

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE
MÚLTIPLES ETAPAS ACOPLADO A UN COLECTOR SOLAR DE
TUBOS DE CALOR CONCENTRADO”**

Presentada por:

FORTUNATO DEL VALLE POMA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**Lima - Perú
2022**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR DE
MÚLTIPLES ETAPAS ACOPLADO A UN COLECTOR SOLAR DE
TUBOS DE CALOR CONCENTRADO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**Presentada por:
FORTUNATO DEL VALLE POMA**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg.Sc. Wifredo Baldeón Quispe

PRESIDENTE

Ph.D. José Calle Maraví

ASESOR

Mg.Sc. Juan Carlos Palma

MIEMBRO

Mg.Sc. Augusto Zingg Rosell

MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo y cariño recibido
A mi esposa y mis hijos por ser la razón de mi vida

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por brindarme fuerza y salud para realizar mis estudios.

A mis amigos Javier Quino y Erich Saettone por su aliento y apoyo incondicional

A la Universidad de Lima por brindarme apoyo con el campus para realizar los experimentos

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	8
	2.1. Métodos de desalinización solar.....	8
	2.1.1.-Método directo	9
	2.1.2.-Método indirecto	9
	2.2. Clasificación de los destiladores solares	11
	2.3. Colectores solares térmicos.....	13
	2.3.1.- Colectores de tubos de vacío (ETCs)	14
	2.3.2. Concentradores parabólicos compuestos (CPCs).....	17
	2.3.3. Colectores parabólicos compuestos (CPCs).....	20
	2.3.4. Colectores de tubos de calor concentrados (CHPSCs).....	23
	2.4. Destiladores solares de múltiples etapas	26
	2.4.1. Experimentos modelo con destiladores solares de múltiples etapas	26
	2.4.2. Modelamiento matemático	30
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
	3.1. Materiales	33
	3.2. Descripción del área de estudio	34
	3.3. Diseño del destilador solar	35
	3.4. Eficiencia y productividad del destilador solar	39
	3.5. Calidad del agua desalinizada.....	42
	3.6. Procedimiento experimental	44
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
	4.1. Construcción del destilador solar	46
	4.1. Productividad de agua destilada	52
	4.2. Eficiencia térmica del sistema	55

4.3. Estadística: prueba de hipótesis	56
4.4. Análisis de la calidad del agua	58
4.5. Análisis económico.....	59
V. CONCLUSIONES	61
VI. RECOMENDACIONES	62
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
VIII. ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Procesos de desalinización comercialmente disponibles	10
Tabla 2: Colectores solares térmicos	14
Tabla 3:Coordenadas (x,z) que generan la forma del CPC truncado	26
Tabla 4: Condiciones climáticas durante la etapa de investigación	34
Tabla 5: Productividad y temperatura de agua por etapas vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021)	40
Tabla 6 : Productividad y temperatura de agua por etapas vs tiempo (sin superficie extendida; Marzo 30, 2021)	41
Tabla 7 : Productividad y diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021).....	41
Tabla 8 : Productividad y diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación vs tiempo (sin superficie extendida; Marzo 30, 2021)	41
Tabla 9: Eficiencia térmica vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021).....	42
Tabla 10 : Eficiencia térmica vs tiempo (sin superficie extendida; Mar 30, 2021).....	42
Tabla 11: Agua de mar de la Costa Verde (Lima-Perú)	43
Tabla 12 : Agua condensada a) con superficie extendida	43
Tabla 13 : Agua condensada b) sin superficie extendida	43
Tabla 14: Especificaciones de la superficie extendida	48
Tabla 15 : Especificaciones del colector solar.....	49
Tabla 16 : Especificaciones de los tubos de vacío.....	50
Tabla 17 : Especificaciones de los tubos heat pipe	50
Tabla 18: Producción de agua fresca; Mar 09,10,11,12, 26, 29, 30, 31, 2021	56
Tabla 19 : Resumen del análisis económico del sistema desalinizador	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:Tecnologías de desalinización solar probadas a nivel piloto	8
Figura 2: Diagrama esquemático de un destilador solar simple	9
Figura 3: Tecnologías de desalinización solar indirecta asociados con posibles dispositivos de conversión de energía solar	11
Figura 4: Clasificación de los destiladores solares	12
Figura 5: Clasificación de los colectores solares térmicos	13
Figura 6:Clasificación de los colectores solares de tubos de vacío	14
Figura 7:Esquema de un colector ETC y sus componentes principales	15
Figura 8: Heat pipe de un colector ETC	16
Figura 9:Componentes de un colector HPSC	16
Figura 10: Clasificación de los CPCs	17
Figura 11: CPC en 2D	18
Figura 12: Propiedades geométricas del CPC en 2D.....	19
Figura 13: Representación geométrica del CPC en 2D	20
Figura 14:Esquema de un colector ETSC-HP	21
Figura 15: Diseño del truncamiento de un colector CPC	23
Figura 16: Esquema de un colector CHPSC: (1) reflector, (2) tubo de vacío de vidrio, (3) <i>heat pipe</i> , y (4) estructura porosa dentro del <i>heat pipe</i>	23
Figura 17 : Distribución de la radiación sobre un colector HPSC y un CHPSC.....	24
Figura 18: Esquema del reflector parabólico de un colector CHPSC	25
Figura 19: Diagrama esquemático del sistema de desalinización solar desarrollado.....	27
Figura 20 :Esquema de la configuración experimental	28
Figura 21: La estructura y operación de un destilador solar con bandejas apiladas multietapa. 29	
Figura 22: Un esquema del destilador y su diagrama de balance de energía	30
Figura 23: Prototipo del destilador solar en 3D.....	35
Figura 24: Dimensionamiento del destilador solar en 3D	36
Figura 25:Componentes del destilador solar en 3D.....	37
Figura 26: Diseño de la inclinación y canaleta del destilador	37
Figura 27:Componentes del colector solar de tubos de calor concentrado	38
Figura 35:Productividad e intensidad de radiación solar vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021 y sin superficie extendida; Mar 30, 2021).....	52

Figura 36: Productividad y temperatura de agua por etapas vs tiempo	53
Figura 37: Productividad y diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación versus tiempo	54
Figura 38: Eficiencia térmica vs tiempo para los dos casos: a) con superficie extendida; Mar 9, 2021 y b) sin superficie extendida; Mar 30, 2021).....	55
Figura 39: Un esquema del diseño experimental del proyecto.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Proceso de fabricación de la superficie extendida	70
Anexo 2: Procedimiento de ensamblado del destilador	72
Anexo 3: Registros de temperatura	77
Anexo 4: Registros de condensado, TDS, conductividad, salinidad y pH	85

RESUMEN

La presente investigación se basó en diseñar y construir un prototipo desmontable de un destilador solar de múltiples etapas acoplado a un novedoso colector solar de tubos de calor concentrado con el fin de producir en pequeña escala agua fresca a partir de agua de mar, y cuyo objetivo era evaluar el rendimiento del destilador a través de su productividad; así como evaluar la calidad del agua fresca destinado al consumo humano. Con el fin de mejorar la productividad del sistema desalinizador se diseñó una superficie extendida de cobre para hacer más eficiente la transferencia de calor en la base o primera etapa del destilador. Para estudiar el efecto de la superficie extendida sobre la productividad la investigación se realizó en dos escenarios: un primer caso a) con superficie extendida y un segundo caso b) sin superficie extendida. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo todo el mes de marzo del presente en la azotea del pabellón W de la Universidad de Lima ($12^{\circ}05'04''S$; $76^{\circ}50'16''W$). Para el registro de la irradiación solar y las temperaturas se utilizó un sistema automático provisto de sensores, un software step 7 y un Siemens PLC modelo S7-1200. Además, se utilizó un equipo multiparámetro para la medición manual de los sólidos totales disueltos (TDS), la conductividad eléctrica, la salinidad y el pH. Se determinó para el destilador operando con la superficie extendida una productividad de $7,32 \text{ kg/m}^2/\text{día}$ y una eficiencia térmica del 14,7 %. Además, que los parámetros de calidad del agua fresca obtenido por destilación solar a partir de agua de mar cumplen con el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (DS N°031-2010-SA). Adicionalmente, se ha estimado que el costo del agua fresca producido (CPL) del presente trabajo es de 0,057 \$/L.

Palabras claves: destilador solar de múltiples etapas, colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC), destilación solar, productividad, calidad del agua fresca, sólidos totales disueltos (TDS), conductividad eléctrica.

ABSTRACT

This research designed and built a demountable prototype of a multi-stage solar still coupled to a novel concentrated heat pipe solar collector to produce fresh water from seawater on a small scale, and whose objective was to evaluate the performance of the distiller through its productivity; as well as evaluating the quality of fresh water intended for human consumption. To improve the productivity of the desalination system, an extended copper surface was designed to make the heat transfer in the base or first stage of the still more efficient. To study the effect of the extended surface on productivity, the investigation was conducted in two scenarios: with an extended surface and without an extended surface. The experimental tests were conducted all the month of March of the present in the roof of the pavilion W of the University of Lima ($12^{\circ}05'04''\text{S}$; $76^{\circ}50'16''\text{W}$). For the recording of solar irradiation and temperatures, an automatic system equipped with sensors, a step 7 software and a Siemens PLC model S7-1200 were used. Additionally, a multiparameter equipment was used for manual measurement of total dissolved solids (TDS), electrical conductivity, salinity, and pH. A productivity of $7.32 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{day}$ and a thermal efficiency of 14.7% were determined for the still operating with the extended surface. The quality parameters of fresh water obtained from solar distillation from seawater comply with the Regulation of the National Water Quality for Human Consumption (DS N ° 031-2010-SA). Additionally, it has been estimated that the cost of fresh water produced (CPL) in this work is 0.057 \$/ L.

