

Estudio comparativo de un destilador solar hibrido y uno convencional

Nestor Ferney Vesga Durán

Nathalia Andrea Solano Cely

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad de Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2021

Estudio comparativo de un destilador solar hibrido y uno convencional

Nestor Ferney Vesga Durán

ID:000307731

Nathalia Andrea Solano Cely

ID: 00025742

Proyecto de grado como requisito

Para optar el título de

Ingenieros Mecánicos

Director del Proyecto de grado

Emil Hernández Arroyo

Ingeniero Mecánico

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad de Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2021

Nota de aceptación:

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

DEDICATORIA

A mis padres Luis Ferney Vesga y Nancy María Duran por su paciencia, amor y apoyo incondicional durante mis estudios, que siempre creyeron en mí y han sido de gran apoyo a lo largo de mi vida, por el sacrificio y esfuerzo que hicieron para brindarme los recursos necesarios para culminar mis metas.

Gracias a mis amigos, que han sido como mis hermanos, a Alfredo Carreño por estar siempre conmigo dándome fuerzas para continuar, por los buenos momentos que hemos compartido.

Nestor Vesga

DEDICATORIA

A mis padres quienes han creído en mi en todo momento y han sido un apoyo invaluable a lo largo de mi vida. A Matías mi hijo quien ha estado siempre con su paciencia y amor ayudándome a superar adversidades, a mi compañero Néstor Vesga por su paciencia y comprensión.

Nathalia Solano

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios quien nos ha permitido cumplir un nuevo logro en nuestra vida dándonos la sabiduría, salud y perseverancia para lograr nuestras metas.

A nuestros padres quienes nos apoyaron en cada momento de este proceso.

A los docentes que nos apoyaron, nos acompañaron y enseñaron durante este proceso, a nuestros compañeros que nos acompañaron en esta etapa de la vida y, por último, pero no menos importante a la universidad pontificia bolivariana que nos brindó el acompañamiento necesario para nuestra formación profesional.

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN
ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	5
2. OBJETIVOS	6
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
3. ANTECEDENTES	7
4. JUSTIFICACIÓN	14
5. MARCO TEÓRICO	15
5.1 El agua.....	15
5.1.1 Importancia del agua pura	15
5.1.2 Paramentos del agua para consumo humano	16
5.2 Situación de las energías convencionales.....	16
5.2.1 Potencial de las energías renovables	18
5.2.2 Relación de las energías convencionales y las energías renovables en desalación de agua	19
5.3 Energía solar.....	20
5.3.1 El sol	20
5.3.2 Sistemas de captación de la energía solar	21
5.4 Conversión térmica de baja temperatura.....	22
5.5.1 Destilación solar en la naturaleza	23
5.5.2 Mecanismos de transferencia de calor en destilación	24
5.5.3 Transferencia de calor en un destilador	24
5.5 Ebullición.....	27
5.6 Ebullición nucleada.....	27
5.7 Calor sensible.....	29
5.8 Calor latente.....	29
5.9 Procesos de destilación.....	29
5.9.1 Destilación solar	30
5.10 Colector solar.....	31

5.11 Eficiencia.....	33
5.12 Clases de destiladores.....	35
5.12.1 Destilador tipo cascada.....	35
5.12.2 Destilador solar tipo caseta.	36
5.12.3 Destilador solar esférico	38
5.12.4 Destilador solar tipo chimenea.	39
5.13 Balance térmico en un destilador solar	40
5.14 Comparación entre diferentes tipos de destiladores solares.....	42
6. MODIFICACION POSPANDEMIA	44
7. METODOLOGIA Y PROCESO DE DISEÑO.....	45
8. RESULTADOS PARA CÁLCULOS DEL SOL	57
9. CONCLUSIONES.....	82
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	86

LISTA DE FIGURAS

Pág.

<i>Ilustración 1: a) sección longitudinal de un calentador solar (CAI); (b) Panorama de perspectiva con indicación de la guía de las nervaduras.....</i>	<i>7</i>
Ilustración 2: Imagen del alambique solar realizado en fibra de vidrio	9
Ilustración 3. Alambique tipo caceta de doble vertiente.....	10
Ilustración 4: Partes de un colector solar de plana.	11
Ilustración 5. Destilador de doble piso o efecto.....	12
Ilustración 6. Alambique solar de cubierta sencilla.	12
Ilustración 7. Destilador de dos vertientes.....	13
Ilustración 8.: Evolución de producción de combustibles fósiles	17
Ilustración 9. Destilador solar en la naturaleza	24
Ilustración 10. Mecanismos de transmisión de calor	26
Ilustración 11: curvatura característica en condiciones de 1 atmosfera para la ebullición del agua	28
Ilustración 12. Colector solar	32
Ilustración 13. Colector solar	33
Ilustración 14. Destilador tipo cascada.....	36
Ilustración 15. Destilador tipo caseta doble vertiente	37
Ilustración 16. Destilador tipo caseta única vertiente.....	38
Ilustración 17. Destilador tipo esférico.....	39
Ilustración 18. Destilador tipo chimenea.	40
Ilustración 19. Comparación entre diferentes tipos de destiladores solares.....	43
Ilustración 20: Destilador tipo cascada.	45
Ilustración 21: Destilador tipo caseta una vertiente.	46
Ilustración 22: Destilador tipo esfero.	46
Ilustración 23: Vidrio de destilador tipo caseta dimensionado respecto a la charola del agua.....	51
Ilustración 24: Bosquejo del procedimiento de radiación incidente solar.....	52
Ilustración 25: Ángulo formado por el sol con la horizontal.	60
Ilustración 26: Cálculo de n (convertir día del mes a día del año).....	60
Ilustración 27: Comparación de eficiencias.....	79
Ilustración 28: Comparación grafica de volumen destilados.	81

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. características físicas	16
Tabla 2. Características microbiológicas.....	16
Tabla 3: Tabla comparativa.....	47
Tabla 4: Parámetros para balance de energía	54
Tabla 5: Promedio de temperatura ambiente y de rocío	55
Tabla 6: Cálculo de ángulo omega	65
Tabla 7: Total de radiación en hora por superficie.....	66
Tabla 8: Radiación difusa horaria por unidad de área.....	67
Tabla 9: Ángulos de incidencia horaria	69
Tabla 10: Ángulo cenital	69
Tabla 11: Valores R_b para cada hora.....	70
Tabla 12: Valores de radiación solar total horaria.....	71
Tabla 13: Medición de temperaturas para el vidrio y el agua del destilador convencional.....	72
Tabla 14: Promedio de temperaturas para el vidrio y el agua del destilador convencional.....	73
Tabla 15: Eficiencia de destilador solar convencional por hora.....	75
Tabla 16: Temperatura del agua dentro de un calentador solar	76
Tabla 17: Promedio de temperaturas para el vidrio y el agua del destilador híbrido.....	76
Tabla 18: Eficiencia de destilador solar híbrido por hora.....	78
Tabla 19: Cantidad de agua destilada en mililitros.	80
Tabla 20: Cantidad de agua destilada (híbrido) en mililitros.....	80

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexos A: Mapa de irradiación en Colombia.	86
Anexos B: Tabla de propiedades del agua.	87
Anexos C: Algoritmo para los cálculos en EES para las variantes del sol	88
Anexos D: Temperaturas para destilador convencional vidrio-agua	90
Anexos E: calentador solar	96
Anexos F: Destilador	97
Anexos G: Base de destilador	98
Anexos H: Intercambiador	99

RESUMEN

Resumen general de trabajo de grado

- TITULO:** Estudio comparativo de un destilador solar hibrido y uno convencional
- AUTORES:** Nestor Ferney Vesga Durán y Nathalia Andrea Solano Cely
- PROGRAMA:** Facultad de ingeniería mecánica
- DIRECTOR:** Ing. Emil Hernández Arroyo

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como objeto diseñar y fabricar un destilador solar hibrido con el fin de realizar un estudio comparativo respecto a su desempeño, para calcular su eficiencia con la que se obtiene agua limpia, utilizando la energía solar como generador de calor con el fin de aumentar la transferencia de calor por medio de un intercambiador y un acumulador. Esto a través de: la realización del diseño de un destilador solar hibrido el cual será a un acumulador solar (calentador solar convencional) para mejorar su eficiencia, la fabricación un prototipo de un banco de pruebas de un destilador solar hibrido y el análisis de las eficiencias del destilador hibrido frente al convencional.

Lo anterior bajo los parámetros de la investigación aplicada y estando, entre los principales resultados ajustados a los requerimientos de la investigación formulada, los siguientes: cálculo de la eficiencia de los destiladores, el cálculo de la irradiancia solar sobre una superficie, la determinación de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie normal al sol (H_o), el cálculo de la Radiación Difusa Diaria que cae sobre una superficie horizontal (H_d'), entre otros.

PALABRAS CLAVE:

Ventilador, Destilador hibrido de una sola vertiente, Acumulador solar

ABSTRACT

General summary of work of grade

TITLE: Comparative study of a hybrid solar still and a conventional one

AUTHORS: Nestor Ferney Vesga Durán y Nathalia Andrea Solano Cely

FACULTY: Mechanical Engineering

DIRECTOR: Ing. Emil Hernández Arroyo

ABSTRACT

The present research project aims to design and manufacture a hybrid solar still with the purpose of carrying out a comparative study regarding its performance; and to calculate the efficiency in which clean water is obtained with, while using solar energy as a heat generator to increase the heat transfer through an exchanger and an accumulator. This through the realization of the design of a hybrid solar still which will be a solar accumulator (a conventional solar heater) for better efficiency, the manufacture of a prototype of a test bench of a hybrid solar still and the analysis of the efficiencies of the hybrid still compared to the conventional one.

The abovementioned under the parameters of applied research and being, among the main results of the proposed investigation, the following: calculation of the distillers' efficiency, the calculation of the solar irradiance over a surface, the determination of extraterrestrial solar radiation on a normal surface to the sun (H_0), the calculation of the Daily Diffuse Radiation that falls on a horizontal surface (H_d), among others.

KEYWORDS:

Fan, Single-slope hybrid still, Solar Accumulator

INTRODUCCIÓN

Garantizar el suministro de agua suficiente para la satisfacción de necesidades tanto actuales como de futuras generaciones supone un elemento fundamental en el desarrollo económico y social de una nación. La existencia de un suministro hídrico suficiente es un condicionante principal para la satisfacción de necesidades básicas en múltiples ámbitos como lo son el doméstico, a nivel industrial y empresarial, en el sector agrícola, construcción, aseguramiento de condiciones de bioseguridad y salubridad, para la promoción de un medioambiente en equilibrio, entre otros. Al ampliar en tal impacto, en especial en el contexto de la salud, uno de los que más impacto tiene en la calidad de vida de las personas y mayor gasto público supone, cabe resaltar que, aunque los beneficios del abastecimiento suficiente de agua en el ámbito de la salud son difíciles de medir dada la dificultad de aislarlos y cuantificarlos, uno de los principales indicadores de los mismo se relacionan con la incidencia del agua contaminada en la presencia de enfermedades, siendo esta la causa de la mayoría de afecciones a la salud en el tercer mundo (Caro, 2020).

De acuerdo con la UNESCO (2020), el aumento en la renta per cápita a nivel mundial ha tenido una fuerte incidencia en factores demográficos que aumentan el consumo de recursos, entre los cuales se destacan principalmente los de orden hídrico. Según el ente internacional el crecimiento demográfico a nivel global mantiene un ritmo de 80 millones de personas anualmente, lo cual supone una demanda de agua dulce estimada en 64 mil millones de metros cúbicos al año para satisfacer las necesidades de tal crecimiento. Partiendo de este panorama, se proyecta que para el año 2030 alrededor del 47% de la población, a nivel mundial, vivirá en zonas catalogadas como de estrés hídrico, estando en su mayoría ubicadas en países en desarrollo o en zonas que no cuentan con la infraestructura suficiente para el acceso seguro a recurso hídricos potables ni al respectivo saneamiento que estos requieren.

En este sentido, la presente investigación que parte del contexto identificado tiene como objeto diseñar y fabricar un destilador solar híbrido con el fin de realizar un estudio comparativo respecto a su desempeño, para calcular su eficiencia con la que se obtiene agua limpia, utilizando la energía solar como generador de calor con el fin de aumentar la transferencia de calor por medio de un intercambiador y un acumulador. Esto a través de: la realización del diseño de un destilador solar híbrido el cual será un acumulador solar (calentador solar convencional) para mejorar su eficiencia cuyo principal resultado será un esquema que contiene especificaciones

sobre el acople con el destilador y con el acumulador y para el cual se definió como indicador de cumplimiento los planos del mismo; la fabricación de un prototipo de un banco de pruebas de un destilador solar híbrido cuyo principal resultado es el sistema híbrido de destilación de agua más eficiente y cuyo indicador de cumplimiento fijado es la entrega del mismo bajo la observancia de principios de ergonomía; y el análisis de las eficiencias del destilador híbrido frente al convencional, siendo el principal resultado del objetivo propuesto la construcción de la curva comparativa de las eficiencias para cada módulo de destilador y definiéndose como indicador de cumplimiento la documentación de las pruebas experimentales al mismo tiempo, esto con el objeto de no variar el entorno de las condiciones climáticas.

Lo anterior se enmarca bajo los parámetros de la investigación aplicada. Cabe resaltar que esta se define como aquella que propende por la producción de conocimiento a partir de la resolución directa de problemáticas sociales o del sector productivo y que esencialmente implica la aplicación del desarrollo teórico de determinado objeto de estudio sobre un entorno real para el logro de un objetivo fijado (Lozada, 2016). Así mismo, como técnica de recolección de la información se parte del análisis documental, lo que conllevó una revisión de fuentes bibliográficas al considerar artículos, tesis, análisis técnicos y demás documentos relevantes en la construcción de la investigación propuesta.

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Estudios han demostrado que la población a nivel mundial va creciendo exponencialmente por lo cual la demanda de energía, alimentos y agua. (Latham, 2002)

El agua es un recurso importante para la existencia humana en la tierra, ya sea para humanos, animales o vegetales del consumo, y sin este recurso la vida no se podría dar de ninguna manera. Teniendo en cuenta el hecho de que nuestro mundo está saturado con agua en aproximadamente 71%, que se estima que alrededor del 96% de esta es salada y solamente el 4% es dulce, pero el 69% de esta está congelada en los polos. En la industria agrícola es esencial para el crecimiento de plantas, según los resultados de la séptima edición del Estudio Nacional de Agua, que se presentó en Bogotá, se realizó una demanda en la cual el total de este líquido en el país entre 2012 y 2016 donde se llega a un registro de un incremento del 5 por ciento, al elevarse por encima de los 37.000 millones de metros cúbicos, siendo el sector de la agricultura el que mayor uso hace de los recursos hídricos. (WWAP, 2019)

Se considera urgente la acumulación de tecnologías que sean capaces de aprovechar los suministros de agua. No son muchos procesos para la destilación de esta misma, entre ellos se difieren principalmente en consumo de energía, costo operativo y efectos ambientales. “En la mayoría de los casos el recurso hídrico destilado se obtiene generalmente utilizando una fuente de energía tradicional en destiladores eléctricos, y en algunos casos condensando vapor de agua obtenido directamente de calderas, proceso que se realiza consumiendo una alta cantidad de energía, bien sea eléctrica en los destiladores o combustibles fósiles en las calderas. Los destiladores solares permiten obtener agua pura a partir de aguas salinizadas”. (M., 2007)

¿Cuál será la eficiencia que podremos obtener mediante un desalinizador solar híbrido que utiliza un acumulador solar en comparación a uno convencional?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y fabricar un destilador solar hibrido con el fin de realizar un estudio comparativo respecto a su desempeño, para calcular su eficiencia con la que se obtiene agua limpia, utilizando la energía solar como generador de calor con el fin de aumentar la transferencia de calor por medio de un intercambiador y un acumulador.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar el diseño de un destilador solar hibrido el cual será a un acumulador solar (calentador solar convencional) para mejorar su eficiencia. **Resultado:** Esquema que contenga el acople con el destilador y con el acumulador. **Indicador:** Realizar planos para saber la forma más eficiente para destilar agua.
- Fabricar un prototipo de un banco de pruebas de un destilador solar hibrido. **Resultado:** Sistema hibrido de destilación de agua más eficiente **Indicador:** Entrega de un banco para pruebas con las normas requeridas de ergonomía.
- Analizar las eficiencias del destilador hibrido frente al convencional. **Resultado:** curva comparativa de las eficiencias para cada módulo de destilador. **Indicador:** pruebas experimentales al mismo tiempo, para no variar el entorno de las condiciones climáticas

3. ANTECEDENTES

La publicación hecha por Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente; vol. 5 le otorgo la ejecución de la investigación a Jorge Barral, Gustavo Morichetti, Pablo Galimberti, Amílcar Fasulo quienes desarrollaron una metodología para evaluar la energía que absorbe un colector acumulador mono-tanque con cubiertas de policarbonato alveolar como lo muestra la ilustración 1, estudiándose la radiación solar incidente y transmitancia-absorbancia del sistema de cubierta. La radiación que cae es determinada dividiendo la superficie del cilindro vertical exterior del acumulador en 16 caras verticales y evaluando los ángulos de incidencia para cada una y para la cara circular encontrada en la parte superior. La energía transmitida de la cubierta es determinada experimentalmente mediante un dispositivo de ángulos acimutal y de inclinación variables, midiendo con tres solarímetros. Se logro graficar la transmitancia y conversión de directa a difusa en relación del ángulo de incidencia, parametrizadas por la orientación del policarbonato. Con estas curvas, la absorbancia del tanque y la radiación solar incidente se puede evaluar la energía absorbida. Los resultados así un modelo de absorción que puede incorporarse a un programa para recrear el comportamiento de estos colectores bajo diferentes ambientes climáticos y de demanda. (Barral, Morichetti, Galimberti, & Fasulo, 2001)

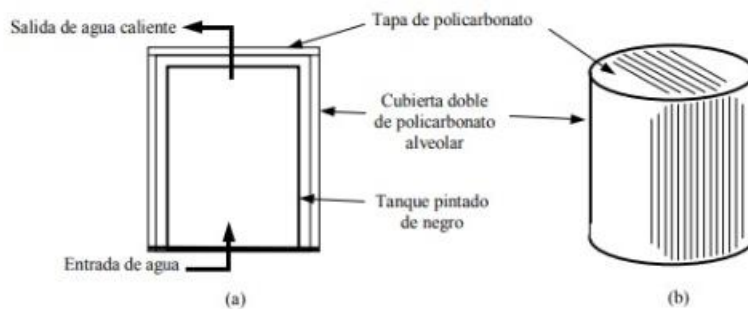


Ilustración 1: a) sección longitudinal de un calentador solar (CAI); (b) Panorama de perspectiva con indicación de la guía de las nervaduras.

Fuente: Fonseca, Susana; Abdala, Jorge L EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR ABSORBIDA POR UN COLECTOR ACUMULADOR INTEGRADO MONOTANQUE CON CUBIERTAS DE POLICARBONATO ALVEOLAR.

En el año 2002 C. Esteban, J. Franco y A. Fasulo ejecutaron un diseño sobre EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR COLECTOR SOLAR ACUMULADOR, Luego de haber concluido el diseño, construcción y puesta a prueba de un destilador colector solar acumulador (DCSA), se representa en el

trabajo la sustentación experimental de este mismo. El misma se ejecutó comprobado las producciones y eficiencias del destilador colector solar acumulador con un destilador tipo batea y con un destilador tipo batea. Los resultados obtenidos muestran que el DCSA tiene un producto de un 70% más que el tipo batea y de un 20% que la batea con colector plano. (C. Esteban J. F., 2002)

En el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), se realizó un estudio para PROTOTIPO DE DESTILADOR SOLAR DE FIBRA DE VIDRIO. Se conocen múltiples clases de destiladores solares, entre los que resaltan los que utilizan el efecto invernadero por ser este uno de los métodos más sencillos y económicos de obtención de agua destilada. La literatura encontrada nos ilustra que existen diversas tecnologías y materiales para el diseño y construcción de destiladores solares.

En este trabajo se evidencia la construcción de un prototipo de destilador solar, con vistas a lo recaudado de agua destilada para diferentes utilidades tales como agua para el transporte automotor, baterías, etcétera. Se muestra la construcción y evaluación de un diseño de un destilador solar tipo caseta elaborado con fibra de vidrio, como lo muestra la ilustración 2. Se calcula el funcionamiento del destilador, calculándose la productividad diaria y la pureza del agua destilada. Se realiza el estudio de los resultados alcanzados en la evaluación y una cotización económica para la utilización de este equipo. (Fonseca, 2005)



Ilustración 2: Imagen del alambique solar realizado en fibra de vidrio

Fuente: Fonseca, Susana; Abdala, Jorge L.; Griñán Villafañe, Pedro; Sánchez Hechavarría, Jorge L. PROTOTIPO DE DESTILADOR SOLAR DE FIBRA DE VIDRIO

Javier Marchesi, Ezequiel Ducculi, Jorge Adaro, Amílcar Fasulose, realizaron una investigación para poder saber de qué manera se logró medir experimentalmente la producción instantánea de los destiladores solares asistidos con sistemas de apoyo solares con la función de precalentar de agua de la batea para ser comparados con un destilador del tipo básico, al que también se le tomó registro de su producción durante las 24 horas del día, por medio del pesaje del destilado producido con la ayuda de balanzas comerciales adaptadas para tal fin. Se muestran detalles de dicha instalación y resultados obtenidos durante una serie de días claros de los meses de invierno para cada uno de los equipos, los que fueron construidos en la UNRC para trabajos previos. Los resultados mencionados consideran apreciar evidentemente las producciones horarias de los mismos, como también el ritmo de respuesta ante cambios climáticos.

También permiten razonar y discutir en las ventajas que representa el precalentamiento del agua de la batea, lo que señala que los objetivos fueron alcanzados. Dichos resultados son evidenciados por medio de gráficos y tablas. (Marchesi, 2007)

Colmenares et al [8] de la universidad pontifica bolivariana llevaron a cabo un proyecto de grado fue el desarrollo y construcción de un destilador solar de tipo caseta con ciertos grados de inclinación, donde ellos evidencian que al variar los grados de inclinación de esta misma su eficiencia térmica tiende a ser mayor. Este destilador era de una sola vertiente en cual se usó el material más aprobado para este tipo de proyectos que es el vidrio, ya que la luz lo atraviesa fácilmente, esto así formando un recinto hermético como contenedor, para esto es viable tener una superficie negra para que absorba esta radiación y la convierta en energía calorífica, también se encuentra que este proceso depende de la cantidad de energía que pueda almacenar y no de la radiación que tenga en ese momento, esto demostrado con etapas en los que el prototipo trabaja bajo sombra. (Colmenares, 2008)

Téllez et al [5] de la universidad Nacional Autónoma de México en el año 2008 implementaron un análisis sobre el uso de una destilación solar como un método más eficiente, accesible y e amigable con el medio ambiente. En la purificación de agua de mar, el agua salobre y agua residual. En el destilador de caseta con dos vertientes (como lo muestra la ilustración 3), el agua a destilar se encuentra en la parte interior y al aumentar su temperatura a tal punto de calentarse y de transforma en vapor de agua que a su vez se desliza por las paredes un vidrio, en donde queda separada el agua a tratar del agua destilada. (téllez, 2008)

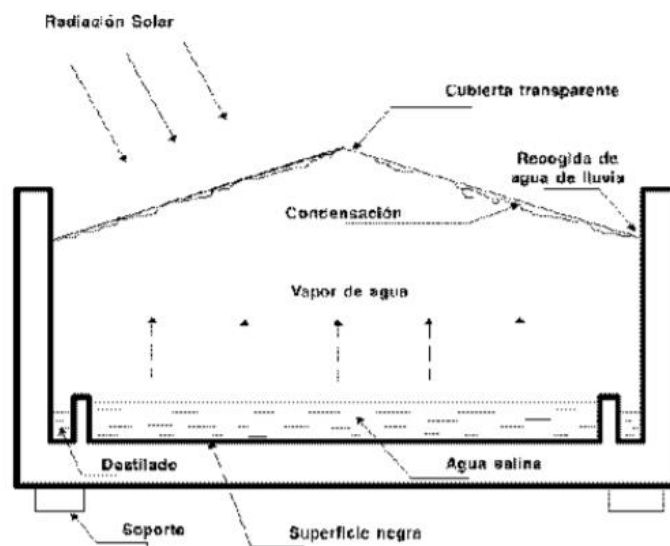


Ilustración 3. Alambique tipo caseta de doble vertiente.

