Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



Maestría en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Instrumentación y Control

Diseño y construcción de un destilador solar con condensación por separado

Tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Ciencias

Presenta:

José Aguilar Castro

Ensenada, Baja California, México 2021 Tesis defendida por

José Aguilar Castro

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez Director de tesis

Dr. Daniel Sauceda Carvajal

Dra. Ivett Zavala Guillén

Dr. Gerardo Soto Herrera



Dra. María del Carmen Maya Sánchez Coordinadora del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

> Dr. Pedro Negrete Regagnon Director de Estudios de Posgrado

José Aguilar Castro © 2021 Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis. Resumen de la tesis que presenta **José Aguilar Castro** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Instrumentación y Control.

Diseño y construcción de un destilador solar con condensación por separado

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez Director de tesis

Los destiladores solares constituyen una excelente opción para proporcionar agua a comunidades aisladas que viven cercas de las costas y que enfrentan escasez. Los destiladores solares de doble pendiente son simples y fáciles de operar; sin embargo, tienen el inconveniente de producir bajos volúmenes de condensado. Para superar esto, se han propuesto cambios en la arquitectura del alambique e implementación de elementos mecánicos. En éste trabajo se acopló un precalentador solar y un condensador externo al destilador solar donde se evaluó la productividad de cada componente acoplado al destilador solar. Logrando una producción máxima y eficiencia de 5.0 L/m² y 66.8% acoplando el precalentador solar y el condensador externo.

Abstract of the thesis presented by **José Aguilar Castro** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Instrumentation and Control.

Design and construction of a separate condensing solar still

Abstract approved by:

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez Thesis Director

Solar stills are an excellent option for providing water to isolated communities living near the coast and facing scarcity. Dual slope solar stills are simple and easy to operate; however, they have the disadvantage of producing low volumes of condensate. To overcome this, changes in the architecture of the alembic and implementation of mechanical elements have been proposed. In this work, a solar preheater and an external condenser were coupled to the solar still where the productivity of each component coupled to the solar still was evaluated. Achieving a maximum production and efficiency of $5.0 \text{ L} / \text{m}^2$ and 66.8% by coupling the solar preheater and the external condenser.

Keywords: Irradiation, still, passive systems, active systems, productivity and efficiency.

Dedicatoria

A mi esposa Lucy Jaen e hija Lucy Aguilar por su amor y apoyo incondicional. A mis padres Miguel Aguilar y Zoraida Castro por su amor, enseñanzas y apoyo incondicional.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por permitirme realizar mis estudios de maestría.

A mí director de tesis, Dr. Francisco Javier Carranza Chávez, por su apoyo y enseñanzas que me han brindado durante mis estudios de posgrado.

A los miembros de comité de tesis, Dr. Daniel Sauceda Carvajal, Dra. Ivett Zavala Guillén y Dr. Gerardo Soto Herrera, por el apoyo brindado durante mis estudios de posgrado.

A los profesores del programa de Maestría en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones y externos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Tabla de contenido

Página

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi

Capítulo 1. Introducción

1.1	Motiv	ación	1
1.2	Antec	edentes	4
1.3	Objeti	VOS	11
	1.3.1	Objetivo general	11
	1.3.2	Objetivos específico	12

Capítulo 2. Estado del arte

2.1 Análisis térmico de un destilador solar	13
2.2 Modificaciones pasivas	18
2.3 Modificaciones activas	21

Capítulo 3. Metodología

3.1 Diseño del sistema de destilación solar	26
3.2 Instrumentación	30
3.3 Procedimiento para la evaluación del sistema de destilación	33

Capítulo 4. Resultados

4.1 Resultados	36
4.1.1 Configuración 1	36
4.1.2 Configuración 2	41
4.1.3 Configuración 3	44

4.2 Discusión	47
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro	
5.1 Conclusiones	53
5.2 Recomendaciones para trabajo futuro	54
Literatura citada	55
Anexos	59

Lista de figuras

Figura	
1	Disponibilidad mundial de agua dulce en 2009 (UNESCO, 2012)
2	Disponibilidad de agua en México en 2015 (UNESCO, 2012)
3	Estimación de la disponibilidad de agua en México en 2030 (CONAGUA, 2016)
4	Proceso de ósmosis inversa (Hi-Tech, 2020)
5	Proceso de desalinización por electrodiálisis (Sharon and Reddy, 2015)
6	Proceso de destilación MSF (American Water Works Association, 2011)
7	Proceso de desalinización por electrodiálisis (American Water Works Association, 2011)
8	Proceso de desalinización por electrodiálisis (McCutcheon et al., 2005)
9	Proceso de desalinización por electrodiálisis (MD)

10	Proceso de desalinización por humidificación-deshumidificación	10
11	Destilador solar tipo piramidal	11
12	Esquema de un destilador solar de doble pendiente con los principales mecanismos de transferencia de calor indicados	14
13	Radiación global horizontal medida con un piranómetro en un día, en W/m ²	17
14	Radiación solar acumulada cada hora en un día, en Wh/m ²	17
15	Destilador solar de una pendiente y simple efecto (Alnaimat et al., 2011)	18
16	Destilador solar de una pendiente y doble efecto (Sebaii et al., 2015)	19
17	a) Destilador solar de doble pendiente y simple efecto. B) Destilador solar de doble pendiente y doble efecto (Rajaseenivasan y Kalidasa, 2013)	19
18	Destilador solar tipo piramidal con distintos ángulos de inclinación (Kabeel et al., 2016)	20

19	Destilador solar piramidal con ventilador (a) sin ventilador (b) (Taamneh et al., 2012)	21
20	Destilador solar acoplado a un cilindro parabólico y a un colector solar (Madiouli, 2020)	22
21	Destilador solar acoplado a un colector solar (A. A. Badran et al., 2005)	23

Página

2

3

4

5

6

7

7

9

9

22	Destilador solar con ventilador acoplado a un condensador externo (Kabeel et al., 2014)	24
23	Destilador solar acoplado a un panel fotovoltaico (Kabeel et al., 2020)	25
24	Esquema representativo del destilador solar propuesto	27
25	Destilador solar de doble pendiente	28
26	Colector solar en espiral	28
27	Condensador externo: vista externa (a) y vista interna (b)	29
28	Sistema de destilación solar construido	30
29	Bomba sumergible	31
30	Controlador de nivel (a) y relevador (b)	31
31	Refractómetro óptico	32
32	Posición de los termopares tipo K en el sistema para medir temperatura	32
33	Esquema representativo de la configuración 1	33
34	Esquema representativo de la configuración 2	34
35	Variación de la radiación solar horaria durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	36
36	Comportamiento de la temperatura ambiente durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	37
37	Variación de la velocidad viento durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	37
38	Evolución de la temperatura de la bandeja durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	38
39	Variación de la temperatura del agua durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	38
40	Comportamiento de la temperatura del vidrio lado este durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	39
41	Cambio de la temperatura del vidrio lado oeste durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1	39
42	Variación de las temperaturas Tb, Tag, Tv,e y Tv,o obtenidas el día 10 de agosto de 2020 utilizando la configuración 1	40
43	Producciones de destilado obtenidas con la configuración 1	41
44	Variación de la radiación solar horaria durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 2	41

45	Comportamiento de la temperatura ambiente durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 2	42
46	Variación de la velocidad viento durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 2	42
47	Variación de Tb, Tag, Tv,e y Tv,o obtenidas el día 7 de agosto de 2020 utilizando la configuración 2	43
48	Producciones de destilado obtenidas con la configuración 2	44
49	Variación de la radiación solar horaria durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 3	45
50	Comportamiento de la temperatura ambiente durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 3	45
51	Variación de la velocidad viento durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 3.0	46
52	Variación de de Tb, Tag, Tv,e y Tv,o obtenidas el día 31 de julio de 2020 utilizando la configuración 3	46
53	Producciones de destilado obtenidas con la configuración 3	47
54	Destilados de las tres configuraciones	48
55	Eficiencia de las tres configuraciones	49
56	Variación del coeficiente de convección en los días con mayor productividad de cada configuración	49
57	Variación del coeficiente de radiación en los días con mayor productividad de cada configuración	50
58	Variación del coeficiente de evaporación en los días con mayor productividad de cada configuración	50
59	Baño térmico usado para calibrar los termopares	60

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Matriz experimental	33
2	Calor trasferido del agua a los vidrios en los días con mayor productividad de cada configuración	51
3	Comparación de los rendimientos obtenidos aquí con respecto a los de otras configuraciones SS	52
4	Resultados de calibración de los termopares a las temperaturas indicadas	61

El trabajo que aquí se describe se enfoca en proponer la técnica de destilación solar como una solución a la falta de agua para uso humano que afecta a numerosas comunidades aisladas. En éste primer capítulo se menciona la motivación, los antecedentes y objetivos del presente trabajo. La escasez de agua limpia es un problema que sufren numerosas comunidades en el mundo. Durante las últimas décadas se ha agravado esta situación debido al rápido crecimiento de la población y su aglomeración en las ciudades.

1.1 Motivación

La disponibilidad promedio anual del recurso hídrico en el mundo es aproximadamente 1,386x10¹² hm³, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo un 2.5% es agua dulce (CONAGUA, 2017). Sin embargo, el porcentaje de agua dulce es suficiente para satisfacer a la demanda mundial. Por consiguiente, la principal causa de escasez para uso diario del agua dulce es su localización debido a que no se encuentra distribuida de manera uniforme en todo el mundo. A causa de esto un número considerable de zonas se han quedado sin este esencial líquido, mientras que otras cuentan con un abastecimiento suficiente.

En la Figura 1 se muestra la disponibilidad mundial de agua dulce en 2009. Teniendo en cuenta que se necesitan 1700 m³ para cubrir las necesidades hídricas anuales por habitante (UNESCO, 2012), varios países se encuentran en severas condiciones de escasez, como se observa en la Figura 1. Así mismo, la localización irregular del recurso hídrico ha generado que las comunidades se sitúen en territorios donde el agua dulce solía ser abundante. Además, el rápido crecimiento de la población y su aglomeración han ocasionado escasez en diversos lugares del mundo. Esto ha provocado que un número significativo de personas no cuenten con agua limpia suficiente para satisfacer sus necesidades.