Keywords: multi-stage solar still, concentrated heat pipe solar collector (CHPSC), solar distillation, productivity, quality of fresh water, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity.

I. INTRODUCCIÓN

En nuestro país, alrededor del 70 % de la población (aprox. 20 millones) vive en la costa, región desértica que sólo cuenta con el 1,8 % del total de agua dulce disponible. Como consecuencia, la población de bajos recursos sufre más las consecuencias de esta escasez; por ejemplo: un 10 % (aprox. 3 millones) ha sufrido enfermedades por el consumo de agua contaminada y 4,5 % de niños menores de 5 años (aprox. 5,4 millones – 31 % de áreas rurales y 10 % en urbanas) padece de desnutrición crónica por no disponer de agua tratada (Saettone 2014).

A lo largo de la historia, las personas han intentado tratar el agua salada para que pueda ser bebida y utilizada para la agricultura. De toda el agua presente en el planeta, el 94 por ciento es agua salada de los océanos y el 6 por ciento es agua dulce. De ésta última, aproximadamente el 27 por ciento está en los glaciares y el 72 por ciento está bajo tierra.

El agua salada es importante para el transporte y pesca, sin embargo, por la concentración de las sales disueltas no es apropiada para sostener la vida humana o la agricultura. La búsqueda de nuevas fuentes de agua ha impulsado el desarrollo de las técnicas de desalinización, lo que ha aumentado el rango de fuentes de agua disponibles para uso de una comunidad (Buros 2000).

La desalinización usa una gran cantidad de energía para remover una porción de agua pura desde una fuente de agua salada. Recientemente, se ha prestado considerable atención al uso de energías renovables como fuentes para desalinización, especialmente en áreas remotas debido a los altos costos de los combustibles fósiles y la falta de energía eléctrica en dichas áreas (Quiblawey y Banat 2008). Sin embargo, a pesar de las ventajas de las energías renovables, su contribución para cubrir la demanda de energía en todo el mundo sigue siendo marginal. Según Mekhilef et al. (2011), fuentes de energía renovables como solar, eólica, biomasa, la energía hidroeléctrica y la energía de las mareas, sólo aportaron alrededor del 1,5 % de la demanda mundial de energía en el 2006, y con una estimación que la tendencia aumentará hasta 1,8 % en 2030.

Según Bachchan et al. (2020) la desalinización solar es el proceso de purificación del agua salina para conseguir agua potable fresca usando energía solar directa. Esta energía permite el proceso de evaporación del agua salina. En seguida, el agua evaporada se condensa y se recoge para su uso posterior. Por otro lado, agua de mar está disponible en abundancia, pero el proceso de desalinización es muy caro debido a los grandes requerimientos de energía. Sin embargo, desde hace muchos años, la energía solar directa se utiliza como uno de los métodos de desalinización más baratos para poner en marcha diversos sistemas de desalinización, a su vez que no tiene ningún impacto ambiental.

Según Quiblawey y Banat (2008), debido a la naturaleza difusa de la energía solar, los principales problemas con el uso de la energía solar térmica en las plantas de desalinización a gran escala son la baja productividad y baja eficiencia térmica además de la considerable superficie requerida. Sin embargo, dado que las plantas de desalinización solar se caracterizan por la libre disponibilidad de la energía solar y costos de operación insignificante, esta tecnología es apropiado para la producción a pequeña escala, especialmente en zonas áridas, donde el suministro de energía convencional es escaso.

Según Quiblawey y Banat (2008), los procesos de desalinización solar pueden ser clasificados en sistemas de captación directa e indirecta. Los sistemas de captación que utilizan energía solar para producir destilado directamente en el colector solar se denominan sistemas de captación directa, mientras que los sistemas que combinan sistemas de captación de energía solar (colectores solares) con sistemas de desalinización convencionales se denominan sistemas indirectos. En los sistemas indirectos, la energía solar se utiliza para generar el calor necesario para la desalinización y/o para generar electricidad que se utiliza para proporcionar la energía eléctrica necesaria para las plantas de desalinización convencionales, como múltiple efecto (MED), múltiples etapas “flash” (MSF), compresión de vapor (VC) o destilación por membranas (MD).

Aunque existe un acuerdo general en la industria de la desalinización sobre lo que constituye una operación a gran y mediana escala, falta un consenso sobre lo que constituye la desalinización a pequeña escala. Buros (1991), categorizó varios niveles: pequeña escala como menos de 20 m³ /día; medio entre 20 y 400 m³ /día; y gran escala como más de 400 m³/día. Ayoub y Alward (1996), consideran que si un consumo de 5 L/persona/día de agua fresca es el mínimo diario para sobrevivir en zonas áridas y semi-áridas; entonces, una

pequeña comunidad rural de hasta 4000 personas requeriría de 20 m³/día de agua desalinizada; de esta manera concluyen que una producción de agua fresca de menos de 25 m³/día corresponde a una operación de desalinización en pequeña escala.

Los procesos de desalinización (MSF, MED, y VC) que tratan agua de mar y que utilizan como fuente de alimentación gas natural o eléctrica, tienen capacidades de producción que varía desde 20 hasta 30000 m³/día; los procesos de desalinización por membranas (ósmosis inversa, RO; electrodiálisis, ED y electrodiálisis inverso, EDR) que tratan agua de mar y salobre y que utilizan como fuente de alimentación energía eléctrica, tienen capacidades de producción desde 0,10 m³/día; el proceso de desalinización por congelación (freezing desalination) que trata agua de mar y que utiliza como fuente de alimentación energía eléctrica, tiene capacidades de producción que varía desde 38 hasta 750 m³/día; mientras tanto, el proceso de desalinización por destilación solar que trata agua de mar y salobre, para producir 4 L/día requiere de un destilador solar con 1 m² de área de colección (Ayoub y Alward 1996) . Finalmente, una planta de escala media MSF que utiliza indirectamente la energía solar, puede producir de 6–60 L/m²/día en comparación con los 3–4 L/m²/día que produce un típico destilador solar (Quiblawey y Banat 2008).

La productividad y la eficiencia térmica son términos asociados a los destiladores solares; la productividad, está definido como la producción de destilado por unidad de área de colección y por unidad de tiempo; en tanto que la eficiencia térmica está definida por la cantidad de energía requerida para evaporar el destilado respecto de la energía solar incidente sobre el área de colección del destilador. Generalmente, la productividad de un destilador solar depende de varios parámetros tales como la profundidad de agua, aislamiento, diferencia de temperaturas agua-vidrio, viento, temperatura ambiente, y radiación solar. Arunkumar et al. (2019), muestran una revisión de la productividad y eficiencia térmica de varios destiladores solares pasivos y activos; cuya productividad supera los 5 kg/m²/día; así mismo, concluye que para obtener una alta productividad y eficiencia térmica se requiere modificaciones en el diseño del destilador solar (bandejas múltiples, bandejas escalonadas, tipo piramidal, etc), el uso de diferentes tipos de colectores solares, el uso de reflectores, y el uso de diferentes materiales aislantes.

Badran y Al-Tahaine (2005), han experimentado el efecto de combinar un colector de placas planas para incrementar la productividad de agua en una destiladora activa simple de

una sola pendiente bajo condiciones climáticas de Amman, Jordania; obtuvieron un incremento del 36 % de productividad con respecto al destilador con el colector solar sin placas planas.

Dwivedi y Tiwari (2009), han realizado una validación experimental de un modelo matemático aplicado a un destilador activo simple de doble inclinación utilizando un colector solar de placas planas y obtuvieron una productividad de 1,838 kg/m²/día en condiciones experimentales de destilador pasivo y una productividad de 2,791 kg/m²/día en condiciones experimentales de destilador activo; ambos bajo condiciones climáticas de New Delhi, India.

Shatat y Mahkamov (2010), han realizado un estudio teórico y experimental a nivel de laboratorio para determinar los parámetros de diseño de un destilador de múltiples etapas utilizando un colector solar de tubos de vacío con un fluido de trabajo y el uso de un intercambiador para transferir el calor a la destiladora, usaron un modelo matemático que luego validaron experimentalmente; sus resultados de productividad alcanzaron del orden de 5 kg/m²/día.

Arunkumar et al. (2012) han investigado otros tipos de destiladores directos, por ejemplo, un destilador solar esférico alcanzó una productividad de 2,3 kg/m²/día; un destilador solar de vidrio de base doble alcanzó 2,9 kg/m²/día; un destilador solar piramidal alcanzó 3,3 kg/m²/día; y un destilador solar semi-esférico alcanzó 3,7 kg/m²/día. Además, utilizaron colectores solares acoplados para mejorar la productividad, por ejemplo: un destilador solar tubular acoplado con un colector parabólico compuesto (CPC) alcanzó una productividad de 4,5 kg/m²/día; y un destilador solar tubular con CPC acoplado con un destilador solar piramidal alcanzó 6,9 kg/m²/día. Finalmente, concluyeron que la productividad del destilador solar depende enteramente de los parámetros climáticos, así como también del incremento de la temperatura del agua. Esta última característica conduce a elevar los coeficientes de transferencia de calor por evaporación y convección en el destilador. Por lo tanto, el efecto concentrador de los colectores solares juega un papel vital para aumentar la temperatura del agua hasta 95° C en comparación con otros tipos de diseño.

De manera general, podemos concluir que los destiladores solares pasivos que utilizan directamente la energía solar tienen una baja productividad que varía de 2,3 – 3,7 kg/m²/día;

y que los destiladores solares activos que utilizan un fluido para la captación de energía solar (colectores solares), tienen una mayor productividad que varía de 1,8 – 6,9 kg/m²/día.

