiento de la energía solar térmica se pueden clasificar en: sistemas de baja temperatura (< 90°C - 150°C), que consisten generalmente en colectores que se utilizan para calentar agua por debajo del punto de ebullición y sistemas de altas temperaturas (> 150 °C), llamadas tecnologías CSP (Concentrating Solar Power)

Tecnología de altas temperaturas (CSP)

Se han desarrollado tecnologías que permiten concentrar la energía solar con el objetivo de obtener calor a altas temperaturas, posteriormente obtener vapor y producir energía eléctrica.

Discos Solares Parabólicos Concentradores (PDSC), en cuyo receptor pueden instalarse termo generadores, motores Stirling o intercambiadores de calor para aprovechar la energía calórica. Estos dispositivos se caracterizan por su modularidad, ver Figura 1-14³⁴.

Canales Parabólicos Concentradores (PTC), en ellos los rayos solares se concentran en una línea focal, donde va colocado el receptor y por un conducto se hace circular un calo portador que llevará el calor hasta un intercambiador para obtener el vapor, o directamente se hará circular por el conducto el agua para obtener el vapor sobresaturado, ver Figura 1-15³⁵.

Torres receptoras (CR) donde los rayos solares son reflejados por helióstatos y concentrados en el receptor de la torre central, en el receptor de las torres se tiene algún calo portador como puede ser sodio líquido o sal fundida, ver Figura 1-16³⁶.

³³ Tabuada Miranda, Bayron Roberto, «Diseño y construcción de un destilador solar para agua de una capacidad de 200 ml/día».

³⁴ George M. Kaplan, «Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables».

³⁵ George M. Kaplan.

³⁶ George M. Kaplan.

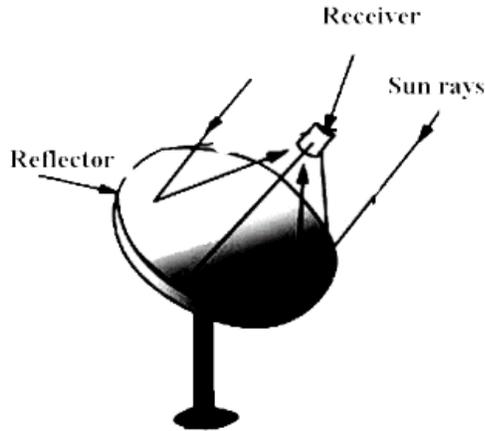


Figura 1-14 Disco Solar Parabólico Concentrador.

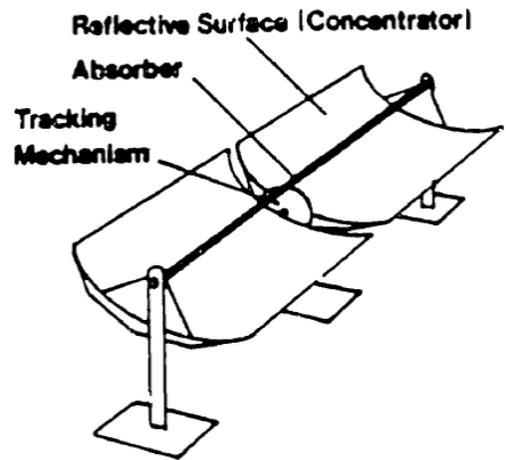


Figura 1-15 Canal Parabólico Concentrador.

Concentradores semiesféricos fijos (HBC) con receptores móviles, por los cuales circula un calo portador para llevar el calor obtenido hasta un intercambiador por donde circulará agua y se obtendrá el vapor, ver Figura 1-17³⁷.

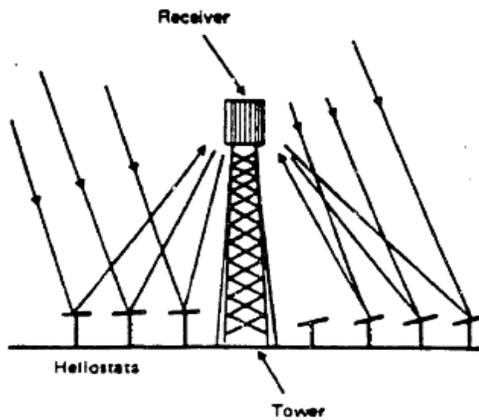


Figura 1-16 Torres receptoras.

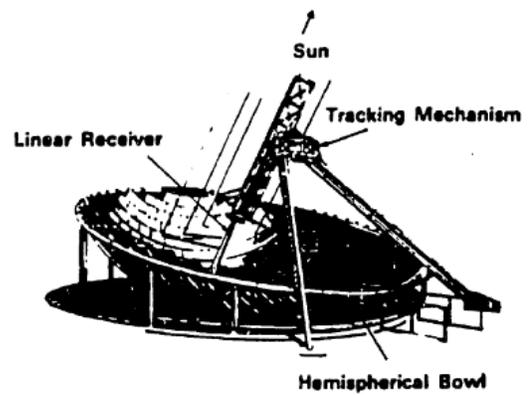


Figura 1-17 Concentradores fijos Semiesféricos.

Concentradores Lineales Fresnel (LFC) con dos variantes básicas: usar lentes del tipo Fresnel ya sean lineales (ver Figura 1-18 ³⁸) o circular (ver

³⁷ George M. Kaplan.

³⁸ George M. Kaplan.

Figura 1-19³⁹⁾, o colocar espejos que siguen la trayectoria de una lente Fresnel y son los que industrialmente han dado los mejores resultados.

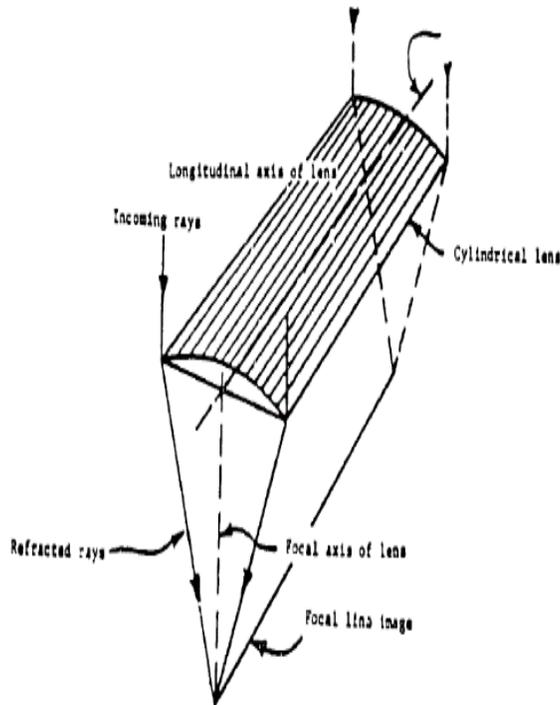


Figura 1-18 Concentrador Lineal Fresnel.

Figura 1-19 Concentrador Circular Fresnel.

En el trabajo de grado “Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel”, se menciona que los concentradores Fresnel son de los más utilizados para aprovechar la energía solar, aunque no tienen el mayor coeficiente de conversión, sus costos de inversión los hacen de interés. Se diseñó, construyó y se realizaron diferentes ensayos, siguiendo modelos industriales desarrollados anteriormente⁴⁰.

En el artículo “Design and Analysis of Rooftop Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator” se presenta el diseño de un reflector solar concentrador tipo

³⁹ I. Martínez, «Fresnel Lenses».

⁴⁰ C. Venegas Coll, «Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel».

Fresnel y su análisis térmico. Se concluye sobre la capacidad modular de dichos sistemas con bajos costos de producción⁴¹.

En el artículo: “Concrete thermal energy storage for linear Fresnel collectors: Exploiting the South Mediterranean’s solar potential for agri-food processes”, los autores estudian la posibilidad de generar el calor necesario de una planta industrial a partir del desarrollo de concentradores solares Fresnel junto con un acumulador de energía construido de hormigón. Todo el proyecto es simulado, alcanzándose las temperaturas necesarias de trabajo de las plantas industriales⁴².

En el artículo: “Innovative thermal storage strategies for Fresnel-based concentrating solar plants with East-West orientation” se plantea una propuesta consistente en dos estrategias de almacenamiento para el manejo de tres tanques de sales fundidas orientados de Este a Oeste en una planta solar Fresnel. Se concluye que la eficiencia de la planta en un año se incrementa en más de un 10%⁴³.

En el trabajo: “An optical performance comparison of three concentrating solar power collector designs in linear Fresnel, parabolic trough, and central receiver” se concluye que los canales parabólicos tienen los mejores resultados ópticos de los tres sistemas comparados. Las torres receptoras centrales son las que proveen una producción más consistente, aunque son las que más sufren por los errores ópticos del sistema de colectores y muestran la necesidad de reducir los costos para las tecnologías lineal Fresnel para ser competitivas en el futuro mercado de energía⁴⁴.

En el artículo: “Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium” aparece un estudio comparativo de diferentes materiales para ser utilizados en el receptor del reflector Fresnel, llegándose a la conclusión de que el sodio líquido es el

⁴¹ K. Gouthamraj, K. Jamuna Rani, and G. Satyanarayana., «Design and Analysis of Rooftop Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator».

⁴² A. Buscemi, D. Panno, G. Ciulla, M. Beccali, and V. Lo Brano, «Concrete Thermal Energy Storage for Linear Fresnel Collectors».

⁴³ A. Sebastián, R. Abbas, M. Valdés, and J. Casanova, «Innovative Thermal Storage Strategies for Fresnel-based Concentrating Solar Plants with East-West Orientation».

⁴⁴ N. Kincaid, G. Mungas, N. Kramer, M. Wagner, and G. Zhu, «An Optical Performance Comparison of Three Concentrating Solar Power Collector Designs in Linear Fresnel, Parabolic Trough, and Central Receiver».

mejor candidato, seguido de las sales fundidas y por último de aceite térmico⁴⁵.

El artículo “Experimental study of small-scale passive solar wall module with phase change material and Fresnel Lens” tuvo como objetivo evaluar la energía latente y sensible acumulada en un recubrimiento de construcción utilizando un material de cambio de fase (CPM), lentes Fresnel y PMMA, arribándose a la conclusión de que para similares CPM no existe una diferencia marcada con el uso de lentes Fresnel o vidrios de acrílicos tipo PMMA⁴⁶.

En el trabajo: “Diseño, construcción y utilización de un concentrador solar tipo Fresnel lineal para desalinización” se presentan cálculos teóricos para el diseño y construcción de un concentrador solar lineal tipo Fresnel orientado en la dirección Este-Oeste. En base a los cálculos se determinó que la eficiencia del equipo depende de la altura del recipiente absorbedor respecto al plano donde se encuentran los espejos⁴⁷.

El trabajo: “Sistema de concentración solar Fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria. Evaluación de prototipo”, en el cual se concluye que en el mes de agosto se alcanzaron temperaturas de 420°C y el mes de diciembre 690°C. El sistema fue montado sobre un seguidor solar con movimiento en dos planos⁴⁸.

⁴⁵ E. Bellos, C. Tzivanidis, and A. Papadopoulos, «Optical and Thermal Analysis of a Linear Fresnel Reflector Operating with Thermal Oil, Molten Salt and Liquid Sodium».