Figura 1 Disponibilidad mundial de agua dulce en 2009 (UNESCO, 2012). Las cifras están dadas en (m³/hab/año).

De acuerdo con datos publicados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el 2015 aproximadamente 1200 millones de personas estaban viviendo en áreas de escasez física de agua y 500 millones en condiciones próximas a la escasez. Por otra parte, 1600 millones enfrentaron escasez económica de agua, ya que carecían de la infraestructura necesaria para transportar el agua a las comunidades. Además, se estima que para el 2025, 1800 millones de personas vivirán en regiones con escasez absoluta de agua, y dos terceras partes de la población podrían hacerlo en condiciones de estrés hídrico (UNESCO, 2015). También, se espera que estas cifras crezcan a causa de diversos factores como el rápido crecimiento de la población, la urbanización, industrialización, la contaminación de los mantos, expansión de las zonas agrícolas y una deficiente gestión del agua (Alvarez et al., 2019)

En resumen, los datos muestran que la situación actual y futura del agua es crítica y alarmante. Así mismo, esta situación afecta principalmente a las comunidades aisladas debido a que no cuentan con la infraestructura necesaria para tratar el agua que utilizan, quedando vulnerables a enfermedades infecciosas intestinales. Se estima que la carencia de agua limpia es la causa principal del 90% de los decesos por enfermedades diarreicas en el mundo (FEA, A.C., 2000).

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016), organismo gubernamental encargado de administrar, regular, controlar y proteger las aguas nacionales, estima que 9 millones de personas no cuentan con acceso a agua potable, quedando expuestas a enfermedades intestinales como hepatitis, cólera, tifoidea, disentería, entre otras.Estas enfermedades constituyen la quinta causa de mortalidad en infantes menores de 5 años en nuestro país (FEA, A.C., 2000). Por lo tanto, se debe actuar ante la gravedad de la situación, invirtiendo más en investigación e infraestructura para la generación y saneamiento de agua potable. Además, se estima que por cada \$1 MXN invertido en saneamiento de agua, se ahorrarían \$5 MXN en gastos del sector salud (FEA, A.C., 2000).

En 2015, en México la disponibilidad promedio de agua era de 3692 m³/hab/año y se estima que para el 2030 será de 3250 m³/hab/año (CONAGUA, 2016), lo que parece indicar que México no presenta ni presentará ningún problema de escasez; lamentablemente este argumento no es correcto, debido a que la distribución del recurso hídrico en el país no es uniforme. En la Figura 2 se muestra la disponibilidad actual de agua en cada una de las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) que conforman al país. Se puede apreciar que la región XIII es la más afectada por la escasez debido principalmente a la sobrepoblación. La mayor concentración de agua se encuentra en el sur del país, y en el norte se localiza el área con mayor déficit.



Figura 2 Disponibilidad de agua en México en 2015 (CONAGUA, 2016). Las cifras están dadas en (m³/hab/año).

En la Figura 3 se puede visualizar la disponibilidad del agua en México, según ha sido estimada para el año 2030 por la CONAGUA La zona XIII sigue siendo la más afectada, el sur continúa manteniendo la mayor concentración y en el norte la situación empeora. Una alternativa para resolver esta escasez es implementando la desalinización del agua de mar. Sin embargo, para que las tecnologías de desalinización sean viables deben cumplirse tres requerimientos: cercanía con la fuente de agua salada, suministro continuo de energía, y alta producción de agua desalada. Estas condiciones sólo se dan en ciudades costeras con alta demanda de agua potable y no en pequeñas comunidades aisladas. Por tal motivo, es necesario desarrollar otros métodos de desalinización que sí sean viables para tales comunidades. Es esta necesidad lo que motivó el trabajo de tesis aquí presentado.



Figura 3 Estimación de la disponibilidad de agua en México en 2030 (CONAGUA, 2016). Las cifras están dadas en (m3/hab/año).

1.2 Antecedentes

La desalinización es un proceso físico donde se separa el exceso de sales disueltas en el agua, a fin de obtener un producto con bajo o nulo contenido de sales para su posterior uso. Existen distintos métodos para desalinizar agua de mar. De forma general, estos se pueden clasificar en dos grupos: por destilación y por membrana. En el primer grupo se encuentran las técnicas de destilación instantánea multi-etapa (MSF, por sus siglas en inglés), destilación de efecto múltiple (MED, por sus siglas en inglés) y compresión de vapor (CV), mientras que los métodos de ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés) y electrodiálisis (ED) son ejemplos del segundo grupo. El 68% del agua desalinizada producida en el mundo proviene de técnicas que usan membranas (Kabeel et al., 2016).

La técnica RO es un proceso de desalinización del agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas en el agua. La ósmosis inversa se logra ejerciendo una fuerza de empuje superior a la presión osmótica en dirección opuesta al proceso natural de ósmosis, logrando separar las sustancias disueltas que se encuentran en el agua. En la Figura 4 se visualizan de manera general los procesos de ósmosis y ósmosis inversa.



Figura 4 Proceso de ósmosis inversa (Hi-Tech, 2020).

En la Figura 5 se visualiza el proceso ED. Además, se mencionan las partes que lo conforman y las etapas de su funcionamiento. El método ED es una tecnología de desalinización que emplea un campo eléctrico continuo para operar. El sistema extrae las sales disueltas que están en una disolución acuosa a través de membranas selectivas de intercambio iónico. Las membranas poseen una elevada densidad de grupos iónicos (cationes o aniones) fijos, que permiten el transporte selectivo de iones a través de la membrana dependiendo de su carga, generando agua libre se sustancias disueltas.

CEM: membrana de intercambio de cationes



Figura 5 Proceso de desalinización por electrodiálisis (Sharon and Reddy, 2015).

El proceso de destilación MSF consiste en inyectar agua salada a una temperatura relativamente alta dentro de varias cámaras ordenadas en serie. Las cámaras se encuentran a una presión menor una respecto a otra, y siempre por debajo de la presión atmosférica con el fin de facilitar la evaporación a menor temperatura. De manera simultánea se genera agua destilada mediante el condensado del vapor a través de intercambiadores de calor, utilizados para transferir el calor latente de condensación al agua salada que se suministra. En la Figura 6 se muestra el proceso de destilación MSF y las distintas etapas que lo componen.



Figura 6 Proceso de destilación MSF (American Water Works Association, 2011).

La Figura 7 presenta el proceso de destilación MED, que consiste en evaporar el agua salada en etapas sucesivas. La primera etapa es alimentada con vapor externo y en el resto de las etapas se va utilizando el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior. Con el fin de facilitar la evaporación en las etapas, éstas se encuentran a una presión menor una respecto a otra, siempre por debajo de la presión atmosférica. Simultáneamente, se genera el condensado a partir de la segunda etapa. Al final de las etapas se coloca un condensador.



Figura 7 Proceso de desalinización por electrodiálisis (American Water Works Association, 2011)

En particular, el uso de sistemas híbridos de energías renovables, para impulsar la desalinización ha generado un interés significativo entre la comunidad de investigación (Ahmed, Hashaikeh y Hilal, 2019). Los estudios han demostrado que los sistemas híbridos de energías renovables fotovoltaico-eólico, son los más aptos para generar una energía de forma continua, la cual es necesaria para la operación de una planta de desalinización. La energía continua se logra debido a que cada fuente puede compensar la falta de disponibilidad de la otra (Ahmed et al., 2019).

En los últimos años se han realizado una serie de estudios experimentales y numéricos demostrando que la implementación de las energías renovables en los procesos de desalinización es exitosa. Sin embargo, la intermitencia de la mayoría de las fuentes renovables afecta gravemente al proceso, aún incluso en sistemas energéticamente híbridos, ocasionando que los sistemas tengan baja eficiencia. Queda claro, por lo tanto, que se deben desarrollar métodos de desalinización alternativos. Entre las técnicas propuestas, las que han captado la mayor atención durante la última década son: destilación solar (SS, por sus siglas en inglés), destilación por membrana (MD, por sus siglas en inglés), ósmosis directa (FO, por sus siglas en inglés) y humidificación-deshumidificación (HD).

El método FO es una técnica de desalinización en la que se colocan dos líquidos en paralelo separados solo por una membrana porosa. La diferencia de presión osmótica causada por la concentración de los fluidos hace que el solvente (agua salada) se mueva a través de la membrana, desde la región de menor concentración hasta la región de mayor concentración. Posteriormente, el disolvente se separa de la solución de extracción para producir el producto. En la Figura 8 se visualiza el proceso de desalinización por ósmosis directa, en la cual se señalan las partes que conforman el sistema.



Figura 8 Proceso de desalinización por ósmosis directa (McCutcheon et al., 2005).

En la Figura 9 se presenta de manera general el diagrama del funcionamiento del proceso MD donde se utiliza una fuente externa de energía térmica (energía solar o calor de deshecho) para calentar el agua marina o salobre que se desea desalar. Posteriormente, el agua caliente se introduce al sistema, donde existe una membrana hidrofóbica que sólo permite el paso del vapor. Después de que el vapor cruza la membrana se condensa al otro lado en un espacio de aire enfriado por un líquido que fluye a una temperatura menor.



Figura 9 Proceso de destilación por membrana (MD).

El método HD es un sistema de destilación térmica compuesto por dos etapas. La primera es la etapa de humidificación, donde el agua de mar caliente se evapora en contraflujo con una corriente de aire. En la segunda etapa se encuentra el proceso de deshumidificación, donde el vapor se condensa con la ayuda de un intercambiador de calor dando como producto agua potable. En la Figura 10 se muestra el proceso de desalinización por humidificacióndeshumidificación y las partes que conforman el sistema.



Figura 10 Proceso de desalinización por humidificación-deshumidificación.