Fuente: CASTILLO TELLEZ, Margarita: *Desarrollo y análisis energético de destiladores solares de agua con convección natural y convección forzada*. Ciudad de México. 2008.

Una publicación hecha para evaluar la energía de un colector hecha por Adrián Enrique Ávila Gómez, Jorge Mario Mendoza Fandiño, Julio Fernando Beltrán Sarmiento en donde se desempeñaron realizando un artículo que establece la incidencia de la analogía de aspecto (razón entre la longitud y ancho de un colector de área constante) acerca de la eficiencia térmica de un colector solar de placa plana que utiliza una doble cubierta cristalina para el elevar la temperatura del aire, como lo muestra la ilustración 4. El estudio se desarrolla desde dos puntos de vista: el primero maneja un tipo físico-matemático a partir de los cálculos de energía del colector, y el segundo utiliza un prototipo con su respectivas herramientas para computar su rendimiento de forma experimental. El receptor está compuesto por una armazón en madera, doble cubierta de vidrio transparente, una placa captadora de radiación solar y un extractor para el aire calentado. De esta forma Para calcular el rendimiento se recolectaron de manera automática datos de temperatura, radiación solar y flujo másico de aire; durante aproximadamente $\frac{1}{4}$ de día durante varios días y bajo condiciones climáticas que venían cambiando en la ciudad de Montería, Córdoba (Colombia). En común se encontró, para un área invariable del colector, que rendimiento térmico de este aumenta cuando la relación de aspecto aumenta y que el modelo teórico se acomoda de una forma aceptable con los resultados experimentales. (Ávila, Mendiza, & Beltran, 2010)

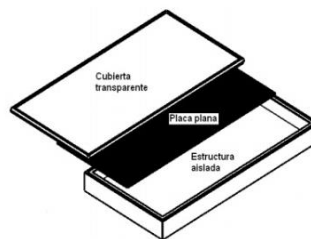


Ilustración 4: Partes de un colector solar de plana.

Fuente: Adrián Enrique Ávila Gómez, Jorge Mario Mendoza Fandiño, Evaluación energética de un receptor solar de placa plana con doble cara superior

Chávez Yavara et al [11] de la universidad de Prat, realizado en una ciudad de Chile en 2013, se desarrolló un análisis con el fin de lograr la comparación de dos prototipos de alambiques los cuales se necesitan para el procedimiento del recurso

hídrico del río Camiña. En la ilustración 5 se identifica el destilador convencional con una cara superior simple e inclinada, de una sola vertiente, por otro lado, en la ilustración 6 se ve el destilador uno de doble suelo. Evidenciando la superioridad que tiene en costos el destilador convencional de pendiente única con respecto al de doble suelo, adicionalmente los dos poseen una eficiencia similar. (Yavara, 2013)



Ilustración 5. Destilador de doble piso o efecto.

Fuente: CHÁVEZ YAVARA, Vladimir: Estudio de dos tipos de destiladores solares pasivos para el tratamiento de aguas del río Camiña en la región de Tarapacá. Iquique. 2013



Ilustración 6. Alambique solar de cubierta sencilla.

Fuente: CHÁVEZ YAVARA, Vladimir: Estudio de dos tipos de destiladores solares pasivos para el tratamiento de aguas del río Camiña en la región de Tarapacá. Iquique. 2013.

Para su requisito de grado como ingeniera mecánica, Raquel Flores, presento como tesis un tipo de destilación que utiliza energía solar; en el boceto es trascendental establecer un equilibrio de energía en las partes prioritarias del destilador solar.

Basándose en ciertos criterios como apariencia, aspecto mercantil, seguridad e higiene, todo esto lograr obtener el sistema óptimo, siendo este el “simple de doble vertiente”. Al terminar este proyecto llegaron a la conclusión de que la eficiencia fue mayor a la esperada, con un 31%, a esto se le añade que, al tener menos nivel de agua, es decir una delgada capa se obtendrá mejor distribución de la energía térmica, acelerando así el proceso de evaporación, también se encuentra que es importante tener una adecuada limpieza de la cubierta ya que puede ensuciarse y así impedir que los rayos solares ingresen, haciendo deficiente el sistema. (NICOLALDE, 2015)

Yari Blanco et al [13] en la universidad de Santander (UNDESUR), se aprueba un proyecto de grado de un desalinizador de bajo costo, con el que buscan la producción del recurso hídrico potable para las necesidades humanas, como lo muestra la ilustración # 7. Llegan a la conclusión de usar el acero inoxidable 316L como material base para su prototipo ya que se adapta a la temperatura y a las concentraciones de sal, previniendo la oxidación de este mismo, esto con el fin de no agregar partículas contaminantes de corrosión, también sugiere la implementación de un aislante térmico en donde se separen las unidades del sistema, con el fin de evitar las pérdidas de calor; además de esto es necesario realizar pruebas y ensayos físico-químicas, como también bacterianas y/o microbiológicas del agua final para poder definir la calidad final de esta (Blanco, 2019)



Ilustración 7. Destilador de dos vertientes.

Fuente: Blanco Yari. Gutiérrez Ángela: Elaboración de un modelo desalinizador de agua con bajo costo, por medio de la implementación de energías renovables para la disposición del ser humano.

4. JUSTIFICACIÓN

Tener agua limpia y potable para las necesidades, ya que es un derecho primordial, además de que también es indispensable para mantener a la humanidad y vegetal, sin embargo, en la última década se ha evidenciado un crecimiento en la población a nivel mundial es exponencial y esto demanda una gran cantidad de agua y comida, a la vez de las contaminaciones.

Este proyecto busca la creación de un destilador que tiene como finalidad solventar la escasez del preciado recurso hídrico para sus diversas utilidades ya sea para riego de cultivos o de consumo humano, mediante la implementación de un sistema de evaporación y condensación del agua que esté contaminada.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 El agua

En la naturaleza podemos encontrar el agua en los 3 estados: sólido en el hielo de los polos de tierra, líquido en los ríos y océanos y gaseoso como vapor de agua en la atmósfera. De los 3 estados, únicamente el hielo y el vapor de agua puede considerarse que es agua químicamente pura, en estado líquido, realmente lo cual se denomina agua son diversas disoluciones naturales que varían, a partir de las aguas bastante finas de manantial de montaña de 0.2 gramos de sal por litro hasta los 35 gramos del agua de océano y los bastante más de 45 gramos de las salmueras, pasando por toda una gama de aguas salobres de concentraciones entre 3 y 25 gramos por litro (Torres, 2004 citado por Bustinza, 2020, p.24).

5.1.1 Importancia del agua pura

El agua es considerada el segundo elemento más esencial después del oxígeno para sostener la vida de todos los organismos vivos. Teniendo en cuenta lo anterior se conoce que los seres humanos solo pueden vivir algunos días sin agua, pero pueden vivir por varias semanas sin alimento. Este dato no sorprende teniendo en cuenta que casi 3/4 partes del cuerpo humano está compuesto de agua. Por lo cual el agua es considera un elemento esencial para el sano mantenimiento de los huesos, tejidos y músculos. A causa de esto es importante tomar agua pura y libre de contaminantes para evitar múltiples padecimientos a causa del consumo de aguas corrompidas o no tratadas. (Bustinza, 2020)

“En el agua de nuestro cuerpo tienen lugar las reacciones que nos permiten estar vivos. Gracias a la elevada capacidad de evaporación del agua, se puede regular la temperatura, 13 mediante la transpiración o perdiéndola por las mucosas, cuando la temperatura exterior es muy elevada, es decir, contribuye a regular la temperatura corporal mediante la evaporación de agua a través de la piel. Espringer (2017) afirma: Que el cuerpo humano requiere buena calidad de agua para beber. El suministro de agua purificada es de vital importancia, para beber debe estar libre de bacterias, organismos patógenos, y minerales que de otro modo crearían efectos fisiológicos y causarían infecciones, tales como infecciones bacterianas, virales y protozoarias en el cuerpo humano.”(Bustinza, 2020, p.13)

5.1.2 Paramentos del agua para consumo humano

Para que el agua se considere apta para consumo humano los valores deben mantenerse bajo valores máximos aceptables señalados a continuación en la tabla 1.

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Tabla 1. características físicas

Fuente: Resolución N°2115, 2007, p.2

En cuanto a su tipología microbiológica, esta no debe exceder los límites máximos aceptables mostrados en la tabla 2, dichos valores son establecidos con límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) o 1 microorganismo en 100 cm³ de muestra:

Técnicas utilizadas	Coliformes Totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm ³	0 UFC/100 cm ³
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm ³	< de 1 microorganismo en 100 cm ³
Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm ³	0 microorganismo en 100 cm ³
Presencia – Ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

Tabla 2. Características microbiológicas

Fuente: Resolución N°2115, 2007, p6

5.2 Situación de las energías convencionales

El combustible fósil fue a lo largo de todo el siglo XX, y actualmente, nuestra primordial fuente de abastecimiento energético, sin exagerar podemos asegurar que todo el modelo de vida “occidental” gira alrededor de este factor. Basta con tener en cuenta que todo el proceso de sustracción, transporte y refinación del petróleo es la

primera actividad mundial en términos económicos. En un segundo plano se ubica la industria automotriz, estrechamente relacionada con esta

La dependencia del petróleo de la sociedad de la cual formamos parte se evidencia con un dato de Agencia Internacional de la Energía: en 1880 la producción mundial, localizada casi por completo en USA, era inferior al millón de toneladas, para el 2006, la producción supera los 3.500 millones de toneladas.

Es evidente que no nos encontramos ante una crisis más del petróleo, sino ante el fin de una era dominada por las tecnologías basadas en el uso de este. En el planeta el consumo energético diario equivale a 210 millones de barriles de petróleo. De esta cantidad, la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) cubren el 75%, como lo muestra la ilustración 8. Además, este campo es responsable de la contaminación atmosférica que genera calentamiento global. Los Estados Unidos producen solamente el 12% de la producción mundial de petróleo, sin embargo consume el 25% y es el responsable directo de la cuarta parte de las emisiones de CO2 con tan únicamente el 4% poblacional (Alarcón, 2006, citado en Bustinza, 2020, p.33)

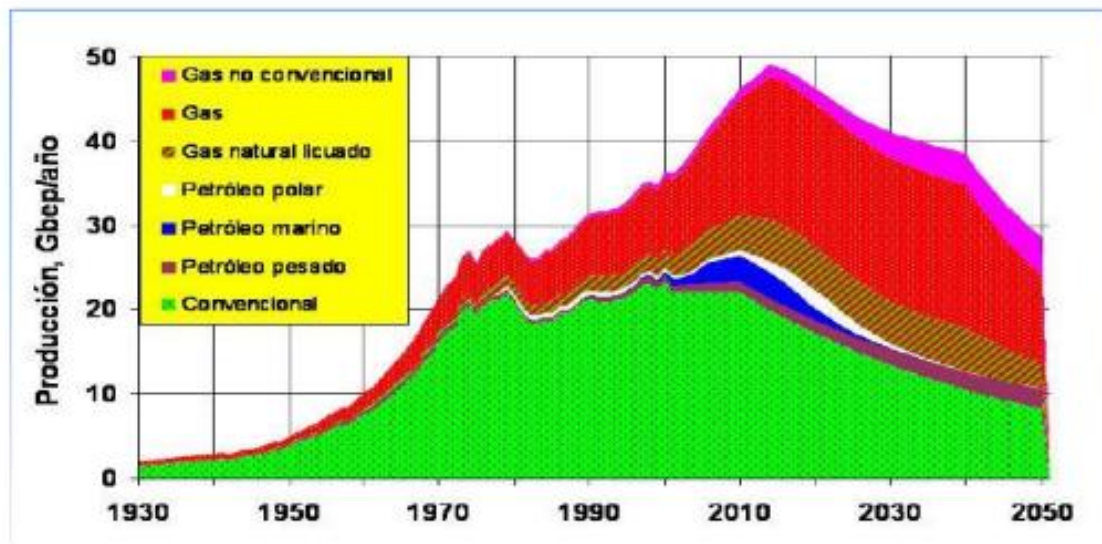


Ilustración 8.: Evolución de producción de combustibles fósiles

Fuente: (Alarcón, 2006, citado en Bustinza, 2020, p.33)

El tema principal de discusión no es sobre cuándo va a “acabar” el petróleo, sino en qué momento se alcanzará el denominado “oilpeak”: instante en el que la demanda va a ser precisamente mayor a la función de producción (limitada por las condiciones de presión internas de los yacimientos). Por otro lado, la utilización masiva de combustibles fósiles tiene asociado el agravamiento del fundamental problema de generación masiva de CO₂, perjudicando a la problemática del calentamiento global como consecuencia directa de su aumento en la atmósfera (producto de la quema de combustibles fósiles). (Alarcón, 2006, citado en Bustinza, 2020, p.34)

5.2.1 Potencial de las energías renovables

Se le conoce como energía renovable a la que, si se administra de forma adecuada, puede explotarse ilimitadamente, lo que significa es que la cantidad que se disponga no disminuirá a medida que se aproveche, dicha energía proviene a partir de fuentes naturales. Una de las principales ventajas es el bajo o casi nulo impacto sobre el medio ambiente.

Aprovechar las fuentes de estas energías representa varios beneficios y dificultades. Estas se ven limitadas por el poco desarrollo de estas mismas, no obstante, en los últimos años se han alcanzado avances tecnológicos notables para esta área, logrando así viabilidad económica. Entre ellas podemos encontrar en la actualidad.

- Energía solar
- Energía eólica
- Energía hidráulica
- Energía de las olas
- Energía de las mareas
- Energía de la biomasa
- Diferencia de temperatura oceánica

En el territorio nacional la electricidad procede un 71,3 % de energía hidráulica y un 27,8 % de plantas térmicas (gas, carbón y diésel). La capacidad instalada es de 16.000 MegaWats (MW), o sea, la porción total de electricidad que el sistema de hoy puede generar. Además de hidroeléctrica y térmica, Colombia tiene 11 MW de energía solar y 19,5 MW de energía eólica, mejor dicho, apenas 0,2 % de la energía procede de fuentes renovables alternativas.

En cuanto a energía solar, el potencial se mide en radiación solar, que se calcula en Kw (KW) hora por metro cuadrado al día. En nuestro país el promedio es de 4,5, cifra que está por arriba del promedio mundial de 3,9. Tanto en La Guajira y como en distintas regiones de la Costa la radiación llega a 6 Kilovatios hora por metro cuadrado.

Beneficios de desarrollar esta clase de energía en Colombia

- Un futuro sin apagones: el 70 % de la electricidad procede de la energía hidroeléctrica. Esta fuente es vulnerable al calentamiento global debido a las sequías. Por tal motivo, el territorio debería diversificar y no depender de una sola fuente; si hay sequía, la energía solar o eólica puede complementar la producción.

- Un futuro limpio: el 30% de la electricidad restante procede de las termoeléctricas que emplean combustibles como diésel, gas o carbón para generarla. Colombia tiene que apostarle a la electricidad sin combustibles fósiles que generan gases de impacto invernadero, responsables del calentamiento global. Fenómenos como El Niño más intensos y recurrentes son una de las protestas más fuertes. (WWF, 2016, p.3-6)

5.2.2 Relación de las energías convencionales y las energías renovables en desalación de agua

La interacción de las energías convencionales y las energía renovables en la desalación del agua, está basada en que al usar energías convencionales necesitan fuentes de energía eléctrica que nace de la quema de combustibles fósiles, el cual es costoso a partir de la perspectiva económico como ambiental, sin embargo las energías renovables se muestran como una de los instrumentos más prometedoras para conseguir resoluciones viables y sostenibles, entre ellas la energía solar en especial, es la más correcta para resolver los inconvenientes de desalinización del agua. El valor del problema de la escasez de agua potable se hace en especial grave en las naciones en vías de desarrollo y del nombrado tercer mundo, siendo además uno de los desafíos más relevantes que tiene la raza humana para mejorar la calidad de vida, aumento y desarrollo económico de un tercio poblacional del mundo (Bustinza, 2020)

5.3 Energía solar

De las más famosas y comunes entre las energías renovables, también llamada energía limpia, y a la que más fácil asemejamos, se obtiene a partir del sol y de su radiación, esta radiación ha sido aprovechada y pudiéndose aprovechar transformándolas en energía eléctrica o térmica.

5.3.1 El sol

Nuestra estrella del sistema solar, el sol, es la fuente de energía más limpia y amigable para nuestro ambiente. La energía que genera en su interior se debe a la fusión de los átomos de hidrogeno fundamentalmente que están a más de 15 millones de grados. Con un diámetro de 1.39×10^9 m y a una distancia de 1.5×10^{11} m respecto a nosotros, y en su interior, en la zona central tiene elevadas temperaturas de entre 8×10^6 a 40×10^6 y la densidad se estima que sea de más de 100 veces la del agua.

El sol genera mediante reacciones nucleares (átomos de hidrogeno) una energía que se debe a la pérdida de masa del mismo sol, y esto se convierte en energía según Einstein con su fórmula de $E=mc^2$. La superficie del sol se conoce como fotosfera, es esta región la que emite la mayor cantidad de radiación hacia el espacio. La energía solar está ligado también a la superficie de la tierra, a sus variaciones metrológicas.

A pesar de que el Sol lleva proporcionando esta energía a lo largo de 6.000 millones de años, todavía existe suficiente proporción de hidrógeno en su núcleo para conservar el ritmo de hoy de disipación energética a lo largo de otros 8.000 millones de años más, al menos, sin cambios significativos en su aspecto o en su comportamiento, por lo cual se puede tener en cuenta como una fuente inagotable de energía.

Ahora bien, no toda la energía que emite el Sol llega a la Tierra, debido a que ésta constituye únicamente un área captadora insignificante, situada a 150 millones de km. Por esto, la potencia interceptada por la Tierra, 173.000 TW, es una sección bastante pequeña de la emitida por el Sol. Aun de esta forma, dicha potencia es

alrededor de 10.000 veces más grande que la que otorgan cada una de las maneras de energía que los humanos emplean en la Tierra.

Se define como constante solar la proporción de energía solar recibida por unidad de área y unidad de tiempo sobre un área perpendicular al Sol situada en el límite de la atmósfera, a la distancia media anual Tierra-Sol. Su costo es de 1.353 W/m² y representa la energía media que llega a la capa más externa de la atmósfera terrestre.

Sin embargo, esta energía corresponde a una radiación electromagnética formada por un grupo de longitudes de onda (λ), cuya rapidez de propagación es de 300.000 km/s. La descomposición de esta radiación origina el denominado espectro solar, el cual se compone por 3 bandas de longitudes de onda, comprendidas entre los próximos valores:

Ultravioleta (UV): $\lambda < 0,35: \mu\text{m}$

Visible: $0,35 < \lambda < 0,75: \mu\text{m}$

Infrarrojo (IR): $\lambda > 0,75: \mu\text{m}$

Cada longitud de onda transporta una cantidad de energía, siendo el valor máximo a $0,47: \mu\text{m}$, es decir, dentro de la zona visible del espectro solar. En conjunto, la radiación visible transporta el 47% de la energía solar, la radiación IR, el 46%, mientras que la radiación UV transporta el 7% restante. (Friedrich, s. f., p.33)

5.3.2 Sistemas de captación de la energía solar

Esta energía muestra 2 propiedades concretas bastante relevantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales: dispersión e intermitencia. Visiblemente, la energía solar es una manera de energía que muestra gran dispersión, debido a que su densidad, en condiciones bastante favorables, difícilmente alcanza 1 kW/m², costo que queda bastante por abajo de las densidades con las que se labora comúnmente en ingeniería. Esto quiere decir que para obtener densidades energéticas altas se requieren, o bien monumentales zonas de captación, o sistemas de concentración de los relámpagos solares.

Sin embargo, la otra característica específica de la energía solar es su intermitencia. Esto provoca que, a la par que se desarrollan instalaciones captadoras de energía, se necesita averiguar los que corresponden sistemas de almacenamiento de la energía tomada.

Todo ello lleva a un replanteamiento en el aprovechamiento y repartición de la energía plenamente diferente al que hoy se estima tradicional, requiriendo la importancia de estos problemas intrínsecos (cuya solución está ligada a cada aplicación concreta) un esfuerzo de desarrollo alto.

De esta forma puesto que, el primer paso para el aprovechamiento de la energía solar es su captación, aspecto dentro del que tienen la posibilidad de diferenciar 2 sistemas de propiedades bastante diferentes: sistemas pasivos y sistemas activos.

Los sistemas pasivos son aquéllos que no requieren ningún dispositivo para captar la energía solar, estando una íntima interacción entre el Sol, el almacenamiento del calor y el espacio, interacción que se consigue por la aplicación de diversos recursos arquitectónicos.

Los sistemas activos se fundamentan en la captación de la radiación solar mediante un factor de unas determinadas propiedades, nombrado colector. Según las propiedades del colector, el aprovechamiento de la energía solar se puede acometer bajo 2 puntos bien diferenciados: la conversión térmica, o aprovechamiento del calor contenido en la radiación solar, y la conversión eléctrica, o aprovechamiento de la energía luminosa (fotones) de la radiación solar para crear de manera directa corriente eléctrica (efecto fotovoltaico).

Paralelamente, la conversión térmica se fundamenta en 3 técnicas que difieren entre sí en funcionalidad de la temperatura que puede conseguir el área captadora. De esta forma, se habla de tecnología de baja temperatura, de temperaturas medias y de altas temperaturas, según que la captación sea directa, de bajo índice de concentración o de elevado índice de concentración, respectivamente. (Friedrich, s. f., pp.4-5)

5.4 Conversión térmica de baja temperatura

La tecnología de conversión térmica a bajas temperaturas comprende todo el calentamiento de agua por abajo de su punto de ebullición para después sustraer

su energía y usarla en distintas aplicaciones. Al grupo de recursos involucrados entre sí, y que se diseña para proporcionar agua caliente a baja temperatura se conoce cómo sistema solar activo a baja temperatura, dentro del cual se debe diferenciar 4 subsistemas:

- Subsistema colector, designado a captar la energía solar. Lo constituye el grupo de colectores, placas solares, captadores o paneles.
- Subsistema de almacenamiento o de acumulación, construido por depósitos de magnitudes correctas, siendo su tarea guardar el agua caliente que procede de los paneles para su uso siguiente.
- Subsistema de repartición, designado a mover el agua caliente a partir del subsistema colector al de acumulación y a partir de aquí a los aspectos de consumo. Se conforma fundamentalmente por redes de tuberías, válvulas, bombas y complementos, que incorporan una instalación tradicional de fontanería.

Subsistema de medida y control, formado por un grupo de recursos que permitan colocar en servicio los diversos circuitos y los que corresponden artefactos de medida

5.5.1 Destilación solar en la naturaleza.

En el medio ambiente se genera la destilación a gran escala en el periodo del agua. Por medio de la energía que aporta el sol, se evapora el agua de los océanos y de otras zonas húmedas, ascendiendo en la atmósfera y desplazándose en estado gaseoso impulsada por las corrientes de aire. Una vez que se otorgan las condiciones idóneas esta agua lleva a cabo el proceso de condensación a modo de pequeñísimas gotas que se quedan suspendidas en la atmósfera conformando las nubes. Si las condiciones siguen siendo correctas continua el proceso de condensación pasando al estado líquido cada vez más proporción de agua y haciéndose las gotas suspendidas cada vez mayores y pesadas hasta el punto de que por gravedad empiecen a caer hasta el suelo produciéndose las precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, etcétera.)