⁴⁶ T. Mols, K.P. Dzene, R. Vanaga, R. Freimanis, and A. Blumberga., «Experimental Study of Small-scale Passive Solar Wall Module with Phase Change Material and Fresnel Lens.»

⁴⁷ E. Saettone O, «Diseño, construcción y utilización de un concentrador solar tipo Fresnel lineal para desalinización».

⁴⁸ D. I. Friedman R., «Tesis en opción al título de Ingeniero Civil Eléctrico».

Capítulo 2

DISEÑO DE DESTILADOR SOLAR

Para el diseño del Destilador Solar se parte de la información existente del trabajo de grado denominado “Desarrollo de un Concentrador Solar tipo Parabólico Compuesto” de los estudiantes: GUSTAVO ALEXANDER ESTRADA CASTRILLON y JUAN SEBASTIAN FIGUEREDO MALPICA, el cual presenta la tabla 2-1 que resume los datos del concentrador solar

R	F	A	f/a	ϕ_r	r_r	D_r	r	C	θ_c
565,36	270,00	1130,72	0,24	92.62	516.92	9.32	30.06	353.76	3.05

Tabla 2-1. Parámetros del paraboloide diseñado y construido. Fuente: referencia⁴⁹

Donde:

ϕ_r - Ángulo de la apertura de la parábola, base utilizada,

r_r - Radio que corresponde al ángulo de apertura de la parábola,

D_r - Diámetro óptico del receptor,

r - Radio óptico del paraboloide construido,

θ_c - Ángulo de aceptación del paraboloide.

$R = 565.36$ mm, radio de la apertura del paraboloide.

⁴⁹ GUSTAVO ALEXANDER ESTRADA CASTRILLON y JUAN SEBASTIAN FIGUEREDO MALPICA, «Desarrollo de un Concentrador Solar tipo Parabólico Compuesto».

$a = 2R = 1130.72$ mm, diámetro de la apertura total del paraboloide.

$h = 1200$ mm, altura del paraboloide.

$f = 270$ mm, distancia focal de la parábola.

$\Delta = 25.4$ mm, desplazamiento del eje del paraboloide del punto focal.

$\alpha = 30^\circ$, ángulo de inclinación del eje de la parábola respecto al eje del paraboloide.

2.1 Diseño conceptual del Destilador Solar

El destilador solar (fig. 2-24) estará compuesto por los elementos siguientes:

1. Fuente de energía: Concentrador Solar Parabólico tipo Compuesto (fig. 2-20)

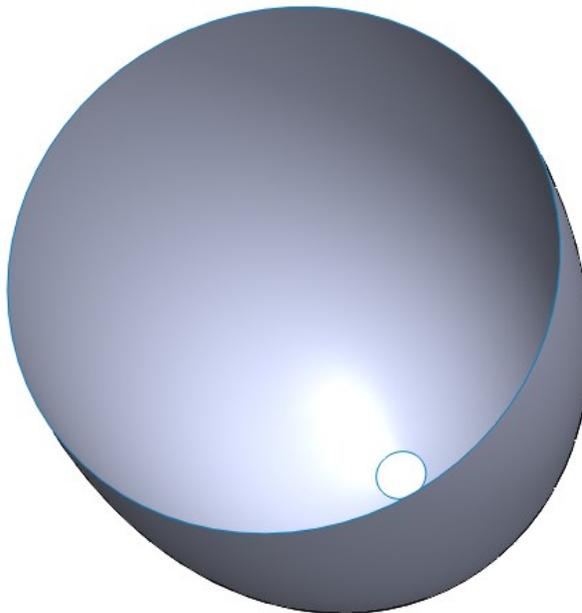


Figura 2-20. Concentrador Solar Parabólico tipo Compuesto (fuente: referencia⁵⁰)

2. Evaporador: Envase de vidrio resistente al calor, y en su interior un conducto de cobre en forma de espiral (Fig. 2-21) que tiene la entrada de agua por un

⁵⁰ SOLIDWORKS 2015 x64 Edition.

lateral y el vapor debe salir por la extensión de la espiral que sale por el centro hacia el condensador.

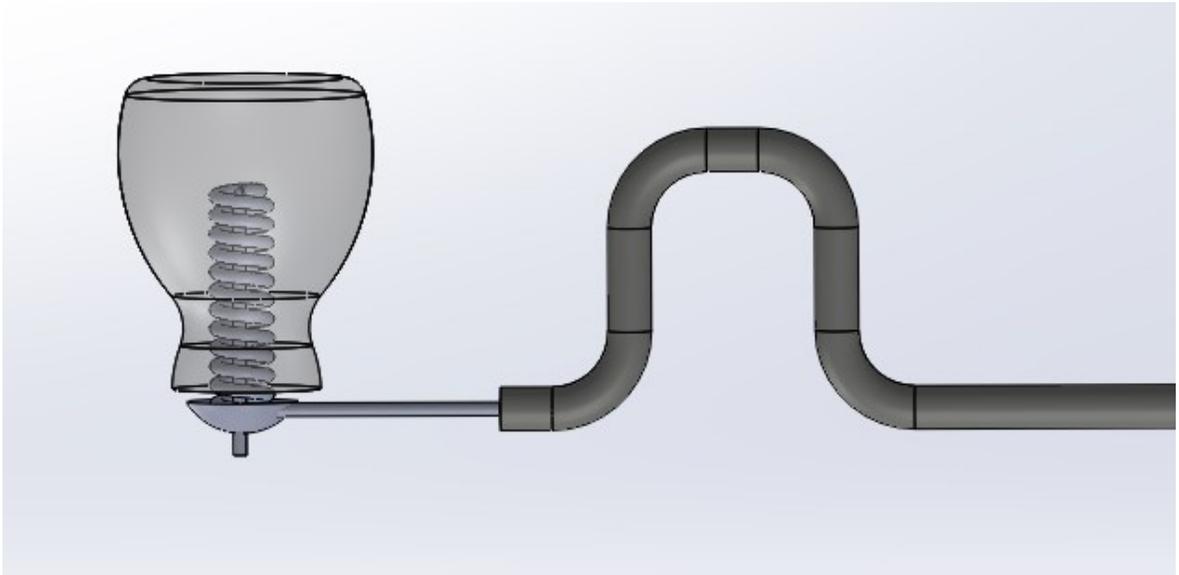
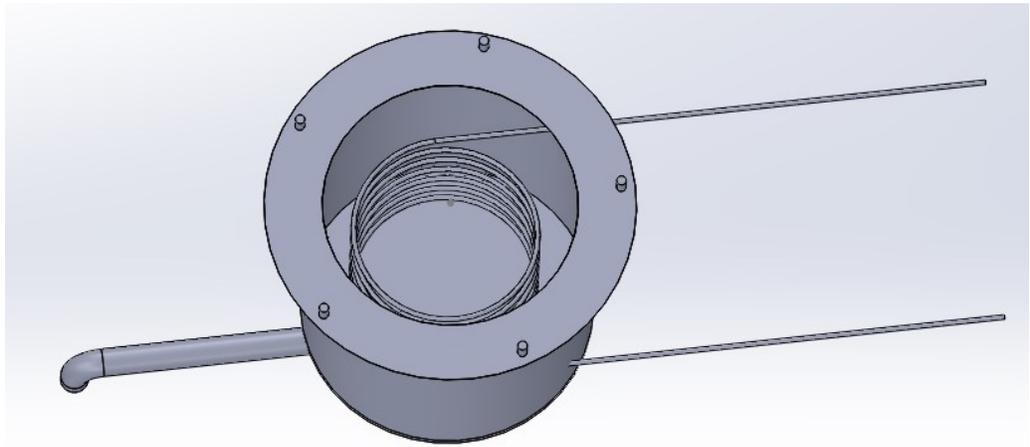


Figura 2-21. Evaporador (fuente: referencia⁵¹)

3. Condensador: Tanque de acero aislado térmicamente y en su interior un intercambiador de calor de cobre.



⁵¹ SOLIDWORKS 2015 x64 Edition.

Figura 2-22. Condensador (fuente: referencia⁵²)

4. Fluido a destilar: Agua con cloruro de sodio en Tanque 1. Figura 2-23
5. Fluido para extracción del calor: Agua del sistema de acueductos en tanque 2 figura 2-23

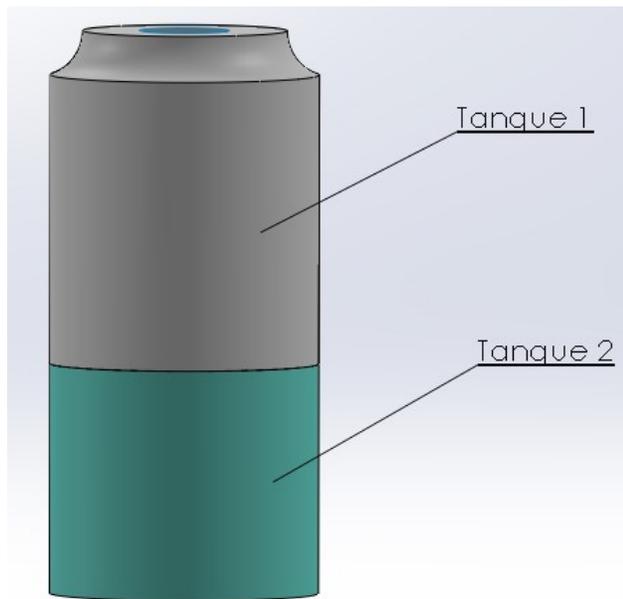


Figura 2-23. Tanque condensador (fuente: referencia⁵³)

⁵² *SOLIDWORKS 2015 x64 Edition.*

⁵³ *SOLIDWORKS 2015 x64 Edition.*

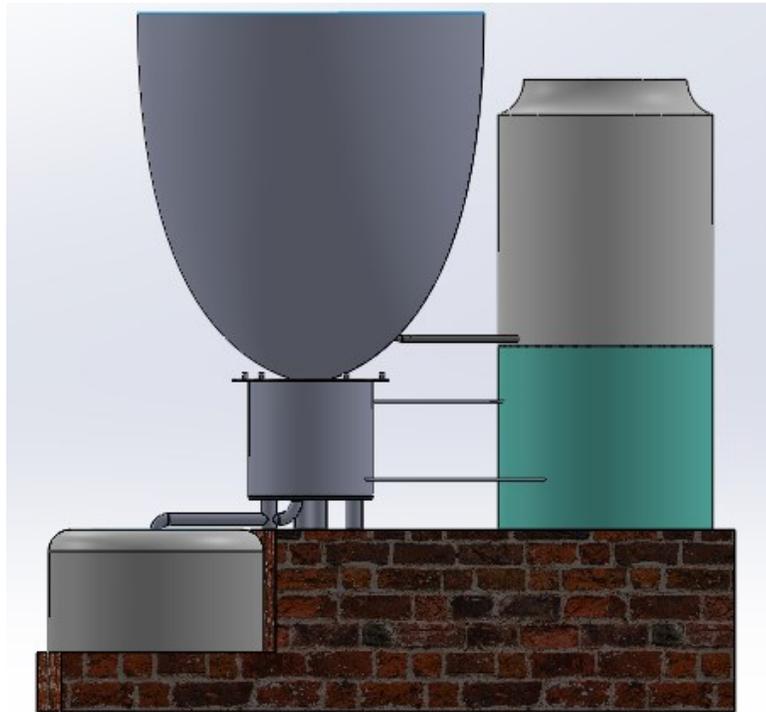


Figura 2-24. Destilador solar (fuente: referencia⁵⁴)

2.1.1 Breve descripción del proceso de destilación en una etapa.

El proceso de destilación a llevar a cabo en el prototipo diseñado consiste en los pasos siguientes:

- Suministro del agua a destilar en el tanque 1 el cual tendrá un sistema de filtros para evitar partículas sólidas que afecten el sistema
- Desde el tanque 1 el agua a destilar llegará por gravedad hasta el evaporador que se encontrará situado en la zona focal del Concentrador Parabólico tipo compuesto.
- Entre el evaporador y el tanque 1 existirán los conductos necesarios para mantener un sistema de vasos comunicantes a nivel de tal forma que al irse evaporando el agua gradualmente el tanque 1 con un

⁵⁴ SOLIDWORKS 2015 x64 Edition.

sistema de válvula mantendrá los niveles para evitar que el agua pase a través del evaporador sin evaporarse.