Rajaseenivasan *et al.* (2013) hacen una revisión de los diferentes métodos ensayados por diferentes investigadores para mejorar la productividad de los destiladores solares. Entre sus sugerencias se tiene:

- Utilizar un destilador de múltiples efectos en lugar de un destilador de simple efecto porque tiene la ventaja de aprovechar el calor latente y además ahorra costos.
- Hacer fluir agua sobre la superficie de vidrio de un destilador de múltiple base incrementa la productividad.
- El acoplamiento de un colector solar de placa plana a un destilador simple incrementa su productividad por tener mayor área de colección.
- Un destilador en modo de circulación forzada tiene mayor productividad que en modo termosifón.
- La productividad del destilador es directamente proporcional al área del colector de placa plana.
- Usando un colector parabólico en lugar de un colector de placa plana se incrementa su productividad, pero requiere de un mecanismo para el seguimiento al sol.

Jafari *et al.* (2015) ensayan un nuevo sistema de desalinización que combina un tubo especial de calor conocido como *heat pipe* localizado dentro de un colector de tubo de vacío de doble pared de vidrio (TETC), y acoplado con un colector de canal cilíndrico (PTC).

En este sistema, la sección del condensador del *heat pipe* se inserta en un depósito tubular con agua salobre (*basin*); entonces el condensador transfiere calor al agua y se produce la ebullición. El vapor de agua se mueve hacia arriba y se condensa en la sección del condensador del sistema. De esta manera, la sal, los minerales y las impurezas se eliminan y se obtiene agua dulce. Un sistema automático fue diseñado para llenar y descargar de agua salobre al depósito o *basin*. Además, fue equipado con un sistema de seguimiento solar para maximizar la absorción de calor solar. Resultados muestran que la máxima productividad puede ser logrado con 150 mL de agua en el depósito o *basin*. Así mismo, el efecto de añadir un fluido al espacio entre el “heat pipe” y el tubo evacuado mejora también la productividad. Dichos

investigadores, obtuvieron una productividad de 0,27 kg/m²/h y una eficiencia de 22,1 % cuando se utilizan láminas conductoras de aluminio; y una productividad de 0,933 kg/m²/h y una eficiencia de 65,2 % cuando se utiliza aceite como un medio para transferir calor.

Por las investigaciones anteriores, se deduce que el principal componente de cualquier sistema de desalinización solar indirecto es el colector solar. Los colectores solares son una clase especial de intercambiadores de calor que transforman energía de la radiación solar a energía interna del medio de transporte. Así este dispositivo el cual absorbe la energía solar entrante, lo convierte en calor y transfiere este calor a un fluido (usualmente aire, agua o aceite) fluyendo a través del colector. La energía solar así colectada es llevada desde el fluido circulante directamente para calentar agua o a un tanque de almacenamiento de energía térmica del cual se puede extraer para usar en la noche y/o días nublados. Hay básicamente dos tipos de colectores solares: estacionarios y con seguimiento al sol. Según Kalogirou (2008), los colectores estacionarios están en posición permanente para no seguir al sol, por ejemplo, los colectores de placa plana (FPC) que alcanzan temperaturas del rango de 30–80 °C para calentamiento de agua; los colectores de tubo de vacío (ETC) que alcanzan temperaturas de 50–200 °C para fines de destilación solar; los colectores parabólicos compuestos (CPC) que alcanzan estacionarios de 60 – 200 °C y en seguimiento al sol en un solo eje alcanzan de 80-300 °C. Otros colectores como el reflector Fresnel lineal (LFR), colector de canal parabólico ((PTC) y colector de canal cilíndrico (CTC), alcanzan temperaturas desde 80–300 °C.

Recientes estudios, según Shafieian *et al.* (2018) muestran que los colectores solares con *heat pipe* son utilizados en diferentes aplicaciones domésticas, industriales y desalinización. Estos colectores (HPSCs) tienen doble ventaja: poseen colectores de tubos de vacío y tubos de calor que fueron introducidos para superar las limitaciones de los colectores solares de placas planas (FPSCs) y los colectores solares de tubo de vacío (ETSCs). Además, remueven calor desde la superficie absorbente con la más alta eficiencia y lo transfieren al fluido de trabajo con la más baja resistencia térmica e hidráulica. El fluido de trabajo cambia de fase y transfiere calor por conducción y convección. Adicionalmente, el movimiento completamente natural del fluido de trabajo elimina la necesidad de bombas. Por otro lado, los colectores solares de tubos de calor concentrados (CHPSC) son otro tipo de colectores HPSC cuyos componentes son los reflectores parabólicos compuestos, tubos de vacío y tubos *heat pipe*; estos captan además de radiación solar directa la radiación solar difusa,

haciendo que este tipo de colectores son apropiados para plantas de potencia solar y desalinización.

En la presente investigación se ha planteado los siguientes objetivos:

- Objetivo general

Evaluar la productividad y eficiencia de un destilador solar extensible de múltiples etapas acoplado a un colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC) para desalinizar agua de mar.

- Objetivos específicos

- a) Diseñar y construir un destilador solar de área extendida en función del área del colector
- b) Comparar la eficiencia y productividad, entre el destilador con superficie extendida con el destilador sin superficie extendida
- c) Evaluar la calidad del agua desalinizada obtenida

Además, se formuló la siguiente hipótesis

- Hipótesis general

La introducción de una superficie extendida de transferencia de calor (aletas) en el interior de la primera etapa del destilador mejora la productividad del agua condensada.

- Hipótesis secundaria

- a) El diseño y construcción de un destilador solar será adecuado, si se consideran las dimensiones del colector solar.
- b) Si el diseño es adecuado la productividad del agua condensada será alta.
- d) Si el diseño es adecuado la calidad del agua desalinizada cumplirá sus características técnicas

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN SOLAR

En la Figura 1 se muestra diferentes métodos de desalinización solar que han sido investigados a nivel de laboratorio o de escala comercial. Estos métodos requieren energía térmica y/o eléctrica; además, que ambas pueden ser obtenidos a partir de la energía solar. Así mismo, se sabe que en los últimos años se ha prestado mucha atención al uso de las energías renovables por su naturaleza amigable con el medio ambiente frente a los combustibles fósiles (Ali *et al.* 2011).

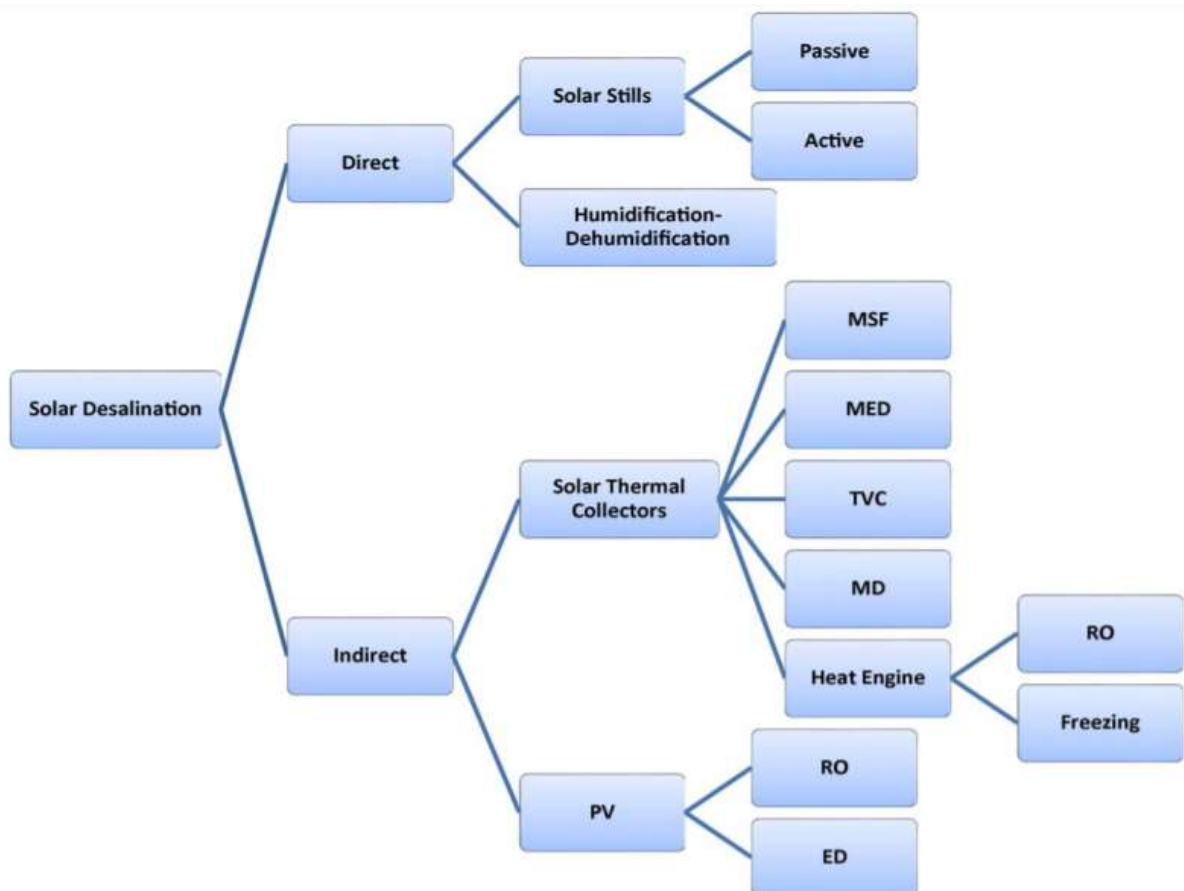


Figura 1: Tecnologías de desalinización solar probadas a nivel piloto

Fuente: Ali *et al.* (2011)

2.1.1.-Método directo

El método de desalinización solar directa consiste en utilizar un sistema que absorbe la energía solar para producir directamente un destilado. Dichos sistemas se denominan destiladores solares (*solar stills*). Este método es muy apropiado para sistemas de producción en pequeña escala, particularmente donde la demanda de agua fresca es menor de 20 m³/día (Quiblawey y Banat 2008). Así mismo, el proceso de destilación solar a partir de agua de mar o salobre sólo es aplicable para la producción de agua fresca en pequeña escala (Ayoub y Alward 1996).