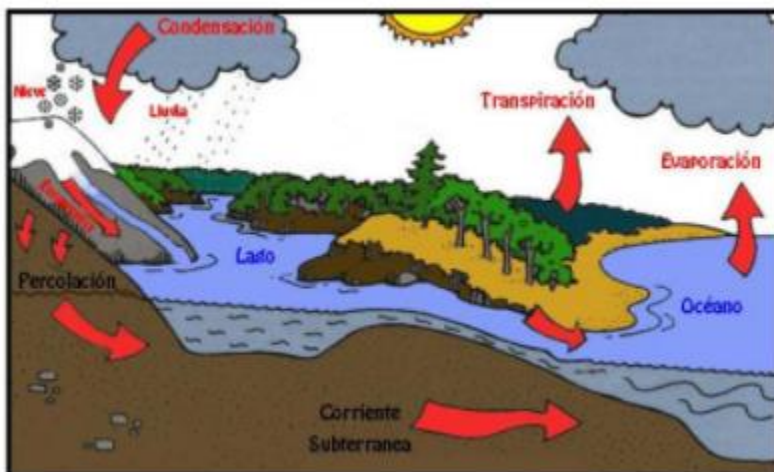


Ilustración 9. Destilador solar en la naturaleza
 Fuente: (EcuadorDocuments, 2015,p.2)

Por este proceso el agua del océano, que está mezclada con una gigantesca proporción de sales y otras sustancias, se separa quedando en un estado básicamente puro que es como cae en la lluvia. Toda el agua dulce que está en las regiones continentales de la tierra es producto de la destilación atmosférica que se genera en el periodo del agua, como lo muestra la ilustración 9. (EcuadorDocuments, 2015, p 3)

5.5.2 Mecanismos de transferencia de calor en destilación

Las formas de transferencia de calor en destilación solar se describen a continuación porque, estos mecanismos ocurren en la purificación de aguas salobres que es el objetivo del trabajo de investigación cuyos conceptos y principios se aplican en el desarrollo del tema. (Bustinza, 2020)

5.5.3 Transferencia de calor en un destilador.

Transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas.

Continuamente que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo humano o entre cuerpos, debería pasar una transferencia de calor. Una vez que existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario que podría ser un sólido o un

fluido se usa el concepto conducción para referimos a la transferencia de calor que se producirá por medio del medio. Sin embargo, el concepto convección tiene relación con la transferencia de calor que ocurrirá entre un área y un fluido en desplazamiento una vez que permanecen a diferentes temperaturas. El tercer modo de transferencia de calor se llama radiación térmica. La cual se basa en el trueque de energía entre 2 zonas a diferentes temperaturas por medio de la emisión de radiación electromagnética. (Bergman et al., 2005)

Aun cuando dichos tres mecanismos de transferencia de calor tienen la posibilidad de tener sitio al mismo tiempo, puede pasar que uno de los mecanismos predomine sobre los demás 2. Ejemplificando, el calor se transmite por medio del muro de una vivienda básicamente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra obtiene calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

De acuerdo con lo muestra la ilustración 10, se puede describir que: La radiación solar incidente Global G, llega al fondo del destilador como energía, esta energía absorbida se transforma en calor. La transferencia de este calor en el destilador solar se lleva a cabo por mecanismos de conducción, convección y radiación.

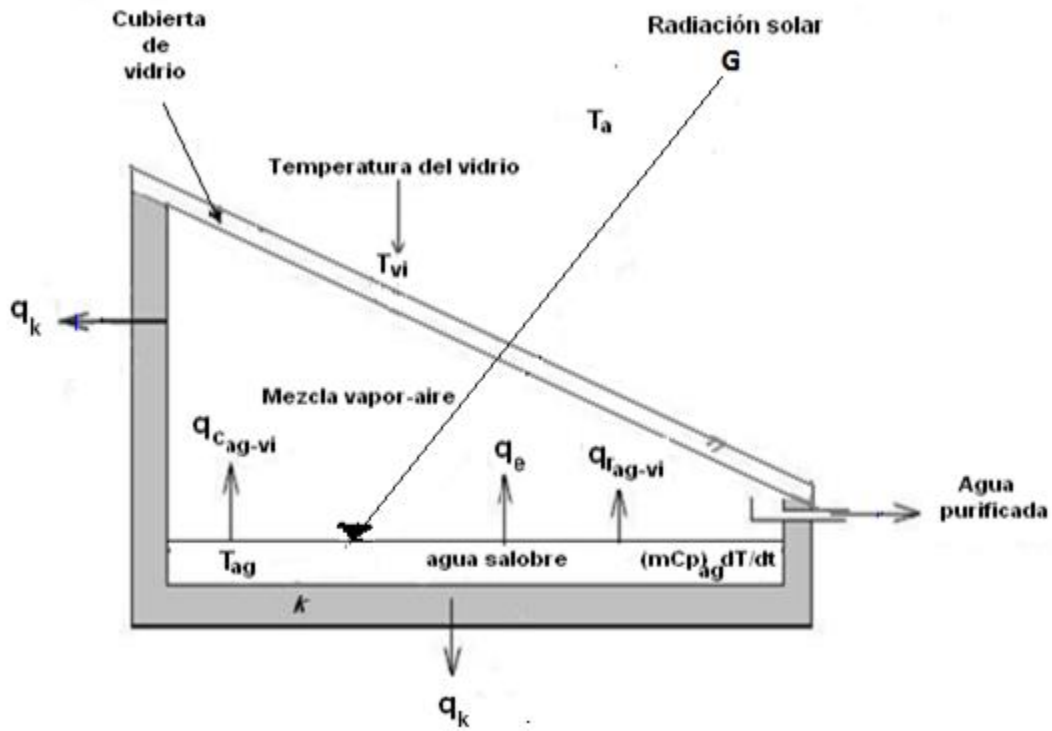


Ilustración 10. Mecanismos de transmisión de calor
Fuente: Bustinza, 2020

Donde:

$q_{r_{ag-vi}}$: Flujo de calor por radiación, W/m^2

$q_{c_{ag-vi}}$: Flujo de Calor por convección, W/m^2

q_e : Flujo de calor por evaporación – condensación, W/m^2

q_k : Flujo de calor por conducción, W/m^2

T_{ag} : Temperatura del agua, K

T_{vi} : Temperatura del vidrio, K

T_a : Temperatura ambiente, K

G_E : Radiación solar global, W/m^2

$(mCp)_{ag} \frac{dT}{dt}$: Energía absorbida en el destilador solar, W/m^2

La evaporación es una operación por la cual, utilizando la aplicación de calor se puede apartar las diferentes sustancias de una composición líquida, basándose en las diferencias de volatilidad, se utiliza usualmente para la desinfección y retiro de líquidos y orgánicos, aprovechando las volatilidades y las altas temperaturas de los componentes líquidos a separar.

Los parámetros a tener presentes en el proceso de destilación son: equilibrio líquido vapor, temperatura, presión, composición y energía, el equilibrio entre el vapor y el líquido de una solución está representado por la relación de moles de vapor y líquido a una temperatura determinada, también puede estudiarse este equilibrio a partir de sus presiones de vapor, la temperatura influye en las presiones de vapor y en consecuencia de la cantidad de energía proporcionada al sistema, también influye en la composición del vapor y el líquido ya que esta depende de las presiones del vapor. (MARTINEZ, 2015 citado por Bustinza, 2020.p. 32)

5.5 Ebullición

Proceso físico en el cual el estado de la materia cambia de fase, en este caso se da entre líquido a gaseoso, este proceso se da cuando el volumen total alcanza en su totalidad el punto de ebullición del líquido a esa presión. El calor que se utiliza para el calentamiento de la masa líquida se denomina calor sensible, y al que se manifiesta durante el cambio de estado se le llama calor latente.

5.6 Ebullición nucleada

El aumento del flujo de calor de ebullición nucleado no puede darse de manera indefinida. El vapor producido puede formar una capa aislante sobre la superficie, que a su vez deteriora el coeficiente de transferencia de calor, cuando se presenta dicha situación se dice que hay " flujo de calor crítico".

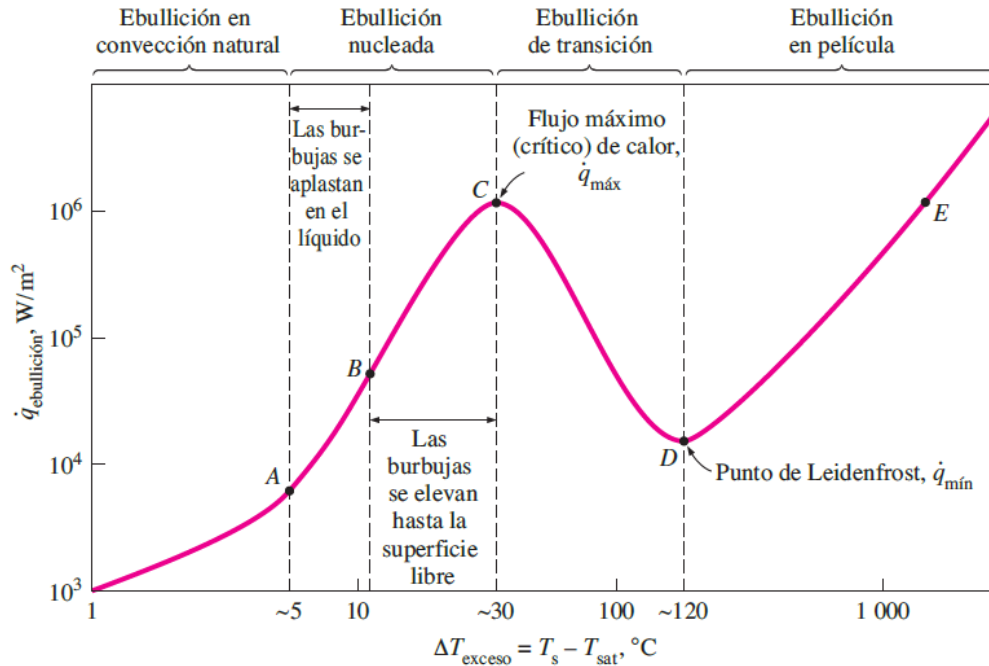


Ilustración 11: curvatura característica en condiciones de 1 atmósfera para la ebullición del agua
Fuente: transferencia de calor yunus cengel

“Las primeras burbujas se empiezan a formar en el punto A de la curva de ebullición, en varios sitios preferenciales sobre la superficie de calentamiento. las primeras burbujas se empiezan a formar en el punto A que reciben el nombre de **comienzo de ebullición nucleada** de la curva de ebullición. Las burbujas se forman con rapidez cada vez mayor, en un número creciente de sitios de nucleación, conforme nos movemos a lo largo de la curva de ebullición hacia el punto C. El régimen de ebullición nucleada se puede separar en dos regiones distintas, con el rango aproximado de 5° Celsius a 30° Celsius. por arriba de la temperatura de saturación. como lo muestra la ilustración 11”

(Cengel, 2011)

La correlación que se usa con mayor amplitud para el flujo de calor en el régimen de bullicio no creada fue propuesta en 1952 por Rohsenow y se expresa como:

$$\dot{q}_{\text{nucleada}} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{c_p(T_s - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3$$

El calor necesario para lograr una ebullición esta expresada como la suma del calor sensible más el calor latente o calor útil: $Q_{\text{ebullición}} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}}$.

5.7 Calor sensible

Se le denomina calor sensible a la energía calorífica suministrada por un cuerpo que hace que su temperatura aumente sin afectar su estructura molecular, es decir lo calienta sin hacerlo cambiar de fase; se ha comprobado experimentalmente que la cantidad de calor necesario para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa y a la diferencia de temperaturas. La diferencia de temperatura que se logra dependerá también del calor específico (C_p) a una presión constante, de la sustancia la cual varía según esta misma.

5.8 Calor latente

El calor latente hace referencia a la energía requerida para que haya cambio de fase, también se conoce como calor escondido y se le denomina así al no poder notarse el cambio de temperatura mientras se produce el cambio de fase, es preciso indicar la temperatura a la que se produce el cambio de fase cuando queremos referenciar el calor latente.

5.9 Procesos de destilación

En la práctica, la destilación puede llevarse a cabo según dos métodos principales. El primer método se basa en la producción de vapor mediante la ebullición de la mezcla líquida que se desea separar y condensación de los vapores sin permitir que el líquido retorne al calderín. Es decir, no hay reflujo. El segundo método se basa en el retorno de una parte del condensado a la columna, en condiciones tales que el líquido que retorna se pone en íntimo contacto con los vapores que ascienden hacia el condensador. Cualquiera de los dos métodos puede realizarse de forma continua o por cargas. (McCabe et al., 1991)

La forma de aportar al ciclo la energía necesaria para lograr el cambio de estado y los sistemas de recuperación del calor latente del vapor al condensarse, diferenciarán unos procesos de otros. Posteriormente se fue complicando el proceso hasta llegar a los evaporadores con varias etapas y recirculación de salmuera, que son los utilizados en la actualidad.

Los procesos de evaporación en este momento se encuentran casi en su techo de desarrollo tecnológico. (Bustinza, 2020)

5.9.1 Destilación solar.

La destilación solar es una operación que permite purificar una solución, basándose en la separación del agua mediante evaporación y la condensación posterior de dicho vapor, reemplazando el uso de energía convencional por energía solar. Cuando en las condiciones predominantes el soluto no es volátil, la destilación se lleva a cabo evaporando el solvente en determinada región de la bandeja y condensando en otra región de esta misma. Por tradición se llama destiladores a los dispositivos que permiten llevar a cabo la desalación. (McCabe et al., 1991)

En el argot de la Ingeniería Química, esta operación se llama simplemente “desalación”; sin embargo, la costumbre ha hecho que en el mundo de la energía solar se conozca como destilación solar (en ingeniería química, el término destilación se aplica a la técnica de sustancias volátiles aprovechando su diferente volatilidad como en el caso de las mezclas alcohol – agua, etc.). (ITESO, 1995)

La destilación solar es una operación de desalación de aguas de mar, salobres, mediante evaporación, utilizando de modo pasivo las energías disponibles en la radiación solar, haciendo uso del efecto invernadero. En el caso de la destilación solar, el sol representa el único requerimiento de energía en este proceso. Las condiciones de equilibrio térmico durante el funcionamiento del destilador solar son tales que la superficie del vidrio de dicho destilador se encuentre a una temperatura más baja que la de la mezcla vapor-aire.

La destilación solar a temperaturas relativamente bajas (47°C – 65°C) resulta ser un sistema muy sencillo, eficiente y de fácil accesibilidad para todo tipo de sociedades. Aplicado de forma masiva podría evitar un buen número de enfermedades en los países pobres producto del consumo de agua en mal estado de conservación, como fuente de calor, la energía solar puede emplearse para destilar. Ya sea concentrándola y alcanzando altas temperaturas o bien a temperaturas bajas.

La aplicación que más ampliamente se le ha asignado a la destilación solar, es la obtención de agua potable a partir de aguas salobres, tal operación se ejecuta de una forma completamente diferente a los otros métodos de purificación. Los otros

procesos tienen el propósito de mantener una razón de producción constante en todas las horas del día y durante las cuatro estaciones del año. La producción obtenida en la destilación solar depende de la incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre.

En la relación entre la temperatura y la presión de vapor de agua se puede verificar que a temperaturas progresivamente superiores a la del ambiente, una pequeña diferencia de temperatura genera un notable aumento en la presión de vapor.

Además del valor de la radiación y de las características constructivas del destilador como: cubierta transparente, material y aislamiento, etc., otros elementos que influyen en el rendimiento total del destilador solar son: la temperatura ambiente, el nivel del agua salobre en el destilador, generalmente de 1 a 100 cm, según las dimensiones de la instalación, la velocidad y la dirección del viento. (Bustinza, 2020,p.34)

5.10 Colector solar

Los colectores solares son aquellos sistemas que trabajan con energía renovable en este caso el sol, con este logran elevar la temperatura del agua que circula dentro de él, este sistema es vital para los calentadores solares, que básicamente están hechos de: un intercambiador de calor, transformando la radicación del sol en una fuente de calor útil, el recipiente del acumulador donde se almacena el líquido a alta temperatura hasta su utilización y de una serie de uniones que están interconectadas , esto con el fin de que se desarrolle el fenómeno de termosifón.

El termosifón es un proceso de circulación natural, dicho ciclo se repite siempre que haya una diferencia de temperaturas en el sistema, el agua se calienta y esto hace desplazar el agua fría haciendo obligar a circular a través de los colectores.

“Estos sistemas pueden ser de placa plana, tubos evacuados o de concentración. El diseño del captador de placa plana se basa fundamentalmente en las propiedades y características de los elementos que lo conforman, el mismo está formado por una placa plana delgada que está unida a una serie de tubos paralelos interconectados entre sí en forma de

radiador, cuya superficie comúnmente es negra colocada de manera conveniente hacia el sol en una estructura resistente de metal, una cubierta superior transparente y en su interior tiene la placa absorbidora así como aislante térmico a su alrededor con el fin de minimizar las pérdidas de calor con el ambiente, en la figura 1 se muestra un captador solar”. (Rodríguez Mejía, López Montegudo, & Araiza Esquivel, 2016)

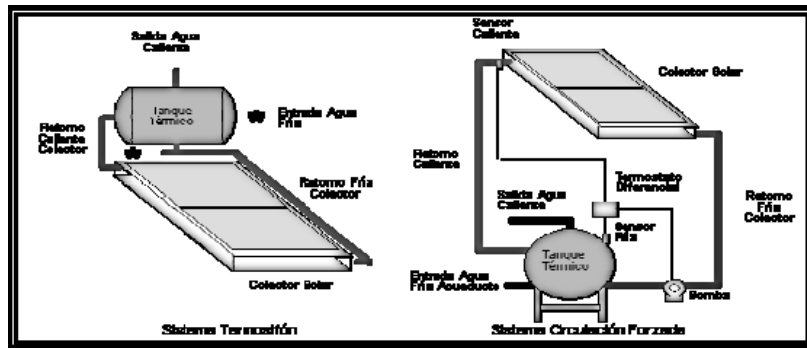


Ilustración 12. Colector solar

Fuente: Aprotec, calentador: 222.aprotec.com.co/pages/solra_term.html.

Por motivos de diseño, el depósito del tanque no siempre se debe ubicar por encima del nivel superior del colector, ya que el agua debe ser obligada a navegar por los colectores por medio de una bomba, como lo muestra la ilustración 12. La circulación se produce únicamente si la temperatura del colector es mayor a la del tanque.

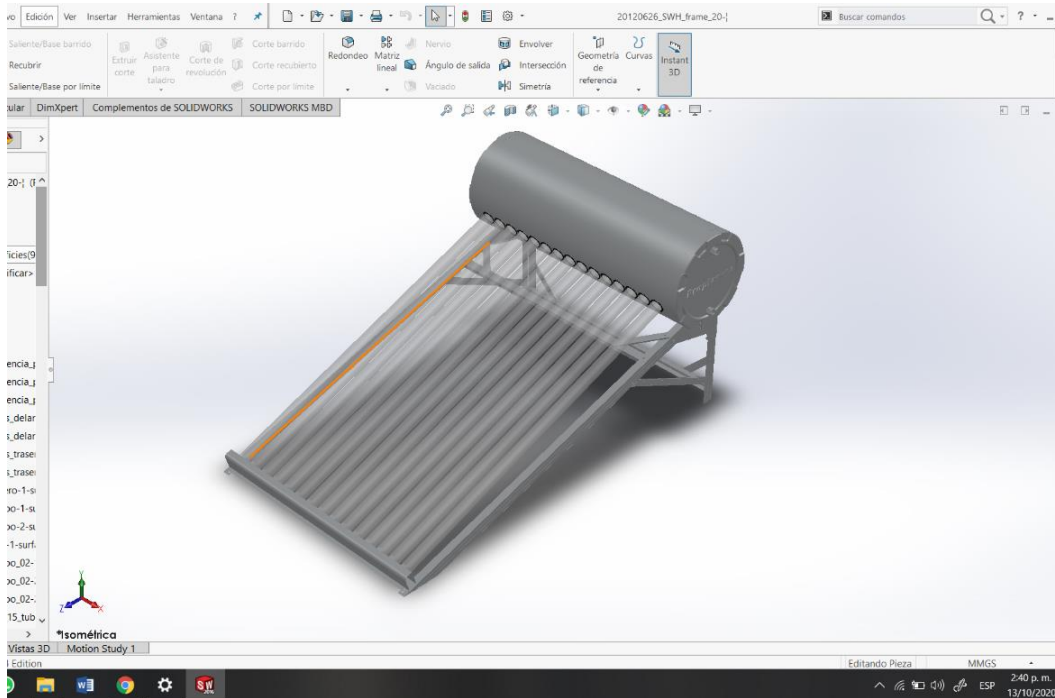


Ilustración 13. Colector solar

Fuente: autores

5.11 Eficiencia

La eficiencia o rendimiento de un destilador esta expresada mediante el cálculo del producto entre la cantidad destilada y el calor latente de la evaporización, dividido entre la irradiación como lo muestra la ecuación. (C. Esteban j. F., 2002)

$$n = \frac{(W * h_{fg})}{(H_t * A)} * 100$$

$$\eta = \frac{W * h_{fg}}{H_t * A} * 100$$

Ecuación 5.1: Eficiencia de un destilador

Donde;

md es el flujo másico de volumen destilado en un día(kg/segundo)

hfg es el calor latente de evaporación del agua (KJ/KG)

Ht es la radiación solar sobre la superficie (KJ/m2)

A es el área del evaporado (m2)

Para la destilación del agua se usará la evaporación natural por elevación de temperatura como primer proceso, esto sucederá una vez se rompa la tensión superficial gracias a la energía que gana. Al llegar a su estado gaseoso pasa por el proceso natural de condensación que será el último proceso, cambiando de estado gaseoso a líquido, dicha agua está compuesta de unidades de, moléculas de H₂O; aquella que se le han eliminado en gran cantidad sus impurezas e iones mediante la destilación.

Este primer proceso se logra alcanzando el punto de ebullición del agua, sobre el nivel del mar se da a 100 grados Celsius y con una presión atmosférica de 760mmHg.

Para Bucaramanga que se encuentra a una altitud de 959 metros sobre el nivel del mar, recurrimos a la ecuación:

$$\text{pat.sitio}=14.7\text{psi}-[0.0016*\text{altura geografica(m)}]$$

Ecuación 5.2: presión atmosférica de un sitio.

Entonces;

$$\text{Pat.sitio}=14.7\text{psi}-[0.0016*959\text{m}]$$

$$\text{Pat.sitio}=13.1656\text{psi}$$

La presión atmosférica de Bucaramanga es 13.1656psi que al convertirlos son 680mmHg.

Teniendo esto encuentra encontramos que la temperatura de ebullición del agua para Bucaramanga esta entre los 97 grados Celsius

Destilador solar.

“El principio de funcionamiento es como sigue: Durante el funcionamiento la radiación solar atraviesa la cubierta y se absorbe en el agua y en el material del fondo del destilador. La energía absorbida calienta el agua salina y la bandeja, y ésta transfiere calor al agua, produciéndose su evaporación, e incrementando la

humedad del aire cercano a la superficie del agua, lo que genera corrientes conectivas dentro del destilador. El aire húmedo y caliente sube hacia la cubierta de vidrio, donde parte del vapor de agua se condensa en la superficie interior de la cubierta de vidrio, que, enfriado por el aire exterior, esto favorece su condensación y permite el escurrido o deslizamiento del condensado hasta la canal de recolección ya como agua destilada desprovista de sales, y de ésta a un depósito convenientemente protegido de la contaminación ambiental, quedando las sales concentradas en el fondo. El aislante térmico reduce las pérdidas caloríficas al medio. El vapor condensado debe quedar libre de sustancias contaminantes.” (Fonseca Fonseca, Brito Sauvanell, Andión Torres, & Perdomo, 2009)

5.12 Clases de destiladores

Actualmente existen diversos tipos de destiladores solares, que varían en tamaños, formas, mantenimiento y en su eficiencia, pero su principio físico y forma de trabajar son semejantes, entre ellos tenemos:

5.12.1 Destilador tipo cascada.

Se identifica fácilmente por tener una charola en forma de escalera por niveles, como lo muestra la ilustración 14, por lo que facilita la orientación promedio hacia el sol para aprovecharlo mejor ya que permite que los rayos caigan perpendicularmente en la superficie por lo que logra un área efectiva mayor, otras de sus ventajas de este diseño es la misma inclinación, ya que facilita la convección del aire húmedo en su interior, que sube al ser evaporado por el colector y baja al condensarse.

Esta charola serán bandejas múltiples a diferentes niveles las cuales presentarán la misma tonalidad negra para ayudar a elevar la temperatura, las cuales les encuentran dentro de una cubierta transparente en un envase aislado.