- El evaporador recibirá el calor del punto focal de concentrador solar y el agua que estará en la espiral se calentará pasando de la fase líquido a gaseoso, ocurriendo así el efecto de evaporación, en este proceso el cloruro de sodio contenido en el agua se depositará en la parte inferior del evaporador y el vapor ascenderá por la espiral hasta su punto superior, desde el cual descenderá por gravedad hacia el condensador al existir temperaturas inferiores en la salida del evaporador
- El vapor descenderá desde el evaporador hacia el condensador que se encontrará ubicado en la parte inferior del evaporador y por consiguiente debajo del Concentrador solar
- Al entrar el vapor en el tanque de condensación chocará con un intercambiador de calor agua-vapor, por dentro de un conducto de cobre circulará el agua de enfriamiento que se encontrará a temperatura ambiente procedente del tanque 2, al chocar el vapor con los conductos de agua a temperatura ambiente descenderá rápidamente la temperatura del vapor saturado pasado de la fase gaseoso al líquido
- El agua en estado líquido después del proceso de condensación se recogerá en un recipiente 3, para su análisis química y poder determinar el porcentaje de pérdidas de sales.

2.1.2. Cálculos preliminares del evaporador

Como se ha comentado al inicio de este trabajo, los cálculos de la fuente de calor se realizaron con anterioridad por lo cual todo el sistema a diseñar parte de los datos obtenidos en el trabajo de grado anteriormente mencionado y referenciados en este trabajo.

En los ensayos realizados al concentrador solar se pudo comprobar que en horarios entre las 11 de la mañana y hasta las 2 de la tarde se logran temperaturas superiores a los 100 e inferior a los 150 grados Celsius respecto a los sensores, por lo cual se toma como valores de cálculo entre 96°C y 140°C para el proceso de evaporación en la temperatura superficial (T_s) que son los valores que se aplican

para una temperatura de saturación del agua de 100 grados centígrados a una atmósfera de presión.⁵⁵

Para el cálculo de evaporación se utilizaron un grupo de ecuaciones conocidas de la bibliografía técnica.

El flujo de calor de una superficie se calcula por la expresión

$$q''_s = h\Delta T_e \quad (1)$$

Donde:

q''_s -Flujo de calor superficial

h - Coeficiente de convección local, que depende de un grupo de factores como: la diferencia de temperatura y la temperatura de saturación, la diferencia de densidad entre el líquido saturado y del vapor, el calor latente, la tensión superficial, la longitud y las propiedades termo-físicas del líquido.

ΔT_e - Exceso de temperatura y se calcula por la expresión 2

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat} \quad (2)$$

T_s - Temperatura de la superficie

T_{sat} -Temperatura de saturación del fluido

Definitivamente para calcular el flujo de calor superficial se utilizará la ecuación

$$q''_s = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 \quad (3)$$

Donde:

μ_l - Viscosidad del líquido

h_{fg} - Entalpia de vaporización

σ - Tensión superficial

⁵⁵ Samoa, «Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel».

ρ_l -Densidad del líquido

ρ_v -Densidad del vapor

$C_{p,l}$ -Calor específico del líquido

Pr_l - Número de Prandtl para el líquido

$C_{s,l}$ combinación superficie, líquido

n - coeficiente exponencial

c - constante de Berensen

Para el cálculo del flujo de calor superficial se asume que:

- Variante con respecto a las temperaturas dadas.
- El agua está bajo presión atmosférica estándar (1.01 bar)
- Temperatura uniforme de saturación del agua de 92 °C
- La superficie del evaporador es de cobre pulido
- No se tienen en cuenta las pérdidas que ocurren por el calentamiento de los alrededores.

De la tabla A.6 (propiedades termodinámicas de agua saturada) se tomaron los siguientes datos: ver referencia⁵⁶

$\rho_l=963.4 \text{ kg/m}^3$; $C_{p,l}=4.209 \text{ kJ/kg}$; $\sigma = 60.5 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$; $\mu_l = 306 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$; $Pr_l= 1.91$;

$h_{fg} = 2278 \text{ kJ/kg}$; $\rho_v= 0.452 \text{ kg/m}^3$; $C=0.09$

⁵⁶ Frank P. Incropera, Adrienne S. Lavine, David P. DeWitt, *introduction to heat transfer*.

Se calcula

- a) Exceso para diferentes temperaturas obtenidas (ver tabla 2-2), que varían desde 96 a 140 grados Celsius

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat}$$

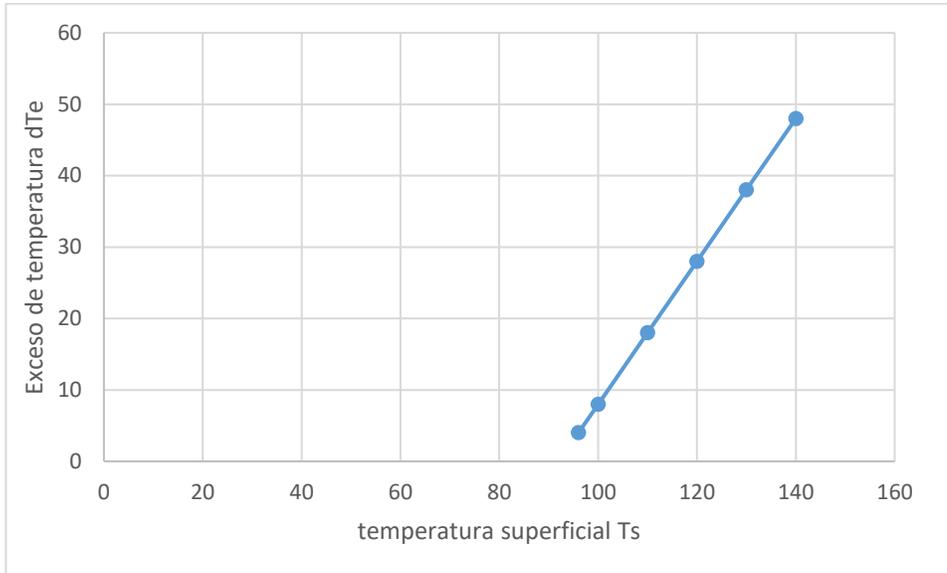
Para el cálculo de exceso de temperatura se tomaran valores de T_s en un rango de 96 a 140 grados Celsius de acuerdo al comportamiento del concentrador parabólico compuesto (tesis).⁵⁷

Tabla 2-2: exceso de temperatura para diferentes T_s

Temperatura superficial T_s	Temperatura de ebullición	Exceso de temperatura en °C
96	92	4
100		8
110		18
120		28
130		38
140		48

⁵⁷ GUSTAVO ALEXANDER ESTRADA CASTRILLON y JUAN SEBASTIAN FIGUEREDO MALPICA, «Desarrollo de un Concentrador Solar tipo Parabólico Compuesto».

Figura 2-25: diagrama T_s vs dT_e



b) Flujo de calor superficial

$$q''_s = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3$$

$$q''_s = 306 \times 10^{-6} (2278 \times 10^3) \left[\frac{9.81(963.4 - 0.452)}{60.5 \times 10^{-3}} \right]^{1/2} \left(\frac{4.209 \times 10^3 (\Delta T_e)}{0.0130 (2278 \times 10^3) 1.91^{(1)}} \right)^3$$

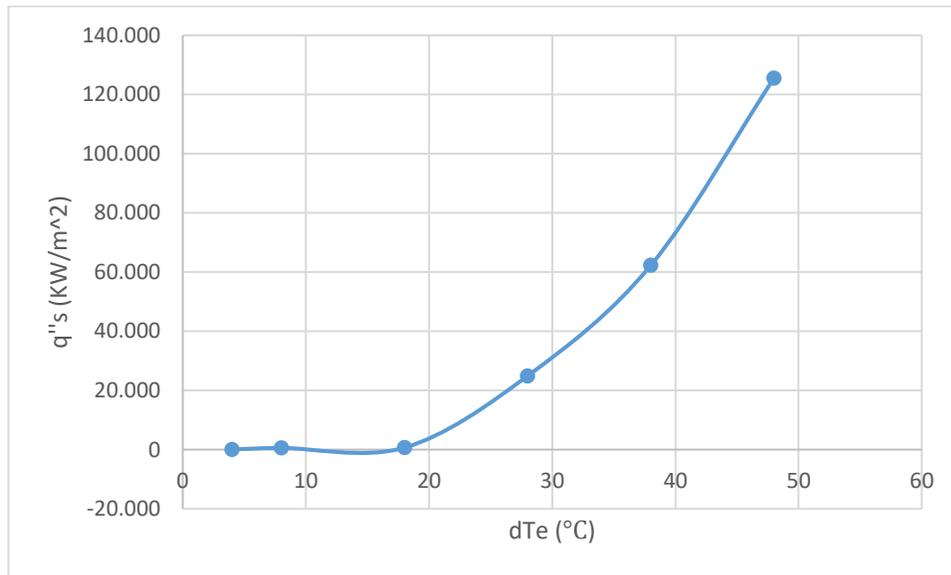
En esta ecuación varía el exceso de temperatura, consecuentemente hay una variación en el flujo superficial y se obtiene en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: flujo de calor superficial a diferentes dT_e

dT_e	q''_s Kw/m ²
4	72,637
8	581,1

18	661,9
28	24914
38	62277
48	125517

Figura 2-26: diagrama dT_e vs q''_s



c) Flujo de calor superficial mínimo para logra el proceso de evaporación

$$q''_{min} = C\rho_v h_{fg} \left[\frac{g\sigma(\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4}$$

$$q''_{min} = 0.09(0.452)(2278 * 10^3) \left[\frac{9.81(60.5 * 10^{-3})(963.4 - 0.452)}{(963.4 + 0.452)^2} \right]^{1/4}$$

$$q''_{min} = 14.59 \text{ kW/m}^2$$

d) Cantidad de calor superficial por unidad de tiempo (Potencia)

$$q_s = q''_s * A$$

Donde:

- Superficie de la espiral del evaporador

Para el diseño conceptual mostrado en la figura 2-21 se muestra una espiral de diámetro $D = 25.4$ mm y 11.5 vueltas, con conductos de cobre $d = 6.35$ mm de diámetro, el cálculo de la longitud se realiza por la siguiente expresión

$$L = \pi DN = 3.1416 * 25.4 * 11.5 = 0.9176 \text{ m}$$

$$A_s = \pi dL = 3.1416 * 0.00635 * 0.9176 = 0.01833 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el flujo de calor por unidad de tiempo (Potencia) necesaria se calcula como:

$$q_s = q''_s * A_s$$

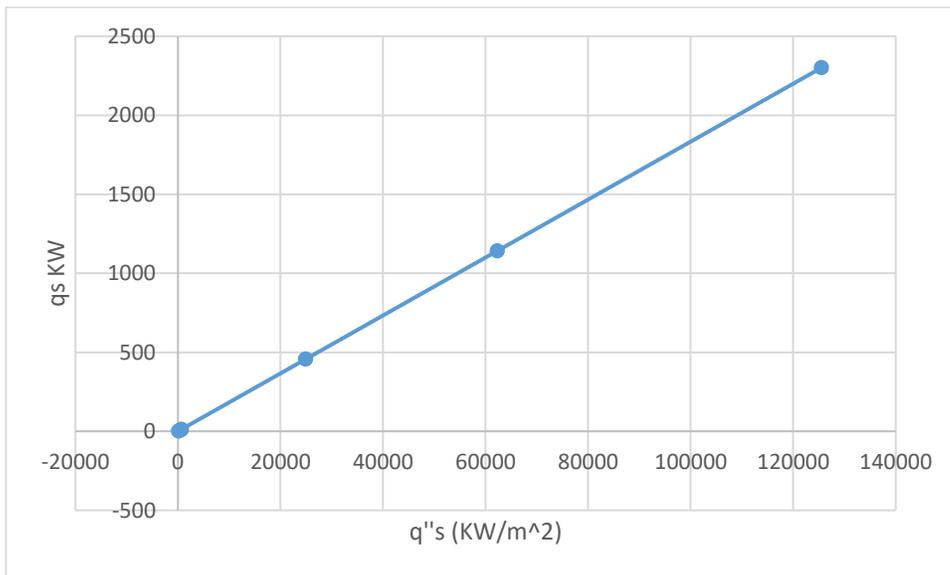
Debido a que el flujo de calor superficial no es constante se tabula los resultados obtenidos para cada valor de q''_s , se tiene en cuenta que el área superficial A_s es constante para todos los casos.

Tabla 2-4: flujo de calor q_s en función del tiempo para su respectivo flujo de calor superficial q''_s

$q''_s \text{ Kw/m}^2$	$A_s \text{ m}^2$	$q_s \text{ Kw}$
72,637	0,01833	1,33
581,1		10,65

661,9		12,13
24914		456,67
62277		1141,53
125517		2300,72

Figura 2-27: diagrama q''_s vs q_s



Y la razón de evaporación sería

$$\dot{m} = \frac{q_s}{h_{fg}}$$

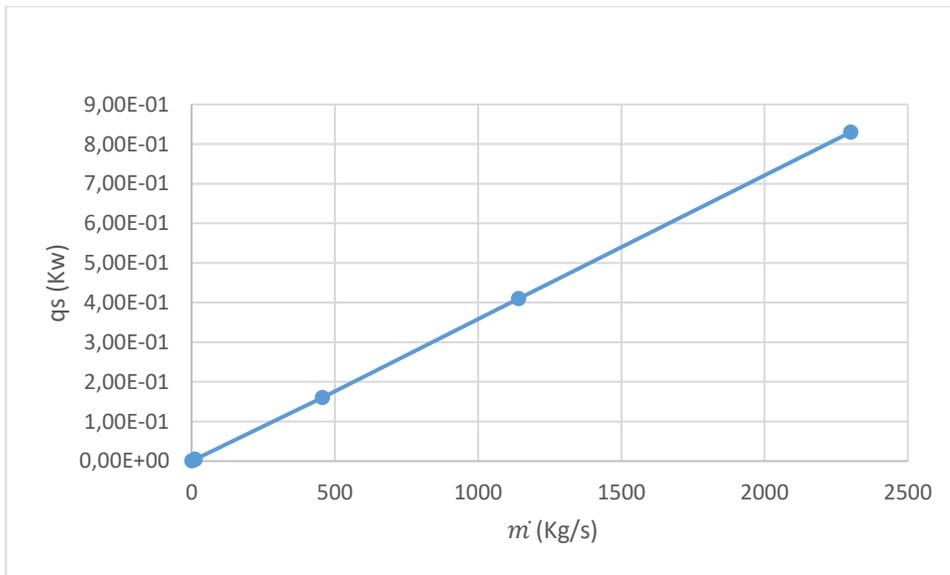
Debido a que el flujo de calor q_s es variable, se tabula la razón de evaporación así

Tabla 2-5: razón de evaporación \dot{m} , respecto al flujo de calor q_s

q_s Kw	\dot{m} Kg/s
1,33	4,68E-4

10,65	3,83E-3
12,13	4,36E-3
456,67	0,16
1141,53	0,41
2300,72	0,83

Figura 2-28: diagrama q_s vs \dot{m}



Para valores reales obtenidos en la tesis concentrador solar parabólico.⁵⁸

La potencia mínima necesaria para el inicio del proceso de evaporación sería

$$q_{min} = q''_{min} * A_s$$

$$q_{min} = 14.59 * 0.01833$$

$$q_{min} = 0.267 \text{ kW}$$

⁵⁸ GUSTAVO ALEXANDER ESTRADA CASTRILLON y JUAN SEBASTIAN FIGUEREDO MALPICA.

La potencia disponible reflectada por el concentrador para alcanzar temperaturas promedio de 110°C fue de 2065.59 W

Por lo cual para poder evaporar el agua el área de la espiral debe ser de:

$$A = \frac{q_s}{q''_s} = \frac{2.0656}{661.9} = 0.00312m^2$$

En el prototipo se utiliza conductos de cobre de ¼ pulgadas de diámetro que equivale a 6.35 mm de diámetro

Para calcular la longitud de la espiral se plantea

$$A_s = \pi D_s L$$

Donde:

A_s - área de la espiral

D_s - Diámetro de la espiral (mm)

L – Longitud de la espiral

Se iguala el área de calentamiento necesaria con el área de la espiral y se calcula la longitud de la espiral

$$L = \frac{A}{\pi D_s} = \frac{0.00312}{3.1416 (0.00635)} = 0.1564 m$$

Se calcula la razón de evaporación sería

$$\dot{m} = \frac{q_s}{h_{fg}} = \frac{2065.6}{2278 * 10^3}$$

$$\dot{m} = 0.00091Kg/h$$

$$\dot{m} = 0.9g/h$$

Con los cálculos realizados se puede concluir

- Para lograr el proceso de evaporación del agua en el prototipo de evaporador propuesto en el diseño conceptual (fig. 2.21) se necesita una diferencia de potencia del concentrador solar de desde 1,33 kW y 230,72 Kw con respecto a las temperatura superficial; como la T_s varia con el pasar del tiempo entonces el evaporador será eficiente solo en un par de horas del día que haya temperatura incidente en punto focal.
- Si se dispusiera esa potencia la cantidad de agua evaporada por hora varía desde de 28.08 g/h hasta 49,8 kg/h que sería en promedio ml/h
- Si se toma la potencia disponible del concentrador solar utilizado para el prototipo que es solamente de 2.0656 kW, y se calcula cual debe ser la superficie de evaporación se comprueba que la longitud del conducto debe ser sólo de 156.4 mm, por lo cual el número de vueltas de la espiral se puede calcular por la expresión

$$N = \frac{L}{\pi D} = \frac{156.4}{3.1416(25.4)} = 1.96 \text{ Vueltas}$$

- Para estas dimensiones de espiral y con la potencia disponible en el concentrador solamente se conseguiría evaporar en una hora 0.9 g. lo que significa que realmente no funcionaría el evaporador.

2.1.3. Cálculos preliminares del condensador

Para los cálculos del condensador se asume que el proceso de condensación será de una fina capa laminar en un plato vertical que es el caso más cercano a la propuesta de prototipo de condensador. Para encontrar la superficie necesaria para el proceso de condensación se utilizará la conocida ecuación (Referencia⁵⁹) del calor de transferencia por unidad de tiempo

$$q = \bar{h}_L A(T_{sat} - T_S)$$

⁵⁹ Frank P. Incropera, Adrienne S. Lavine, David P. DeWitt, *introduction to heat transfer*.

Donde:

h_L -coeficiente medio de convención y se calcula por la expresión

$$\bar{h}_L = 0.933 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l(T_{sat} - T_s)L} \right]^{1/4}$$

k_l -Coeficiente de conductividad térmica

h'_{fg} -Calor latente modificado se calcula por la expresión

$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0.68J_a)$$

J_a -Número Jakob se calcula por la expresión

$$J_a = \frac{C_p(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}}$$

De la tabla A.6 (propiedades termodinámicas de agua saturada) se tomaron los siguientes datos para la realización de los cálculos: ver referencia⁶⁰

$\rho_l=963.4 \text{ kg/m}^3$; $C_{p,l}=4.209 \text{ kJ/kg}$; $\sigma = 60.5 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$; $\mu_l = 306 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$; $Pr_l = 1.91$;

$h_{fg} = 2278 \text{ kJ/kg}$; $\rho_v = 0.452 \text{ kg/m}^3$; $k_l = 677 \cdot 10^3 \text{ W/m-k}$;

$$J_a = \frac{C_p(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}}$$
$$J_a = \frac{4.209 \cdot 10^3 (92 - T_s)}{2278 \cdot 10^3}$$

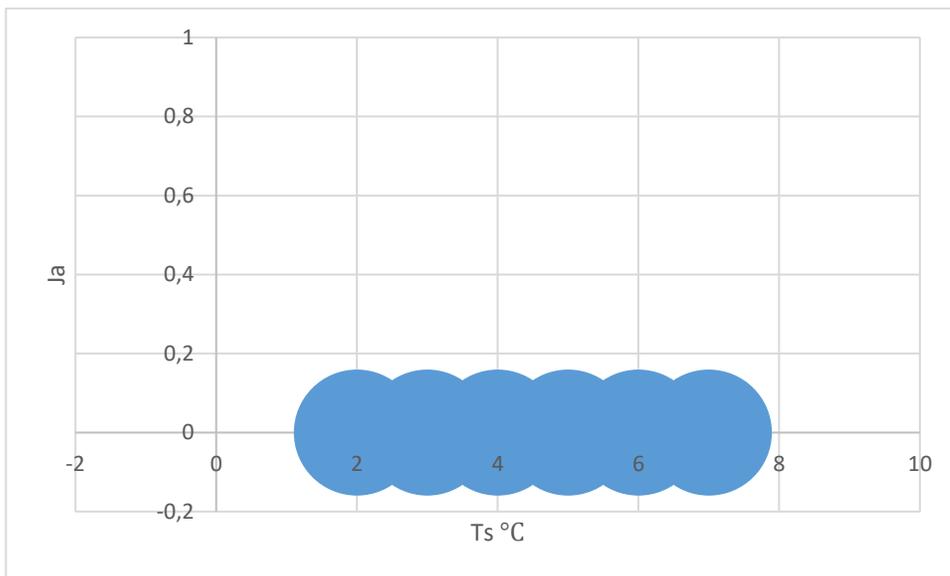
⁶⁰ Frank P. Incropera, Adrienne S. Lavine, David P. DeWitt.