El método más antiguo para obtener agua fresca en pequeña escala es a través del destilador solar tipo recipiente o *basin* (Figura 2), cuya productividad es del orden 4 L/día para 1 m² de área de colección (Tabla 1); sin embargo, modificaciones posteriores en su diseño ha permitido mejorar su productividad (Badran *et al.* 2008).

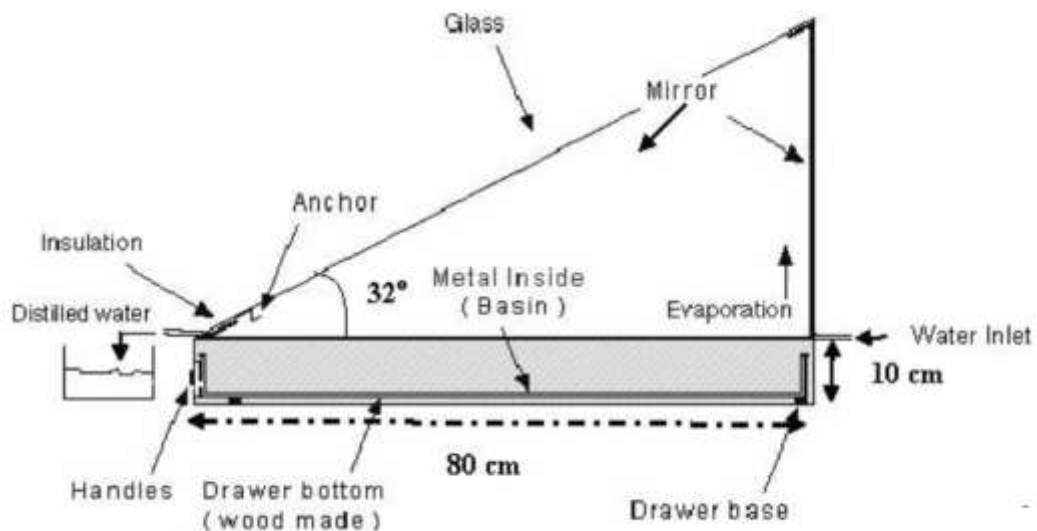


Figura 2: Diagrama esquemático de un destilador solar simple

Fuente: Badran et al. (2008)

2.1.2.-Método indirecto

Según Quiblawey y Banat (2008), el método de desalinización solar indirecta utiliza dos sistemas por separado: la captación de energía solar, mediante un sistema de conversión solar convencional, acoplado a un método de desalinización convencional, tales como procesos de desalinización por múltiple efecto (MED), múltiples etapas “flash” (MSF.), compresión de vapor (VC) o destilación por membranas (MD).

Los procesos de desalinización térmica MED, MSF y VC son aplicables para la producción de agua fresca en gran escala (ver Tabla 1). Los procesos RO (ósmosis inversa), ED (electrodialisis) y EDR (electrodialisis inversa) a diferencia de los anteriores no requieren cambios de fase del agua de mar o salobre y son adaptables desde gran a pequeña escala (Ayoub y Alward 1996).

Tabla 1: Procesos de desalinización comercialmente disponibles

Commercially available desalination processes					
Process	Feed water source	Capacity (m ³ /d)	Power source	Market share (%) (1991 figures)	1991 — Total installed or contracted desalting capacity (%)
Major processes					
Thermal:					
• MSF	Sea	4,000–30,000	Natural gas	32	52
• ME	Sea	2,000–10,000	Natural gas	}	}
• VC	Sea	20– 2,000	Electric		
Membrane:					
• RO	Sea/brackish	Various	Electric	50	33
• ED	Sea/brackish	Various	Electric	}	}
• EDR	Sea/brackish	Various	Electric		
Minor processes					
• Vacuum freezing	Sea	38–750	Electric	Negligible	
• Solar distillation	Sea/brackish	1 m ² of collector area is needed to produce 4 l/d of water	Solar	Negligible	

Fuente: Ayoub y Alward (1996)

Los sistemas de desalinización solar indirecta se pueden clasificar en tecnologías térmicas, mecánicas o eléctricas. Por ejemplo (ver Figura 3), MSF, MED, TVC y MD son tecnologías de destilación térmica que requieren colectores térmicos solares como su fuente de energía; en tanto que, RO y *freezing* son tecnologías impulsadas mecánicamente. ED es la tecnología que requiere solo energía eléctrica (Ali et al. 2011).

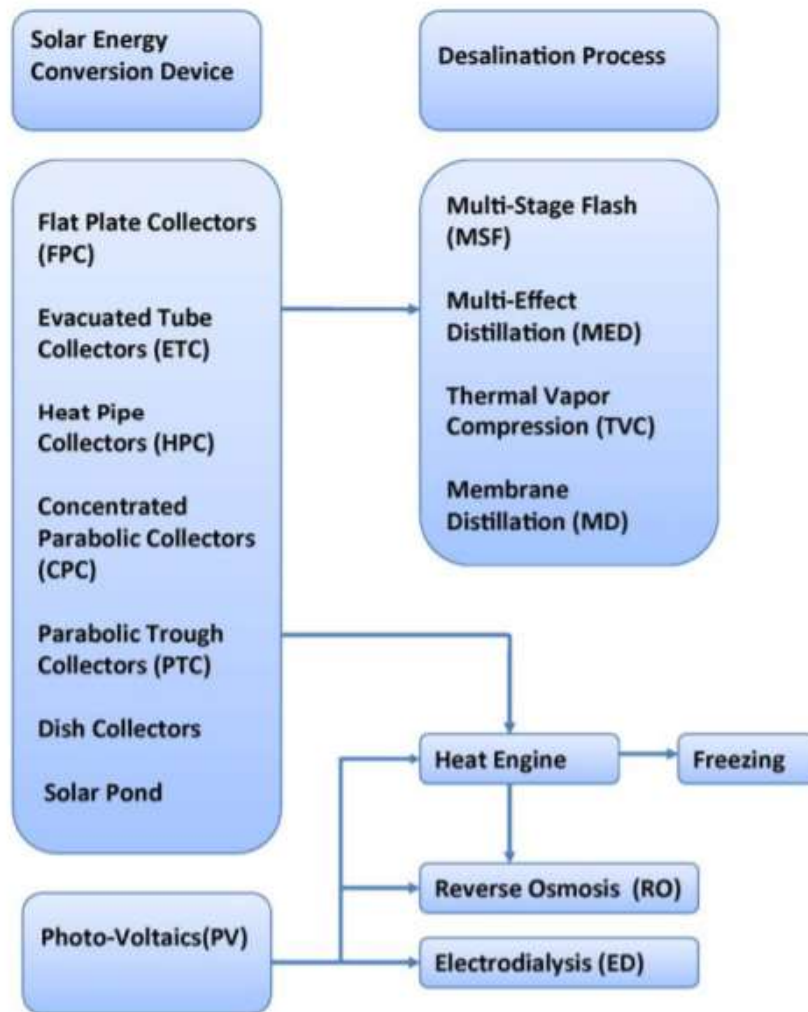


Figura 3: Tecnologías de desalinización solar indirecta asociados con posibles dispositivos de conversión de energía solar

Fuente: Ali et al. (2011)

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DESTILADORES SOLES

Sing et al. (2020), dividen a los destiladores solares en pasivos y activos (ver Figura 4). En los destiladores solares pasivos, la energía solar es la única fuente para calentar la masa de agua del destilador y no intervienen otros elementos que consuman o produzcan energía eléctrica. Además, los destiladores solares pasivos se pueden subdividir en dos grupos, uno con diseño convencional y el otro con un diseño eficiente. Estos últimos, tienen combinaciones tales como estructura tipo *wick*, escalonado, multiefecto, cascada, cóncavo, hemisférico, etc.

En tanto que, en los destiladores solares activos, se suministra calor adicional a través de diversos colectores solares u otros medios adicionales y, además, puede existir la posibilidad de que estos elementos adicionales consuman o produzcan energía eléctrica útil para el sistema. Por otro lado, en los destiladores solares activos para mejorar la captación de calor los colectores solares están asociados con elementos tales como tubos de vacío, tubos de calor (*heat pipes*), concentradores parabólicos, módulos fotovoltaicos, estanques solares, etc. Además, se incluye circulación del agua natural o forzado, generación de energía eléctrica para apoyar el funcionamiento del sistema (Sing *et al* 2020).