La técnica SS consiste en la destilación agua salina o agua de mar en un dispositivo relativamente simple y económico, el cual actúa como un absorbedor de radiación solar que convierte la energía solar en energía térmica y la utiliza para evaporar el agua salada. Posteriormente, el vapor se condensa dentro del mismo sistema produciendo agua destilada (Belessiotis y Delyannis, 2016). En la Figura 11 se muestra un destilador solar tipo piramidal y las partes que lo conforman. Dado que esta tecnología es de construcción y operación sencillas, económica y no requiere de mantenimiento especializado, resulta ideal para emplearse en poblaciones aisladas con escasez de agua para uso humano, pero con acceso a agua salada o salobre. Por dichas razones, en este trabajo de tesis se eligió trabajar con la técnica de destilación solar.



Figura 11. Destilador solar tipo piramidal.

Los destiladores solares son capaces de proveer agua limpia a muchos lugares en el mundo con escasez y poco desarrollo tecnológico. En consecuencia, se les puede considerar como una herramienta sumamente útil para ayudar a disminuir todas las enfermedades ocasionadas por agentes patógenos que se encuentran en el agua y que las personas ingieren.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

• Diseñar y construir un destilador solar con precalentador y donde la condensación se realice en un depósito separado.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar los diseños de las distintas partes que conforman el sistema: el precalentador, destilador y condensador.
- Elaborar la construcción del precalentador, destilador y condensador tomando en cuenta los diseños previamente elaborados.
- Instrumentar el sistema.
- Hacer las pruebas experimentales bajo las condiciones de radiación solar de Ensenada.

El primer uso conocido de un destilador solar se remonta a 1551 implementado por los alquimistas árabes (Sebaii y Bialy, 2015). Durante, estos últimos años los destiladores solares han sido el centro de estudio para un número significativo de científicos. Por lo mismo, los destiladores solares han presentado diversas modificaciones tanto pasivas como activas en el diseño, las cuales serán descritas a continuación. Además, se explicarán los principales mecanismos de trasferencia de calor y las ecuaciones correspondientes.

2.1 Análisis térmico de un destilador solar

En la Figura 12 se puede visualizar el diagrama de un destilador solar de doble pendiente y su principio de funcionamiento. El sistema comienza a operar cuando la radiación solar incidente (*I*) llega a la bandeja metálica, donde es absorbida ocasionando que aumente su temperatura. A continuación, la bandeja calienta el agua salada por convección facilitando el proceso de evaporación. El vapor formado se eleva y transfiere parte de su calor a la cubierta de vidrio, produciendo condensado. Una pequeña parte del calor absorbido por la bandeja se pierde por conducción a través del aislamiento térmico (q_{cb}).

La cubierta de vidrio hace la función de una superficie de condensación, donde el calor adquirido se transfiere al ambiente por radiación (q_{rva}) y convección (q_{cva}). Por otra parte, las tasas de transferencia de calor entre el agua y el vidrio se llevan a cabo por convección (q_{cagv}), radiación (q_{ragv}) y evaporación (q_{eagv}). Estos mecanismos son los más relevantes en el análisis de los destiladores solares y se calculan de la siguiente forma

$$q_{cagv} = h_{cagv} A_{ag} \left(T_{ag} - T_v \right) \tag{1}$$

$$q_{ragv} = h_{ragv} A_{ag} (T_{ag} - T_v)$$
⁽²⁾

$$q_{eagv} = h_{eagv} A_{ag} (T_{ag} - T_v)$$
(3)



Figura 12 Esquema de un destilador solar de doble pendiente con los principales mecanismos de transferencia de calor indicados.

donde h_{cagv} , h_{ragv} y h_{eagv} son los coeficientes de transferencia de calor por convección, radiación y evaporación, respectivamente; A_{ag} es el área de la superficie del agua, T_{ag} la temperatura del agua y T_v la temperatura del vidrio. De acuerdo con Chavez et al. (2019) de los tres coeficientes, h_{eagv} es el más significativo, y Tiwari (2004) ha propuesto la siguiente correlación para calcularlo

$$h_{eagv} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cagv} \left(\frac{P_{ag} - P_v}{T_{ag} - T_v} \right)$$
(4)

donde P_{ag} y P_v son las presiones de vapor de agua determinadas a las temperaturas del agua y del vidrio, respectivamente. Las ecuaciones para encontrar h_{cagv} y h_{ragv} son (Chávez et al., 2019, Dunkle, 1961)

$$h_{cagv} = 0.884 \left[T_{ag} - T_v + \frac{(P_{ag} - P_v)(T_{ag} + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_{ag}} \right]^{1/3}$$
(5)

$$h_{ragv} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{ag}} + \frac{1}{\varepsilon_{v}}\right)^{-1} \sigma \left[\left(T_{ag} + 273\right)^{2} + (T_{v} + 273)^{2} \right] \left(T_{ag} + T_{v} + 546\right)$$
(6)

donde ε_{ag} y ε_v son las emisividades del agua y el vidrio, respectivamente. Para este trabajo se asumieron valores de 0.96 y 0.88 (Kabeel, Omara, y Essa, 2017). σ es la constante de Stefan-Boltzmann: $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Para determinar P_v y P_{ag} se pueden utilizar las correlaciones publicadas por Mostafa et al. (2010) para agua salada.

Las Ecuaciones (1) a (6) permiten calcular las tasas de transferencia de calor que ocurren en los destiladores solares. De esta manera es posible saber la cantidad de calor trasferido entre el agua salada y la cubierta de vidrio durante el proceso de destilado. La eficiencia térmica de un destilador solar se obtiene a partir de la siguiente ecuación propuesta por Kabeel et al. (2019)

$$\eta_d = \frac{m_p h_{fg}}{3600H} \tag{7}$$

donde m_p es la cantidad de condensado obtenido en un día expresado en kg/m², h_{fg} es el calor latente de vaporización a la temperatura del agua salada contenida en la bandeja (T_{ag}) y H es la irradiación solar acumulada en un día en KWh/m². El término m_p se calcula multiplicando el volumen destilado por la densidad del agua salada, donde ésta es determinada a partir de las correlaciones de Nayar y Mostafa (2010; 2016) con una precisión del 0.14%. La entalpía h_{fg} se calcula al implementar la siguiente correlación (Dessouky y Ettouney, 2002)

$$h_{fg} = 2501.897 - 2.407T_{ag} + 1.192 \times 10^{-3}T_{ag}^2 - 1.586 \times 10^{-5}T_{ag}^3$$
(8)

con T_{ag} expresada en grados Celsius (°C). Para determinar H es necesario medir la radiación solar disponible con la ayuda de un piranómetro. Éste es un instrumento de medición que permite cuantificar la irradiación solar sobre una superficie horizontal cada cierto tiempo (generalmente se toma una medición cada cinco minutos). De este modo se puede generar una gráfica de mediciones de la radiación global horizontal (RGH) para un día entero, como la mostrada en la Figura 13. A partir de estos datos se puede obtener la radiación solar horaria *I* de la siguiente manera: si entre una medición y otra transcurren 5 min (300 s) entonces en 1 hora se realizan 12 mediciones, por lo que

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{12} RGH_i \times 300 \text{ s}}{3600 \text{ s}}$$
(9)

De esta manera, para un día entero se puede generar otra gráfica de radiación solar horaria como se ilustra en la Figura 14. Una vez conocido cada valor de *I*, se calcula H a partir de la siguiente ecuación

$$H = \sum I \tag{10}$$



Figura 13 Radiación global horizontal medida con un piranómetro en un día, en W/m².



Figura 14 Radiación solar acumulada cada hora en un día, en Wh/m².

Normalmente la productividad de los destiladores solares es relativamente pequeña, de 2 a 2.5 L/m² en invierno y 5 a 6 L/m² en verano (Belessiotis y Delyannis, 2016), por lo que diversos científicos han propuesto modificaciones para mejorar su rendimiento. Estas se clasifican como modificaciones pasivas o activas. Mientras no se integren en la operación elementos mecánicos, como ventiladores, bombas, calentadores de agua o condensadores, se dice que el sistema funciona en modo pasivo; sin embargo, cuando éstos son integrados el sistema trabaja en modo activo.

2.2 Modificaciones pasivas

En modo pasivo Elango y Kalidasa (2015) analizaron el rendimiento de un destilador solar de simple efecto (Figura 15), donde variaron la profundidad del agua salada al interior del sistema. Obtuvieron como resultado 4.40 L/m²/día en 1 cm de profundidad y 4.01 L/m²/día en 2 cm de profundidad, ambos en primavera. Para las estaciones de verano y otoño, Feilizadeh et al. (2016) informaron producciones de 4.46 y 3.28 L/m²/día, respectivamente, ambos a 2 cm de profundidad. En definitiva, el nivel del agua salada influye considerablemente en el rendimiento del sistema y entre menor sea mayor será la producción (Rajamanickam y Ragupathy, 2012). Esto se debe a la disminución de energía que requiere el sistema para iniciar la evaporación y la reducción de pérdidas por convección.



Figura 15 Destilador solar de una pendiente y simple efecto (Alnaimat et al., 2011).

Continuando en modo pasivo, la productividad de los destiladores solares también se puede mejorar reutilizando el calor latente de condensación, para lograrlo es necesario colocar un efecto adicional, como se muestra en la Figura 16. Debido a que el calor latente de condensación puede ser reutilizado más de una vez mediante la adición de más efectos pueden formarse sistemas multiefecto.



Figura 16 Destilador solar de una pendiente y doble efecto (Sebaii et al., 2015)

Rajaseenivasan y Kalidasa (2013) realizaron un trabajo teórico experimental donde se efectuaron modificaciones pasivas. El trabajo consistió en analizar dos destiladores solares de doble pendiente, uno simple y otro de doble efecto como se muestra en la Figura 17. Como resultado se obtuvo que la producción del destilador de doble efecto fue mayor que la del de un solo efecto en un 85% para la misma condición de los sistemas.



Figura 17 Destilador solar de doble pendiente y simple efecto (a). Destilador solar de doble pendiente y doble efecto (b) (Rajaseenivasan y Kalidasa, 2013).

Kabeel et al. (2016) analizaron en modo pasivo un destilador solar tipo piramidal en donde variaron el ángulo de inclinación. Se tomaron tres ángulos distintos 40°, 50° y el ángulo de la latitud local, como se muestra en la Figura 18. Después de analizar los sistemas, obtuvieron como resultado que la productividad alcanzó su punto máximo cuando el ángulo de la cubierta de vidrio fue igual al ángulo de latitud local.