Lo complicado viene estando en la alimentación, ya que al ser una cascada debe ingresar en el primer nivel y rebosar para pasar al siguiente, y así hasta el final, y esta acción, de escurrir al siguiente nivel y las salpicaduras pueden hacer que se derrame un poco y contamine ya el destilado que se encuentra en la parte de abajo. (Hermosillo Villalobos, 1989)

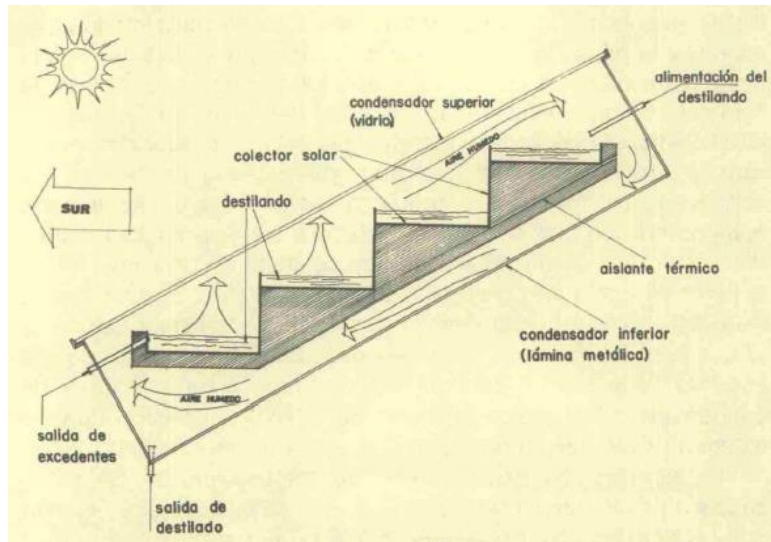


Ilustración 14. Destilador tipo cascada

Fuente: HERMOSILLO VILLALOBOS, Juan José: Destilación solar. Guadalajara. 1989.

5.12.2 Destilador solar tipo caseta.

Son los destiladores más conocidos además de eso se cuenta con dos diseños los cuales, uno en el cual tiene solo una vertiente para la condensación, y el otro con dos, en forma de techo, consisten en una cubierta de material semitransparente, generalmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja que contiene agua contaminada, es muy común verlos para usos familiares ya que maneja volúmenes más pequeños de agua destilada.

Este tipo es de los más sencillos de construir y operar, pero no el más eficiente debido a su simplicidad y a sus pocas partes importantes, que sería el colector, el condensador que además recolecta el vapor condensado y la canaleta.

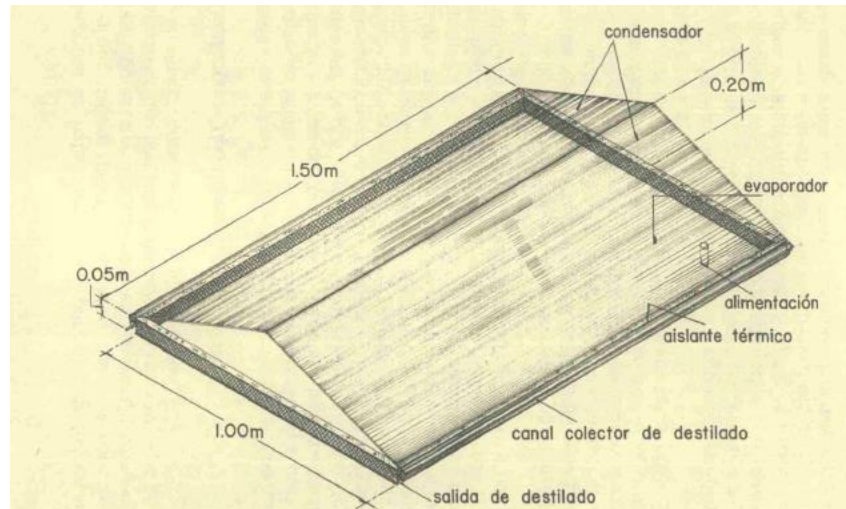


Ilustración 15. Destilador tipo caseta doble vertiente

Fuente: HERMOSILLO VILLALOBOS, Juan José: Destilación solar. Guadalajara. 1989.

Cuanta con un principio muy sencillo, la bandeja que tendrá una tonalidad negra va a contener el agua contaminada y la radiación solar pasa a través de la caseta, ya sea la sencilla o la doble, como lo muestra la ilustración 15 y 16, haciendo que se caliente el agua y gracias al color negro aumentamos esto, una vez alcance la temperatura de ebullición el vapor se eleva hasta que entra en contacto con el vidrio donde puede condensarse alcanzando la temperatura de rocío, estas gotas condensadas se deslizan por el vidrio inclinado hasta el recolector.

“Estos equipos cuando tienen láminas de agua de 1.5 a 2 cm de espesor, bajo condiciones de alta insolación, baja temperatura del aire ambiente y vientos apreciables (2m/s o más) llegan a producir hasta un máximo de 3 a 5 L de agua destilada por cada metro cuadrado de superficie cada día, en el caso de destiladores de una sola pendiente la producción se encuentra entre 1 y 4 litros por cada m² de superficie.” (Pinzon & Colmenares, 2008)

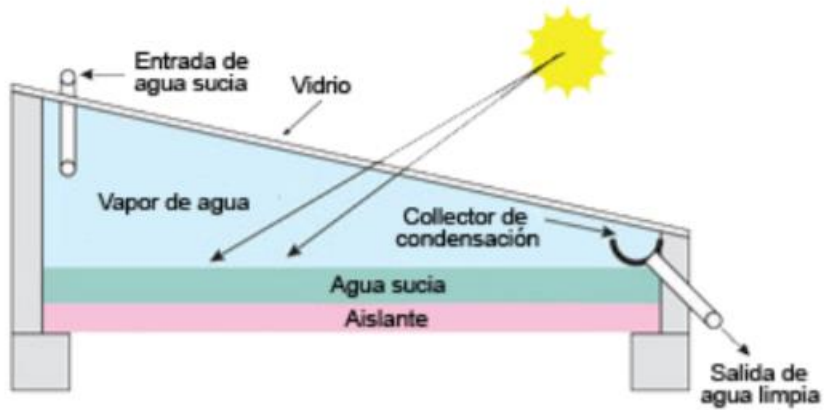


Ilustración 16. Destilador tipo caseta única vertiente

Fuente: Raquel Carolina Flores Nicolalde; diseño y construcción de un prototipo de destilador de agua, utilizando energía solar. quito 2015

5.12.3 Destilador solar esférico

Este funciona de manera similar al tipo caseta, con la diferencia que este posee una forma esférica, este utiliza un limpiador que gira dentro para facilitar el escurrimiento. Por ende, las gotas de agua que condensan en la superficie interior de la cubierta superior son barridas por el limpiador y dirigidas hacia el hemisferio inferior a través de un espaciamiento entre el recipiente y la esfera envolvente, como lo muestra la ilustración 17. (ZAMBRANO, JUNIO 2017)

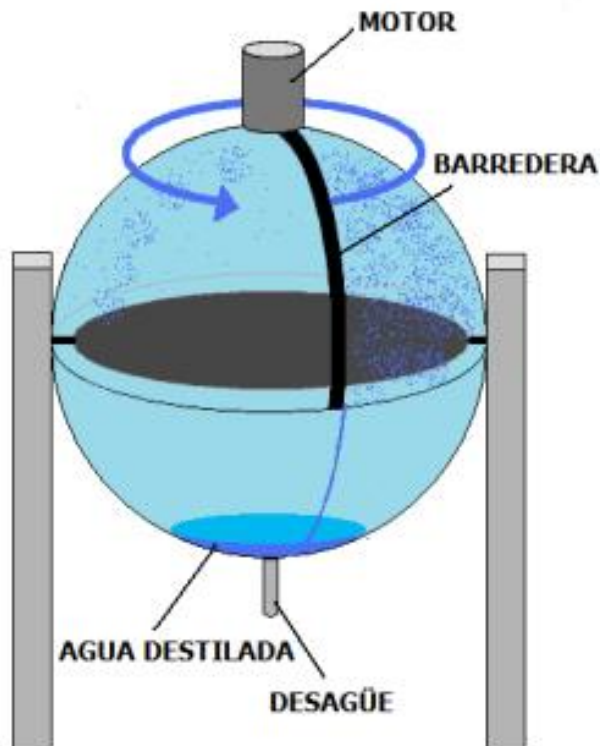


Ilustración 17. Destilador tipo esférico

Fuente: JOSSELYN K. INTRIAGO BASURTO DENISSE E. ZAMBRANO SOLORZANO; REPOTENCIACIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR PARA AGUA SALINA POR MEDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y CONDENSACIÓN FOTOVOLTAICA. CALCETA, JUNIO 2017

5.12.4 Destilador solar tipo chimenea.

Este destilador tiene una chimenea localizada en uno de los costados de dispositivo. En dicha chimenea se aloja un intercambiador de calor, el flujo de salmuera recorre el intercambiador de calor hasta llegar al punto donde se encuentra el destilador. Alguna cantidad del vapor obtenido por el efecto de la radiación solar se transporta hacia la chimenea, al entrar en contacto con las aletas extremas del intercambiador se condensa. El destilado se deposita en la base de la chimenea para después ser extraído, como lo muestra la ilustración 18. (KATHERINE, JUNIO 2017)

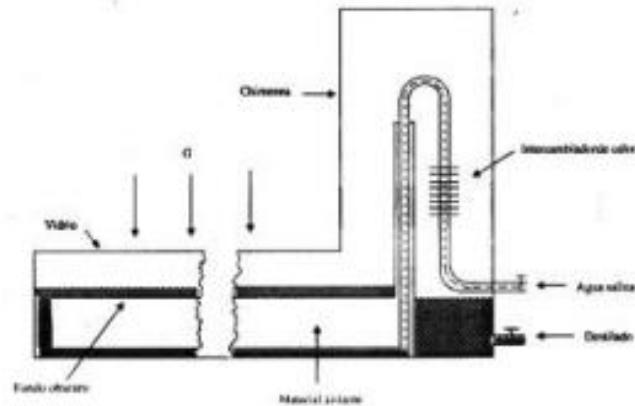


Ilustración 18. Destilador tipo chimenea.

Fuente: JOSSELYN K. INTRIAGO BASURTO DENISSE E. ZAMBRANO SOLORZANO; REPOTENCIACIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR PARA AGUA SALINA POR MEDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y CONDENSACIÓN FOTOVOLTAICA. CALCETA, JUNIO 2017

5.13 Balance térmico en un destilador solar

Existen dos maneras de realizar el análisis del balance térmico de un destilador solar: desde el punto de vista termodinámico y el punto de vista de los principios de la transferencia de calor. Dentro del análisis termodinámico se considera al destilador como un conjunto en equilibrio, en el cual la cantidad de calor aprovechado para que el proceso de destilación se realice, es igual a los cambios de energía del fluido de trabajo. En cuanto al análisis por transferencia de calor, se tiene en cuenta los mecanismos por los cuales se presentan los flujos de energía, y en base a estos se evalúa la cantidad de calor transferido entre los diferentes medios y superficies del destilador.

Balance en la cubierta. Está definido por la sumatoria de flujos de calor y energía sobre la cubierta definida, definido en la ecuación 5.3

$$q_{\text{entrada}} \cdot A = q_{\text{c}} \cdot A + q_{\text{r}} \cdot A + Q_{\text{util}}$$

Ecuación 5.3: balance de la cubierta.

El calor de entrada q_{entra} puede definir por la ecuación 5.4

$$q_{entra}=G_s*\alpha_s$$

Ecuación 5.4: calor de entrada.

Donde; G, es la radiación solar (W / m), α_s , es la absorptividad.

El calor de salida es la sumatoria del calor por convección que, por radiación q_r , y del calor útil Q útil. que se expresan en las ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7

$$q_c=h(T_\infty-T_s)$$

Ecuación 5.5: Calor convección.

Donde; h es el coeficiente por convección (W / m * K), T, es la temperatura del ambiente (K) y T, es la temperatura en la superficie (K).

$$q_r=\epsilon*\sigma([T^4]_s- [T^4]_\infty)$$

Ecuación 5.6: Calor por radiación.

Donde; m es la emisividad y σ es la constante de Stefan Boltzmann (W/m² K⁴)

$$Q_{util}=m *h_{fg}$$

Ecuación 5.7: Calor útil.

Donde; m es el flujo másico (Kg /s) y h_{fg} es la entalpia de vaporización (KJ / Kg).(Colmenares & Pinzon, 2008, pp.27-28)

5.14 Comparación entre diferentes tipos de destiladores solares

Tipo	Autores	Especificaciones	Resultados experimentales	Comentarios
Destilador solar con colector de placa (circulación forzada)	Rai <i>et al.</i> , 1990 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Angulo de inclinación: 45° Flujo: 1,15kg·min ⁻¹	Máxima producción de destilado: 6,75kg·m ⁻²	Requiere bombas para suministro de agua Debe considerarse el consumo de electricidad para el funcionamiento de la bomba Problemas operacionales pueden ocurrir durante el proceso
Destilador solar con colector de placa (circulación natural)	Badran y Al-Tahameh, 2005 (Omán, Jordania)	Área: 1x1m Angulo de inclinación: 35°	Máxima producción de destilado: 3,50kg·m ⁻² Angulo óptimo de inclinación de 10° para la estación de otoño de Jordania	Fácil de operar Menor productividad en comparación con el de circulación forzada
Destilador solar de doble efecto	Kumar y Tiwari, 1996 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Angulo de inclinación: 15° Flujo: 40ml·min ⁻¹ Espacio entre las dos cubiertas de vidrio: 20cm Bomba: 0,2HP	Producción de destilado: 7,5L/día operando bajo el modo activo Alternando la operación con modo pasivo y activo, la producción de destilado fue de 2,2-3,9L/día.	Fácil operación y mantenimiento La operación bajo el modo 'doble efecto' no mejora la producción diaria de destilado por la dificultad para mantener caudales bajos y uniformes sobre las cubiertas de vidrio
Destilador solar de regeneración activa	Tiwari y Sinha, 1993 (Nueva Deli, India)	Área: 1m ² Flujo: 0,20kg·seg ⁻² Emplea intercambiador de calor	Rendimiento máximo: 1; 0,7; 0,3 y 0,02kg·m ⁻² para 13h de operación bajo modos de regeneración activa, no activa, pasiva y no pasiva, respectivamente	Alto costo inicial Diseño y operación compleja Requiere personal especializado Posibles pérdidas en el intercambiador
Destilador solar con colector de placa paralelo	Yadav y Prasad, 1995 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Longitud del colector de placa paralelo: 1m	Producción máxima: 0,250kg·m ⁻² Se registró temperatura máxima del agua de 69°C	Diseño simple comparado con destilador acoplado a colector de placa, sin embargo su productividad es menor
Destilador solar vertical acoplado a colector de placa	Kiatsirirot <i>et al.</i> , 1987 (Bangkok, Tailandia)	Área: 1,52x1m Área de colección: 1,4m ² Angulo de inclinación: 15°	Optimización del proceso con 5 placas de evaporación para una producción de destilado de 50kg·h ⁻¹	Requiere de bombas Alto costo de operación comparado con otros que emplean colectores de placa Pocas investigaciones reportadas
Destilador solar acoplado a concentrador parabólico	Zeinab <i>et al.</i> , 2007 (Giza, Egipto)	Diámetro tubo de cobre: 0,0095m Longitud tubo de cobre: 14,4m Área: 1m ² Área de colección: 80cm de largo y 0,04cm de espesor	Producción: 2,75L/día	Más económico que destilador de tipo convencional Posee un mayor número de partes en comparación con otros sistemas
Destilador de doble efecto acoplado a concentrador parabólico	Bhagwan y Tiwari, 1996 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Área concentrador parabólico: 1x1m Longitud del concentrador: 1m Modo de circulación forzada Flujo: 0,0027kg·s ⁻¹	Rendimiento máximo: 14,7kg/día Disminución de la producción por pérdidas de agua Concentrador ajustable manualmente para aumentar la radiación solar	Mayor rendimiento en comparación con colectores de placa, por mayor concentración de la radiación solar Altos costos de mantenimiento y operación Mantener la temperatura de la cubierta de cristal es crucial para lograr alta eficiencia

Destilador solar de regeneración acoplado a concentrador parabólico	Kumar y Sinha, 1996 (Nueva Deli, India)	Área: 1m ² Espesor aislamiento: 0,004m Área concentrador parabólico 0,086m ² Flujo: 0,05kg·s ⁻¹ Velocidad del viento: 5m·s ⁻¹	Producción: 8,2L/día La eficiencia térmica del destilador con concentrador parabólico acoplado es mayor que el colector de placa plana	Proceso más complejo trabajando con flujo constante de agua Requiere bomba para recirculación de agua No es adecuado para ser aplicado en comunidades rurales Alto costo de capital en comparación con otros destiladores solares
Destilador solar acoplado a tubos colectores	Tiwari <i>et al.</i> , 2007 (Nueva Deli, India)	Área: 1m ² Masa de agua: 50kg Área tubo colector: 2m ² Flujo: 0,035 kg·s ⁻¹	Producción: 4,0kg·m ⁻³ /día Eficiencia térmica: 17%	Opción más viable para calentamiento y destilación simultánea de agua
Destilador solar multietapa	Ahmed <i>et al.</i> , 2009 (Kualalumpur, Malasia)	Número de etapas: 3 Recirculación de agua salobre a través de una bomba	Producción máxima: 14,2kg·m ⁻³ /día	Mayor productividad comparado con otros El diseño cilíndrico en términos de seguridad y flexibilidad es más ventajoso comparado con el diseño rectangular Costo del galón de agua destilada de \$0,026
Destilador solar multiefecto	Abdel, 2006 (Egipto)	Área de colección: 1m ² Dimensiones cámaras de destilación: 187x118x160cm.	La destilación se basa en procesos de humidificación/deshumidificación Se colectan 24L/día de destilado empleando dos cámaras de condensación	Aplicación en pequeñas unidades (hoteles, áreas rurales, industrias pequeñas) Costos de capital y operación altos Requiere de mano de obra calificada
Destilador tipo burbuja de aire	Pandey, 1984 (Nueva Deli, India)	Área: 0,67m ² Ángulo de inclinación: 10°	Incremento de producción de destilado: 7,1% empleando burbujas de aire; 34% con burbujas de aire seco; 48% con burbujas de aire seco más enfriamiento con cubierta de vidrio, y 31% empleando solo enfriamiento con cubierta de vidrio	Diseño y construcción simple Requerimientos de energía para el funcionamiento del motor
Destilador solar híbrido o de tipo invernadero	Voropoulos <i>et al.</i> , 2004 (Grecia)	Área de colección: 5x2,5m Tanque con capacidad de almacenamiento de 3750L Profundidad del agua: 5cm	Producción de 36, 57 y 75% de agua destilada para tanque de almacenamiento de 0,5; 0,25 y 1L, respectivamente, con suministro de energía de 1990, 3300 y 5200MJ	Producción simultánea de agua caliente y destilado Diseño y operación simple
Destilador con precalentamiento del agua	Tiwari y Madhuri, 1985 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m	Producción de destilado de 0,5kg·m ⁻² ·h ⁻¹ con flujo de 0,006kg·s ⁻¹ Aumento en la eficiencia de producción de destilado al incrementar la temperatura del flujo de agua	Fácil de operar y mantener Mayor tasa de producción en comparación con los destiladores simples

Ilustración 19. Comparación entre diferentes tipos de destiladores solares

Fuente: Aldana et al., 2011

6. MODIFICACION POSPANDEMIA

Debido a la pandemia presentada como SARS-CoV-2. También conocida como covid-19 donde su primer caso fue reconocido en el año 2019 en el país de china en la ciudad de Wuhan, causando una neumonía con síntomas de gripe, donde incluía también diarrea tos y fiebre, en donde en caso de agravarse presentaba insuficiencia respiratoria.

En Colombia se presentó el primer caso de COVID-19 el 6 de marzo en Bogotá oficialmente, Posteriormente se presentaron unos cierres dentro del país, incluyendo a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga (UPB) en donde el martes 17 de marzo del 2020 ya no se requería la presencialidad dentro de la institución.

Se presento la idea del anteproyecto al comité, el día 5 de mayo y por motivo de la pandemia se tuvo un retraso en la aceptación. La aprobación por parte del comité se realizó el día 17 de junio, sin embargo, como estaba estipulado en el anteproyecto “Estudio comparativo de un destilador solar hibrido y uno convencional”, se haría uso del calentador solar que posee la institución ubicada inicialmente en el edificio K y posteriormente llevado al centro de desarrollo tecnológico (CDT) para su almacenamiento.

Siendo el calentador solar una parte esencial para cumplir con los objetivos estipulados anteriormente, como lo es la fabricación el destilador solar hibrido y su comparación en resultados con el destilador convencional, se tuvieron percances que involucraban el tiempo en donde se esperó una respuesta por la institución para el ingreso y hacer uso del dispositivo para acelerar las tomas de mediadas y así empezar con la fabricación.

Al evidenciar que la situación de la pandemia no mejoraba, junto al director del proyecto se decidió cambiar los objetivos de diseñar y construir por simular por medio del software ANSYS y analizar datos teóricos, en donde se ejecutan las condiciones necesarias, así como materiales, posición geográfica etc., para tener datos necesarios para lograr comparar las eficiencias de forma teórica

7. METODOLOGIA Y PROCESO DE DISEÑO

En este apartado se evidenciará los ítems que se tomaron en cuenta para el destilador. Donde este proyecto busca como finalidad el diseño, construcción y comparación de dos destiladores, uno de ellos será apoyado por medio de un acumulador solar (hibrido), y otro será uno convencional. Con la característica de contengan componentes con un bajo precio para su construcción, haciéndolo económico, ayudando para la construcción de nuestro destilador, y a la vez manteniendo una facilidad de fabricación optima.

Tenemos 3 conceptos de diseño previstos para escoger el más apropiado para nuestro proyecto; se parte de investigaciones previamente realizadas para determinar características y datos que nos servirán para el proyecto, entre ellos se encuentran como lo muestra las ilustraciones 20, 21 y 22.

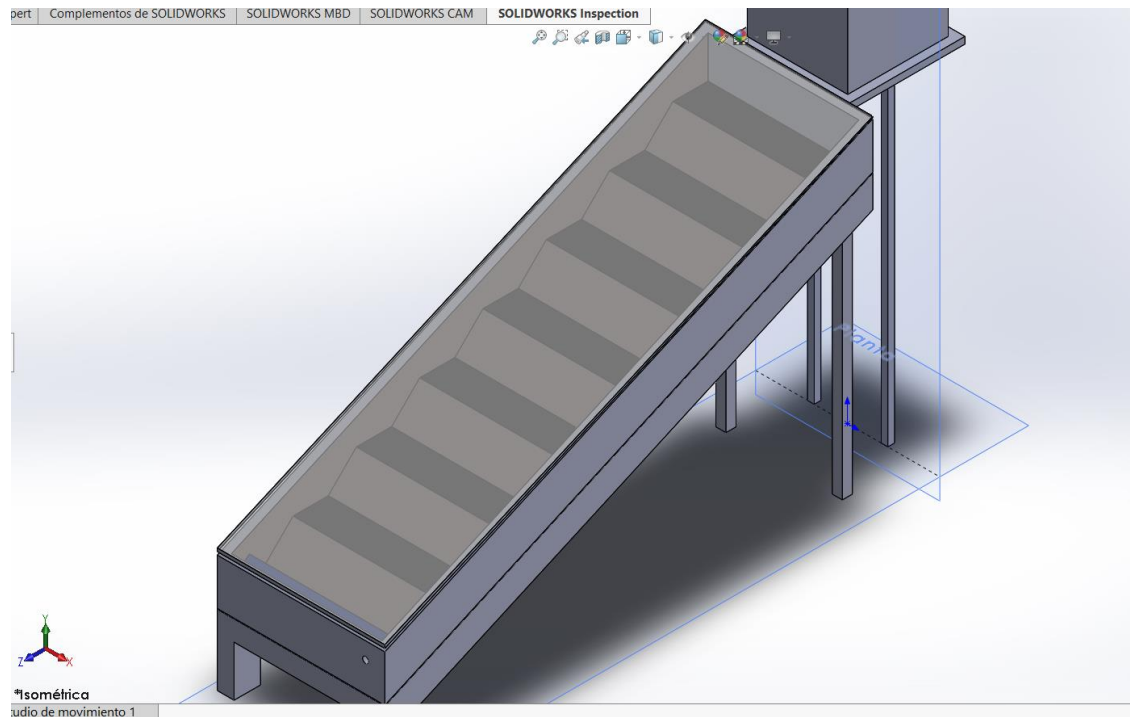


Ilustración 20: Destilador tipo cascada.

Fuente: Autores.