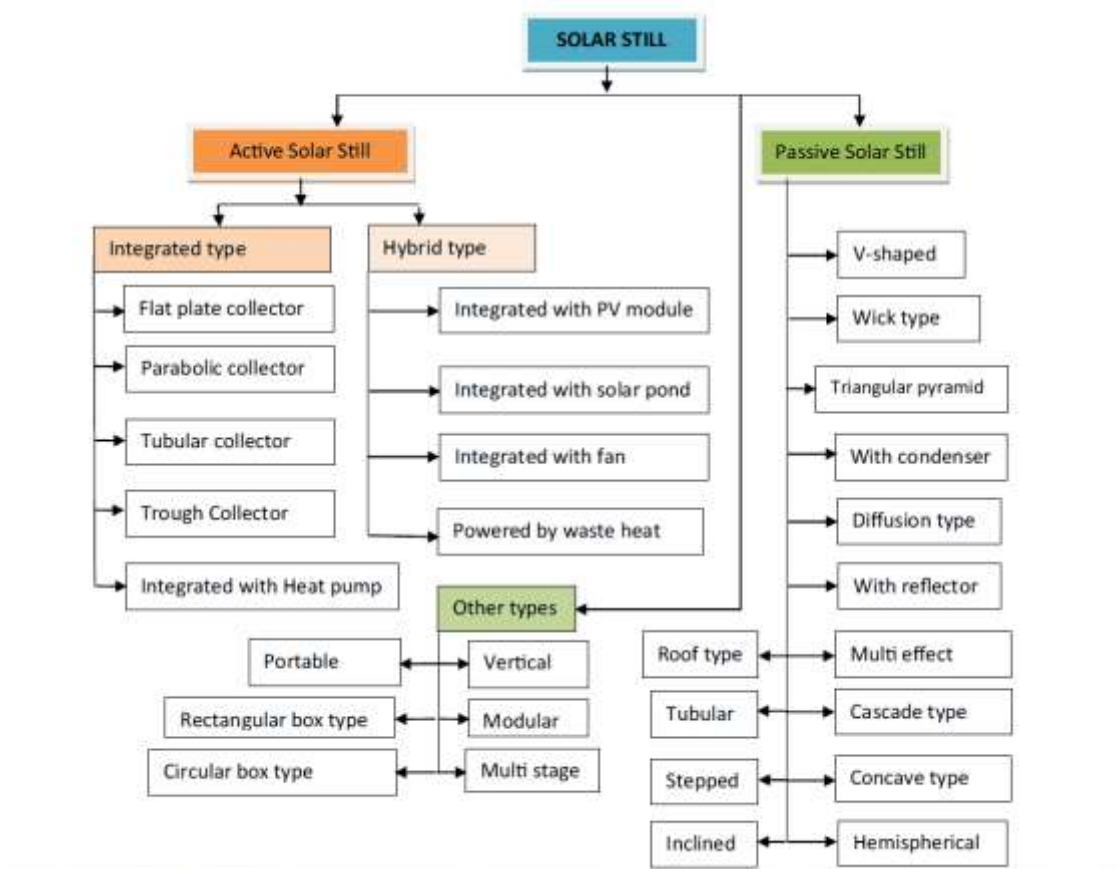


Figura 4: Clasificación de los destiladores solares

Fuente: Sing et al. (2020)

Así mismo, según Shafein et al. (2018) los colectores solares integrados a los destiladores solares activos pueden ser de diversos tipos tales como los colectores solares de placa plana (FPSCs), colectores solares de tubos de vacío (ETSCs) y los colectores solares de tubos de calor (HPSCs).

2.3. COLECTORES SOLARES TÉRMICOS

Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía térmica. El componente principal de cualquier sistema solar es el colector solar. Este es un dispositivo que absorbe la radiación solar entrante, la convierte en calor y transfiere este calor a un fluido (generalmente aire, agua o aceite) que fluye a través del colector (Kalogirou 2007).

Considerando diferentes parámetros, como diseños estructurales y principios de funcionamiento los colectores solares térmicos se clasifican, como se muestra en la Figura 5.

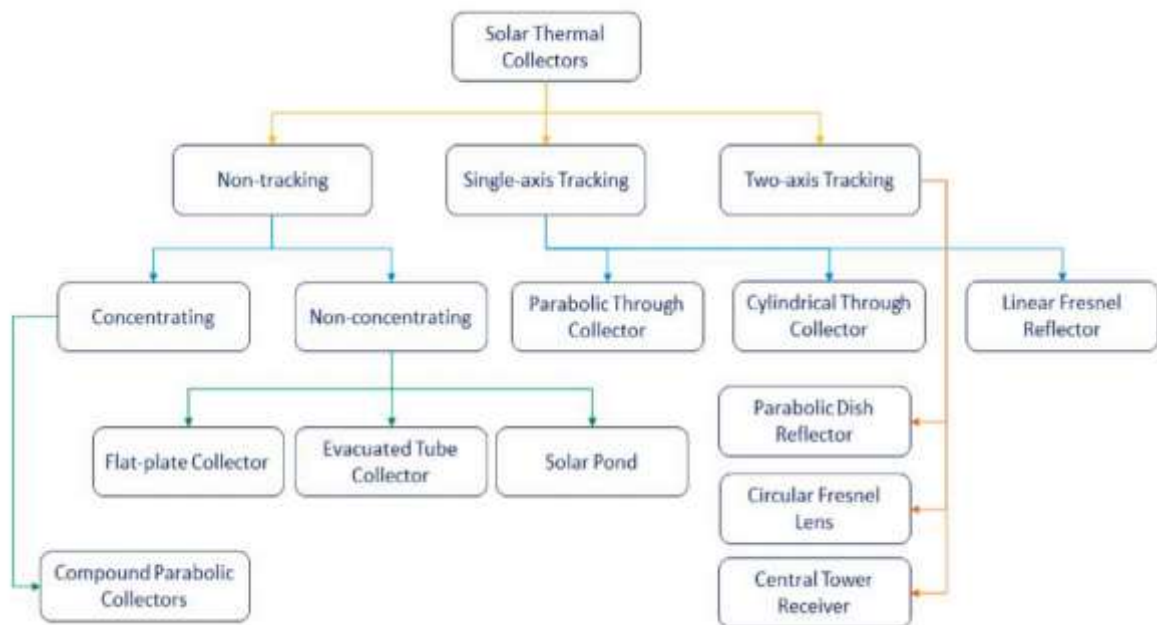


Figura 5: Clasificación de los colectores solares térmicos

Fuente: Gorjian et al. (2020)

Los colectores solares térmicos se identifican básicamente por su movimiento: colectores estacionarios; colectores con seguimiento de un solo eje y colectores con seguimiento de dos ejes; sin embargo, también se identifican por el rango de temperatura de funcionamiento (Tabla 2).

Además, los colectores estacionarios se dividen en dos tipos de colectores solares: no concentradores y concentradores. Un colector no concentrador tiene la misma área para

interceptar y absorber la radiación solar, mientras que un colector solar concentrado con seguimiento solar generalmente tiene superficies reflectantes cóncavas para interceptar y enfocar la radiación del rayo solar a un área de recepción más pequeña, aumentando así el flujo de radiación (Kalogirou 2007).

Tabla 2: Colectores solares térmicos

Motion	Collector type	Absorber shape	Concentration ratio	Indicative temperature range (°C)
Stationary	Flat plate collector (FPC)	Flat	1	30-80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50-200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1-5	60-200
5-15			80-300	
Single-axis tracking	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10-40	80-250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15-45	80-300
	Cylindrical trough collector (CTC)	Tubular	10-50	80-300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100-1000	100-500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	100-1500	150-2000

Note: Concentration ratio is defined as the aperture area divided by the receiver/absorber area of the collector.

Fuente: Kalogirou (2007)

2.3.1.- Colectores de tubos de vacío (ETCs)

En la Figura 6 se muestra una clasificación de varios diseños de los colectores ETC; sin embargo, los más comunes emplean como absorbedor tubos de calor (*heat pipe*) y tubos en forma de U (*U-shaped*).

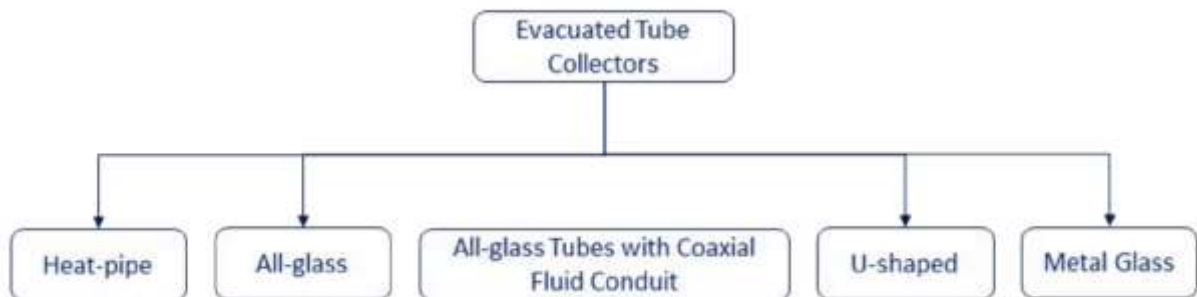


Figura 6: Clasificación de los colectores solares de tubos de vacío

Fuente: Gorjian et al. (2020)

Un colector ETC tipo *heat pipe* se muestra en la Figura 7, el cual está constituido por varios tubos de vidrio largos y paralelos que contienen en su interior un *heat pipe* de cobre y una

placa absorbente. Dentro de cada *heat pipe* de cobre se encuentra una pequeña fracción de fluido volátil (generalmente metanol o etanol) que experimenta un ciclo de evaporación-condensación siempre que la luz solar incida sobre el colector. El alto vacío formado en el espacio entre los dos tubos concéntricos en los ETC elimina la pérdida de calor por convección y proporciona un aislamiento térmico efectivo y, por lo tanto, niveles de temperatura más altos en comparación con los FPC (Gorjian et al. 2020).