Figura 18 Destilador solar tipo piramidal con distintos ángulos de inclinación (Kabeel et al., 2016).

Además, de los destiladores solares de pendiente simple y doble, se han propuesto otras configuraciones geométricas: tubular, hemisférico, escalonado y vertical, etc. (Arunkumar et al., 2019; Sebaii et al., 2015). No existe un criterio sobre qué configuración geométrica es la mejor, debido a que durante el funcionamiento de un destilador solar intervienen otras variables además de las impuestas por la geometría. Dado que el destilador solar de doble pendiente es considerablemente fácil de construir, operar y mantener, fue la configuración elegida en este trabajo.

Una manera adicional de modificar la productividad independientemente de la geometría del destilador es agregando nanopartículas metálicas al agua salada durante la operación. Carranza et al. (2021) analizaron el rendimiento de un destilador solar de doble pendiente y un solo efecto agregando combinaciones de nanoestructuras de óxido de titanio (TiO₂), óxido de zinc (ZnO) y óxido de aluminio (Al₂O₃) al agua de alimentación. Las nanopartículas permitieron aumentar la superficie de contacto con el agua y ayudaron a mejorar la transferencia de calor por convección entre la bandeja y el agua, reduciendo las pérdidas. Como resultado se lograron rendimientos y eficiencias máximas de 5.46 L/m² y 59.9% con TiO₂+Al₂O₃, y 4.72 L/m² y 50.2% con TiO₂+ZnO.

2.3 Modificaciones activas

En modo activo, Taamneh et al. (2012) incorporaron un ventilador en la cubierta de vidrio de un destilador solar piramidal para generar condiciones de convección forzada al interior del sistema y compararon su desempeño con un destilador solar similar sin ventilador, como se visualiza en la Figura 19. El resultado que obtuvieron fue que la productividad diaria aumentó de 2.62 a 3.15 L/m² generando un aumento aproximado del 20% debido a la influencia del ventilador. Sin embargo, el uso de un ventilador también tiene el potencial de disminuir la temperatura del agua, lo cual es un efecto adverso (Kabeel et al., 2014).



Figura 19 (a) Destilador solar piramidal con ventilador (b) sin ventilador (Taamneh et al., 2012).

En la literatura se menciona que para mejorar la producción es necesario aumentar la temperatura del agua salina contenida en la bandeja de un destilador solar. Madiouli et al. (2020) combinaron un destilador solar de una pendiente con un colector de placa plana y un colector cilíndrico parabólico. Así mismo, colocaron en la bandeja del sistema esferas de vidrio para almacenar energía durante el día y liberarla por la noche. Agua fluyó a través del colector de placa plana y aceite a través del colector cilíndrico parabólico. Ambos fluidos liberaron su calor en el agua salina por medio de dos serpentines colocados dentro de la bandeja. El diseño del sistema se muestra en la Figura 20. Durante la temporada de primavera, obtuvieron 6.04 kg/m² de agua destilada durante el día y 0.73 kg/m² durante la noche. Durante el invierno, los rendimientos diurnos y nocturnos fueron de 2.78 y 0.65 kg/m², respectivamente. Con respecto a un destilador solar de una pendiente sin ningún sistema acoplamiento, los rendimientos fueron menores, 2.51 kg/m² en verano y 1.38 kg/m² en invierno, demostrando que la adición de colectores mejora el rendimiento considerablemente.



Figura 20 Destilador solar acoplado a un cilindro parabólico y a un colector solar (Madiouli, 2020).

La producción de agua destilada también se puede mejorar elevando la temperatura del agua salina antes de ingresar al destilador solar. Esto se hace mediante el precalentamiento del agua de alimentación con calentadores solares. Para este propósito, Badran y Al-Tahaineh (2005) combinaron un destilador solar simple con un colector solar de placa plana hecho de siete tubos de acero paralelos. La Figura 21 muestra el sistema construido. En el mes de octubre lograron una producción de 3.51 L/m²/día, alrededor de 36% más que cuando el alambique se operó sin precalentamiento del agua de alimentación, la cual fue de 2.24 L/m²/día. En otro trabajo, Badran et al. (2005) reportaron un incremento del 52% en el rendimiento de un alambique solar piramidal cuando se acopló con un colector de placa plana en el mes de mayo. El rendimiento sin el colector fue de 3.30 L/m²/día, mientras que con el colector fue de 5.0 L/m²/día.



Figura 21 Destilador solar acoplado a un colector solar (A. A. Badran et al., 2005).

También Kabeel et al. (2014) realizaron un estudio en modo activo donde incorporaron un ventilador y un condensador. El análisis consistió en utilizar el ventilador para arrastrar el vapor de un destilador solar de una pendiente a un condensador externo; de esta manera, se generó vacío al interior del sistema y se amplió el área de condensación. Este sistema se muestra en la Figura 22. Al compararlo con un destilar solar similar sin ningún componente, afirmaron que el rendimiento diario mostró incrementos entre 16.3% (de 8.12 a 9.44 L/m²) y 53.2% (de 5.60 a 8.58



L/m²). Por esto, es que se eligió agregar un condensador externo al sistema propuesto en este trabajo.

Figura 22 (a) Destilador solar piramidal con ventilador (b) sin ventilador (Kabeel et al., 2014).

Continuando en modo activo, los destiladores solares también pueden acoplarse a paneles fotovoltaicos y la energía eléctrica generada es utilizada en el funcionamiento del sistema. Kabeel et al. (2020) colocaron un panel fotovoltaico de silicio policristalino junto a un destilador solar simple con el mismo ángulo de inclinación. Además, instalaron una superficie reflectante vertical en la parte superior de ambos sistemas para aumentar la cantidad de rayos solares incidentes. La energía eléctrica generada durante el día se almacenó y se utilizó para impulsar un calentador eléctrico durante la noche el cual está instalado en la bandeja del sistema, asegurando así un funcionamiento continuo las 24 horas. El diseño del sistema se muestra en la Figura 23. Para un periodo de prueba entre el 2 de mayo y el 11 de agosto de 2019, reportaron productividades diarias entre 10.63 y 12.09 L/m². Para comparar el desempeño del sistema, construyeron otro destilador solar similar y lo probaron en el mismo periodo, obteniendo producciones menores entre 4.1 - 4.35 L/m².


Figura 23 Destilador solar acoplado a un panel fotovoltaico (Kabeel et al., 2020).

Como se observa en la literatura, el rendimiento de un destilador solar se mejora significativamente al aumentar la temperatura del agua salina. Esto se puede hacer a través de dos mecanismos: precalentar el agua salina antes de enviarla al destilador o agregar más calor al agua una vez que está en el recipiente. Con el objetivo de mantener un diseño simple, en este trabajo se seleccionó la opción de usar un precalentador solar en espiral para aumentar la temperatura del agua que ingresa al destilador solar de doble pendiente que se investiga.

El proceso de elaboración del sistema propuesto en este trabajo y la matriz experimental implementada para el análisis del sistema se describirán a continuación. La elaboración del sistema se dividió en tres etapas: la primera fue el diseño del sistema, la segunda consistió en la construcción y en la tercera se realizó la instrumentación. La matriz experimental aplicada para evaluar el desempeño del sistema se enfocó en analizar la productividad considerando el efecto de cada componente añadido.

3.1 Diseño y construcción del sistema de destilación solar

En este trabajo se diseñó un destilador solar tomando en cuenta toda la información relevante adquirida en el estado del arte, descrito en el Capítulo 2. En la primera etapa se diseñó un destilador solar de doble pendiente, con un ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio igual a la latitud local de la ciudad de Ensenada, Baja California, para lograr mayor producción de destilado (Kabeel et al., 2016). Asimismo, buscando aumentar más la productividad, el destilador fue equipado con un condensador externo y un precalentador solar en forma de espiral. El diagrama del sistema que se construyó se muestra en la Figura 24.

Dentro del destilador se capta la radiación solar incidente y se convierte en energía térmica, utilizada para evaporar el agua salada contenida en la bandeja metálica. Posteriormente, el vapor producido entra en contacto con la cubierta de vidrio y luego es transferido al condensador externo. Una parte del vapor se condensa en contacto con la cubierta, y el resto en el condensador externo. El destilado que se forma sobre la superficie interna del vidrio se recolecta por medio de dos canales habilitados para hacer esa función. El calor adquirido por la cubierta de vidrio se transfiere por convección y radiación al medio ambiente. El destilado generado al interior del condensador externo es recolectado mediante una tubería instalada en la base. El calor adquirido por el condensador se transfiere al tanque de agua salada debido a que hay un flujo continuo de agua de enfriamiento a través del serpentín y el tanque de almacenamiento, como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Esquema representativo del destilador solar propuesto.

La influencia del condensador externo consiste en generar un primer calentamiento del agua salada de alimentación. Después, en el colector solar en espiral se realiza un segundo calentamiento del agua para que llegue al destilador solar con mayor temperatura, favoreciendo así la tasa de evaporación. En consecuencia, se espera una mayor producción de destilado.

El sistema de destilación solar mostrado en la Figura 24 se construyó en tres etapas. En la primera se construyó solamente el destilador solar. Para ello se utilizó una bandeja de aluminio de 1.6 mm de espesor con un área de base de 0.58 m². Debajo y alrededor de la bandeja se colocó una capa de poliestireno con un espesor de 25 mm, funcionando como aislante térmico para evitar cualquier pérdida de calor por conducción. Los recubrimientos laterales se elaboraron utilizando madera de pino con un grosor de 6.4 mm. La base del destilador fue hecha de petatillo con un grosor de 12.7 mm. La cubierta utilizada fue de vidrio templado con una transmisividad mayor al 95%. La inclinación del vidrio fue de 32º, lo cual corresponde con la latitud local. Las

dimensiones totales del destilador fueron: 1 m de largo, 0.7 m ancho y 0.35 m de altura. En la Figura 25 se proporciona una fotografía del destilador construido.



Figura 25. Destilador solar de doble pendiente.