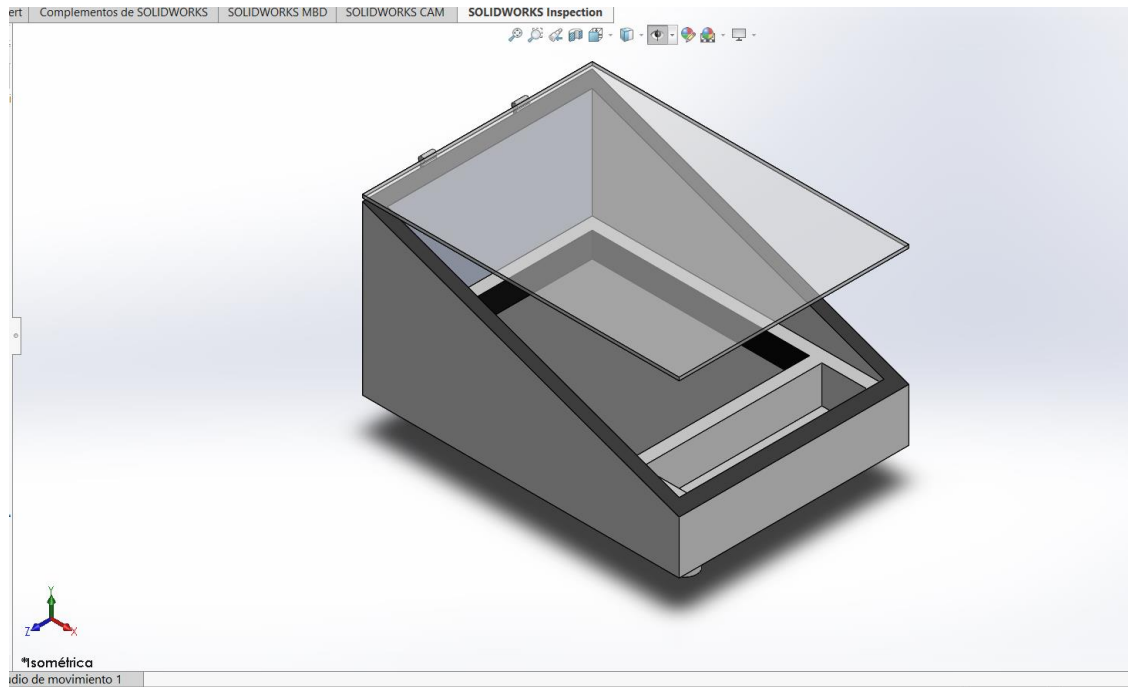


Ilustración 21: Destilador tipo caseta una vertiente.

Fuente: Autores.

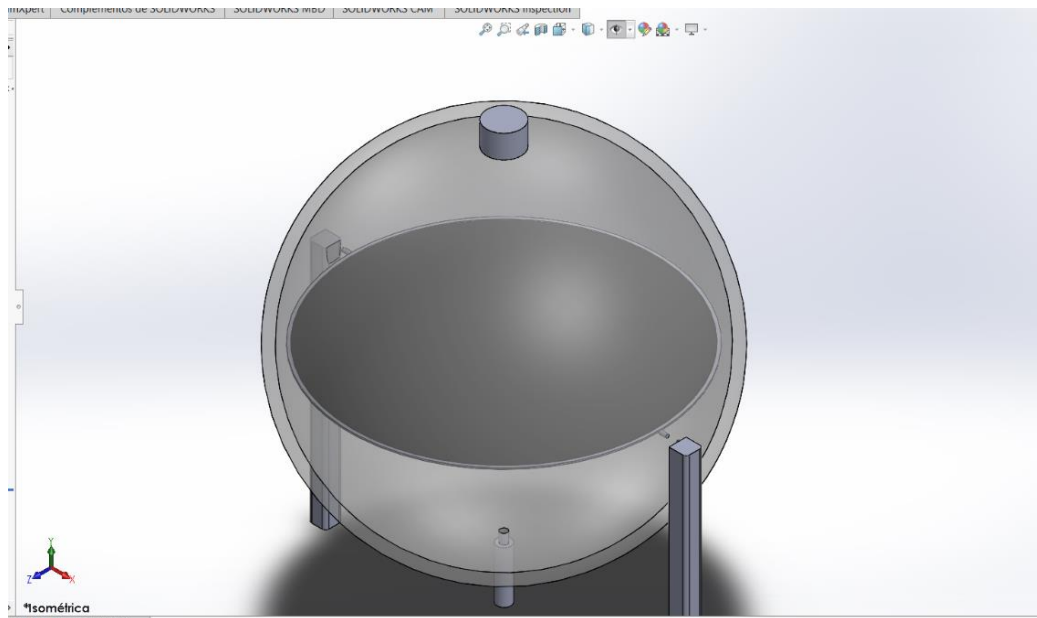


Ilustración 22: Destilador tipo esfera.

Fuente: Autores.

Para ello lo basamos en la información presentada en la siguiente tabla #3, la cual se elabora considerando aspectos claves para la selección de dicho destilador, teniendo en cuenta la información recolectada.

Matriz de selección

Nota: Se da un valor de 1 a 10 siendo uno el mínimo y 10 el máximo.

Nombre	Eficiencia	Mantenimiento	Facilidad de Fabricación	Vida útil	Total
Destilador solar tipo cascada.	10	8	6	10	34
Destilador solar tipo caseta	8	8	10	10	36
Destilador solar tipo esférico	8	5	5	6	24
Destilador solar tipo chimenea	9	6	4	10	29

Tabla 3: Tabla comparativa

Fuente: Autores.

En base a esto se determina realizar el destilador de tipo caseta, como se indica, ya que es el que obtiene el mejor resultado respecto al análisis de parámetros.

Los destiladores solares reciben su energía de la radiación solar, la cual se transfiere por el vidrio hasta la base del destilado y desde el fondo se transforma en energía térmica, una parte hace evaporar el agua y mientras que otra se pierde en el medio debido a las paredes; consideraremos nulas las pérdidas de masa, al asumir nulas cualquier tipo de fuga en el equipo.

Para este tipo caseta se decide por adaptarle una pendiente de 20 grados para el vidrio superior, (Colmenares, 2008) esto nos ayuda a que las gotas que se condensan en el vidrio se deslicen con facilidad a la bandeja recolectora, también se tiene en cuenta pintar con un recubrimiento el fondo de la bandeja para aumentar la captación de la irradiación proveniente del sol, también por ultimo pero no menos importante, el uso de materiales aislantes como fibra de vidrio (Duct Wrap), esto para reducir las pérdidas de energía.

Cálculo de área del destilador

Para encontrar el área del destilador es necesario tener un dato de partida, en este caso el dato de partida será el volumen deseado a destilar, el cual será de, Vd: 200 mililitros en el transcurso de un día, y ya que, Según el atlas, en Bucaramanga, Colombia se obtiene un promedio entre 3.5 KWh/m² y 4 KWh/m², están dadas entre las 09: 30a.m y las 2: 30p.m, que es el tiempo en donde la irradiación solar es mayor, más critica. (ver anexo A)

Una vez se obtiene el área del destilador o de la charola se procede a dimensionar las demás partes, entre otras como el área del vidrio, que será útil para otros cálculos, como sería el de un cálculo energético.

El calor imprescindible para la ebullición nucleada esta denominado por la suma de los calores sensibles y latentes, ver ecuación 6.2 y 6.3, esta es usada para elevar la temperatura y se dé el cambio de fase, como lo muestra la ecuación 6.1.

$$\dot{Q}_{ebullicion} = \dot{Q}_{sensible} + \dot{Q}_{latente}$$

Ecuación 6.1: Calor de ebullición.

Donde:

$$\dot{Q}_{sensible} = \dot{m}C_p\Delta T$$

Ecuación 6.2: Calor sensible.

Y,

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{latente} = \dot{m}h_{fg}$$

Ecuación 6.3: Calor latente.

Donde;

Donde ΔT es la resta entre las temperaturas del líquido en medio ambiente y la temperatura de saturación.

\dot{m} , es el flujo masico dado en unidades. $[\frac{kg}{s}]$

C_p , representa el calor especifico en el líquido (agua)

h_{fg} , representa la entalpia de la evaporación con respecto de la temperatura, en este caso del agua, y está dada en [kJ/kg] (GHAJAR, 2011)

Luego;

$$\dot{m} = \frac{Vd * \rho}{t}$$

Ecuación 6.4: Flujo masico.

V_d ; va a representar el volumen que se quiere conseguir al final, ρ es la densidad del agua y t es del tiempo en la producción (GHAJAR, 2011)

Remplazando la ecuación 6.4 tenemos que:

$$\dot{m} = \frac{2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 * 958 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{18000 \text{ s}} = 1.064 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Y de la ecuación 6.3 se obtiene.

$$\dot{Q}_u = 1.064 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) * 2257 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 0.02402 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_u = 24.02 \text{ W}$$

Una vez obtenido el calor útil se puede proceder con un balance energético del cual al despejarlo obtendremos nuestra área.

$$E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} = 0$$

Ecuación 6.5: Balance de energía.

Remplazando la ecuación 6.5 se tiene que:

$$I_h * \alpha_s * A = A * q_{\text{conv}} + A q_{\text{rad}} + \dot{Q}$$

Ecuación 6.6: Energía de entrada y salida.

Luego, desarrollando cada transmisión de calor que se obtuvo de la ecuación 6.6.

$$I_h * \alpha_v * A = h * A (t_{vo} - t_a) + A * \epsilon_v * \sigma (t_{vo}^4 - t_a^4) + \dot{Q}$$

Ecuación 6.7: Transmisión de calor.

Despejando la constante A de la ecuación 6.7, quien será quien nos indique el área del destilador,

$$A = \frac{\dot{Q}}{(I_h * \alpha_v - h_{t,a-v} (t_{vo} - t_a) - \epsilon_v * \sigma (t_{vo}^4 - t_a^4))}$$

Ecuación 6.8: A despejada del balance de energía.

Donde:

σ = constante de stefan boltzmann

ϵ_v = emisividad del virio

$h_{t,a-v}$ = coeficiente general de la transmisión de calor en el líquido al vidrio [w/m²K]
(convección libre de gases)

Remplazando en la ecuación 6.8 se obtiene que:

$$A = \frac{24.02W}{350 \left(\frac{W}{m^2}\right) * 0.9 - 15 \left(\frac{W}{m^2} * k\right) (311.15k - 298.15k) - 0.9 * 5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 * k^4}\right) (311.15k^4 - 298.15^4)}$$

A=0.181m²

Ahora con base del área de la charola que se obtuvo a partir del volumen deseado, se puede dimensionar el área de vidrio, como se muestra en la ilustración 23 la cual será útil para el balance de energía de este.

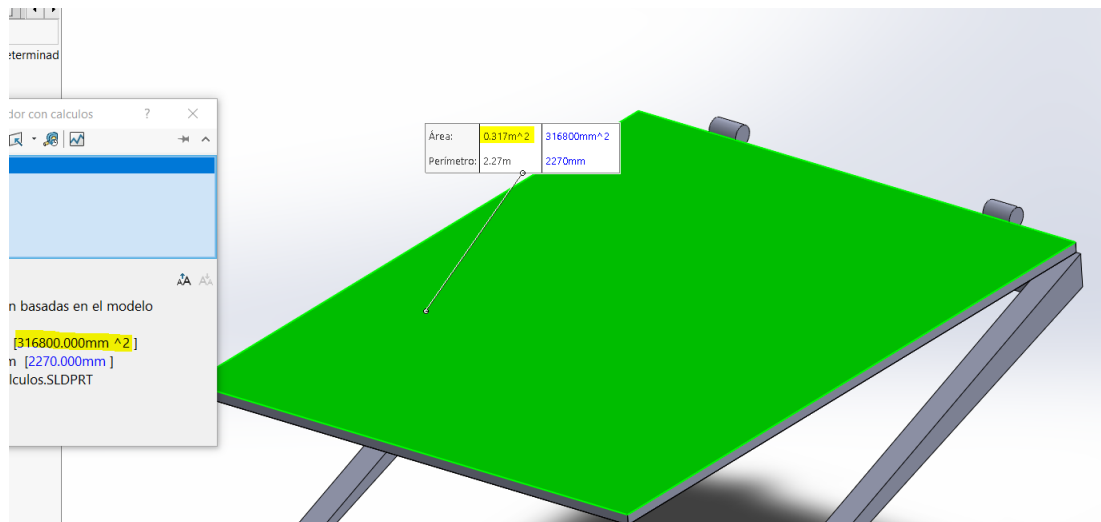


Ilustración 23: Vidrio de destilador tipo caseta dimensionado respecto a la charola del agua.

Fuente: Autores.

Balance de energía en el vidrio del alambique.

Para realizar el cálculo energético en el vidrio primero se toma y analizar la radiación proveniente del sol sobre nuestro cristal transparente, como se muestra en la ilustración 24. En nuestro caso la radiación alcanza hasta el área del vidrio donde en la cual una

porción de ella es captada, transmite a su interior de la bandeja del destilado y la otra es reflejada, para ello tenemos la ecuación 6.9.

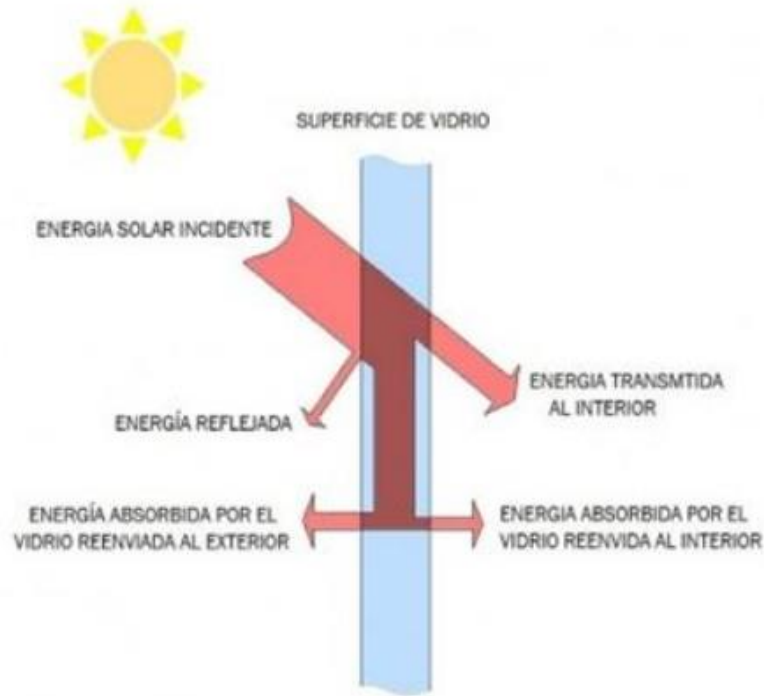


Ilustración 24: Bosquejo del procedimiento de radiación incidente solar.

Fuente: Diego Redondo y Feliz Valderrama, diagnóstico de la incidencia de la radiación solar presente en las instalaciones de la sede principal de la universidad cooperativa de Colombia sede Villavicencio, Villavicencio 2017

Siendo así tenemos que:

$$I_h * \alpha_v * A_v + h_{t,a-v} * A_w(T_w - T_v) = h_{r,v-c} * A_v(T_{vo} - T_c) + h_{c,v-a} * A_v(T_{vo} - T_a)$$

Ecuación 6.9: Balance energía en el vidrio del destilador.

Donde los parámetros conocidos para los cálculos son dados en la tabla #4.

V_d	Volumen de agua a destilar	2E-4m ³	Autores
I_h	Radiación incidente sobre el vidrio	400 KWh/m ²	(TORRES, 2015)
α_v	coeficiente de absorbanca del vidrio	0.9	(Salinas, 2019)
T_w	Temperatura del agua	80 C	(Quijano, Jaimes, & Vera, 2015)
T_{am}	Temperatura ambiente	26 C	(Myers, 2021)
T_{vi}	Temperatura del vidrio interior	39 C	(Franco & Saravia, 2013)
T_{vo}	Temperatura del vidrio exterior	50 C	(Franco & Saravia, 2013)
t	tiempo	18000 segundos	Autores
ρ	Densidad del agua a temperatura (anexo B)	958 kg/m ³	(GHAJAR, 2011)
h_{fg}	Entalpia de vaporización respecto temperatura (anexo B)	2557 KJ/Kg	(GHAJAR, 2011)
c_p	Calor especifico (agua) (anexo B)	4.217 KJ/Kg	(GHAJAR, 2011)

ε_v	Emisividad del vidrio	0.9	(Incropera F. P., 1999, pág. 852)
$h_{t,a-v}$	coeficiente total de transferencia de calor del agua al vidrio (convección libre de gases)	$15\left(\frac{W}{m^2} * k\right)$	(DeWitt, 1999)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 * K^4}\right)$	(Roll, 2006)
A_v	Área del vidrio	0.3168 m ²	Autores
$h_{t, a-v}$	coeficiente de transferencia de calor del agua al vidrio	15[w/m ² C]	(Incropera F. P., 1999)
A_w	Área del agua a destilar	0.18m ²	Autores

Tabla 4: Parámetros para balance de energía

Fuente: Autores

$h_{r,v-c}$ = coeficiente de radiación del vidrio al cielo [W/m²C]

$h_{c,v-a}$ = coeficiente de convección del vidrio al ambiente[W/m²C]

Ahora se pasa a encontrar el coeficiente de transferencia de calor por radiación que va del vidrio al ambiente, el cual depende de la temperatura del vidrio que se encuentra al exterior y la temperatura del cielo, la cual será averiguada por medio de la ecuación 6.10.

$$h_{r, v-c} = \varepsilon_v * \sigma (t_{v0}^2 - t_c^2) * (t_{v0} - t_c)$$

Ecuación 6.10: Transmisión de calor por radiación.

donde:

T_c es la temperatura cielo [C], donde está representada en la siguiente ecuación.

$$\text{Luego: } t_c = t_{am} \left[0.8 + \left(\frac{t_{dp} - 273}{250} \right) \right]^{0.25}$$

Ecuación 6.11: Temperatura del cielo

Por lo tanto:

t_a = Representa la temperatura ambiente [K]

t_{dp} = Representa la temperatura en punto de rocío [K]

las cuales son de un promedio de 26 C y 15C respectivamente, sacado de la tabla #5 (Myers, 2021)

accuweather	punto de rocío[C]	temperatura ambiente[C]
15/02/2021	15	28
16/02/2021	16	26
17/02/2021	16	28
18/02/2021	16	25
19/02/2021	13	22
20/02/2021	16	26
21/02/2021	15	28
22/02/2021	15	28
23/02/2021	17	29
24/02/2021	16	25

Tabla 5: Promedio de temperatura ambiente y de rocío

Fuente: Autores, datos tomados de www.accuweather.com

Remplazando en la ecuación 6.11 se tiene que:

$$t_c = 299.15 \left[0.8 + \left(\frac{289.15 - 273}{250} \right) \right]^{0.25}$$

$$T_c = 387.75K$$

Y reemplazando en la ecuación 6.10 se obtiene que:

$$h_{r, v-c} = 0.9 * 5.67 * 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 * K^4} \right) * (311.15K^2 - 386.44K^2) * (311.15K - 387.75K)$$

$$h_{r, v-c} = 0.2018 (W/m^2 * K)$$

Ahora que ya se conoce todos los valores para el cálculo energético del vidrio en la cubierta, ya se puede despejar el $h_{c,v-a}$ (el coeficiente de calor por convección que va del vidrio al agua) de la ecuación 1.9, teniendo así:

$$400 \left(\frac{W}{m^2} \right) * 0.9 * 0.3185m^2 + 15 \left(\frac{W}{m^2 * K} \right) * 0.18m^2 (353.15K - 323.15K) = 0.2018 \left(\frac{W}{m^2 * K} \right) * 0.19m^2 (308.15k - 386.15k) + h_{c,v-a} * 0.19m^2 (308.15k - 298.15k)$$

$$h_{c,v-a} = 63.17 (W/m^2 * K)$$

8. RESULTADOS PARA CÁLCULOS DEL SOL

Para determinar la eficiencia de los destiladores se recurre a las siguientes ecuaciones 7.1, 7.2 y 7.3.

$$\eta = \frac{q_e}{H_t} * 100\%$$

Ecuación 7.1: Eficiencia a partir del calor transferido y la radiación total incidente

Esta eficiencia sirve para comparar los dos destiladores, con una relación producto/recurso (entrada/salida) pero para el caso del híbrido no se tendrá en cuenta la energía que entra debido al calentador solar, y debido a esto los resultados obtenidos pueden llegar a estar por encima del 100%

$$q_e = 3.45 * 10^{-3} * h_c * (p_{di} - p_{vi}) * h_e$$

Ecuación 7.2: Calor transferido evaporación-condensación.

$$h_c = 0.75[(t_{di} - t_{vi}) + \left(\frac{p_{di} - p_{vi}}{2.7 * (p_t - p_{di})}\right) * t_{di}]^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 7.3: Coeficiente de transferencia de calor por convección.

Donde:

η , es representado como la eficiencia

q_e , Cálculo del calor transferido por vaporación-condensación desde el agua a la cubierta.

H_t . es la radiación solar caída sobre el destilador

h_c . es el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección [kcal/h m²]

h_e . Representa la entalpía del agua evaporada [540Kca/Kg]

t_{di} . Representa la temperatura con la que empieza el agua [k]

t_{vi} .	Representa la temperatura inicial del vidrio	[k]
p_{di} .	Representa la presión de saturación del agua a la temperatura Td	[mmHg].
p_{vi}	Representa la presión de saturación del agua a la temperatura Tv	[mmHg].
p_t .	Representa la presión total dentro del destilador	[mmHg].

Tratamiento de la información para la irradiancia solar sobre un área.

Para ello se observa que se requiere de la radiación directa del sol que cae sobre el destilador (H_t), en donde únicamente no tan solo depende de la irradiancia que cae sobre el lugar, también de la disposición e inclinación de la superficie, como se ve en la ilustración 25.

Para ello se tiene en cuenta el perihelio y el afelio que son la mínima y máxima distancia al sol donde la radiación será máxima y mínima respectivamente.

Para encontrar dicho valor de la radiación se usará el método de Duffie - Beckman (Duffie, 2013) descritos en su libro (Solar engineering of thermal Processes), para el cual se estará teniendo en cuenta los siguientes elementos para su realización.

ϕ (ϕ) el cual se refiere a la latitud geográfica del lugar, en la ciudad de Bucaramanga se tiene una latitud de 7 positivo hacia el norte de la línea del ecuador, por ende $\phi = 7$.

β (beta) Representa la inclinación del plano en la cual cae la irradiación, es decir el ángulo de inclinación en la cubierta, para nuestro estudio será de 20 grados.

γ (gamma) es el ángulo que forma la normal a la superficie, respecto al meridiano, para este caso lo tomaremos 0 ya que se ubicara mirando hacia el sur.

δ (delta) es la declinación solar, un ángulo que se calcula mediante la siguiente ecuación, en la cual alcanza su punto máximo ya que el sol esta más alejado del Ecuador (solsticio de verano), y está dada por la ecuación 7.4, donde n es el día del año en el que se evalúa, el cual está calculado como se muestra en la ilustración 26.

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 * \frac{284 + n}{365} \right)$$

Ecuación 7.4: Declinación solar.

ω (omega) el cual se refiere al ángulo horario, dado, así como el desplazamiento que tiene el sol del este al oeste, siendo este de 15 grados por hora (360 en 24 horas), siendo así para las 12 del mediodía un valor de 0, para la mañana valores negativos y en las tardes negativos.

Para el primer valor se usará un valor de 60.

Para los demás valores se opta por usar una herramienta computacional como lo es EES para realizar el cálculo de las demás variables, el cual se encuentra dicho código en el Anexo C.

También por la herramienta de computacional de ANSYS con la cual se calcularán las temperaturas requeridas en el vidrio y en la bandeja del destilador, mediante este software se estipulan los materiales de este mismo tales como lo es el aluminio, vidrio convencional, y un aislante como fibra de vidrio.