En condiciones la temperatura superficial (T_s) varía y se tabula el número de Jakob (J_a)

Tabla 2-6: temperatura superficial y número de Jakob

Temperatura superficial T_s °C	Numero de Jakob J_a
4	0,162
8	0,155
18	0,136
28	0,118
38	0,099
48	0,081

Figura 2-29 diagrama J_a vs T_s



Calor latente modificado se expresa de la siguiente manera:

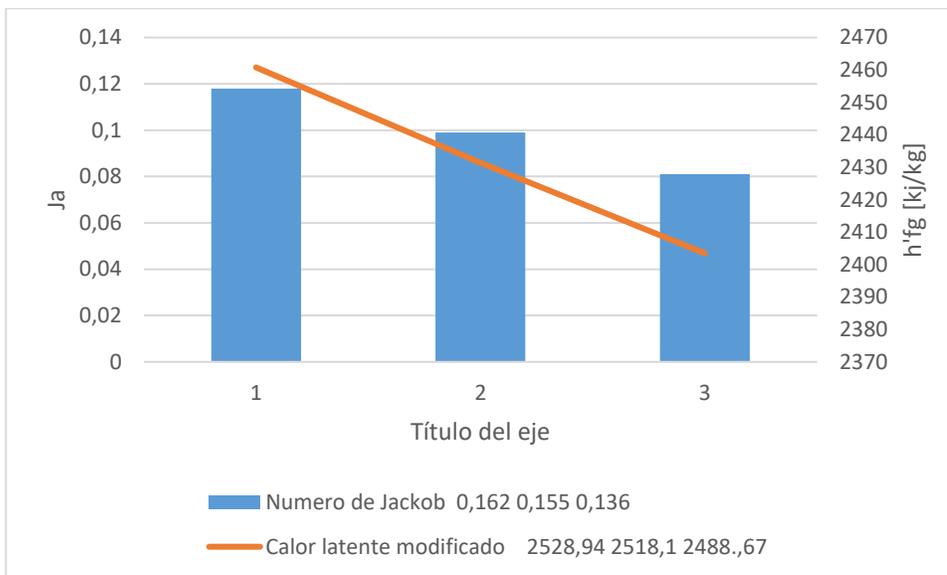
$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0.68J_a)$$

$$h'_{fg} = 2278 * 10^3 (1 + 0.68 * J_a)$$

Tabla 2-7: número de Jakob y calor latente modificado.

Numero de Jakob J_a	Calor latente modificado h'_{fg} [Kj/K g]
0,162	2528,94
0,155	2518,1
0,136	2488,67
0,118	2460,78
0,099	2431,35
0,081	2403,47

Figura 2-30: diagrama J_a vs h'_{fg}



Coeficiente medio de convección, se calcula

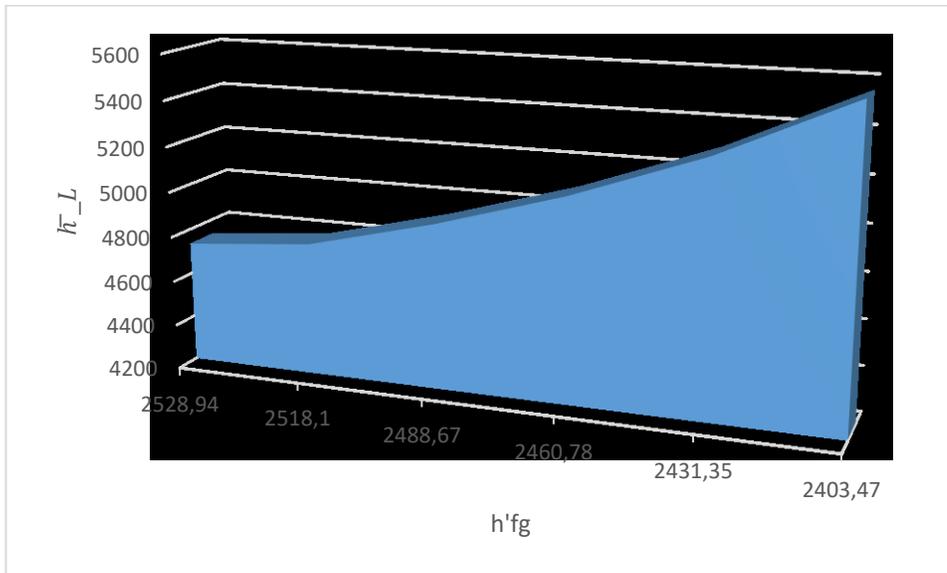
$$\bar{h}_L = 0.933 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l(T_{sat} - T_s)L} \right]^{1/4}$$

$$= 0.933 \left[\frac{9.81(963.4)(963.4 - 0.452)677 * 10^{-3^3} (h'_{fg})}{306 * 10^{-6}(92 - T_s)0.4} \right]^{1/4}$$

Tabla 2-8 coeficiente de convección

T_s	h'_{fg}	Coeficiente de convección \bar{h}_L w/m - k
4	2528,94	4734,36
8	2518,1	4784,6
18	2488,67	4924,2
28	2460,78	5091,8
38	2431,35	5296,8
48	2403,47	5558,96

Figura 2-31: diagrama \bar{h}_L vs h'_{fg}



Calor de transferencia por unidad de tiempo, se calcula

$$q = \bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)$$

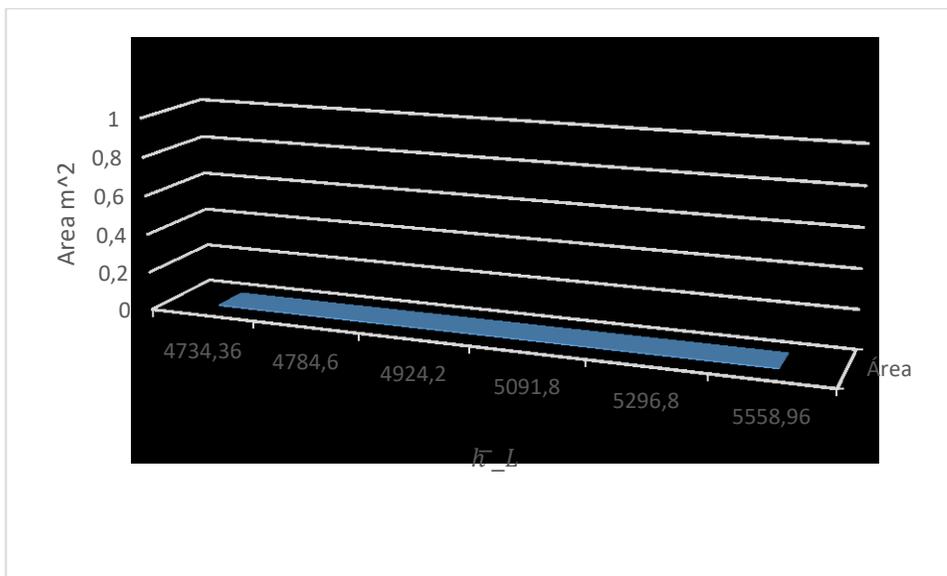
$$A = \frac{q}{\bar{h}_L (T_{sat} - T_s)}$$

$$A = \frac{2065.6}{\bar{h}_L (92 - T_s)}$$

Tabla 2-9 área necesaria para la condensación del vapor de agua

T_s	\bar{h}_L	Área
4	4734,36	0.005
8	4784,6	0.0051
18	4924,2	0.0057
28	5091,8	0.0063
38	5296,8	0.0072
48	5558,96	0.0084

Figura 2-32 diagrama del área determinada respecto al coeficiente de convección



Ahora ya se saben las áreas respectivas y con esto se puede determinar el diámetro donde debe circular el agua a temperatura ambiente

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\rightarrow D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4(A)}{3.14}}$$

Tabla 2-10 Para diferentes áreas existen distintos diámetros

Área m^2	Diámetro m
0.005	0.079
0.0051	0.080
0.0057	0.085
0.0063	0.089
0.0072	0.095
0.0084	0.103

Con los cálculos realizados del condensador se puede concluir:

- Se hizo el modelamiento de cómo se comporta el destilador con respecto a las temperaturas del concentrador solar y para la potencia disponible del Concentrador solar para lograr la condensación del vapor se necesita una varilla vertical de 400 mm de altura y un diámetro de 85 mm por donde debe circular agua a la temperatura ambiente es decir, 18 °C valores válidos para la ciudad de Tunja.

2.1.4. Dimensionamiento del prototipo de Destilador Solar

Las dimensiones fundamentales del Concentrador solar Parabólico Compuesto se muestran en la figura 2-33