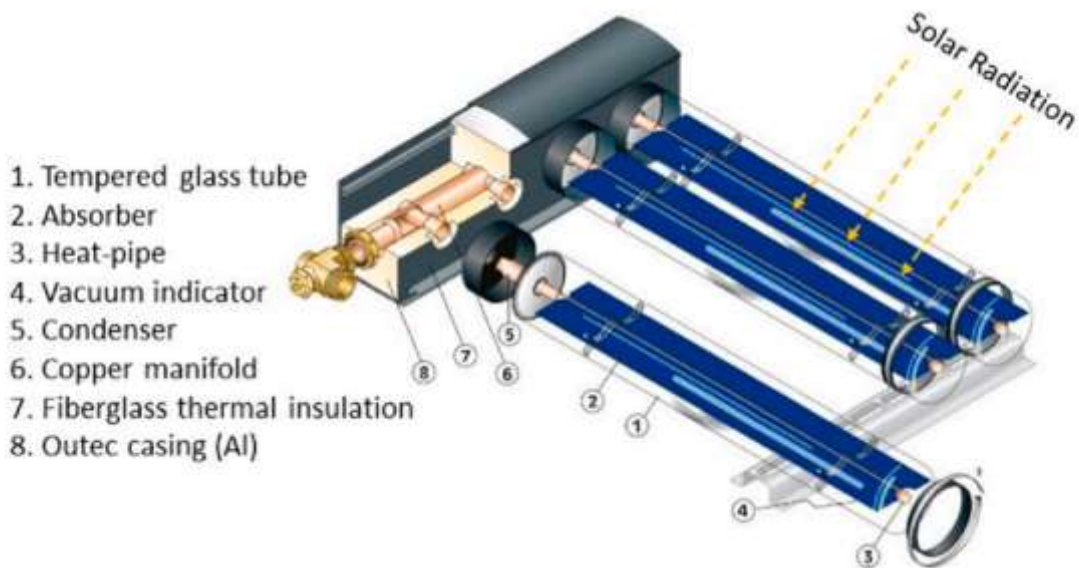


Figura 7: Esquema de un colector ETC y sus componentes principales

Fuente: Gorjian et al. (2020)

Un esquema del *heat pipe* dentro de un colector ETC se muestra en la Figura 8. El *heat pipe* es un aparato de doble fase que posee una alta conductividad térmica e incluye una estructura interna de poro capilar y una pequeña cantidad de líquido vaporizable (Olfian et al. 2020). Los *heat pipes* consisten de un recipiente sellado con una pequeña cantidad de líquido como fluido de trabajo. El calor se transfiere como energía de calor latente mediante la evaporación del fluido en la zona de calentamiento y la condensación del vapor en la zona de enfriamiento, la circulación se completa por el flujo de retorno del condensado a la zona de calentamiento a través de la estructura porosa capilar que recubre la pared interna del sistema (Azad 2008).

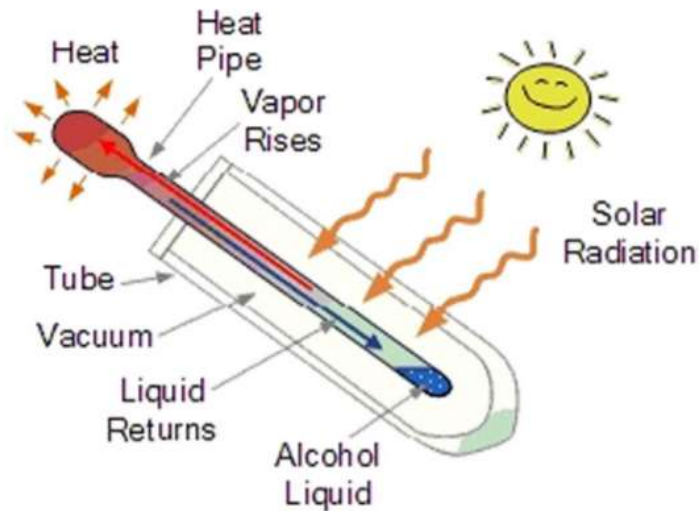


Figura 8: Heat pipe de un colector ETC

Fuente: Hussain et al. (2018)

Los colectores solares ETCs tipo *heat pipe* también se denominan HPSCs (ver Figura 9). El principio de funcionamiento de estos colectores consiste en que el fluido de trabajo dentro del *heat pipe* fluye por convección natural hacia arriba a un intercambiador de calor ubicado en el área del colector donde el calor se transfiere a otro fluido (típicamente agua o agua-glicol) para ejecutar un proceso térmico al que se destina el uso del colector (Gorjian et al. 2020).



Figura 9:Componentes de un colector HPSC

Fuente: Shafieian et al. (2018)

2.3.2. Concentradores parabólicos compuestos (CPCs)

A lo largo de los años de investigación y desarrollo, los CPC han evolucionado desde la forma cilíndrica preliminar hasta modelos avanzados. En la Figura 10 se muestra una clasificación de variados diseños de CPCs; sin embargo, los más típicos son los que están basados en la forma de la construcción del reflector sea simétrico o asimétrico; así como, los que están basados en especificar la ruta del fluido de transferencia de calor (HTF), combinando con tubos de calor (*heat pipe*) o con tubos en forma de U (*U-tube*).

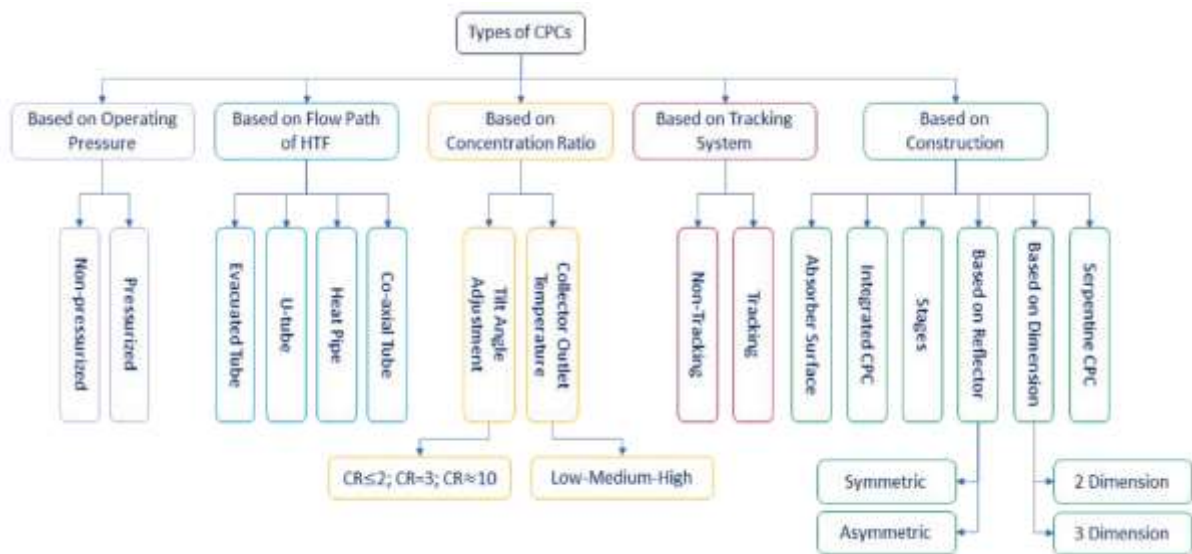


Figura 10: Clasificación de los CPCs

Fuente: Gorjian et al. (2020)

Según Tapia (2009), un concentrador parabólico compuesto (CPC) es uno de los sistemas de concentración del grupo no imagen, con la gran ventaja de lograr la concentración de la energía solar sin el uso de un sistema de seguimiento, disminuyendo así el costo del sistema de concentración de energía solar, lo cual hace muy interesante a estos equipos en diversas aplicaciones solares. Considera que el CPC es el concentrador más eficiente, ya que toda la radiación que entra al CPC en un cono de luz con apertura $\pm\theta_{\max}$ (Figura 11) con respecto a la vertical, será concentrada.

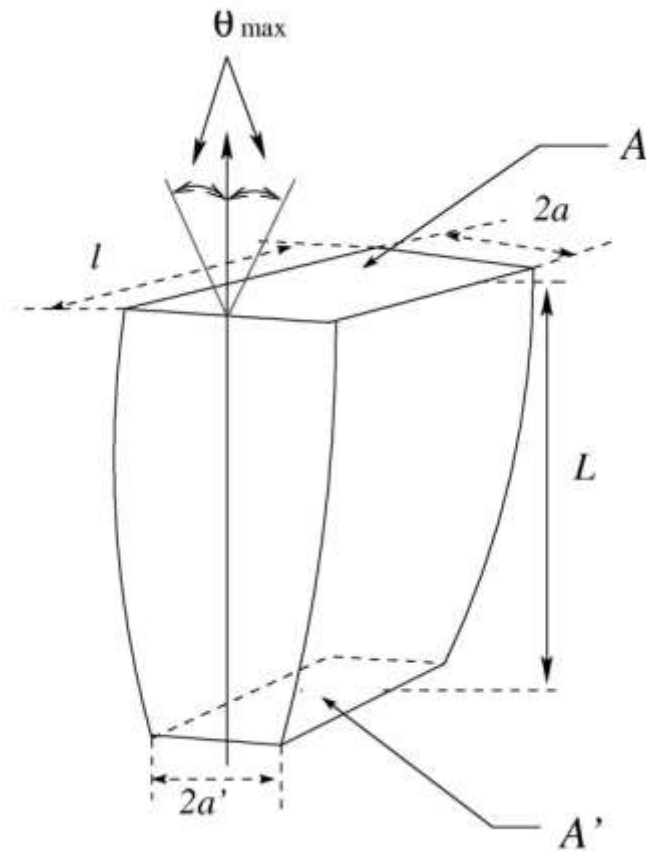


Figura 11: CPC en 2D

Fuente: Tapia (2009)

Aplicando la definición de concentración geométrica al CPC en 2D de la Figura 11 obtenemos la siguiente relación:

$$C_{2D} = \frac{A}{A'} = \frac{2a \cdot l}{2a' \cdot l} = \frac{a}{a'} \quad (1)$$

Las propiedades geométricas del CPC en 2D a partir de un segmento de parábola que se inicia en el punto Q, se muestra en la Figura 12. El punto final del CPC está en el punto de la parábola donde la normal N con el segmento FQ son paralelos. El eje del CPC es paralelo a la tangente T, e intercepta el punto medio del segmento FQ. También se observa que la reflexión en espejo del segmento de parábola PQ con respecto al eje del CPC genera el CPC en 2D.