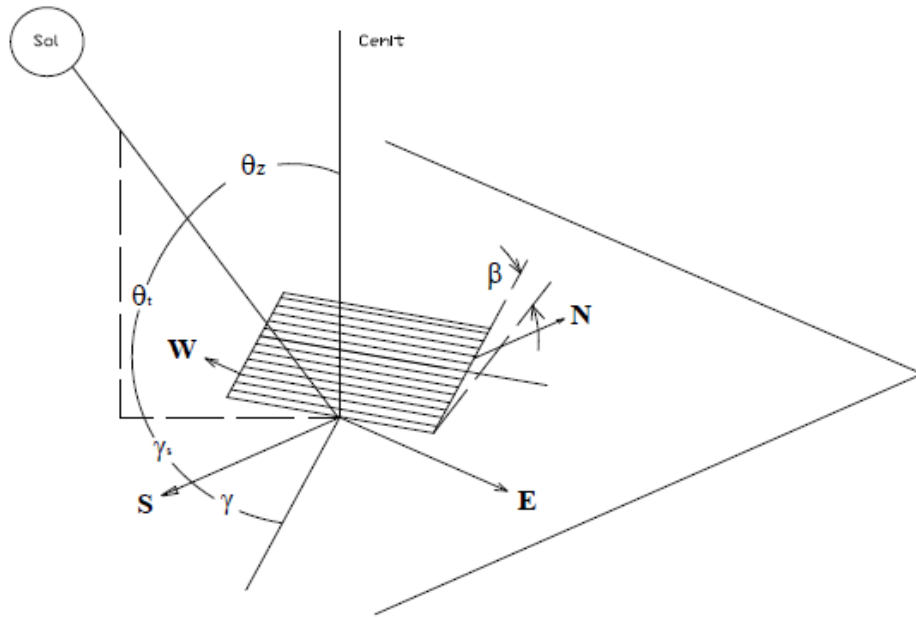


Ilustración 25: Ángulo formado por el sol con la horizontal.

Fuente: Duffie and Beckman solar engineering.

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

Ilustración 26: Cálculo de n (convertir día del mes a día del año)

Fuente: Cesar Santin, modelación y simulación dinámica del sol

Para esto se tiene que para el 21 de junio corresponde una $i = 21$ lo que da un valor de $n = 172$, siendo así la ecuación 7.4 de la declinación solar delta queda:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 * \frac{284 + 172}{365} \right)$$

$$\delta = 23.45$$

Desplazamiento angular del sol (W_s)

Muestra el desplazamiento del sol medido en un ángulo sobre el plano de la trayectoria solar, y este dado por la ecuación 7.5.

$$W_s = \cos^{-1}(-\operatorname{tg}\phi * \operatorname{tg}\delta)$$

Ecuación 7.5: Angulo solar W_s

$$W_s = \cos^{-1}(-\operatorname{tg}7 * \operatorname{tg}23.45)$$

$$W_s = 93.05$$

Cálculo de la irradiación solar extraterrestre sobre un área normal al sol (H_o)

Representa la energía que recoge, en un espacio de tiempo determinado, un área del plano tangencial al del planeta en un punto del exterior en el espacio. En otras palabras, se habla de la consistencia de un caudal de radiación proveniente del sol, el cual está determinado por unidades de J/m^2 en S.I (Bautista Carracosa) ver la ecuación 7.6.

$$H_o = \frac{24 * 3600 * G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360(n)}{365} \right) \right) * (\cos\phi * \cos\delta * \operatorname{sen}W_s + \left(\frac{\pi * W_s}{180} \right) * \operatorname{sen}\phi * \operatorname{sen}\delta)$$

Ecuación 7.6: Radiación solar extraterrestre.

Donde

G_{sc} . Representa un valor constante equivalente a $1361 W/m^2$, ahora remplazando en la ecuación 7.6

$$H_o = \frac{24 * 3600 * 1361}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360(172)}{365} \right) \right) * (\cos 7 * \cos 23.45 * \sin 93.05 + \left(\frac{\pi * 93.05}{180} \right) * \sin 7 * \sin 23.45)$$

$$H_o = 3.594 * 10^7 \text{ J/m}^2$$

$$H_o = 35.94 * 10^3 \text{ KJ/m}^2$$

Apreciación para la irradiación total en un día sobre un plano para una superficie horizontal H')

$$H' = K_T * H_o$$

Ecuación 7.7: Radiación total diaria en un área horizontal.

Donde;

K_T = Es el factor en el cual se pierde transparencia en la atmosfera, para esto es necesario tener en cuenta albedos como el polvo, nubes gruesas, entre otros. Ecuación 7.8

$$K_T = \frac{I_h}{H_o}$$

Ecuación 7.8: Índice de nubosidad.

Donde en el capítulo anterior, según el atlas en Bucaramanga se llega a unos 3.5 a 4 KWh/m² lo cual al cambiar sus unidades sería I_h igual a 12600 KJ/m²

Siendo así el remplazo en la ecuación 7.8 tenemos que:

$$K_T = \frac{12600}{35.94 * 10^3}$$

$$K_T = 0.3506$$

Remplazando ahora en la ecuación 7.7:

$$H' = 0.3506 * 35.94 * 10^3$$

$$H' = 1.26 * 10^4 \text{KJ/m}^2$$

Estimación de la Radiación propagada Diaria que cae sobre un área plana (H_d')

$$H_d' = f(K_t) * H'$$

Ecuación 7.9: Irradiación propagada diaria sobre un área plana.

Donde

$f(K_t)$ viene dado por la expresión de la siguiente ecuación 7.10:

$$f(K_t) = 1.3903 - 4.0273 * (K_t) + 5.5315 * ((K_t)^2) - 3.1080 * ((K_t)^3)$$

Ecuación 7.10

$$f(K_t) = 1.3903 - 4.0273 * 0.3506 + 5.5315 * ((0.3506)^2) - 3.1080 * ((0.3506)^3)$$

$$f(K_t) = 0.5204$$

Remplazando en 7.9 se obtiene que:

$$H_d' = f(K_t) * H'$$

$$H_d' = 0.5204 * 1.26 * 10^4$$

$$H_d' = 6.607 * 10^3 \text{ [KJ/m}^2\text{]}$$

Estimación de la irradiación del sol en hora por unidad de área que cae sobre un plano (H)

$$H = K * H'$$

Ecuación 7.11: la irradiación del sol en hora por unidad de área que cae sobre un plano.

Donde K esta dada como la correlación entre la radiación solar horaria y la radiación solar total diaria y se calcula por la ecuación 7.12:

$$K = \left(\frac{\pi}{24}\right) * (a + b * \cos W) * \left(\frac{\cos W - \cos W_s}{\sin W_s - \left(\frac{\pi * W_s}{180}\right) * \cos W_s}\right)$$

Ecuación 7.12: Correlación a través de la irradiación solar horaria y su total.

Donde;

$$a = 0.409 + 0.5016 * \text{seno}(W_s - 60)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 * \text{seno}(93.05 - 60)$$

$$a = 0.683$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 * \text{seno}(W_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 * \text{seno}(93.05 - 60)$$

$$b = 0.401$$

W = Representa el ángulo horario que en este caso será de 60° para el medio día y cambia cada 15° por cada unidad de hora, tomado de la tabla #6.

ω	Hora del día
75	7:00
60	8:00
45	9:00

30	10:00
15	11:00
0	12:00
-15	13:00
-30	14:00
-45	15:00
-60	16:00
-75	17:00

Tabla 6: Cálculo de ángulo omega

Fuente: Autores

Remplazando la ecuación 7.12 tenemos que:

$$K = \left(\frac{\pi}{24}\right) * (0.683 + 0.401 * \cos 60) * \left(\frac{\cos 60 - \cos 93.05}{\sin 93.05 - \left(\frac{\pi * 93.05}{180}\right) * \cos 93.05}\right)$$

$$K = 0.05857$$

Remplazando en 7.11 para obtener la irradiación total horaria producida por el sol por unidad de área sobre un plano se obtiene que:

$$H = 0.05857 * 1.26 * 10^4$$

$$H = 738 \text{ KJ/m}^2 \text{ h}$$

Siendo así este valor para un ángulo de 60 es decir para las 8 am, se debe realizar el mismo procedimiento para los cálculos de los demás ángulos omega, desarrollando así la tabla #7.

	grados		KJ/m ²	Wh/m ²
hora	ω	K	H	H
8	60	0,05857	738	205,0164
10	30	0,1131	1426	396,1428
12	0	0,1363	1717	476,9826
1	-15	0,1302	1641	455,8698
2	-30	0,1131	1426	396,1428
5	-75	0,0295	371,7	103,25826

Tabla 7: Total de radiación en hora por superficie.

Fuente: Autores

Cálculo de la irradiación horaria prolongada por unidad de área que incide en un plano perpendicular al vertical (H_d)

$$H_d = K_d * H_d'$$

Ecuación 7.13:

Según el libro de "Duffie y Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes," presenta una correlación con la irradiación prolongada horaria y la irradiación prolongada horaria sobre un plano por la duración del día.

Donde K_d determinado por la siguiente expresión 7.14

$$K_d = \left(\frac{\pi}{24}\right) * \left(\frac{\cos W - \cos W_s}{\text{sen} W_s - \left(\frac{(\pi * W_s)}{180}\right) * \cos W_s}\right)$$

Ecuación 7.14: Relación entre radiaciones.

Reemplazando en 7.14 tenemos que:

$$K_d = \left(\frac{\pi}{24}\right) * \left(\frac{\cos 60 - \cos 93.05}{\text{sen} 93.05_s - \left(\frac{(\pi * 93.05)}{180}\right) * \cos 93.05}\right)$$

$$K_d = 0.0667$$

Reemplazando en 7.13 para obtener la radiación difusa horaria

$$H_d = K_d * H_d'$$

$$H_d = 0.0667 * 6.607 * 10^3$$

$$H_d = 441 \text{ KJ/m}^2 \text{ h}$$

Donde un 1KJ/m² equivale a 0.00027778 KW/m²

Desarrollando así la tabla #8.

	grados		KJ/m ²	Wh/m2
hora	ω	Kd	H_d	H_d
8	60	0,06674	441	122,50098
10	30	0,1109	732,7	203,529406
12	0	0,1271	839,5	233,19631
1	-15	0,123	812,3	225,640694
2	-30	0,1109	732,7	203,529406
5	-75	0,03765	248,7	69,083886

Tabla 8: Radiación difusa horaria por unidad de área

Fuente: Autores

Ahora se procede a averiguar los ángulos θ_t y θ_z los cuales son los ángulos de incidencia horaria de la irradiación inmediata y el ángulo cenital, el cual está formado por la vertical del lugar donde nos encontremos y la dirección hacia el sol.

Los valores de θ_t y θ_z serán datos claves y necesarios para encontrar el R_b , que está definido como la conexión entre la irradiación que cae sobre un plano inclinado y también con la que cae sobre el plano perpendicular al vertical; Ya con esto se procede a la última

fórmula para determinar irradiación total del sol horaria que incide sobre el plano del alambique.

Estimación del ángulo de Incidencia horario de la irradiación directa sobre el alambique (θ_t)

Para ello se requiere de los valores de phi, beta y delta los cuales corresponden a 7 grados para la latitud de Bucaramanga, 20 grados de la inclinación del vidrio de nuestro destilador, y 23.45 del valor de delta obtenido al inicio.

$$\cos\theta_t = [\cos(\phi + \beta) * \cos\delta * \cos W + (\text{sen}(\phi + \beta) * \text{sen}\delta)]$$

Ecuación 7.15: Angulo de incidencia cos (theta t).

Siendo así:

$$\theta_t = \arccos[\cos(\phi + \beta) * \cos\delta * \cos W + (\text{sen}(\phi + \beta) * \text{sen}\delta)]$$

Ecuación 7.16: Theta t.

Donde

β , Representa el Angulo de inclinación de la superficie captadora

ϕ , Representa la coordenada de latitud de Bucaramanga

δ , Representa la declinación del sol para el día seleccionado

W, Representa el ángulo horario el cual tendrá valores de 0 para las 12 del día y varia cada 15 grados según la tabla 6, ahora bien, remplazando en 7.16 quien representa el resultado de despejar la ecuación 7.15, se obtiene que:

$$\theta_t = \arccos[\cos(7 + 20) * \cos 23.45 * \cos 60 + (\text{sen}(7 + 20) * \text{sen} 23.45)]$$

$$\theta_t = 53.89$$

hora	ω	θ_t
8	60	53,89
10	30	27,31
12	0	3,55
1	-15	14,02
2	-30	27,31
5	-75	66,91

Tabla 9: Ángulos de incidencia horaria

Fuente: autores

De esta forma se origina la tabla #9.

Determinación del Angulo Cenital (θ_z)

$$\theta_z = \arccos[\cos\phi * \cos\delta * \cos W + \text{sen } \delta * \text{sen}\phi]$$

Ecuación 7.17: ángulo cenital.

Ahora bien, remplazando 7.17

$$\theta_z = \arccos[\cos 7 * \cos 23.45 * \cos 60 + \text{sen } 23.45 * \text{sen } 7]$$

$$\theta_z = 59.75$$

Por ende, los valores de θ_z están representados en la tabla #10.

hora	ω	θ_z
8	60	59,75
10	30	33,17
12	0	16,45
1	-15	21,87
2	-30	33,17
5	-75	73,49

Tabla 10: Ángulo cenital

Fuente: autores

Estimación de la correlación de la irradiación solar incidente sobre un plano inclinado y la irradiación solar incidente sobre un plano perpendicular al vertical (Rb).

$$R_b = \frac{H_t}{H} = \frac{H_n * \cos \theta_t}{H_n * \cos \theta_z}$$

Ecuación 7.18: Radiación solar directa.

Donde se puede simplificar los valores de H_n teniendo así que la ecuación 7.18 nos queda así:

$$R_b = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_z}$$

$$R_b = \frac{\cos 53.89}{\cos 59.75}$$

$$R_b = 1.17$$

De esto se puede obtener la tabla #11.

hora	ω	R_b
8	60	1,17
10	30	1,062
12	0	1,041
1	-15	1,045
2	-30	1,062
5	-75	1,38

Tabla 11: Valores R_b para cada hora

Fuente: Autores

Estimación de la cantidad de la irradiación solar total horaria que incide sobre el plano del alambique (Ht)

$$Ht = (H - H_d) * R_b + H_d * \left(\frac{1}{2} * (1 + \cos\beta)\right) + H * \rho_t * \left(\frac{1}{2} * (1 - \cos\beta)\right)$$

Ecuación 7.19: Radiación total horaria sobre una superficie

Donde:

ρ_t , Representa la radiación que el planeta refleja equivalente a 0,2 esto va con respecto a irradiación que incide, también conocido como albedo, remplazando en 7.19 tenemos que:

$$Ht = (738 - 441) * 1.17 + 441 * \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + H * 0.2 * \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

$$Ht = 788.4 \text{KJ/m}^2 \text{ h}$$

Obteniendo así la tabla #12.

		KJ/m ²	Wh/m ²	Kcal
hora	ω	Ht	Ht	Ht
8	60	788,4	219,001752	188,43233
10	30	1468	407,8104	350,860808
12	0	1753	486,9834	418,977518
1	-15	1679	466,4262	401,291074
2	-30	1468	407,8104	350,860808
5	-75	418,7	116,31486	100,071812

Tabla 12: Valores de radiación solar total horaria

Fuente: Autores

Ahora bien, se procede a averiguar las demás variables que nos hacen falta para obtener la eficiencia de los destiladores, para ello se recurre a las temperaturas del vidrio y del colector de este mismo, las cuales se obtuvieron por medio del promedio de tres tomas tomadas en diferentes puntos por medio del software de ANSYS (Ver anexo D) las cuales están dadas en las siguientes tablas.

8:00 a. m.	medición 1 [K]	medición 2 [K]	medición 3 [K]	Promedio [K]
vidrio	299,21	297,56	300,83	299,20
agua	312,9	311,31	312,1	312,06

10:00 a. m.	medición 1 [K]	medición 2 [K]	medición 3 [K]	Promedio [K]
vidrio	301,86	301,77	300,01	301,21
agua	319,5	317,63	319,5	318,88

12:00 a. m.	medición 1 [K]	medición 2 [K]	medición 3 [K]	Promedio [K]
vidrio	306,07	303,65	302,27	304,00
agua	325,08	325,08	319,37	323,18

1:00 p. m.	medición 1 [K]	medición 2 [K]	medición 3 [K]	Promedio [K]
vidrio	305,9	304	302,14	304,01
agua	319,12	320,99	324,75	321,62

2:00 p. m.	medición 1 [K]	medición 2 [K]	medición 3 [K]	Promedio [K]
vidrio	303,61	303,6	305,45	304,22
agua	318,3	321,14	321,95	320,46

5:00 P.M	medición 1 [K]	medición 2 [K]	medición 3 [K]	Promedio [K]
vidrio	296,51	295,34	294,17	295,34
agua	305,9	307,07	308,25	305,89

Tabla 13: Medición de temperaturas para el vidrio y el agua del destilador convencional

Fuente: Autores

Teniendo así la tabla #14 en la cual se resume el promedio de la temperatura del vidrio del destilador y del agua por cada hora las cuales se usan para determinar la eficiencia del dispositivo.

convencional	VIDRIO [K]	AGUA [K]
8	299,200	312,067
10	301,060	318,877
12	304,000	323,180
1	304,010	321,700
2	304,220	320,460
5	295,340	305,890

Tabla 14: Promedio de temperaturas para el vidrio y el agua del destilador convencional

Fuente: autores

Ahora bien, para encontrar los valores de P_{vi} y P_{di} es necesario recurrir a la tabla de saturación del agua que se encuentra en el (ANEXO B). Siendo así P_t la sumatoria de la presión atmosférica del sitio sumada con la presión de saturación líquido a la temperatura por la cual se encuentra el agua. ver ecuación 7.20.

$$P_t = P_{atm} + P_{di}$$

Ecuación 7.20: Presión total.

En donde en Bucaramanga presenta una presión atmosférica de 13.1656 [psi] siendo esto así 680.8580 [mmhg] y la temperatura preliminar del agua es de 312.067 [K] lo cual daría un P_{di} igual a 6.96 [KPa] que equivale a:

$$P_t = 680.8550 \text{ mmhg} + 52.25 \text{ mmhg}$$

$$P_t = 733.1 \text{ mmhg}$$

Ahora bien, se procede a interpolar los valores de P_{vi} y P_{di} se realiza el remplazo en la ecuación 7.3 para obtener el factor constante de la transmisión de calor por convección se obtiene:

$$h_c = 0.75[(312.067 - 299.2) + \left(\frac{52.25 - 25.3}{2.7 * (733.1 - 52.25)}\right) * 312.067]^{\frac{1}{3}}$$

$$h_c = 1.937 \text{ kcal/h m}^2$$

Ahora se reemplaza en la ecuación 7.2 para obtener el del calor transferido por evaporación-condensación desde el agua a la cubierta teniendo así:

$$q_e = 3.45 * 10^{-3} * 2.078 * (67.69 - 29.29) * h_e$$

Donde h_e entalpía del agua evaporada la cual está dada como una constante de 540 Kcal/kg

$$q_e = 97.26 \text{ kcal/h m}^2$$

Ahora bien, se puede determinar la eficiencia reemplazado en 7.1

$$\eta = \frac{97.26}{188.4} * 100\%$$

$$\eta = 51.62$$

Dicho proceso se repite para obtener las demás eficiencias a lo largo de las horas seleccionadas, teniendo en cuenta que los valores de la presión dentro del destilador van a ir cambiando, por ende, también lo harán las demás variables como el calor transferido y el factor constante de la transmisión de calor por convección, con el fin de simplificar los datos se opta por volver a usar el software de EES para los cálculos de las variables.

Tenido así la tabla #15.

HORA	T VIDRIO [K]	T AGUA [K]	q_e [Kcal/ h m ²]	Ht [Kcal/ h m ²]	η %
8	299,200	312,067	97,170	188,432	51,568 %
10	301,060	318,877	190,500	350,861	54,295 %
12	304,000	323,180	253,900	418,978	60,600 %
1	304,010	321,700	218,700	401,291	54,499 %
2	304,220	320,460	189,400	350,860	53,982 %
5	295,340	305,890	50,960	100,072	50,923 %

Tabla 15:Eficiencia de destilador solar convencional por hora.

Fuente: Autores.

Ahora bien, se repite el debido proceso de las ecuaciones y las temperaturas, pero esta vez con el destilador solar híbrido.

Siendo así, las temperaturas en el destilador solar híbrido el cual está apoyado por un acumulador solar están dadas en la tabla 16, donde dichas temperaturas se tienen en cuenta para nuestros cálculos ya que representan el valor de T_{di} , la temperatura que puede aportar un calentador solar puede llegar aproximadamente a los 80 grados y Celsius y se pueden mantener hasta los 40 grados aun sin energía solar esto gracias a su termotanque. (Mejia Espinosa, 2016)

Y para las temperaturas del vidrio T_{vi} , se utilizarán las mismas obtenidas para el convencional proporcionadas por el software de ANSYS, ya que estos fueron evaluados el mismo día en la misma zona en simultaneo.

Temperatura del agua a una irradiación media de 4,0 KWh/m ²	
Tiempo	Temperatura [K]
08h00	315.15
10h00	323.15
12h00	331.15
13h00	334.15
14h00	340,15
15h00	343,15
16h00	341,15
17h00	333,15
18h00	318,15

Tabla 16: Temperatura del agua dentro de un calentador solar

Fuente: (Mejia Espinosa, 2016)

hibrido	VIDRIO [K]	AGUA [K]
8 am	301,50	315.15
10 am	302,86	323.15
12 pm	303,47	331.15
1 pm	304,01	334.15
2 pm	316,25	340,15
5 pm	299,82	333,15

Tabla 17: Promedio de temperaturas para el vidrio y el agua del destilador híbrido.

Fuente: Autores.

Para esto se requiere partir desde el mismo punto anterior, desde la presión total dentro del destilador, siendo esta la atmosférica sumada con la presión de saturación al grado térmico de dicho líquido, y como estas también van a ser diferentes a las del destilador convencional se debe repetir el proceso, siendo así el remplazo tenemos:

$$P_t = P_{atm} + P_{di}$$

Siendo así P_{atm} los mismos 680.855 mmhg al encontrarnos en el mismo lugar, pero para la P_{di} si es diferente ya que el líquido se encuentra a un mayor grado térmico, siendo esta de 315.15 [K], lo que se ve reflejada para un P_{di} de 8.205 KPa, el cual al transformar de unidades se obtiene 61.55 mmhg.

$$P_t = 680.8550 \text{ mmhg} + 61.55 \text{ mmhg}$$

$$P_t = 742.4 \text{ mmhg}$$

Ahora bien, se procede a interpolar los valores de P_{vi} y P_{di} y se realiza el remplazo en la ecuación 7.3 para obtener el factor constante de transmisión de calor por convección se tiene que:

$$h_c = 0.75[(315.15 - 299.2) + \left(\frac{61.55 - 25.3}{2.7 * (742.4 - 61.55)}\right) * 315.15]^{\frac{1}{3}}$$

$$h_c = 2.096 \text{ kcal/h m}^2$$

Ahora se remplaza en la ecuación 7.2 para obtener el del calor transferido por evaporación-condensación desde el agua a la cubierta teniendo así:

$$q_e = 3.45 * 10^{-3} * 2.096 * (61.55 - 25.3) * h_e$$

Donde h_e entalpía del agua evaporada la cual está dada como una contante de 540 Kcal/kg

$$q_e = 141.5 \text{ kcal/h m}^2$$

Ahora bien, se puede determinar la eficiencia remplazado en 7.1

$$\eta = \frac{141.5}{188.4} * 100\%$$

$$\eta = 75.09\%$$

Dicho proceso se repite para obtener las demás eficiencias a lo largo de las horas seleccionadas, teniendo en cuenta que los valores de la presión dentro del destilador van a ir cambiando, por ende, también lo harán las demás variables como el calor transferido y el factor constante de transmisión de calor por convección, volviendo a los datos se opta por volver a usar el software de EES para los cálculos de las variables.

Teniendo así la tabla #18.

HORA	T VIDRIO [K]	T AGUA [K]	q_e [Kcal/h m ²]	Ht [Kcal/ h m ²]	η %
8	299,200	315,15	141,5	188,432	75,09%
10	301,060	323,15	287,1	350,861	81,83%
12	304,000	331,15	505,4	418,978	120,63%
1	304,010	334,15	632,2	401,291	157,54%
2	304,220	340,15	950	350,860	270,76%
5	295,340	333,15	701,7	100,072	701,20%

Tabla 18: Eficiencia de destilador solar hibrido por hora.