La segunda etapa de construcción se enfocó en el colector solar en espira, mismo que se ilustra en la Figura 26. Se utilizó una manguera negra de PVC de 12.75 m de longitud, con un diámetro interior de 16.4 mm, montada sobre una base de madera contrachapada de 1.1 × 1.1 m. También se colocaron paredes laterales de madera, las cuales fueron atornilladas a la base del precalentador. Para finalizar se añadió una cubierta de plástico transparente para evitar el enfriamiento por convección con el aire del ambiente.



Figura 26. Colector solar en espiral.

En la tercera etapa fue construido el condensador externo cilíndrico, mostrado en la Figura 27. Se utilizó un tubo de cobre de 3.5 m de longitud y 6.35 mm de diámetro exterior para formar el serpentín (Figura 27b). Se utilizaron coples especiales para colocar el serpentín de cobre en el interior del recipiente, con el fin de evitar fugas de agua. También, se empleó un tubo de plástico ABS con un diámetro de 50.8 mm y una longitud 300 mm para permitir la entrada del vapor. Además, se colocó un acoplador en la parte inferior del condensador para recolectar el agua condensada. Las dimensiones del condensador fueron de 350 mm de diámetro superior, 300 mm de diámetro inferior y 330 mm de altura. Se recubrió el condensador externo de pintura azul para evitar la corrosión.



Figura 27. Condensador externo: vista externa (a) y vista interna (b).

Después de construidos el destilador solar, el precalentador y el condensador externo, se unieron para formar el sistema mostrado en la Figura 28. La primera unión fue entre el precalentador y el destilador, para ello se utilizó tubería capaz de soportar temperaturas moderadamente altas (tubería CPVC) con un diámetro externo de 15.88 mm. Así mismo, para evitar pérdidas de calor por convección se recubrió la tubería con aislante térmico. También se colocaron válvulas de bola para controlar el flujo del agua salada. La segunda unión fue entre el condensador externo y el destilador piramidal mediante un tubo de plástico abs con un diámetro de 101.6 mm y una longitud 400 mm y un reductor. Las zonas de extracción de agua destilada fueron hechas utilizando tubería de CPVC y se enviaron al tanque de almacenamiento. El sistema mostrado en la Figura 28 corresponde al diagrama de la Figura 24.



Figura 28. Sistema de destilación solar construido.

3.2 Instrumentación

La instrumentación del sistema se llevó acabo incorporando distintos equipos, algunos permitieron hacerlo funcionar y otros analizarlo. Uno de los primeros equipos instalados fueron dos bombas sumergibles marca Evans, modelo Aqua60W (Figura 30a), con una potencia de 60 W y un flujo máximo de 33.3 L/min. Las bombas se colocaron al interior del tanque de almacenamiento, una de ellas se usó para enviar agua salada al precalentador solar y la otra para el condensador externo. Para mantener constante el volumen de agua en la bandeja, se empleó el controlador de nivel expuesto en la Figura 30a conectado al relevador que se muestra en la Figura 30b, generando una profundidad de 20 mm.

Para medir la salinidad del agua en el tanque de almacenamiento se utilizó un refractómetro óptico (Figura 31), marca Yieryi, modelo RHS-10ATC, con una precisión del 0.1% y

escala del 0 al 100%. La salinidad del agua utilizada en la operación del sistema fue en promedio del 12% de sólidos totales disueltos. Este nivel de salinidad corresponde a agua salobre.



Figura 29. Bomba sumergible.

Las principales variables atmosféricas que influyen en el proceso de destilación son la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del aire. Los valores de cada una se obtuvieron a partir de las mediciones reportadas por la estación meteorológica de la Secretaría de Marina ubicada en Ensenada, Baja California (Marina, 2021). Para cada día de experimentos, se emplearon las Ecuaciones (9) y (10) para obtener la radiación solar disponible cada hora y la acumulada durante todo el día.



Figura 30. Controlador de nivel (a) y relevador (b).



Figura 31. Refractómetro óptico.

El monitoreo de las temperaturas para analizar el sistema se realizó mediante termopares tipo K, marca Omega, conectados a un adquisidor de datos. Se utilizaron 10 termopares, 8 de ellos con una capacidad de medición hasta 105 °C, y los otros 2 hasta 175 °C. Los puntos amarillos indicados en la Figura 32 representan los puntos de medición de temperatura: entrada de agua de alimentación proveniente del calentador solar en espiral, bandeja metálica, agua en la bandeja, vapor, cubierta de vidrio del destilador (lados este y oeste), entrada del vapor al condensador, salida de agua del condensador y agua en el tanque de almacenamiento.



Figura 32. Posición de los termopares tipo K en el sistema para medir temperatura.

3.3 Procedimiento para la evaluación del sistema de destilación

Para realizar el estudio experimental del sistema de desalinización solar construido, éste se colocó en el techo de una vivienda en la zona sur de Ensenada, orientado hacia el sur. Las pruebas experimentales consistieron en medir la producción de agua destilada. En la Tabla 1 se muestra la matriz experimental que se utilizó. Del 31 de julio al 2 de agosto de 2020 se evaluó el desempeño del sistema completo (destilador solar, colector solar en espiral y condensador externo), llamado configuración 3 en la tabla. Después se removió el condensador externo (configuración 2) y se midió la productividad del 7 al 9 de agosto de 2020. Finalmente, del 10 al 12 de agosto de 2020 se hicieron mediciones con el destilador solar únicamente (configuración 1). En las Figuras 33 y 34 se proporcionan los esquemas representativos de las configuraciones 1 y 2.

Tabla	1.	Matriz	experimental
-------	----	--------	--------------

Configuración	Fecha de experimentación	
1 – Destilador solar (DS)	10 – 12 de agosto de 2020	
2 – DS + Precalentador	7 – 9 de agosto de 2020	
3 – DS + Precalentador + Condensador	31 de julio a 2 de agosto de 2020	



Figura 33. Esquema representativo de la configuración 1.



Figura 34. Esquema representativo de la configuración 2.

El procedimiento que se estableció para realizar las mediciones de las distintas variables que intervienen en el proceso de desalinización durante cada uno de los días mostrados en la Tabla 1 consiste en los siguientes siete pasos:

- 1. Análisis de la salinidad del agua que se va a introducir al destilador y al tanque de almacenamiento.
- 2. Llenar el tanque de almacenamiento a su capacidad máxima.
- Encender las bombas de agua para llenar el calentador solar en espiral y el destilador a los niveles requeridos, y poner en funcionamiento el condensador.
- Iniciar el sistema de adquisición de datos. Registrar las mediciones de temperatura hasta la hora indicada.
- Detener el sistema de adquisición de datos a la hora indicada y desconectar las bombas de agua.

- Descargar las mediciones de temperatura del sistema de adquisición de datos a la computadora y recopilar las mediciones de las variables ambientales de la página web de la estación meteorológica.
- 7. Medir el volumen destilado antes del amanecer del día siguiente.

Independientemente de la configuración analizada, el procedimiento de medición fue el mismo. Los datos recopilados durante cada día de experimentación fueron procesados para crear tablas y gráficas de resultados similares a las encontradas en la literatura sobre destilación solar y son expuestas en el capítulo 4 de esta tesis.

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos en este trabajo experimental. Los resultados se presentan en tres etapas, una para cada configuración propuesta, como se visualiza en la Tabla 1. En la sección final del capítulo se realiza una discusión sobre los resultados generados.

4.1 Resultados

4.1.1 Configuración 1: destilador solar

La evaluación de la configuración 1 (Figura 33) se realizó del 10 al 12 de agosto de 2020. Corresponde al análisis del destilador solar únicamente, como se muestra en la matriz experimental de la Tabla 1. En la Figura 35 se puede ver el comportamiento de la irradiación solar cada hora (*I*) calculada con le Ecuación (9). Se observa que a medida que avanzó el día la cantidad de radiación disponible aumentó, hasta alcanzar el punto máximo al mediodía, posteriormente descendió. Los valores máximos alcanzados durante los tres días fueron: 655.29, 641.49 y 633.67 W/m², respectivamente. Los valores de la radiación acumulada (*H*), obtenidos con la Ecuación (10), para cada día fueron: 5.16, 4.79 y 4.68 kWh/m², respectivamente.



Figura 35. Variación de la radiación solar horaria durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.

Las curvas de variación de la temperatura ambiente (T_{amb}) y la velocidad del viento (V) durante los tres días de mediciones usando la configuración 1 se proporcionan en las Figuras 36 y 37, respectivamente. En la Figura 36 se puede observar que T_{amb} no mostró un cambio significativo. El día que más variación hubo fue el 11 de agosto de 2020 pues se registró un cambio de 18.5 °C a 20.5 °C. El valor promedio de T_{amb} cada día fue: 19.2, 19.5 y 19.5 °C, respectivamente.



Figura 36. Comportamiento de la temperatura ambiente durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.



Figura 37. Variación de la velocidad viento durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.

Contrario a T_{amb} , sí se presentaron variaciones significativas de la velocidad del viento en cada uno de los días. Se observa en la Figura 37 que no se siguió una tendencia regular y que los valores más grandes se midieron en la segunda mitad del día, siendo 7.79, 6.11 y 6.13 m/s,

respectivamente. Considerando que el 10 de agosto de 2020 la radiación solar acumulada fue mayor, la temperatura ambiente fue ligeramente menor y la velocidad del viento mayor, se espera que haya más producción de destilado en comparación con los otros dos días. Una baja temperatura ambiente combinada con una alta velocidad del viento asegura una transferencia de calor más efectiva de los vidrios al ambiente y, en consecuencia, una mayor generación de condensado. En las Figuras 38 a 41 se muestra la evolución de las temperaturas de la bandeja (T_b), del agua (T_{ag}), del vidrio que da al este (T_{g,e}) y del vidrio que da al oeste (T_{g,o}), respectivamente, para cada uno de los días en que se probó la configuración 1.



Figura 38. Evolución de la temperatura de la bandeja durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.



Figura 39. Variación de la temperatura del agua durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.



Figura 40. Comportamiento de la temperatura del vidrio lado este durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.