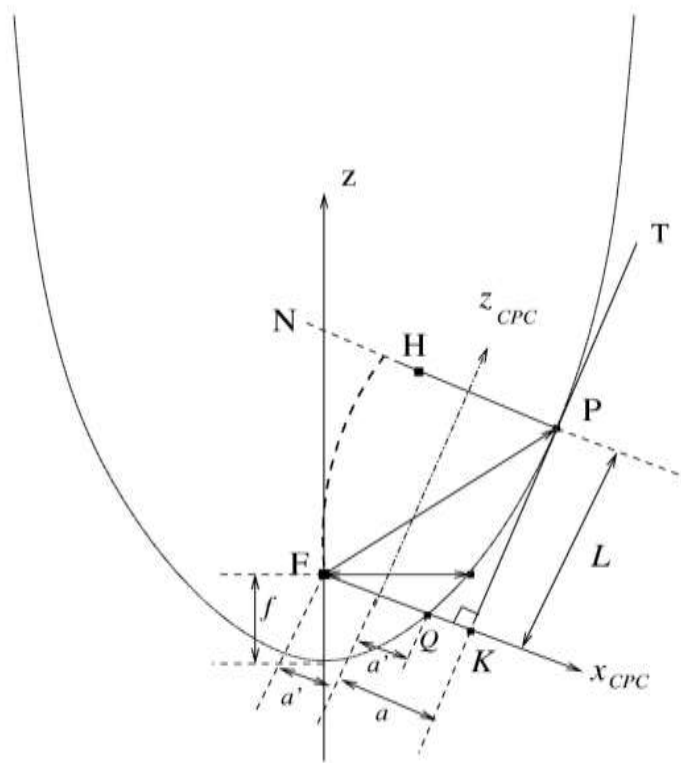


Figura 12: Propiedades geométricas del CPC en 2D

Fuente: Tapia (2009)

Las propiedades geométricas descritas en las Figura 11 y Figura 12, y considerando la “ley de reflexión de rayos” que inciden y reflejan en el segmento de la parábola PQ, nos llevan a establecer una nueva relación para la concentración geométrica del CPC en 2D dado por:

$$C_{2D} = \frac{a}{a'} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_{\max})} \quad (2)$$

Donde θ_{\max} es el máximo ángulo de incidencia del flujo de rayos en el área de apertura A (ver Figura 11). Considerando que el ángulo de incidencia varía entre $0 < \theta_{\text{in}} < \theta_{\max}$. Siendo, el “ángulo de aceptación” del CPC de $\pm\theta_{\max}$. Este parámetro C_{2D} representa la capacidad del sistema para concentrar la energía solar, o el poder de concentración del sistema.

La relación para evaluar la longitud L del CPC en función de los parámetros de la Figura 11 y Figura 12, está dado por:

$$L = (a + a') \text{Cot}(\theta_{\max}) = \frac{(a+a')}{a'} \sqrt{a^2 - a'^2} \quad (3)$$

La representación geométrica en coordenadas cartesianas (x,z) del concentrador CPC en 2D, se muestra en la Figura 13.

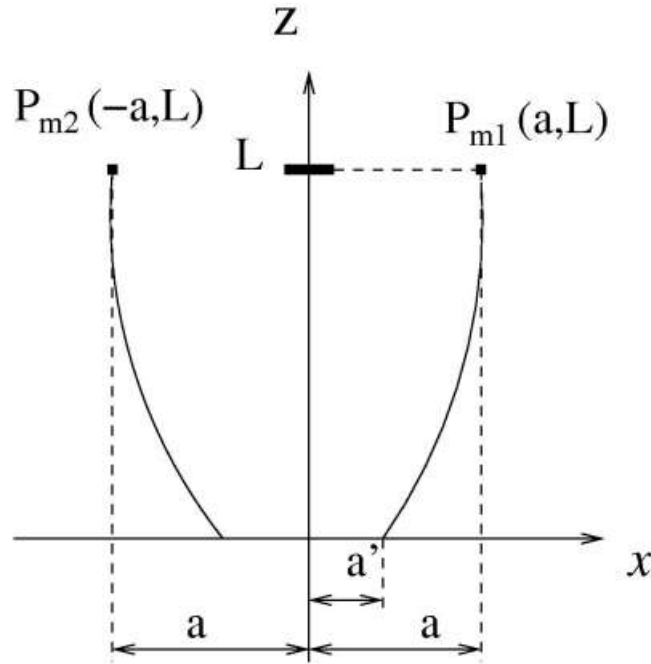


Figura 13: Representación geométrica del CPC en 2D

Fuente: Tapia (2009)

Finalmente, la relación del CPC en coordenadas cartesianas considerando los parámetros de la Figura 13, se muestra a continuación:

$$Z = 2L - \left[\left(\frac{L}{a+a'} \right) (|x| + a') \right] - 2 \frac{a(a+a')}{a'} \sqrt{1 - \left[\frac{|x|+a'}{a+a'} \right]^2} \quad (4)$$

2.3.3. Colectores parabólicos compuestos (CPCs)

Un típico colector parabólico compuesto está diseñado con un concentrador parabólico compuesto (CPC) para concentrar la radiación solar, un colector solar de tubos de vacío (ETSC) para absorber la radiación con mayor eficiencia, y en el fondo del colector un tubo de calor denominado *heat pipe*. Según Vijayakumar *et al.* (2020), estas características corresponden a un colector solar de tubos de vacío integrado con *heat pipe* (ETSC-HP) como el de la Figura 14. Además, según Shafieian *et al.* (2018), estas características corresponden a un colector de tubos de calor concentrados (CHPSC).

En la Figura 14, la energía reflejada por el concentrador CPC es absorbida por el tubo de vacío, el cual lo convierte en energía térmica. El vacío actúa como un aislante evitando pérdidas calor. Enseguida la energía térmica es absorbida por el *heat pipe* el cual internamente transfiere el calor por convección desde la zona del evaporador hacia el condensador. Por lo tanto, el *heat pipe* dentro del tubo de vacío, da como resultado un colector solar térmico de alta eficiencia (Vijayakumar *et al.* 2019).

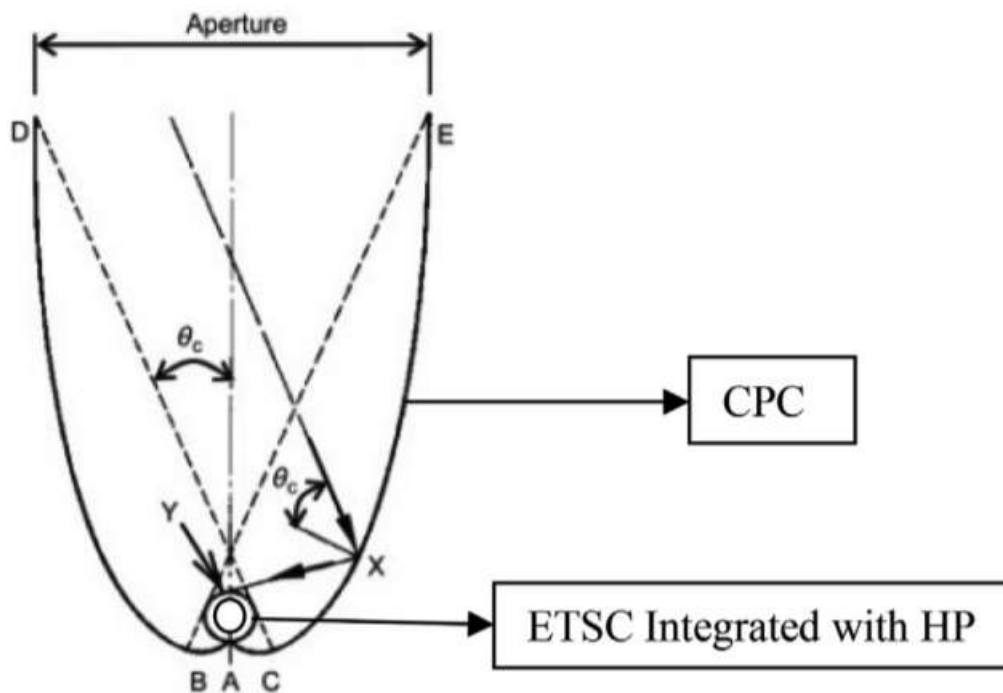


Figura 14: Esquema de un colector ETSC-HP

Fuente: Vijayakumar *et al.* (2020)

Según Kalogirou (2007), la orientación de un colector CPC está relacionada con su ángulo de aceptación, ($\pm\theta_c$, en la Figura 14). Además, el colector puede estar estacionario o en seguimiento dependiendo del ángulo de aceptación del colector. Un concentrador CPC puede orientarse con su eje mayor a lo largo de la dirección norte-sur o este-oeste y su apertura se inclina directamente hacia el ecuador en un ángulo igual a la latitud local. Cuando se orienta a lo largo de la dirección norte-sur, el colector debe girar su eje mirando continuamente al sol. Como el ángulo de aceptación del concentrador a lo largo de su eje largo es amplio, no es necesario un ajuste de inclinación estacional. Cuando el concentrador está orientado con su eje largo a lo largo de la dirección este-oeste, con un pequeño ajuste estacional en el ángulo de inclinación, el colector puede captar los rayos del sol de manera

efectiva a través de su amplio ángulo de aceptación a lo largo de su eje largo. En el caso de un colector estacionario recibirá la radiación solo durante las horas en que el sol esté dentro del ángulo de aceptación del colector. Por otro lado, dos tipos básicos de colectores CPC; el simétrico y el asimétrico. Además, se suelen emplear dos tipos principales de absorbedores; tipo aleta con tubo y absorbedores tubulares.