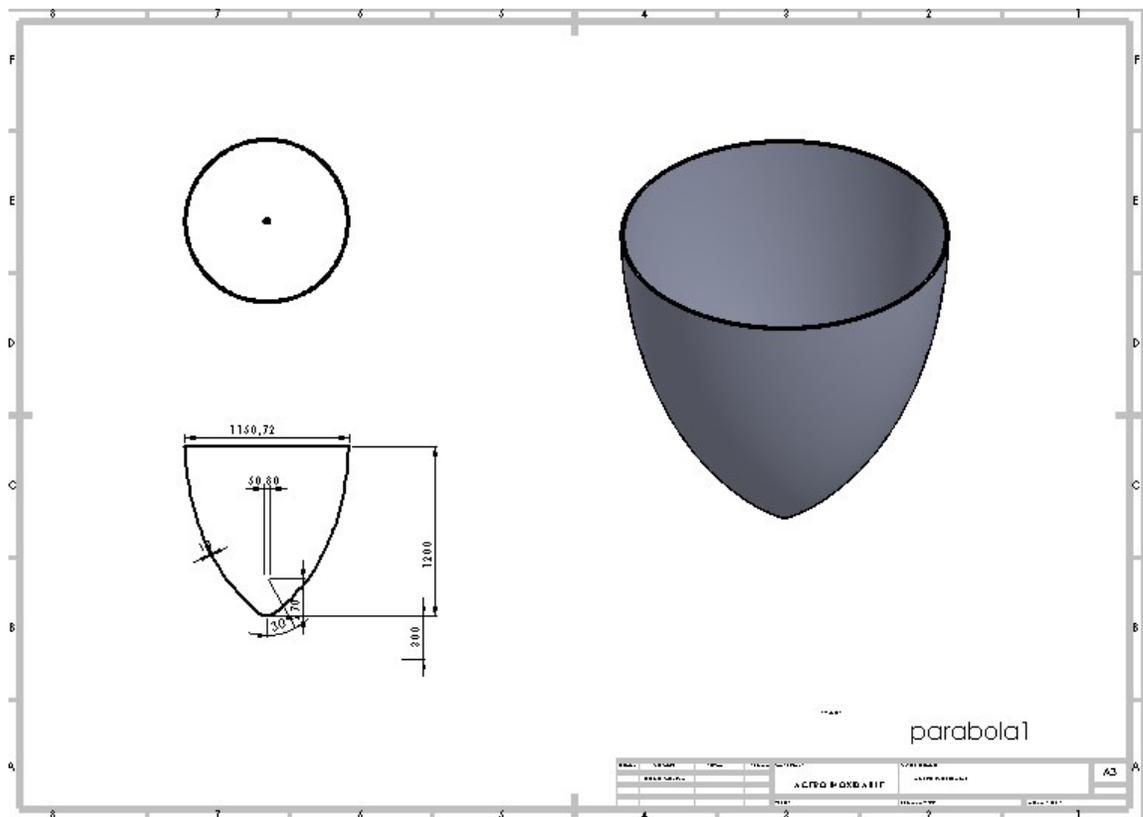
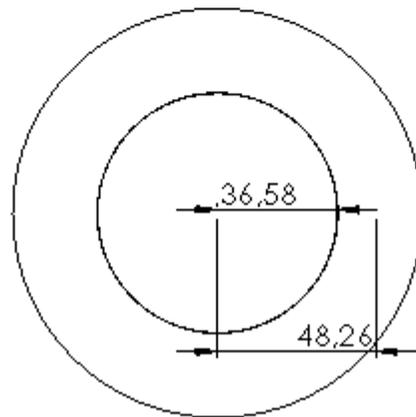
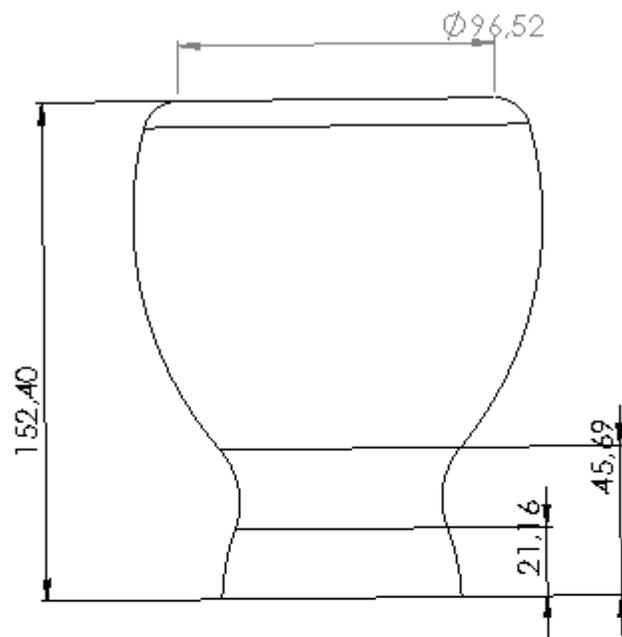


Figura 2-33. Dimensiones del concentrador parabólico Compuesto



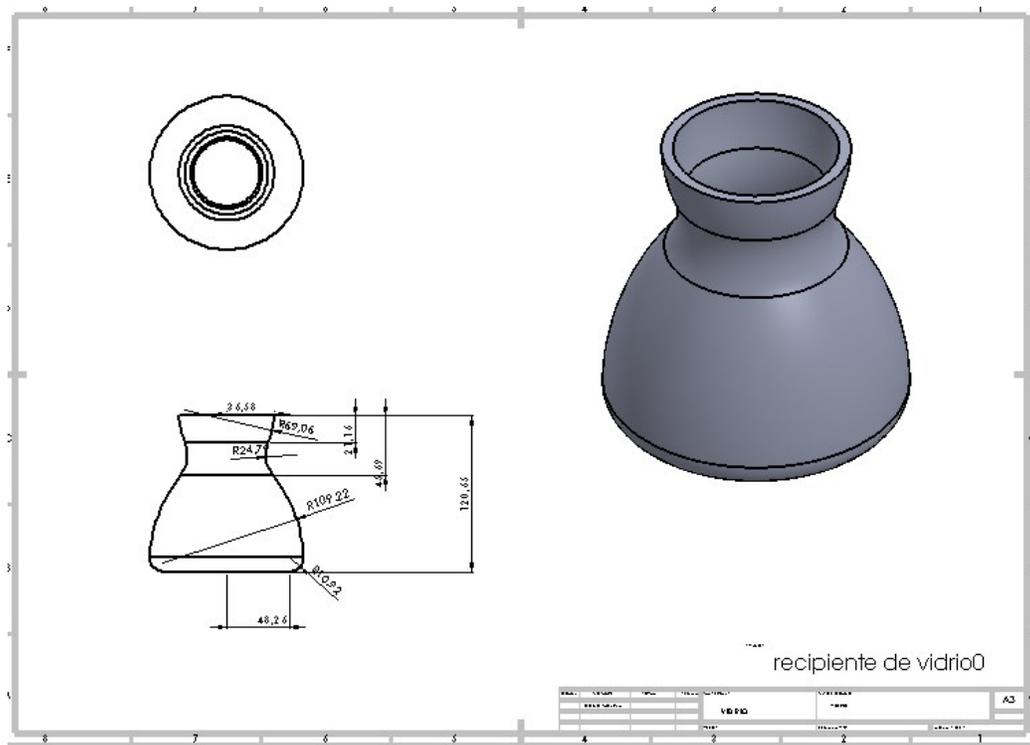
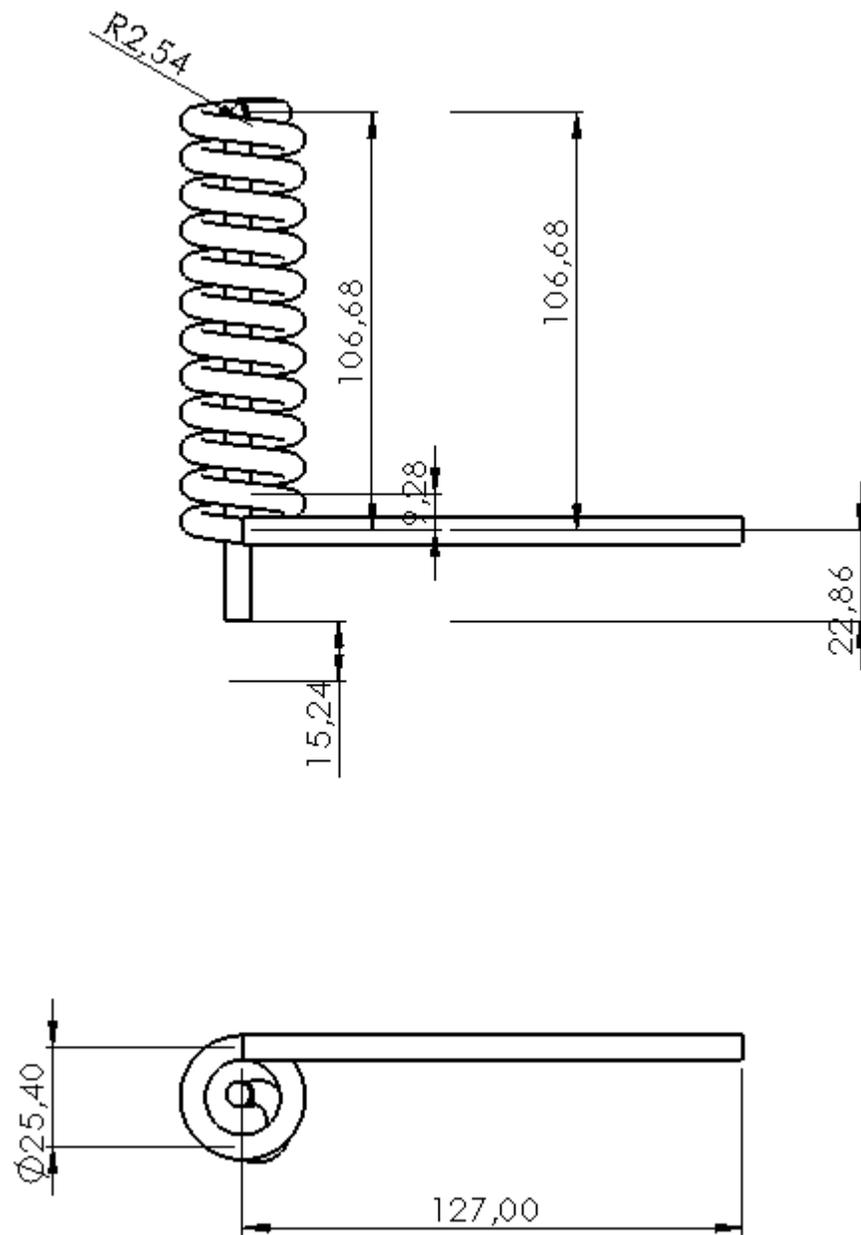