Figura 41. Cambio de la temperatura del vidrio lado oeste durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 1.

Se puede notar de las Figuras 38 a 41 que todas las temperaturas siguieron la tendencia de la radiación solar incidente sobre la bandeja, confirmando así que es la radiación del Sol la energía que impulsa y mantiene el proceso de destilación. El 10 de agosto de 2020 las magnitudes de las cuatro variables en cuestión fueron relativamente mayores durante la primera mitad del día, lo cual está de acuerdo con el hecho de que *I* fue considerablemente mayor en este día. En

la segunda mitad del día no se presentó la misma tendencia debido a la influencia de la baja temperatura ambiente y la alta velocidad del viento que se mostró después del mediodía.

En la Figura 42 se proporcionan las curvas de T_b, T_{ag}, T_{v,e} y T_{v,o} obtenidas el día 10 de agosto de 2020, que corresponde al día en que se acumuló más radiación solar. Se puede ver que la diferencia entre T_{ag} y T_b fue prácticamente despreciable a causa del aislamiento térmico que rodea la bandeja de metal, el cual minimizó las pérdidas de calor, ocasionando una alta trasferencia de energía entre la bandeja y el agua. Igualmente se observa que T_{ag} fue consistentemente mayor que T_{v,e} y T_{v,o}, después de las 10 de la mañana, permitiendo una transferencia efectiva de calor hacia la cubierta de vidrio a través de los mecanismos de convección, radiación y evaporación descritos por las Ecuaciones (1) a (3). En los días 11 y 12 de agosto de 2020 se registraron comportamientos similares.



Figura 42. Variación de las temperaturas Tb, Tag, Tv,e y Tv,o obtenidas el día 10 de agosto de 2020 utilizando la configuración 1.

En la Figura 43 se muestra en un gráfico de barras la producción de condensado en los tres días utilizando la configuración 1. Se observa que la producción máxima ocurrió el 10 de agosto de 2020 y fue de 3.86 L/m². Dicho rendimiento fue 4.3% mayor que la producción máxima de 3.7 L/m² obtenida en el verano de 1988 en Baja California Sur, donde utilizaron un destilador solar de tipo canal con techo triangular (Bermudez-Contreras et al., 2008). En comparación con el 10 de agosto de 2020, el día 11 se obtuvo una producción 4.1% menor y el día 12 una 5.7% menor.



Figura 43. Producciones de destilado obtenidas con la configuración 1.

4.1.2 Configuración 2: destilador solar + precalentador

Los experimentos utilizando la configuración 2 (Figura 34) fueron realizados del 7 al 9 de agosto de 2020. Se evaluó el desempeño del destilador acoplado al precalentador solar. En la Figura 44 se visualiza el comportamiento de la irradiación solar en el transcurso de los tres días, presentando una tendencia similar. Los valores máximos alcanzados se presentaron al mediodía y fueron: 674.29, 695.41 y 698.67 W/m², respectivamente. Asimismo, los valores de *H* para cada día fueron: 5.13, 5.20 y 5.26 kWh/m², respectivamente.



Figura 44. Variación de la radiación solar horaria durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 2.

En las Figuras 45 y 46 se indican las curvas de T_{amb} y V de los tres días de mediciones implementando la configuración 2. En la Figura 45 se muestra que T_{amb} mostró una tendencia ascendente durante la mayor parte del tiempo. El día de mayor variación fue el 8 de agosto de 2020, con una lectura mínima de 17.6 °C y una máxima de 20.7 °C. El valor promedio de T_{amb} de cada día fue: 19.2, 19.4 y 19.5 °C, respectivamente. Se puede observar que los valores promedio de T_{amb} fueron similares a los obtenidos en los días en que se evaluó la configuración 1.



Figura 45. Comportamiento de la temperatura ambiente durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 2.



Figura 46. Variación de la velocidad viento durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 2.

En la Figura 46 se puede ver que la velocidad del viento también presentó un comportamiento similar los tres días. En las primeras 8 horas de medición la velocidad del viento fue incrementando y posteriormente descendió. Al igual que en la configuración 1, los valores más grandes registrados de *V* se midieron en la segunda mitad del día, siendo 7.05, 7.74 y 6.13 m/s, respectivamente. Igualmente, los valores promedio de la velocidad del viento fueron: 4.67, 4.67 y 4.13 m/s, respectivamente.

De las Figuras 44 a 46 se puede comentar que la radiación solar acumulada fue aproximadamente constante en los tres días, en cambio hubo mayor variación en los valores horarios de la velocidad del viento y la temperatura ambiente. Por lo tanto, fue el 7 de agosto de 2020 el día con mejores condiciones climatológicas para el proceso de destilación, debido a las relativamente más bajas temperaturas y ligeramente más altas velocidades del viento que se obtuvieron. Por tal motivo se espera que haya más producción de destilado.

En la Figura 47 se puede notar que las tendencias de las curvas fueron nuevamente semejantes a las de la irradiación solar. Los valores máximos de T_b, T_{ag}, T_{v,e} y T_{v,o} fueron 66.3, 66.0, 55.0 y 50.7 °C, respectivamente. Se observa que en este día se alcanzó una mayor temperatura del agua en comparación con el día de mayor productividad de la configuración 1 (10 de agosto de 2020, Figura 42). Esto se explica por la adición del precalentador al sistema. También, las diferencias entre T_b y T_{ag} fueron despreciables este día, señalando una efectiva trasferencia de calor entre la bandeja y el agua. El comportamiento de las curvas de T_b, T_{ag}, T_{v,e} y T_{v,o} en los días 8 y 9 de agosto de 2020 mostró un comportamiento similar al de la Figura 47.



Figura 47. Variación de Tb, Tag, Tv, e y Tv, o obtenidas el día 7 de agosto de 2020 utilizando la configuración 2.

En la Figura 48 se muestra un diagrama de barras con el rendimiento total diario de destilación. Se puede notar que el máximo generado se presentó el 7 de agosto de 2020 con 4.74 L/m². Este valor fue 18.6% mayor que el máximo de la configuración 1 (3.86 L/m²), lo que demuestra la efectividad de utilizar un precalentador solar para elevar la temperatura del agua que se suministra al destilador solar.



Figura 48. Producciones de destilado obtenidas con la configuración 2.

4.1.3 Configuración 3: destilador solar + precalentador + condensador

Los días del 31 de julio al 2 de agosto de 2020 se realizó el estudio de la configuración 3 (Figura 24). Se analizó la productividad del destilador acoplado al precalentador solar y al condensador externo. En la Figura 49 se muestra el comportamiento de la irradiación solar de los tres días, donde se visualiza una tendencia iregurar los días 1 y 2 de agosto de 2020 debido a la nubosidad. Los valores máximos alcanzados durante los tres días fueron: 598.51 W/m², 580.06 W/m² y 612.86 W/m², respectivamente. Los valores de la radiación acumulada (*H*), para cada día fueron: 4.86 kWh/m², 3.92 kWh/m² y 3.70 kWh/m², respectivamente.



Figura 49. Variación de la radiación solar horaria durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 3.

Las curvas de la temperatura ambiente y la velocidad del viento durante los tres días de mediciones utilizando la configuración 3 se presentan en las Figuras 50 y 51, respectivamente. En la Figura 50 se puede observar que T_{amb} mostró un comportamiento relativamente distinto cada día, a causa de la nubosidad. El día que más variación hubo fue el 31 de julio de 2020 pues se registró un cambio de 19.3 °C a 21.4 °C. El valor promedio de T_{amb} cada día fue: 20.2, 19.4 y 18.6 °C, respectivamente.



Figura 50. Comportamiento de la temperatura ambiente durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 3.



Figura 51. Variación de la velocidad viento durante los 3 días de medición correspondientes a la configuración 3.

Se observa en la Figura 51 que no se siguió una tendencia regular en la velocidad y que los valores más grandes se midieron entre las 9:00 y 15:00 horas, siendo 5.13, 5.50 y 5.33 m/s, respectivamente. Tomando en cuenta que la irradiación solar es la variable que más influye en los destiladores solares, se espera que el 31 de julio de 2020 sea el día que presente mayor destilado, debido a su alta radiación solar acumulada. La mayor registrada en los tres días de medición implementando la configuración 3. En la Figura 52 se proporcionan las curvas de T_b, T_{ag}, T_{v,e} y T_{v,o} obtenidas en este día 31 de julio de 2020.



Figura 52. Variación de de Tb, Tag, Tv, e y Tv, o obtenidas el día 31 de julio de 2020 utilizando la configuración 3.

En la Figura 52 se puede observar nuevamente que la diferencia entre T_{ag} y T_b fue prácticamente despreciable, corroborando que las pérdidas de calor por la bandeja son mínimas y la trasferencia de energía entre la bandeja y el agua fue alta. De nuevo se observa que T_{ag} fue consistentemente mayor que $T_{v,e}$ y $T_{v,o}$, después de las 10:00, permitiendo una transferencia efectiva de calor hacia la cubierta de vidrio. Los valores máximos de T_b , T_{ag} , $T_{v,e}$ y $T_{v,o}$ fueron 66.0, 65.4, 56.2 y 56.5 °C, respectivamente.

Durante los tres días de estudio no se presentaron condiciones climatológicas semejantes a las que se tuvieron durante la evaluación de las configuraciones 1 y 2. Los niveles de irradiación que se presentaron durante la experimentación con la configuración 3 fueron menores; sin embargo, se obtuvo un destilado mayor. En la Figura 53, se visualizan los niveles de destilado que se produjeron con la configuración 3. Se puede notar que el máximo se obtuvo el 31 de julio de 2020 con 5.0 L/m². Este valor es 5.2% mayor que el máximo de la configuración 2, lo que demuestra la efectividad de utilizar un condensador externo acoplado al destilador solar, pues aumenta la superficie de condensación.



Figura 53. Producciones de destilado obtenidas con la configuración 3.