Fuente: Autores

Como se nombra al inicio del capítulo, se evidencio que las eficiencias del destilador solar hibrido sobrepasaron el 100%, y esto es debido a que no se tiene en cuenta en la formula el aporte que hace el calentador solar como fuente de entrada de energía.

Lo que da como resultado la ilustración 27, referente a las eficiencias.

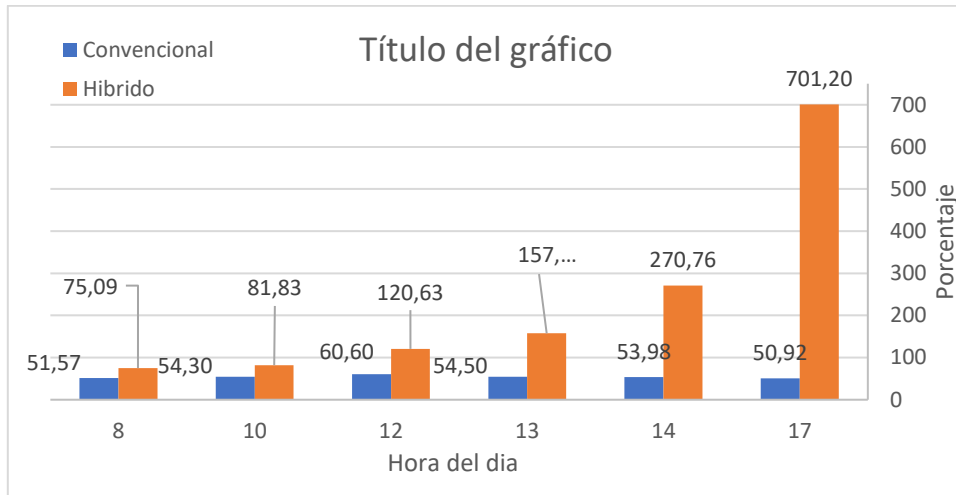


Ilustración 27: Comparación de eficiencias.

Fuente: Autores.

Siendo esto así podemos aplicarle ingeniería a la inversa a la ecuación 5.1 la cual ya se ha citado anteriormente, con el fin de obtener un dato aproximado de la cantidad de agua que podría lograr a destilar cada uno.

$$\eta = \frac{W \cdot h_{fg}}{H_t \cdot A} * 100$$

Donde H_t está en KJ/m^2 lo cual lo tenemos en la tabla #12, y la entalpia de vaporización será 2257 KJ/KG lo que equivale a 540 Kcal/Kg usado anteriormente.

Al despejar la ecuación se tiene que:

$$w = \frac{\eta \cdot H_t \cdot A}{h_{fg} \cdot 100\%}$$

$$w = \frac{51.57 \cdot 788.4 \cdot 0.18}{2257 \cdot 100\%}$$

$$w=0.032\text{Kg}$$

Siendo así que a las 8 de la mañana se puede destilar bajo las condiciones dadas un aproximado de 0.032Kg de agua lo que representa 32.1 ml por medio de la densidad del agua a temperatura ambiente.

Por ello se genera la tabla #19.

HORA	Ht [KJ/m ²]	Eficiencia destiladora convencional [%]	W [Kg]	V [ml]
8	788,4	51,568	0,0320	32,0963
10	1468	54,295	0,0636	63,7613
12	1753	60,600	0,0847	84,9749
1	1679	54,499	0,0730	73,1996
2	1468	53,982	0,0632	63,3902
5	418,7	50,923	0,0170	17,0512

Tabla 19: Cantidad de agua destilada en mililitros.

Fuente: Autores

Donde se muestra el volumen que se destila a cada hora en mililitros, en los datos tomados se evidencia una sumatoria de más de 300 mililitros de agua destilada, pero se debe tener en cuenta de que no se analizó para todas las horas, es decir que este tipo de destilador convencional puede destilar un poco más de los 300 ya obtenidos.

Por otro lado, tenemos al destilador híbrido el cual al tener mayor eficiencia podrá destilar mayor cantidad de agua por hora, y todo gracias a que el acumulador le ayuda a mantener la temperatura más alta por mayor tiempo, lo que incrementa la cantidad de volumen destilado.

HORA	Ht [KJ/m ²]	n híbrida [%]	W [Kg]	V [ml]
8	788,4	75,09	0,0472	47,36
10	1468	81,83	0,0958	96,09
12	1753	120,63	0,1686	169,2
1	1679	157,54	0,2110	211,6
2	1468	270,76	0,3170	317,9
5	418,7	701,20	0,2341	234,9

Tabla 20: Cantidad de agua destilada (híbrido) en mililitros

Fuente: Autores

Al igual que con el convencional el destilador híbrido puede destilar más que la sumatoria dada en este caso que sería aproximadamente de 1 litro, ya que no se evaluó en todas las horas dadas.

Lo que da como resultado la ilustración 28, referente al volumen que puede generar en cada hora.

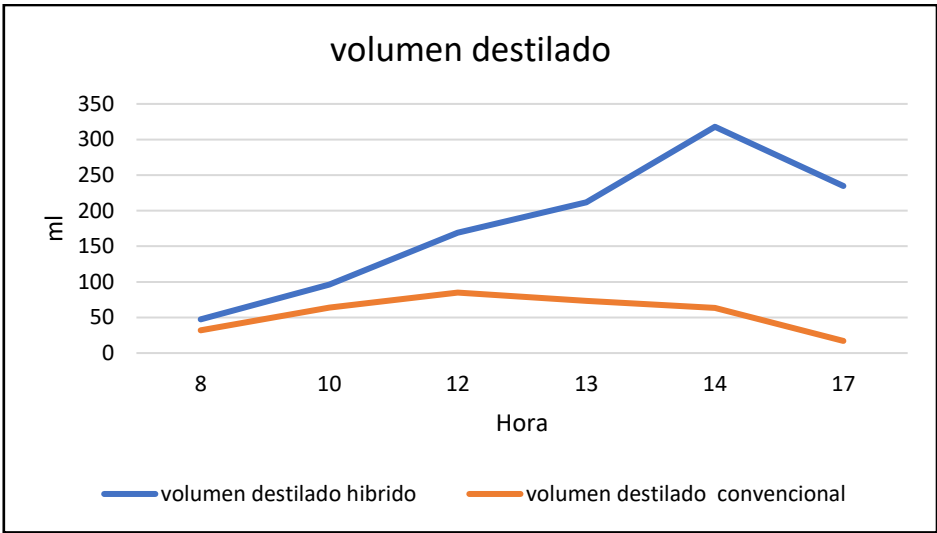


Ilustración 28: Comparación grafica de volumen destilados.

Fuente: Autores.

El comportamiento de esta grafica de volúmenes para los dos destiladores, evidencia un alto desempeño en el destilador solar híbrido en los puntos de 13:00 a 17:00 horas, alcanzando un punto máximo a las 14:00 horas, en donde puede alcanzar hasta unos 300 mililitros destilados a esa hora, mientras que el convencional alcanza su pico al medio día con este un valor de 80 mililitros aproximadamente.

9. CONCLUSIONES

- la investigación teórica que se presenta en la tesis fue desarrollada con éxito, comparando un destilador solar convencional tipo caseta simple con un destilador solar híbrido, apoyado con un calentador solar, de igual forma este era de tipo caseta simple, en las condiciones meteorológicas y geográficas del solsticio de verano, en Bucaramanga, Santander.
- Se realizaron comparaciones entre las eficiencias de los destilados híbridos y convencionales donde se evidencio un desempeño superior en el destilador solar híbrido sobre el convencional.
- Ambos destiladores solares lograron la meta para el cual fueron diseñados que fue de un valor diario de 200 mililitros diarios, teniendo en cuenta de que las mediciones no fueron tomadas a cada momento.
- El destilador con mayor rendimiento para trabajar con las condiciones meteorológicas y la ubicación geográfica dada es el destilador híbrido, ya que puede llegar a generar más de 1 litro al día, esto debido al alto aporte térmico que le da el calentador solar ya que por su diseño y aislamiento logra mantener una temperatura más alta del agua dentro de su tanque llegando está a tener 60 grados Celsius incluso a las 17:00 horas.
- Las eficiencias de los destiladores podrían aumentar en los meses en donde hay más radiación solar incidente, en donde el sol está más cerca de la tierra (perihelio), el cual constituye a los primeros meses del año, pero para esta investigación usamos el afelio o solsticio de verano que es donde se encuentra más alejado del sol.
- Gracias a la modelación y simulación matemática se puede lograr predecir el comportamiento que tendrá el destilador solar para poder tomar los correctivos necesarios para la mejora de los equipos.
- La capacidad para realizar la función de destilar el agua está sometido a la diferencia de temperaturas que se puedan lograr en el agua de la bandeja y la superficie del vidrio donde llegan la radiación, haciendo de esta un

comportamiento directamente proporcional ya que se relación con la presión de saturación a dicha temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

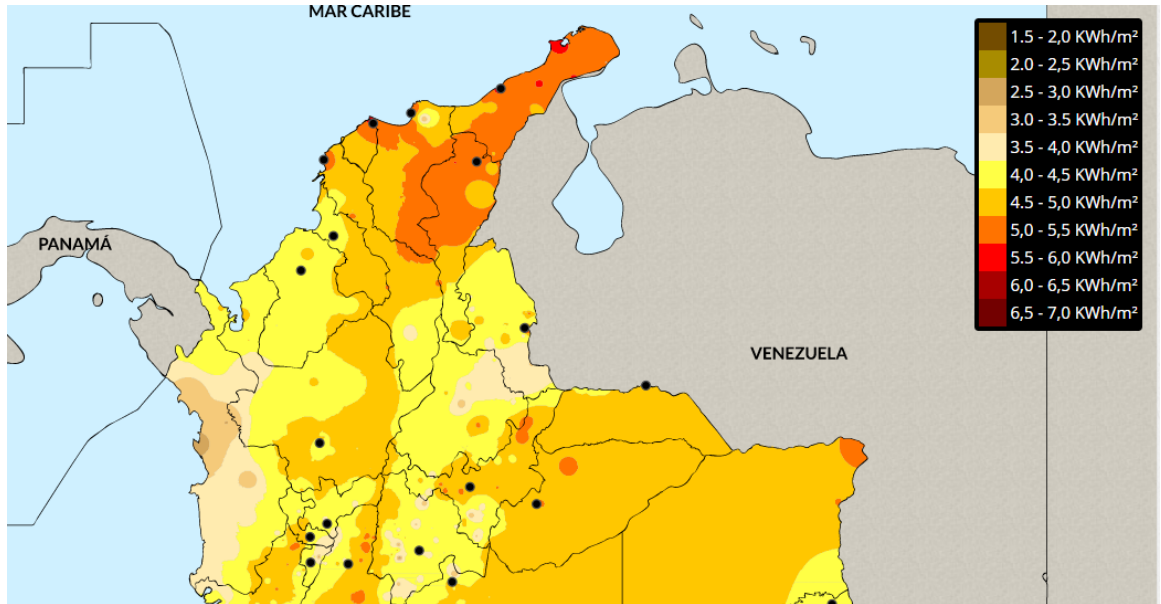
- Ávila, A., Mendiza, J., & Beltran, S. (2010). Evaluación energética de un colector solar de placa plana en doble cubierta. *Energía y Desarrollo*(27), 93-112.
- Barral, J., Morichetti, G., Galimberti, P., & Fasulo, A. (2001). EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR ABSORBIDA POR UN COLECTOR ACUMULADOR INTEGRADO MONOTANQUE CON CUBIERTAS DE POLICARBONATO ALVEOLAR. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)*, 5, 31-36.
- Bautista Carracosa, I. (s.f.). *Cálculo de la radiación solar* . valencia: universidad politecnica de valencia .
- Blanco, y. G. (2019). *Desarrollo de un prototipo desalinizador de agua de bajo costo, mediante la implementación de*. Bucaramanga : Universidad de Santander UDES.
- C. Esteban, j. F. (2002). EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR COLECTOR SOLAR ACUMULADOR. *ASADES*, 06.81-06.85.
- C. Esteban, J. F. (2002). EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR COLECTOR SOLAR ACUMULADOR. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)*, 1(06), 81-85.
- Cengel, Y. (2011). trnaferencia de calor. En Y. Cengel, *trnaferencia de calor* (pág. 585). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Colmenares, S. P. (2008). *Diseño, contruccion y purebas de un destialdor soalr*. Universidad Pontificia Bolivariana escuela de ingenierias.
- DeWitt, D. P. (1999). funda. En *Fundamentals of heat and mass transfer* (pág. 8). Mexico: Prentice Hall.
- Duffie, J. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Madison: University of Wisconsin-Madison.
- Fonseca Fonseca, S., Brito Sauvanell, A. L., Andión Torres, R., & Perdomo. (2009). ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL DESTILADOR SOLAR DE BANDEJA DE FIBRA DE. *tecnologia quimica*, 17-26.
- Fonseca, S. A. (2005). PROTOTIPO DE DESTILADOR SOLAR DE FIBRA DE VIDRIO. *Tecnologia Quimica*, xxv(3), 57-64.
- Franco, J., & Saravia, L. (2013). destilador solar. *ASADES*, 03.01-03.07.
- GHAJAR, Y. A. (2011). *TRANSFERENICA DE CALOR Y MASA*. ESPAÑA : McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Hermosillo Villalobos, J. J. (1989). *Destialcion solar* . Guadalajara: iteso.
- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de tranderencia de calor. En F. P. Incropera, *Fundamentos de tranderencia de calor* (pág. 8). mexico : prentice hall.
- Incropera, F. P. (1999). fundamentos de tranferencia de calor. mexico: prentice hall.

- KATHERINE, I. B. (JUNIO 2017). *REPOTENCIACIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR PARA AGUA*. CALCETA.
- Latham, M. C. (2002). Población, alimentación, nutrición y planificación familiar. En *Colección FAO: Alimentación y nutrición N° 29* (pág. 546). Roma: FAO.
- M., L. A. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y. *Ingeniería*, vol. 11, xi, 5-14.
- Marchesi, J. D. (2007). SISTEMATIZACION DE LAS MEDICIONES DE PRODUCCION Y TEMPERATURAS. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)*, 11(3), 123-130.
- Mejia Espinosa, M. (2016). calentador solar en forma espiral con espejos reflectores . *revista de tecnología e innovacion*, 16-20.
- Myers, J. N. (15 de 02 de 2021). *accuweather*. Obtenido de <https://www.accuweather.com/>
- NICOLALDE, R. F. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DESTILADOR DE*. Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Pinzon, J., & Colmenares, S. (2008). *diseño, construccion y pruebas de un destilador solar*. bucarmanga: upb.
- Quijano, J., Jaimes, R., & Vera, E. (2015). *diseño y construccion de un prototipo de destilador solar de agua multiefecto para implementar en zonas rurales* . Bucarmanga : Universidad Industrial de Santander .
- Rodríguez Mejía, J. R., López Monteagudo, F. E., & Araiza Esquivel. (2016). diseño de un colector sola de placa plana. *ingenieria energetica*, 15-24.
- Roll, K. C. (2006). *Termodinamica*. Nueva Jersey: pearson prentice hall.
- Salinas, H. A. (2019). limites termodinamicos a la productividad de los destiladores solares pasivos . *revista ION*, 7-20.
- téllez, m. c. (2008). *DESARROLLO Y ANÁLISIS ENERGÉTICO DE*. ciudad de mexico: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.
- TORRES, O. F. (2015). *Atlas interactivo*. Obtenido de Atlas: atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadicaion.html#
- WWAP. (2019). *NO DEJAR A NADIE ATRAS*. PARIS: LACART STUDIO SA.
- Yavara, W. C. (2013). *ESTUDIO DE DOS TIPOS DE DESTILADORES SOLARES PASIVOS PARA EL*. iquique: UNIVERSIDAD ARTURO PRAT .
- ZAMBRANO, J. K. (JUNIO 2017). *REPOTENCIACIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR PARA AGUA*. CALCETA.

ANEXOS

Anexos A: Mapa de irradiación en Colombia.

a.



Fuente <http://atlas.ideam.gov.co>

Anexos B: Tabla de propiedades del agua.

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P_{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización, h_{fg} , kJ/kg	Calor específico, c_p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}

Fuente: (GHAJAR, 2011)

Anexos C: Algoritmo para los cálculos en EES para las variantes del sol

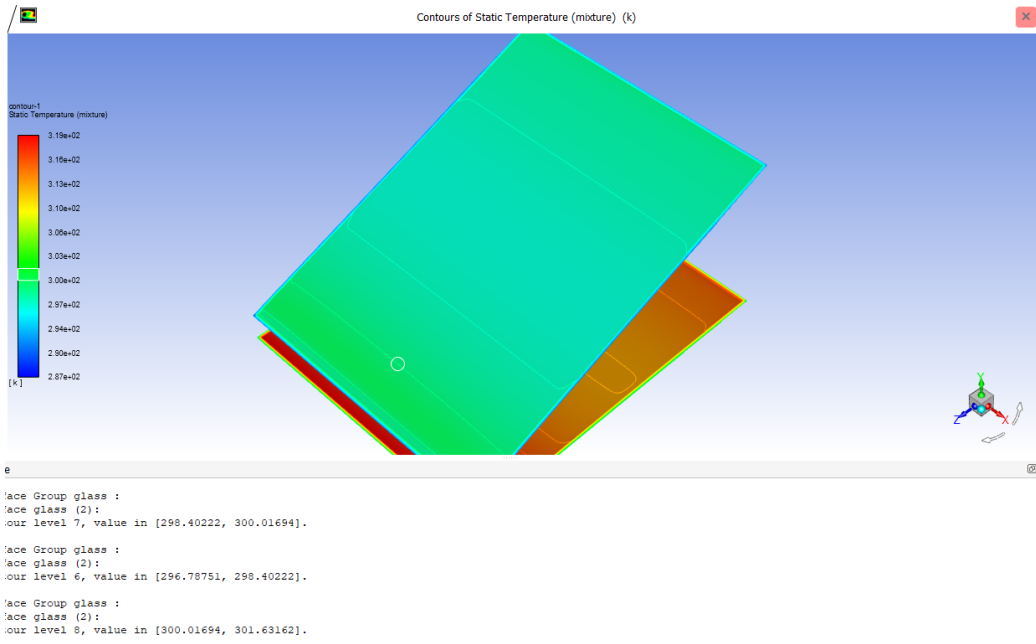
```
Equations Window
//metodo de Duffie-beckman radiacion por hora//
//constante//
phi=7
n=172
G_sc=1367
beta=20
//ecuacion //
delta=23,45*x
w_s=arccos(-x_2*x_3)
// Determinación de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie normal al sol (H_o)//
H_o=(24*3600*G_sc/3,1415)*(1+0,033*x_4)*(x_5*x_6*x_7+(3,1415*w_s/180)*x_8*x_9)
//angulos//
x=sin(360*((284+n)/(365)))
x_2=tan(phi)
x_3=tan(delta)
x_4=cos(360*n/365)
x_5=cos(phi)
x_6=cos(delta)
x_7=sin(w_s)
x_8=sin(phi)
x_9=sin(delta)
//radiacion total diaria por unidad de area de superficie horizontal //
H°=K_T*H_o
K_T=12600/H_o
K_T1=K_T*1000
//Cálculo de la Radiación Difusa Diaria que cae sobre una superficie horizontal //
//hd=f(kt)*h//
H_d°=F_KT*H°
F_KT=(1,3903)-(4,0273*(K_T1))+(5,5315*(K_T1)^2)-(3,1080*K_T1^3)
//Determinación de la Radiación Solar Total Horaria por unidad de área que cae sobre una
..superficie horizontal (H)//
H=K*H°
K=(pi/24)*(a+b*x_10)*((x_10-x_13)/(x_7-(pi*w_s/180)*x_13))
a=0,409+0,5016*x_11
b=0,6609-0,4969*x_12
x_10=cos(w)
x_11=sin(w_s-60)
x_12=sin(w_s-60)
x_13=cos(w_s)
w=60
//Determinación de la Radiación Difusa Horaria por unidad de área que cae sobre una superficie
```

Fuente: Autores

```
Equations Window
w=60
//Determinación de la Radiación Difusa Horaria por unidad de área que cae sobre una superficie
horizontal (Hd)//
H_d=K_d*H_d°
K_d=(pi/24)*((x_10-x_13)/(x_7-(pi*w_s/180)*x_13))
//Determinación del valor del Angulo de Incidencia Horario de la Radiación Sola Directa sobre el
calentador solar (tetat)//
theta_t=arccos(x_14*x_6*x_10+(x_15)*x_9)
teta_t=cos(theta_t)
x_14=cos(phi+beta)
x_15=sin(phi+beta)
//Determinación del Angulo Cenital teta z//
teta_z=x_5*x_6*x_10+x_9*x_8
theta_z=arccos(teta_z)
//Cálculo de la Relación de la Radiación Solar Directa sobre una superficie inclinada y la
Radiación Solar Directa sobre una superficie horizontal//
R_b=x_16/x_17
x_16=cos(theta_t)
x_17=cos(theta_z)
//determinación de los valores de la Radiación Solar Total Horaria que cae sobre la superficie del
secador solar (Ht)//
H_T=(H-H_d)*R_b+H_d*((1+x_18)/2)+H*rho_t*((1-x_18)/2)
x_18=cos(beta)
rho_t=0,2
X Line: 64 Char: 1 Wrap: On Insert Caps Lock: Off SI C kPa kJ mass deg Warnings: On
```

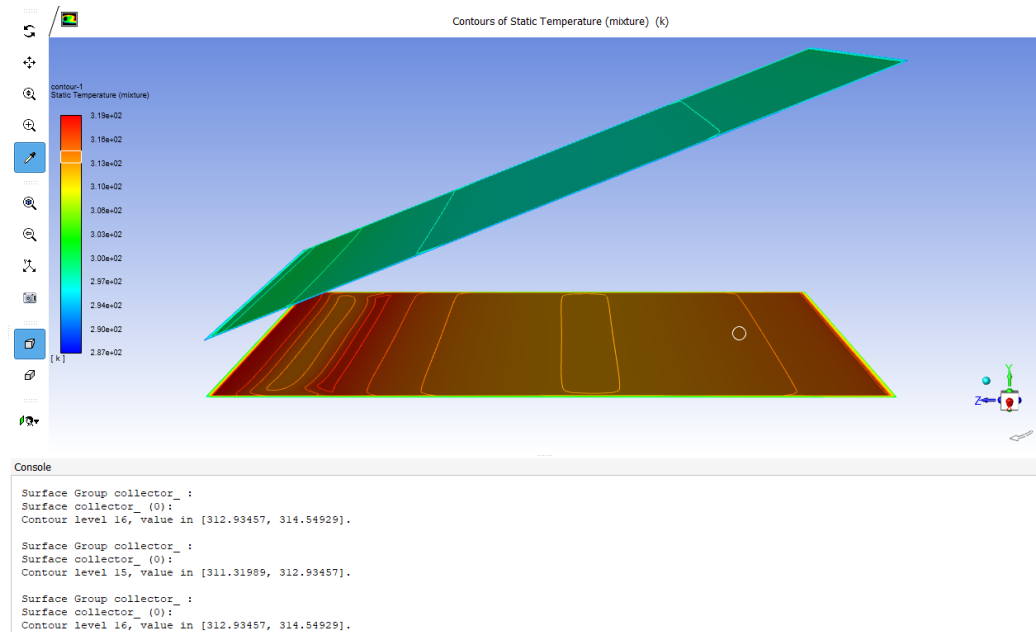
Fuente: Autores

Anexos D: Temperaturas para destilador convencional vidrio-agua



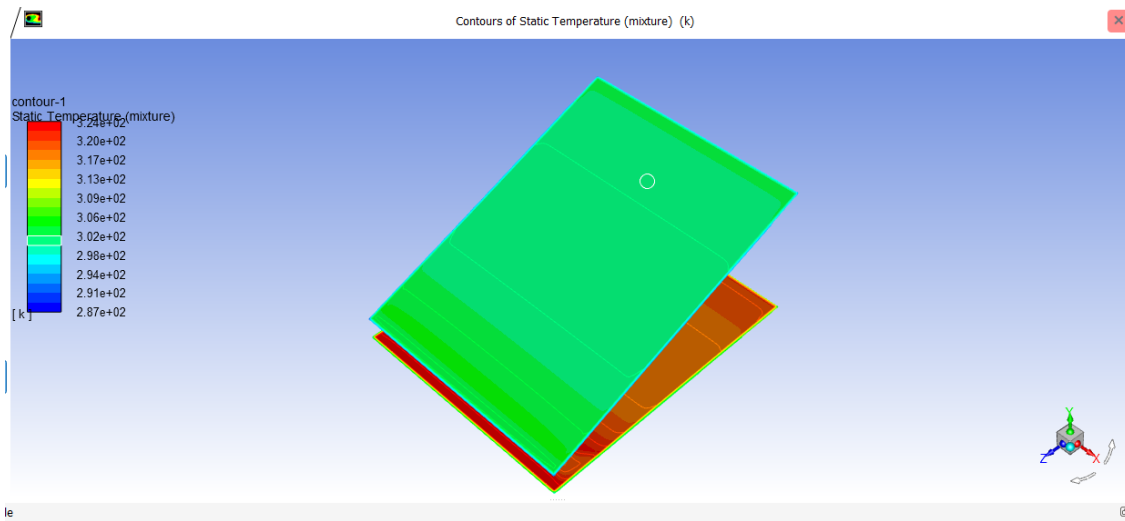
Vidrio 8am

Fuente: Autores



Colector 8 am

Fuente: Autores



```

face Group glass :
face glass (2):
  our level 8, value in [301.8688, 303.71774].

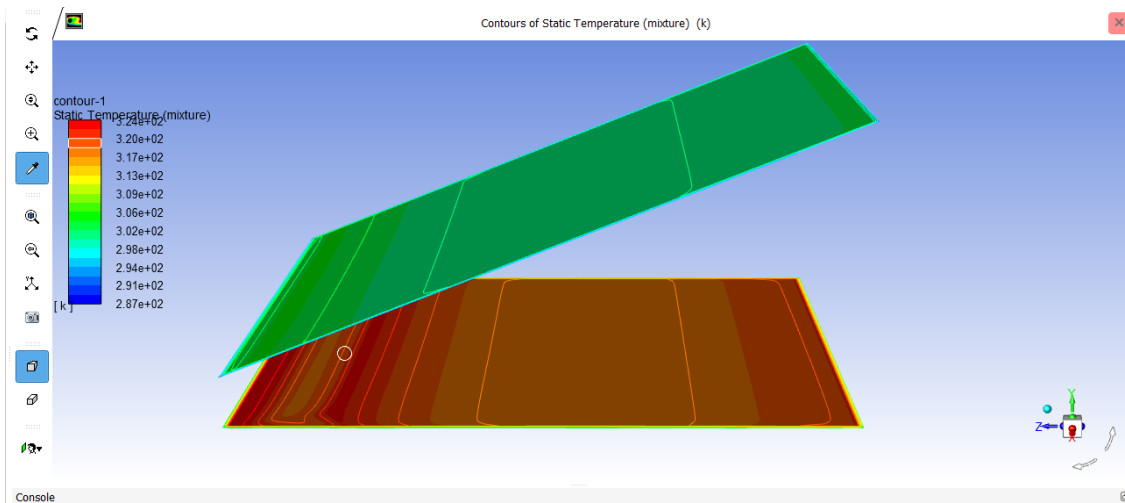
face Group glass :
face glass (2):
  our level 7, value in [300.0199, 301.8688].

face Group glass :
face glass (2):
  our level 7, value in [300.0199, 301.8688].