Figura 2-34. Dimensiones del recipiente de vidrio del evaporador



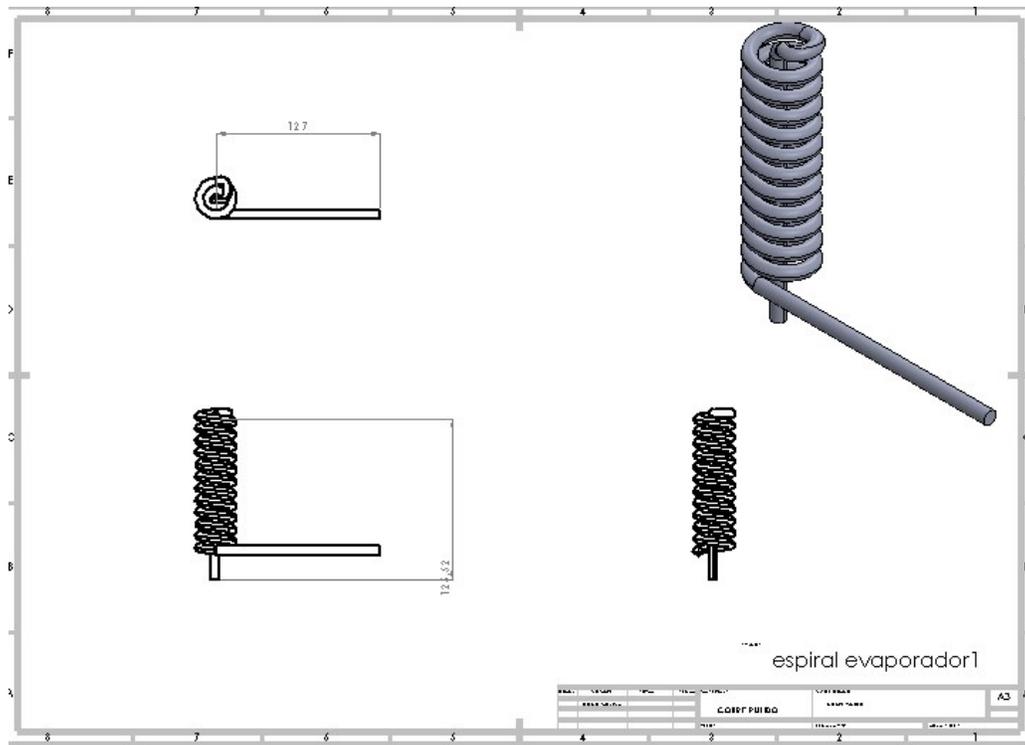
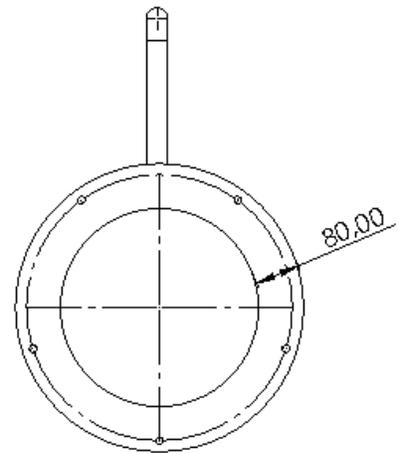
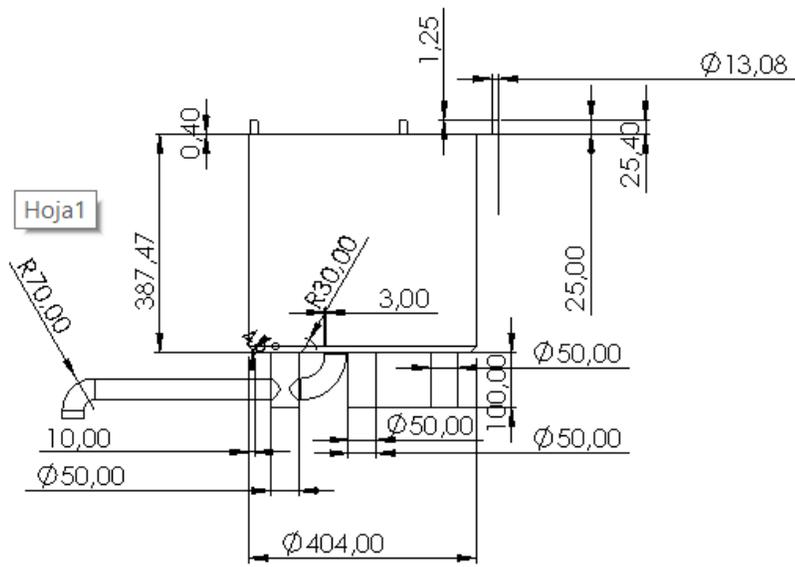


Figura 2-35. Dimensiones de la espiral del evaporador



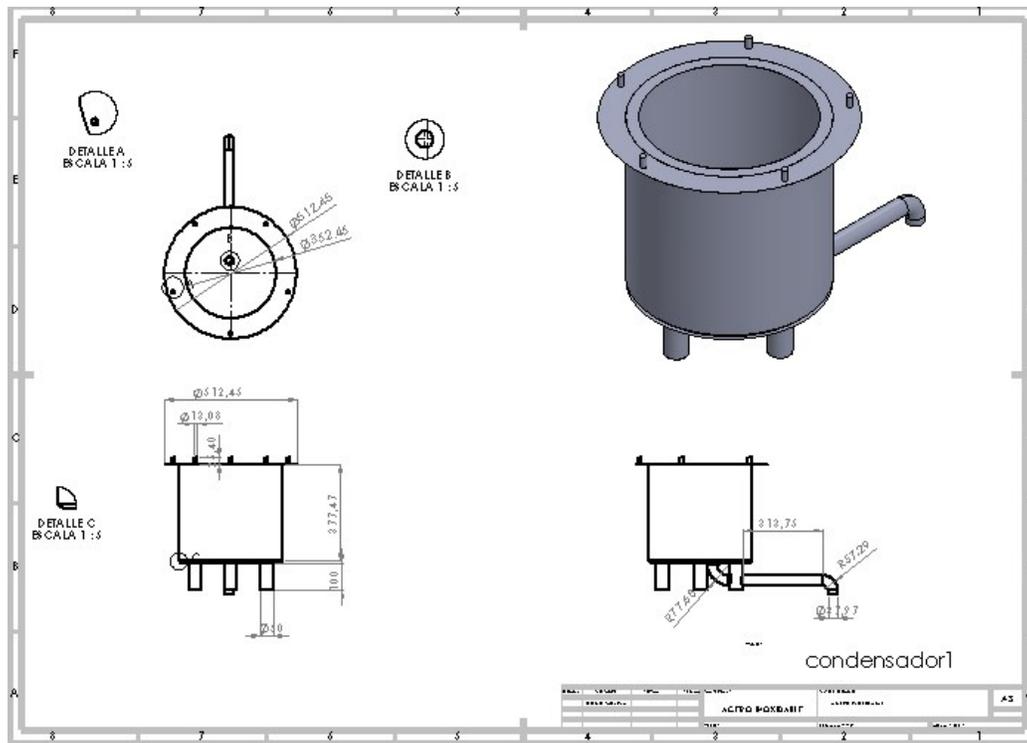
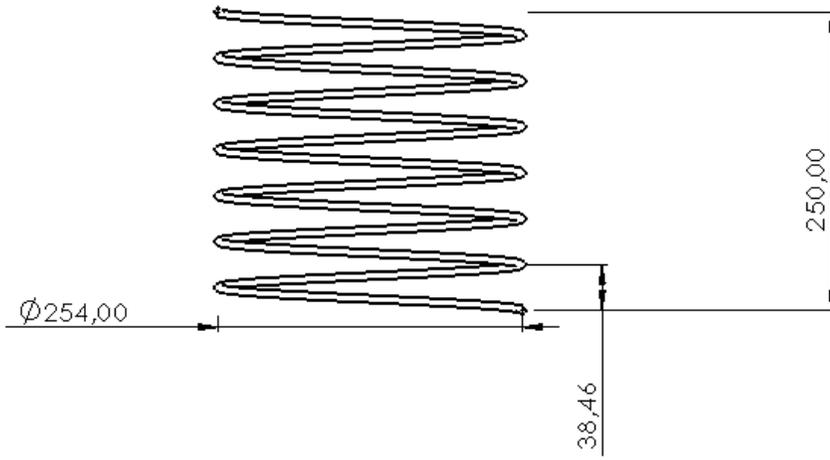


Figura 2-36. Dimensiones del depósito del condensador



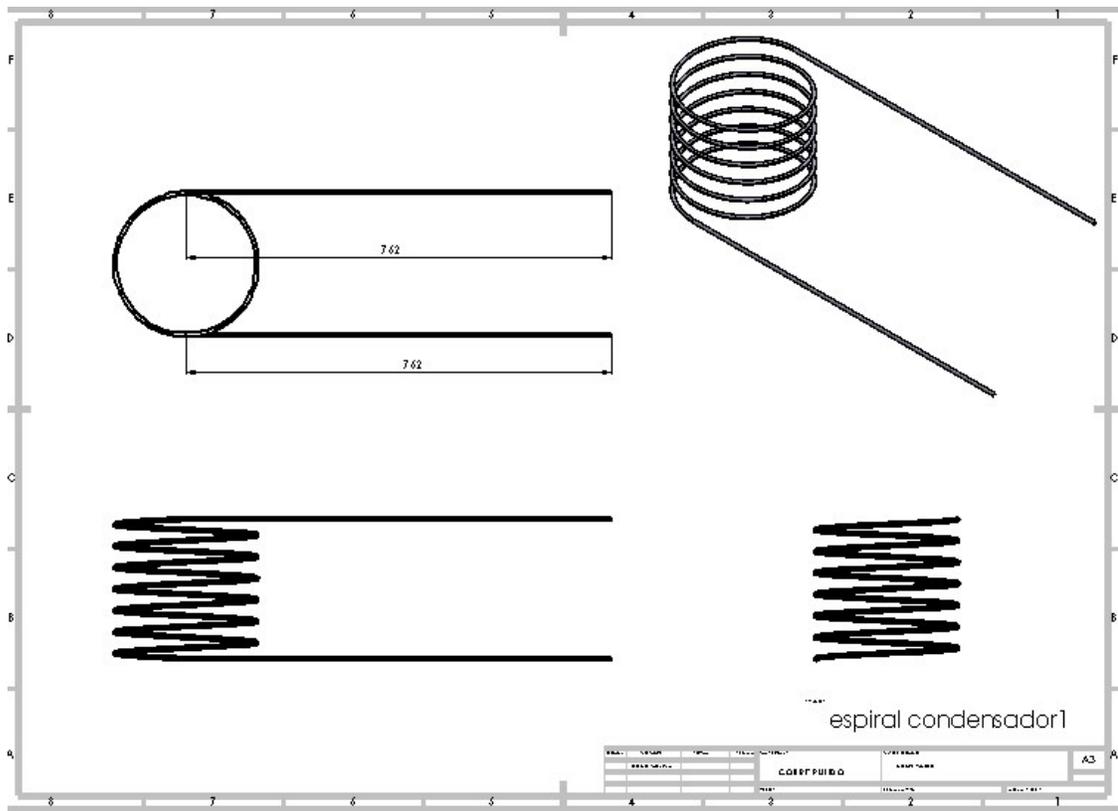
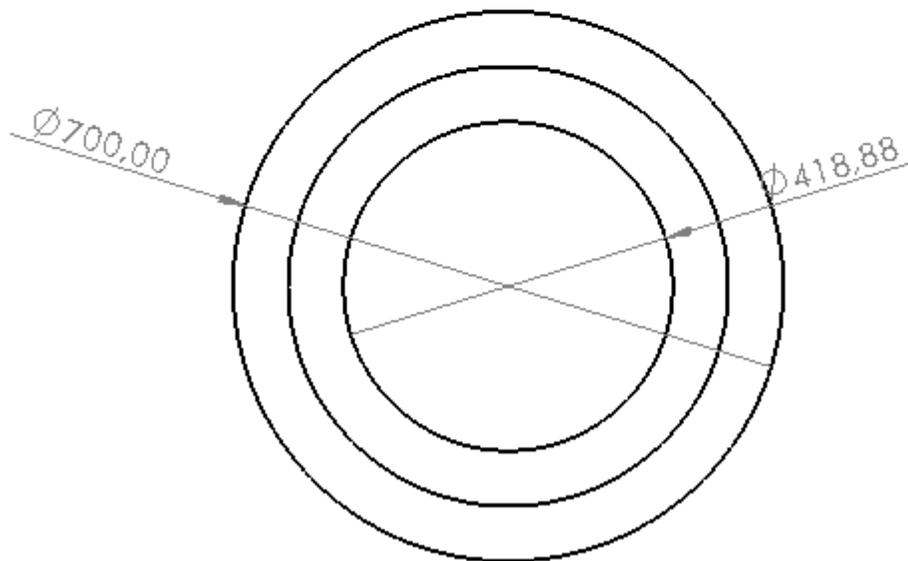
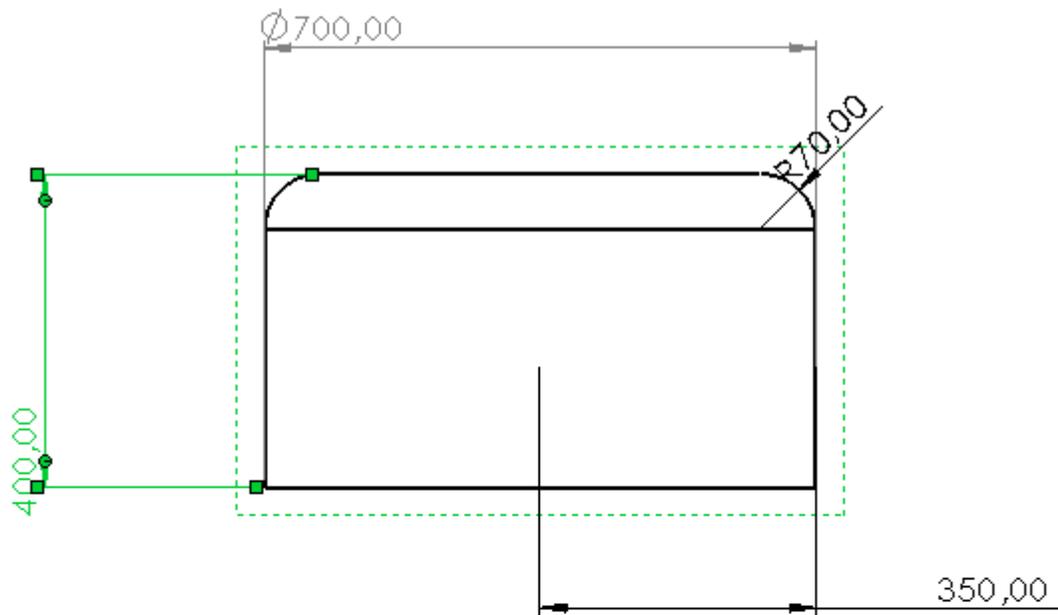