4.2 Discusión

La producción de destilado de cada día de experimentación se representa en la Figura 54 en una gráfica de barras, donde se ve claramente que el uso de elementos adicionales (precalentador y condensador) acoplados al destilador solar mejora su rendimiento. La productividad máxima registrada fue 5.0 L/m², obtenida el 31 de julio de 2020 con la configuración 3. Se visualiza también que la producción de destilado del 1 y 2 de agosto configuración 3 fue menor que la registrada el 7, 8 y 9 de agosto con la configuración 2, esto se debió a la menor cantidad de irradiación solar acumulada.



Figura 54. Destilados de las tres configuraciones.

En la Figura 55 se muestran los valores de eficiencia térmica calculados con la Ecuación (7) y su respectiva incertidumbre para los días de mayor productividad de cada configuración. Para considerar la energía consumida por las bombas del precalentador y del condensador, se agregaron los términos $\dot{W}_{bp}\Delta t_p$ y $\dot{W}_{bc}\Delta t_c$ al denominador. El primero cuantifica la energía que se consumió en la bomba del precalentador y el segundo la que se utilizó en el condensador. En ambos términos \dot{W}_b denota la potencia eléctrica de la bomba y Δt el tiempo de operación de la misma. Se observa que la adición del precalentador solar mejoró el rendimiento del sistema en un 11.3%, y que la incorporación del condensador externo agregó un 6.7% adicional; demostrando así la efectividad de acoplar ambos elementos externos al destilador solar. La incertidumbre se determinó siguiendo la metodología señalado en el Anexo 2.



Figura 55. Eficiencia de las tres configuraciones.

Con el propósito de estimar la trasferencia de calor del agua contenida en la bandeja a los vidrios y posteriormente al ambiente se calcularon los valores de los coeficientes $h_{cag,v}$, $h_{rag,v}$ y $h_{eag,v}$ usando las Ecuaciones (4) a (6), y del calor total (qt_{agv}) transmitido por los mecanismos de convección, radiación y evaporación con las Ecuaciones (1) a (3). En las Figuras 56 a 58 se muestran las curvas de los coeficientes para los días con mayor productividad en cada configuración. Y en la Tabla 2 se proporcionan los valores de qt_{aqv} para los mismos días.



Figura 56. Variación del coeficiente de convección en los días con mayor productividad de cada configuración.



Figura 57. Variación del coeficiente de radiación en los días con mayor productividad de cada configuración.



Figura 58. Variación del coeficiente de evaporación en los días con mayor productividad de cada configuración.

En la Figura 56 se puede ver que con las configuraciones 1 y 2 el valor del coeficiente de convección entre el agua y los vidrios fue similar, no obstante en la configuración 3 la presencia del condensador externo provocó una ligera disminución en el valor de $h_{cag,v}$. En contraste, el valor de $h_{rag,v}$ para la configuración 3 fue ligeramente mayor como se observa en la Figura 57. En el caso de $h_{eag,v}$ su valor en las tres configuraciones fue parecida, aunque ligeramente menor en la configuración 1. En comparación $h_{cag,v}$ y $h_{rag,v}$, el coeficiente $h_{eag,v}$ es el que presenta una mayor influencia ya que su magnitud fue considerablemente mayor, coincidiendo con lo reportado por Kabeel et al. (2017) y Chavez et al. (2019) para un destilador solar.

Configuración	Fecha	$qt_{ag, v}$ (kW)	
1	10-agt-20	1.81	
2	07-agt-20	1.94	
3	31-jul-20	1.68	

Tabla 2 Calor trasferido del agua a los vidrios en los días con mayor productividad de cada configuración.

Respecto a $qt_{ag,v}$ se visualiza en la Tabla 2 que el efecto del precalentar el agua de alimentación en el calentador solar (configuración 2) causó un aumento de 0.13 kW en comparación con la configuración 1. Para la configuración 3 el valor de $qt_{ag,v}$ aparentemente fue menor que los otros dos casos, sin embargo, se estima que ocurrió lo contrario porque parte del vapor se enfrió en el condensador, donde el calor liberado se transmitió al agua de enfriamiento y al ambiente. En la Tabla 3 se muestra una comparativa entre las producciones máximas de destilado obtenidas en este trabajo y las reportadas en la literatura para diferentes configuraciones de destiladores solares.

Se puede observar en la Tabla 3 que en general las productividades alcanzadas con el sistema aquí analizado se ubican dentro de los valores publicados para destiladores solares de una y dos pendientes, independientemente de si éstos cuentan con elementos mecánicos adicionales o no, con excepción del trabajo de Kabeel et al. (2014) que empleó un ventilador para crear vacío dentro del destilador y un condensador externo. También se puede ver que la producción de condensado de la configuración 3 igualó a la de un destilador piramidal equipado solamente con un colector solar para precalentar el agua de la bandeja. Esto significa que un destilador piramidal es más eficiente que uno de doble pendiente. Sin embargo, uno de doble pendiente es notablemente más sencillo de construir y más económico.

Autor	Tipo de destilador solar	Lugar de prueba	Temporada / Mes	Profundidad del agua (cm)	Productividad diaria (L/m2)
Elango and Kalidasa	Destilador solar de doble pendiente	India	Primavera / Marzo-Abril	1 2	4.40 4.01
Feilizadeh et al.	Destilador solar de doble pendiente	Irán	Verano Otoño	2 2	4.46 3.28
Badran and Tahaineh	Destilador solar de una pendiente con colector	Jordania	Otoño / Octubre	2	3.51
Badran et al.	Destilador solar piramidal con colector	Jordania	Primavera / Mayo	2	5.0
Kabeel et al.	Destilador solar de una pendiente con ventilador y condensador	Egipto	Primavera / Mayo Verano / Junio	_	9.44 12.56
Presente trabajo	Destilador solar de doble pendiente		Verano / Julio	2	3.86
	Destilador solar de doble pendiente con precalentador	México		2	4.74
	Destilador solar de doble pendiente con precalentador y condensador			2	5.0

Tabla 3 Comparación de los rendimientos obtenidos aquí con respecto a los de otras configuraciones SS.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Se diseñó, construyó y evaluó un sistema de desalinización solar de doble pendiente novedoso por el hecho de que integra tanto un colector solar para precalentar el agua de alimentación como un condensador externo al destilador. Un destilador solar de doble pendiente con estas características no ha sido reportado.

El sistema de desalinización solar que se desarrolló se construyó con materiales económicos disponibles localmente, es de operación y mantenimiento sencillos, y produjo cantidades de condensado dentro de los valores reportados en la literatura. Las mediciones experimentales se realizaron bajo condiciones de clima real en Ensenada, Baja California, los días 31 de julio a 10 de agosto de 2020.

La evaluación experimental del sistema se realizó en tres etapas. En primer lugar, se analizó el destilador solar únicamente (configuración 1), después se evaluó el efecto de incorporar el precalentador solar (configuración 2), y finalmente se añadió el condensador externo y se estudió el rendimiento del sistema en su conjunto. Cada configuración se investigó durante tres días.

Las producciones máximas de condensado con cada configuración fueron: 3.86 L/m², 4.74 L/m² y 5.0 L/m², respectivamente. Igualmente, las eficiencias térmicas correspondientes fueron: 48.8%, 60.1% y 66.8%, respectivamente. Estos resultados demuestran la positiva contribución del precalentador y condensador al desempeño del sistema.

De los tres coeficientes involucrados en el proceso de trasferencia de calor entre el agua de la bandeja y la cubierta de vidrio se corroboró que el coeficiente de evaporación fue el más influyente debido a que fue el de mayor magnitud. Su valor se mantuvo entre 7.1 W/m²•°C y 40.2 W/m²•°C. Los valores máximos calculados de los coeficientes de convección y radiación fueron 2.7 W/m²•°C y 3.9 W/m²•°C, respectivamente.

5.2 Recomendaciones para trabajo futuro

Con el propósito de mejorar el trabajo aquí presentado se hacen las siguientes recomendaciones:

- 1. Determinar el calor que se trasfiere del vapor al agua de enfriamiento y al ambiente en el condensador.
- 2. Analizar en conjunto cada una de las configuraciones para determinar el rendimiento exacto del precalentador solar y el condensador externo.
- 3. Determinar cuál es el flujo másico adecuado para que el condensador externo genere el mayor condensado.
- 4. Analizar el rendimiento del destilador solar propuesto agregando nanomarticulas para aumentar considerablemente su rendimiento.

- Ahmed, F. E., Hashaikeh, R., Hilal, N. 2019. Solar powered desalination Technology, energy and future outlook. Desalination, 453 (November 2018), 54–76. doi:10.1016/j.desal.2018.12.002
- Alnaimat, F., Klausner, J. F., Mei, R. 2011. Transient analysis of direct contact evaporation and condensation within packed beds. International Journal of Heat and Mass Transfer, 54(15– 16), 3381–3393. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.03.048
- Alvarez, A., Carranza, F., Zavala, I., Sauceda, D. 2019. Theoretical investigation of a direct-contact humidification-dehumidification desalination system. Desalination and Water Treatment, 142, 11–23. doi:10.5004/dwt.2019.23415
- Arunkumar, T., Raj, K., Dsilva Winfred Rufuss, D., Denkenberger, D., Tingting, G., Xuan, L., Velraj,
 R. 2019. A review of efficient high productivity solar stills. Renewable and Sustainable Energy
 Reviews, 101(November 2018), 197–220. doi:10.1016/j.rser.2018.11.013
- Association, A. W. W. 2011. Desalination of seawater, manual of water supply practices. Denver: American Water Works Association. Recuperado el 18 de agosto de 2020 de: https://www.americanwaterworks.....
- Badran, A. A., Al-Hallaq, I. A., Eyal Salman, I. A., Odat, M. Z. 2005. A solar still augmented with a flat-plate collector. Desalination, 172(3), 227–234. Recuperado el 10 de junio de 2020 de:https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.203
- Badran, O. O., Al-Tahaineh, H. A. 2005. The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity. Desalination, 183(1), 137–142. Recuperado el 9 de mayo de 2020 de:https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.046
- Bermudez-Contreras, A., Thomson, M., Infield, D. G. 2008. Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. Desalination, 220(1–3), 431–440. doi:10.1016/j.desal.2007.01.046
- Cano, J. 2017. Manual de Usuario eSICET Manual de Usuario eSICET, 1–5. Retrieved from Recuperado el 1 de julio de 2020 de: http://www.etitudela.com/entrenadorcomunicaciones/downloads/gsmmanualsmsconfigur atorl.pdf
- Carranza, F., Villa, C. D., Aguilar, J., Borbón-Nuñez, H. A., Sauceda, D. 2021. Experimental study on the potential of combining tio2, zno, and al2 o3 nanoparticles to improve the performance of a double-slope solar still equipped with saline water preheating. Desalination and Water Treatment, 216, 14–33. doi:10.5004/dwt.2021.26760