```

Vidrio 10 am

Fuente: Autores



```

Console
Surface Group collector_ :
Surface collector_ (0):
  Contour level 17, value in [318.50909, 320.358].

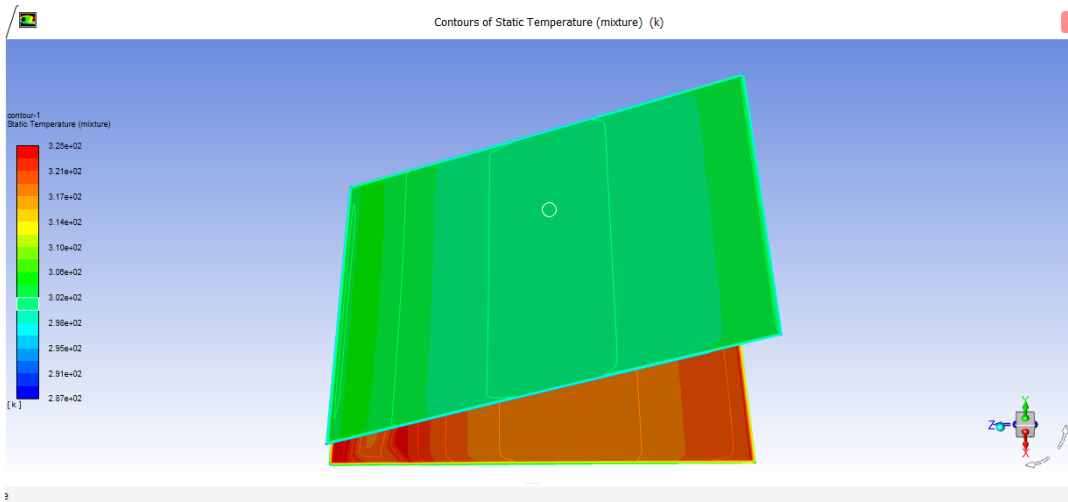
Surface Group collector_ :
Surface collector_ (0):
  Contour level 16, value in [316.66016, 318.50909].

Surface Group collector_ :
Surface collector_ (0):
  Contour level 17, value in [318.50909, 320.358].

```

Colector 10 am

Fuente: Autores



```

ace Group glass :
ace glass (2):
our level 9, value in [304.17606, 306.07654].

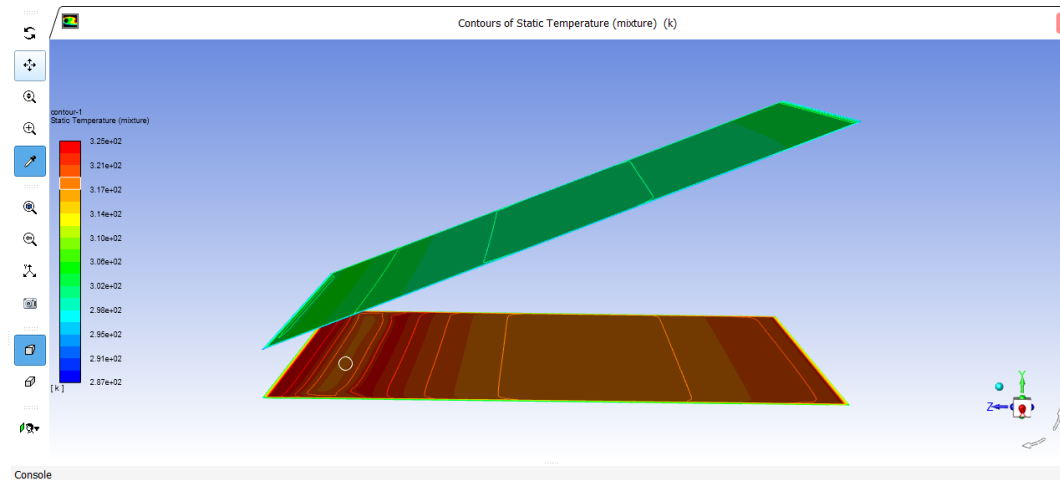
ace Group glass :
ace glass (2):
our level 8, value in [302.2756, 304.17606].

ace Group glass :
ace glass (2):
our level 7, value in [300.37515, 302.27561].

```

Vidrio 12 m

Fuente: Autores



```

Console
Surface Group collector_ :
Surface collector_ (0):
Contour level 19, value in [323.18066, 325.08112].

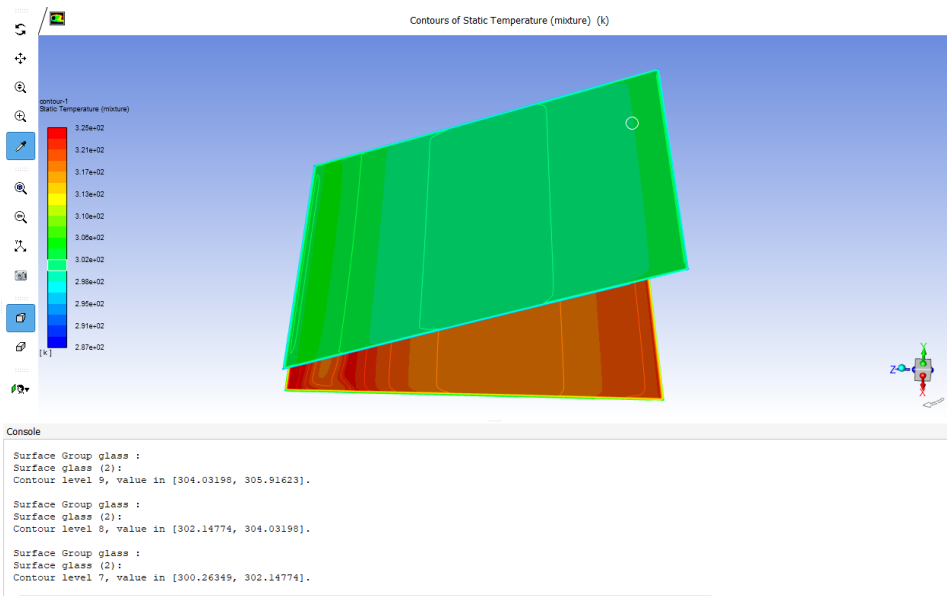
Surface Group collector_ :
Surface collector_ (0):
Contour level 19, value in [323.18066, 325.08112].

Surface Group collector_ :
Surface collector_ (0):
Contour level 16, value in [317.47928, 319.37973].

```

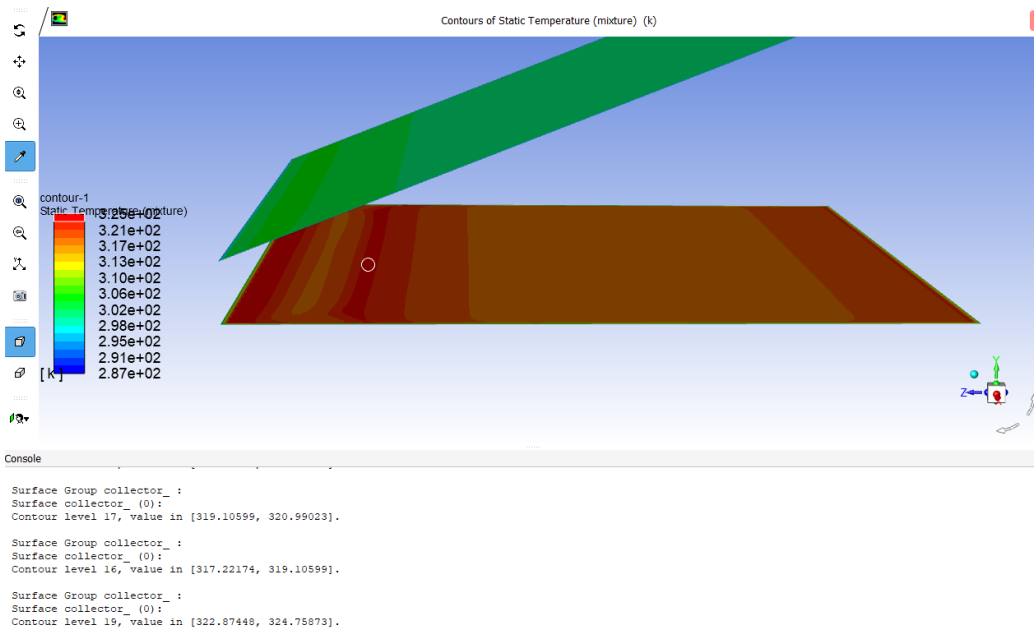
Colector 12m

Fuente: Autores



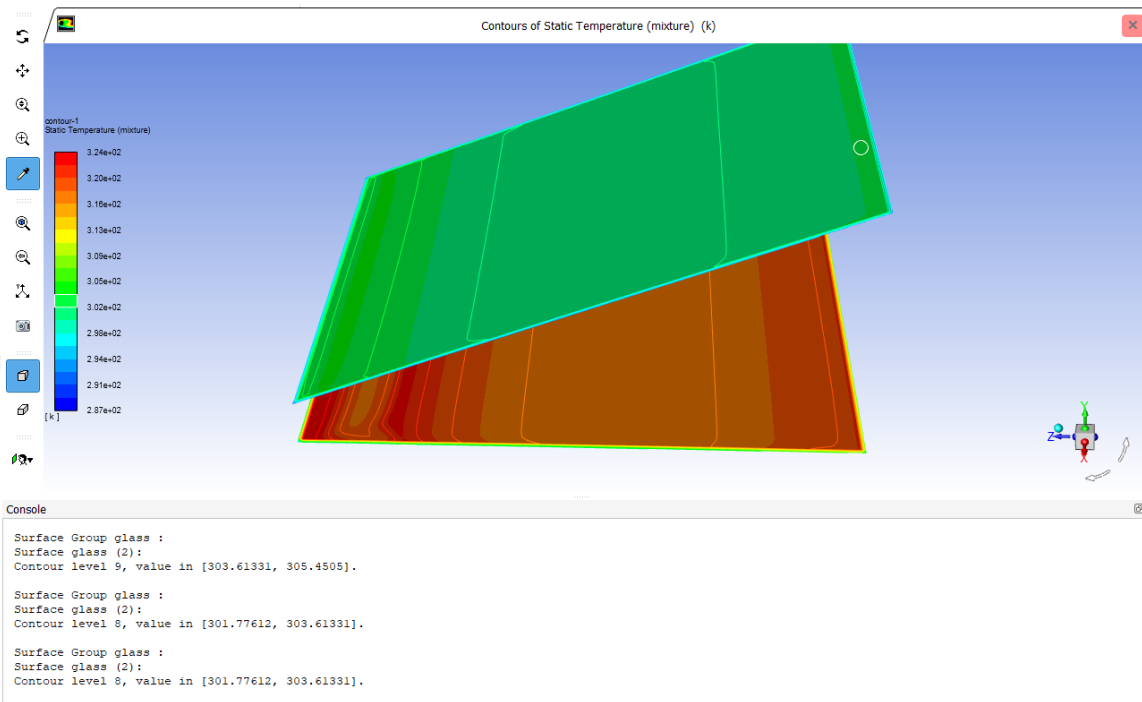
Vidrio 1 pm

Fuente: Autores



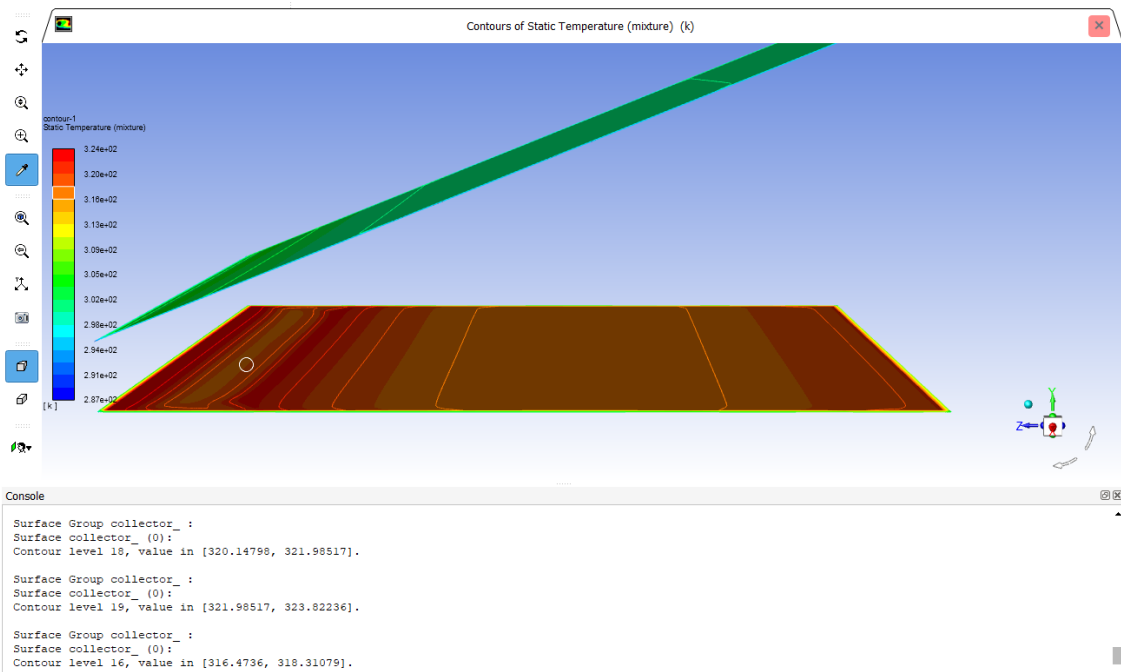
Colector 1pm

Fuente: Autores



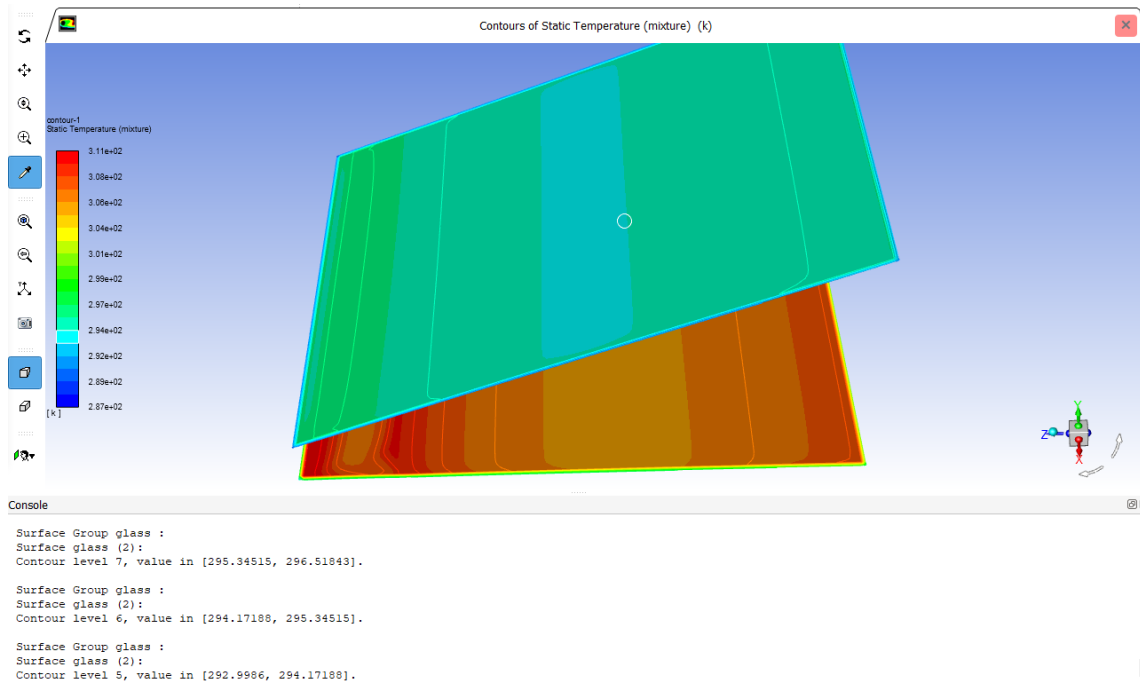
Vidrio 2pm

Fuente: Autores



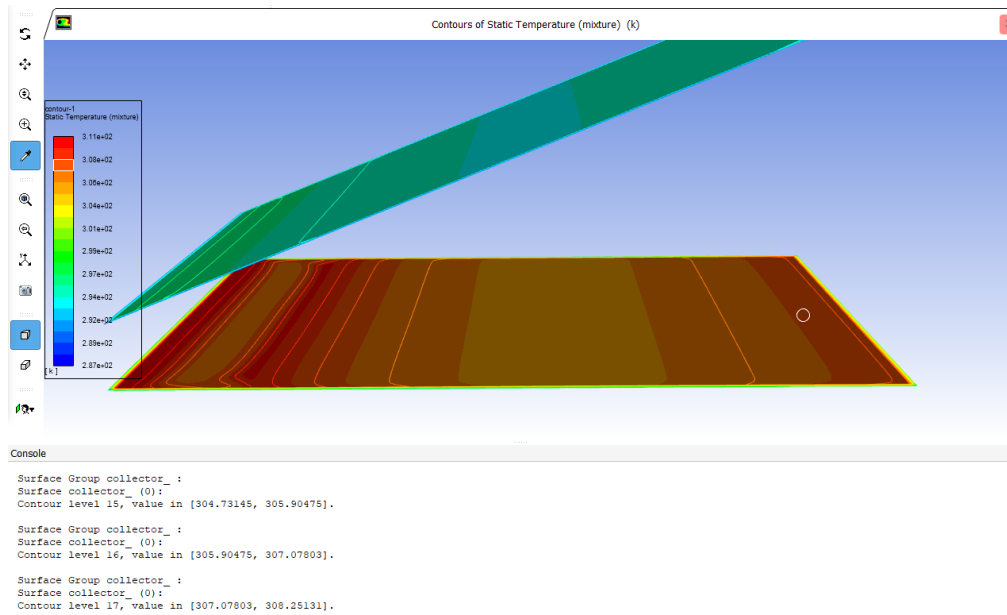
Colector 2pm

Fuente: Autores



Vidrio 5pm

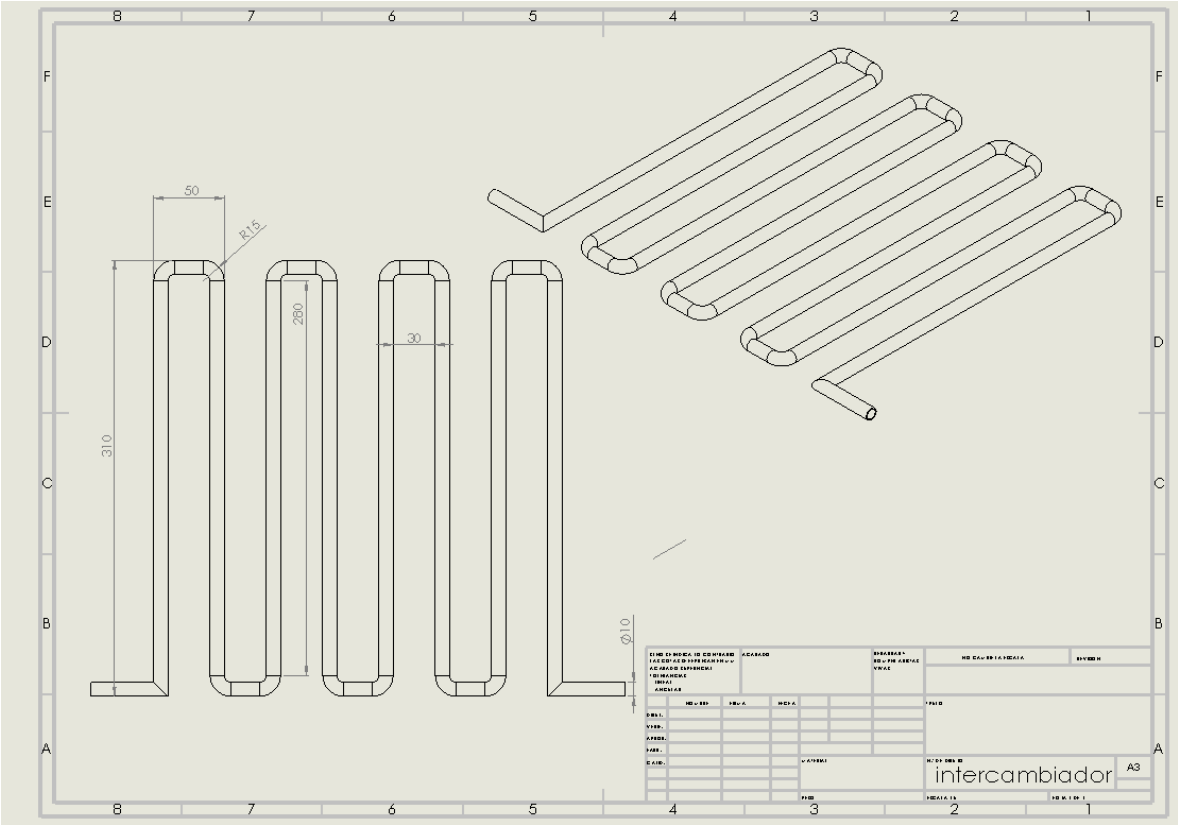
Fuente: Autores



Colector 5pm

Fuente: Autores

Anexos H: Intercambiador



Fuente: Autores.