Figura 2-37. Dimensiones de la espiral del condensador



Conclusiones

Realizado el análisis de diseño y modelamiento conceptual del destilador solar con respecto a la energía producida por el punto focal se puede concluir que el objetivo general del trabajo de grado se ha alcanzado al disponer de los gráficos de modelamiento analítico y dimensiones fundamentales de las principales partes del destilador solar. Los cálculos realizados muestran que la potencia disponible del Concentrador Solar Parabólico Compuesto es muy pequeña para ser utilizado en un destilador solar, ya que la cantidad de agua a destilar por hora no sobrepasa a 1 ml, es necesario implementar un diámetro mayor de tubería para que él pueda evaporarse el agua o aumentar la potencia incidente en el foco. Por último, se enfatiza que es necesario utilizar otra tecnología de fuente de calor por lo que no es procedente la fabricación del prototipo destilador diseñado.

Bibliografía

- A. Buscemi, D. Panno, G. Ciulla, M. Beccali, and V. Lo Brano. «Concrete Thermal Energy Storage for Linear Fresnel Collectors» No. 166, n.º Energy Conversion and Management, (2018): pp: 710-736.
- A. Sebastián, R. Abbas, M. Valdés, and J. Casanova. «Innovative Thermal Storage Strategies for Fresnel-based Concentrating Solar Plants with East-West Orientation» No. 230, n.º Applied Energy, (2018): pp: 983-995,.
- Angel Franco Garcia. «calor latente de vaporacion», 5 de mayo de 2008.
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/latente/latente.htm>.
- C. Venegas Coll. «Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel». Universidad Técnica Federico Santa María título de Ingeniero Civil Mecánico, Mención Energía, 2017.
<https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23305>.
- Cristina Novillo. «que es la condensacion del agua», 30 de mayo de 2019.
<https://www.ecologiaverde.com/que-es-condensacion-del-agua-y-ejemplos-1999.html>.
- D. I. Friedman R. «Sistema de concentración solar Fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria. Evaluación de prototipo». Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2017. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145345>.
- E. Bellos, C. Tzivanidis, and A. Papadopoulos. «Optical and Thermal Analysis of a Linear Fresnel Reflector Operating with Thermal Oil, Molten Salt and Liquid Sodium» No. 133, n.º Applied Thermal Engineering, (2018): pp: 70-80,.
- E. Saettone O. «Diseño, construcción y utilización de un concentrador solar tipo Fresnel lineal para desalinización». XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, 12 de noviembre de 2012.
http://www.ulima.edu.pe/sites/default/files/research/files/ponencia_diseno_construccion_y_utilizacion_de_un_concentrador_solar_tipo_fresnel_lineal_xix-spes-_puno_2012.pdf.
- educar chile. «IRRADIANCIA». En *educar chile*, s. f.
<https://www.aprendeconenergia.cl/glossary/irradiancia/#primary>.
- «energía solar», s. f. <https://solar-energia.net/>.
- Frank P. Incropera, Adrienne S. Lavine, David P. DeWitt. *introduction to heat transfer*. Sexta edición., s. f.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YBaNaLurTD4C&oi=fnd&pg=PR21&dq=introduction+to+heat+transfer+3rd+edition+frank+p.+incropera+y+david+p.+dewitt+&ots=tPUGamolay&sig=wJ0HhjSk6lkcyQBdKbDWZKsLuY#v=onepage&q&f=false>.
- George M. Kaplan. «Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables». Pearson Education s.a. Madrid. Prentice Hall, 18 de octubre de 2011.
https://canadianpreppersnetwork.com/cd3wd/disk2/_sl_solar_concentrators_vita_en_lp_147750_.pdf.
- GUSTAVO ALEXANDER ESTRADA CASTRILLON y JUAN SEBASTIAN FIGUEREDO MALPICA.
«Desarrollo de un Concentrador Solar tipo Parabólico Compuesto». Antonio Nariño, 2019.
- I. Martínez. «Fresnel Lenses». En *Fresnel Technologies*, Inc. -2014 de 1996.
https://www.google.com/search?q=12.+Fresnel+Lenses.+Fresnel+Technologies&rlz=1C10KWM_esCO784CO784&oq=12.%09Fresnel+Lenses.+Fresnel+Technologies&aqs=chrome.0.69i59.1346j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8.

- Ismael Montiel Hernández. «México- Alumno del Instituto Politécnico Nacional crea sistema de tratamiento de agua de lluvia con energía solar», 22 de enero de 2014.
<http://www.sitiosolar.com/noticias-2/mexico-alumno-del-instituto-politecnico-nacional-crea-sistema-de-tratamiento-de-agua-de-lluvia-con-energia-solar/>.
- Joaquín Recio Miñarro. «ENERGIA SOLAR EN LA TIERRA». *LA ENERGÍA* (blog), s. f.
http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/solar.htm.
- K. Gouthamraj, K. Jamuna Rani, and G. Satyanarayana. «Design and Analysis of Rooftop Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator» Volume 2, n.º Int. J. of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), (mayo de 2013).
https://www.wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Solar/Solar%20Thermal%20-%20Heat%20Storage%20-%20Files/Design%20and%20Analysis%20of%20Rooftop%20Linear%20Fresnel%20Reflector%20Solar%20Concentrator%20-%20Gouthamrai%20-%20IJEIT%202008.pdf.
- khan academy. «¿Qué es la tasa de flujo volumétrico?», s. f.
<https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate>.
- Laboratorio Químico. «Qué es la Evaporación?» En *Portal de Contenidos Educativos de Química General y Laboratorio Químico.*, 5 de octubre de 2017.
<https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/procedimientos-basicos-de-laboratorio/evaporacion.html>.
- Michael Torbert de Semper. «Constante Solar | Eficiencia Energética». En *certificacionenergetica.info*, 2 de abril de 2015.
- . «los destiladores solares II», 9 de enero de 2014. <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>.
- N. Kincaid, G. Mungas, N. Kramer, M. Wagner, and G. Zhu. «An Optical Performance Comparison of Three Concentrating Solar Power Collector Designs in Linear Fresnel, Parabolic Trough, and Central Receiver» No. 231, n.º Applied Energy, (2018): pp: 1109-1121,.
- Navarro, Edwin. *Mecánica de Fluidos - 6ta Edición - Robert L. Mott.pdf*. Accedido 4 de junio de 2020. https://www.academia.edu/31396567/Mec%C3%A1nica_de_Fluidos_-_6ta_Edici%C3%B3n_-_Robert_L._Mott.pdf.
- nikolas buitrago. «EFICIENCIA». *FISICA DE FLUIDOS Y TERMODINAMICA* (blog), 6 de febrero de 2015. <https://nikolasbuitragoj.wordpress.com/tercer-corte/consultas/eficiencia/>.
- Polo bravo carlos. «Polo bravo carlos diseño, construcción y caracterización de un destilador solar tubular». Presentado en CENTRO DE ENERGIAS RENOVABLES DE TACNA (CERT) FACULTAD DE CIENCIAS UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN, TACNA XXI SIMPOSIO PERUANO DE ENERGÍA SOLAR, 18 de abril de 2015.
<https://es.slideshare.net/Perusolar/polo-bravo-carlos-diseo-construccion-y-caracterizacion-de-un-destilador-solar-tubular>.
- Samoa, Alex. «Transferencia de Calor y Masa 4ta ed. - Yunus Cengel». Accedido 4 de junio de 2020.
https://www.academia.edu/12140362/Transferencia_de_Calor_y_Masa_4ta_ed._-_Yunus_Cengel.
- SOLIDWORKS 2015 x64 Edition* (versión 2015). Diseño, Diseño Mecánico, s. f.
- T. Mols, K.P. Dzene, R. Vanaga, R. Freimanis, and A. Blumberga. «Experimental Study of Small-scale Passive Solar Wall Module with Phase Change Material and Fresnel Lens.» No. 147, n.º Energy Procedia, (2018): pp: 467-473,.

- Tabuada Miranda, Bayron Roberto. «Diseño y construcción de un destilador solar para agua de una capacidad de 200 ml/día». universidad politecnica salesiana, 2015.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8615>.
- Universidad Nacional Autónoma de México, y Facultad de Ciencias. «Destiladores Solares-revista de cultura científica», mes de abril. <https://www.revistaciencias.unam.mx/es/160-revistas/revista-ciencias-15/1407-destiladores-solares.html>.
- Velásquez, Reinaldo José Gamardo. «Ingeniería Claudio Mataix Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas». Consultado 4 de junio de 2020.
https://www.academia.edu/15618791/Ingenieria_Claudio_Mataix_Mecanica_de_fluidos_y_maquinas_hidraulicas.
- Villegas, Carlos Isaac Contreras. «Termodinámica, 6ta Edición - Yunus A. Çengel y Michael A. Boles». Consultado 4 de junio de 2020.
https://www.academia.edu/38408493/Termodin%C3%A1mica_6ta_Edici%C3%B3n_-_Yunus_A._%C3%87engel_y_Michael_A._Boles.
- word press. «El primer destilador solar de Charles Wilson». *word press* (blog), s. f.
<https://historiadelagua.wordpress.com/el-primer-destilador-solar-de-charles-wilson/>.