- Chávez, S., Terres, H., Lizardi, A., López, R., Lara, A. 2019. Heat Transfer Intern Coefficient Determination in the Process of Solar Still. Journal of Physics: Conference Series, 1221(1). doi:10.1088/1742-6596/1221/1/012032
- CONAGUA. 2016. Estadisticas del agua en México. México, D. F. Recuperado el 5 de mayo de 2020 de:https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-ygeograficas-60692
- CONAGUA. 2017. Estadisticas del agua en México. México, D. F. Recuperado el 5 de mayo de 2020 de:https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-ygeograficas-60692
- CONAGUA. 2018. Estadisticas del agua en México. México, D. F. Recuperado el 5 de mayo de 2020 de:https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-ygeograficas-60692
- Dunkle, R. V. 1961. Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still. In *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA* (Vol. 5, p. 895).
- El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M. 2002. FEl-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M. 2002. Fundamentals of salt water desalination. Elsevier.undamentals of salt water desalination. Elsevier.
- El-Sebaii, A. A., El-Bialy, E. 2015. Advanced designs of solar desalination systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 1198–1212. doi:10.1016/j.rser.2015.04.161
- Elango, T., Kalidasa Murugavel, K. 2015. The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. Desalination, 359, 82–91. doi:10.1016/j.desal.2014.12.036
- FEA. 2000. Agua en México. México, D. F Recuperado el 5 de mayo de 2020 de:https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692.
- Feilizadeh, M., Karimi Estahbanati, M. R., Ahsan, A., Jafarpur, K., Mersaghian, A. 2016. Effects of water and basin depths in single basin solar stills: An experimental and theoretical study. Energy Conversion and Management, 122, 174–181. doi:10.1016/j.enconman.2016.05.048
- Hi-Tech. (n.d.). The page you requested cannot be found., 4–7. Retrieved from Recuperado el 25 de marzo de 2020 de: https://www.hitechro.net/flow-charts
- Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., Almulla, N. 2016. Performances of pyramid-shaped solar still with different glass cover angles: Experimental study. IREC 2016 - 7th International Renewable Energy Congress, 1–6. doi:10.1109/IREC.2016.7478869

- Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., Eisa, A. 2019. Effect of graphite mass concentrations in a mixture of graphite nanoparticles and paraffin wax as hybrid storage materials on performances of solar still. Renewable Energy, 132, 119–128. doi:10.1016/j.renene.2018.07.147
- Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., Mahmoud, G. M. 2020. Performance evaluation of continuous solar still water desalination system. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. doi:10.1007/s10973-020-09547-5
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., Essa, F. A. 2014. Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach. Energy Conversion and Management, 78, 493–498. doi:10.1016/j.enconman.2013.11.013
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., Essa, F. A. 2017. Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 75, 77–86. doi:10.1016/j.jtice.2017.01.017
- Madiouli, J., Lashin, A., Shigidi, I., Badruddin, I. A., Kessentini, A. 2020. Experimental study and evaluation of single slope solar still combined with flat plate collector, parabolic trough and packed bed. Solar Energy, 196, 358–366. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.027
- Marina. (n.d.). Estaciones Mareográficas de la Secretaría de Marina. Retrieved May 31, 2021, from http://redmar.cicese.mx/emmc/webm/emmc.php?nvar=met&nsta=ENSM&nday=2
- McCutcheon, J. R., McGinnis, R. L., Elimelech, M. 2005. A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. Desalination, 174(1), 1–11. doi:10.1016/j.desal.2004.11.002
- Mostafa, H. S., John, H., Lienhard, V., Syed, M. Z. 2010. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment, 16(1–3), 354–380.
- Nayar, K. G., Sharqawy, M. H., Banchik, L. D., Lienhard, J. H. 2016. Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. Desalination, 390, 1–24. doi:10.1016/j.desal.2016.02.024
- Rajamanickam, M. R., Ragupathy, A. 2012. Influence of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer in a Double Slope Solar Still. Energy Procedia, 14, 1701–1708. Recuperado el 5 de mayo de 2020 de:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1155
- Rajaseenivasan, T., Kalidasa Murugavel, K. 2013. Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. Desalination, 319, 25–32. Recuperado el 28 de enero de 2020 de:https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.029

- Sharon, H., Reddy, K. S. 2015. A review of solar energy driven desalination technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 1080–1118. doi:10.1016/j.rser.2014.09.002
- Sharqawy, M. H., Lienhard V, J. H., Zubair, S. M. 2010. Thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment, 16(1–3), 354– 380. doi:10.5004/dwt.2010.1079
- Taamneh, Y., Taamneh, M. M. 2012. Performance of pyramid-shaped solar still: Experimental study. Desalination, 291, 65–68. doi:10.1016/j.desal.2012.01.026
- Tiwari, G. (n.d.). Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications G. N. Tiwari -Google Libros. Retrieved October 7, 2020, from https://books.google.com.mx/books/about/Solar_Energy.html?id=82oBeeq6UZYC&redir_e sc=y
- UNESCO. 2012. Managing Water under Uncertainty and Risk. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (Vol. 1). EE.UU. Recuperado el 17 de febrero de 2020 de: https://doi.org/10.1016/0020-0190(95)00060-P
- UNESCO. 2015. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO. Retrieved from http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf

Procedimiento de calibración de los termopares

La calibración de los termopares se realizó utilizando el procedimiento recomendado por Miller (Miller, 1975). Primero se calcula el valor promedio \overline{I} de las lecturas realizadas, como se muestra en la siguiente ecuación

$$\bar{\mathbf{I}} = \frac{\sum I_i}{n} \tag{11}$$

donde I_i representa el valor de cada lectura individual y n es el número total de las lecturas realizadas. Luego, el valor porcentual de la desviación de cada lectura se calcula de la siguiente manera

$$(I_{\%}) = ((I_i - \bar{I})/\bar{I}) * 100$$
(12)

Posteriormente, se obtiene la desviación estándar porcentual σ mediante la siguiente ecuación

$$\sigma = \left[\frac{\sum (I_{\%})_{i}^{2}}{n-1}\right]^{1/2}$$
(13)

Y finalmente σ se multiplica por un factor de corrección t_{st} derivado de la distribución t de Student para una confidencialidad del 95%

$$\sigma_{\rm p} = t_{\rm st}\sigma \tag{14}$$

 σ_p se conoce como la precisión del instrumento. Ahora, el error de desviación se calcula como

$$B = \left(\frac{\bar{I} - I_t}{I_t}\right) * 100 \tag{15}$$

Donde I_t es el valor convencional verdadero dado por el micro baño térmico que se utilizó para la calibración, marca Fluke modelo 7102 (Figura 58), con una precisión de ±0.25°C y una resolución de 0.01°C.



Figura 59. Baño térmico usado para calibrar los termopares.

El factor de corrección para ajustar las lecturas individuales se calcula por

$$F_B = \left(1 + \frac{B}{100}\right)^{-1}$$
(16)

Finalmente, una vez ajustada las lecturas individuales, la exactitud está dada por la siguiente ecuación

Exactitud =
$$\pm (1 + \frac{1}{n} \sigma_{\rm p}^2)^{1/2}$$
 (17)
Temperatura (ºC)	36.0	50.0	76.0
	Exactitud (%)	Exactitud (%)	Exactitud (%)
Termopar 1	2.26	1.16	1.21
Termopar 2	1.05	1.09	1.03
Termopar 3	1.03	1.07	1.08
Termopar 4	1.05	1.38	1.14
Termopar 5	1.71	1.03	1.11
Termopar 6	1.04	1.13	1.01
Termopar 7	1.05	1.16	1.03
Termopar 8	1.06	1.13	1.03
Termopar 9	1.13	1.05	1.01
Termopar 10	1.04	1.14	1.02

 Tabla 4. Resultados de calibración de los termopares a las temperaturas indicadas.

Anexo 2

Procedimiento para calcular la incertidumbre de la eficiencia térmica del destilador

La incertidumbre de la eficiencia térmica del destilador (Ecuación 7) se determinó a partir de la siguiente ecuación

$$\delta\eta_d = \sqrt{\left(\frac{\delta m_p}{m_p}\right)^2 + \left(\frac{\delta h_{fg}}{h_{fg}}\right) + \left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 * \eta_d}$$
(18)

donde para determinar $\delta m_p\,$ se utilizó la siguiente ecuación

$$\delta m_p = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2} * Q * \rho \tag{19}$$

Aquí δQ es la incertidumbre del volumen destilado por m² y se obtuvo como sigue

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2} \tag{20}$$

donde V es el volumen destilado (m³) y ρ es la densidad del agua. De acuerdo con la precisión de la probeta que se empleó para medir el volumen, $\delta V = 5$ ml. El valor de ρ se obtuvo de tablas de propiedades termodinámicas con una precisión de <u>+</u>0.14% (Sharqawy et al.,2010). En la Ecuación (19) δA se obtuvo a partir de la siguiente fórmula

$$\delta A = \sqrt{\left(\frac{\delta L_1}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta L_2}{L_2}\right)^2} * A$$
(21)

donde L_1 y L_2 son las dimensiones de la base de la bandeja metálica, medidas con una regla graduada: $L_1 = 619.6 \pm 0.5 \text{ mm}$ y $L_2 = 936.6 \pm 0.5 \text{ mm}$. En la Ecuación (17) h_{fg} se determinó también a partir de talas de propiedades termodinámicas con una precisión del $\pm 0.01\%$. Asimismo, δH es la incertidumbre del piranómetro y vale $\pm 1\%$ (Cano, 2017).