Según Gorjian *et al.* (2020), la relación de concentración geométrica de un colector CPC, como el de la Figura 14, se puede evaluar como:

$$C = \frac{1}{\text{sen } \theta_{\max}} \quad (5)$$

Donde $\theta = \theta_{\max}$ es el “ángulo de aceptación de media apertura” (*acceptance half-angle*). La configuración del reflector se encarga de enfocar todos los rayos solares captados con un umbral igual al ángulo de aceptación y aumentar la intensidad de la radiación sobre el absorbedor. Además, según Salgado-Tránsito *et al.* (2015), los colectores CPC capturan la irradiación directa, así como una fracción de irradiación difusa igual a $1 / C$, donde C es la relación de concentración geométrica.

La Figura 15 muestra los aspectos básicos del diseño de un colector CPC. Cada lado del concentrador parabólico compuesto (CPC) es una parábola, cuyo eje tiene un ángulo θ_c (ángulo de aceptación de media apertura) con respecto al eje vertical del CPC. Este tipo de colector garantiza que cada rayo de luz que atraviesa el área de apertura A_o con un ángulo de incidencia menor o igual al ángulo $\theta_c = \theta_{\max}$ será reflejado por la superficie reflectiva del colector y dirigida hacia una parte del perímetro del receptor tubular. Los haces de luz con un ángulo de incidencia mayor que θ_c serán reflejados al exterior. Esta es la razón por la que el ángulo θ_c es uno de los principales parámetros de diseño (Salgado-Tránsito *et al.* 2015).

En la Figura 15 la relación de concentración geométrica está dado por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{A_o \cdot l}{2r \cdot l} = \frac{A_o}{2r} \quad (6)$$

Donde A_a es el área de apertura del concentrador solar; A_r es el área superficial del receptor; A_o es el ancho del área de apertura; l es la longitud del canal; r es el radio del tubo receptor.

Según Salgado-Tránsito *et al.* (2015), para propósitos de diseño práctico, los extremos superiores en las parábolas de CPC no contribuyen de manera relevante con la concentración del receptor, porque están casi paralelos al eje vertical del colector (Figura 15), y la irradiación no se reflejará hacia el tubo receptor; por lo tanto, dichos extremos pueden truncarse. Al realizar este truncamiento se pierde casi el 10% de la relación de concentración; sin embargo, se logra un ahorro de material del 50%.

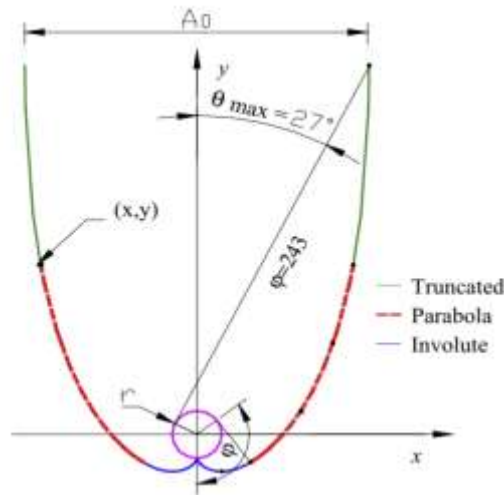


Figura 15: Diseño del truncamiento de un colector CPC

Fuente: Salgado-Tránsito *et al.* (2015)

2.3.4. Colectores de tubos de calor concentrados (CHPSCs)

El colector solar de tubo de calor concentrado (CHPSC) es otro tipo del colector HPSC integrado con reflectores tipo CPC. En la Figura 16 se muestra los componentes del colector CHPSC.

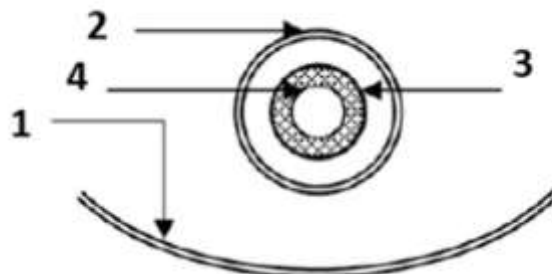


Figura 16: Esquema de un colector CHPSC: (1) reflector, (2) tubo de vacío de vidrio, (3) heat pipe, y (4) estructura porosa dentro del heat pipe

Fuente: Shafieian *et al.* (2018)

En la Figura 17, se observa que el colector CHPSC mejora su eficiencia con respecto al colector HPSC debido a que el reflector permite adicionalmente la absorción de radiación difusa. De esta manera la energía solar se concentra y es absorbida por los tubos de calor (*heat pipe*). Los colectores CHPSC con altas “relaciones de concentración” (concentration ratio) pueden alcanzar altos niveles de temperatura, lo que las hace adecuadas para aplicaciones como plantas de energía solar y desalinización (Shafieian *et al.* 2018).

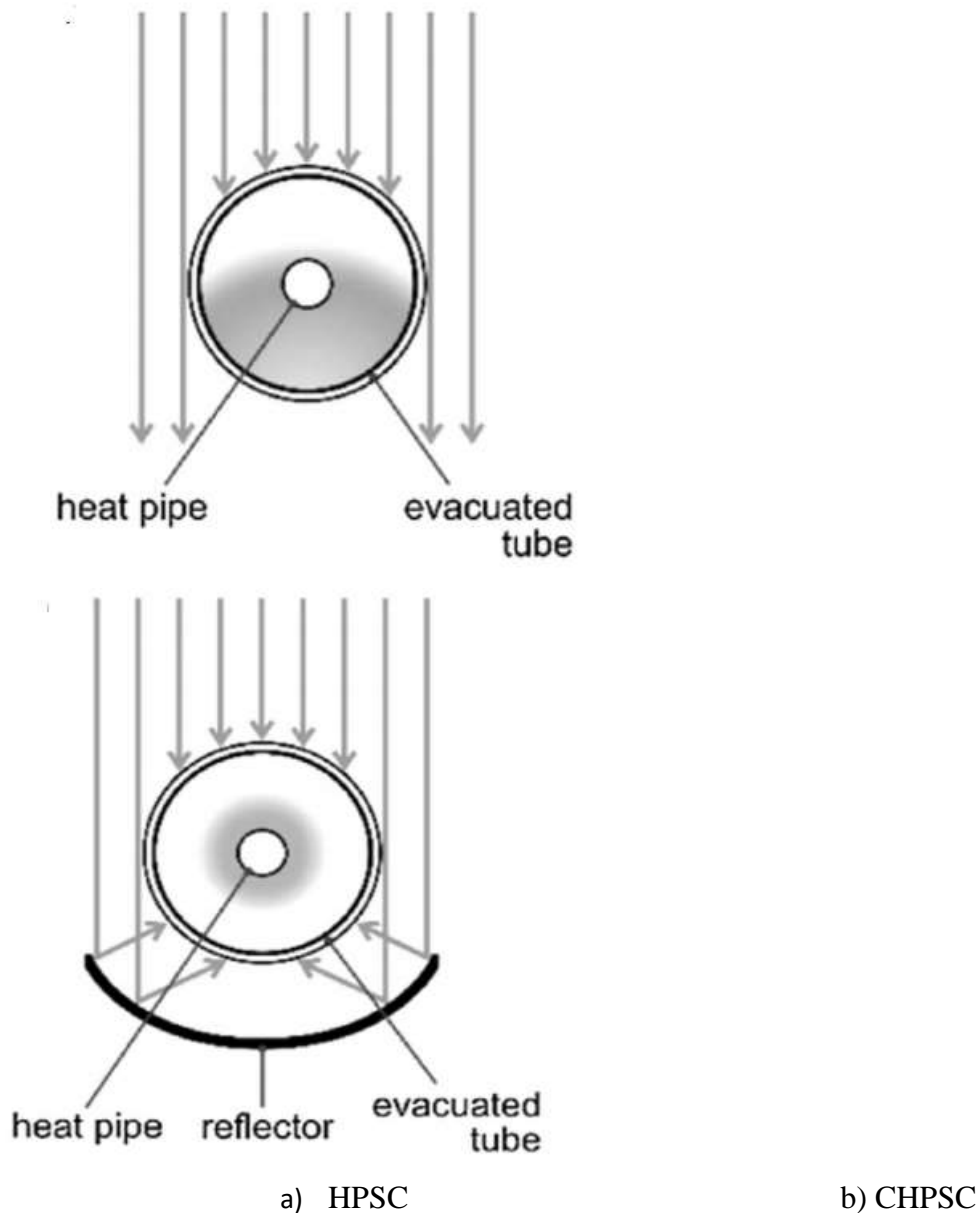


Figura 17 : Distribución de la radiación sobre un colector HPSC y un CHPSC

Fuente: Shafieian et al. (2018)

Para diseñar el reflector parabólico de la Figura 18, podemos recurrir a un esquema del CPC en coordenadas cartesianas (Figura 13). Además, se requiere fijar la relación de

concentración del CPC en 2D dado por la ec (2). Finalmente, el máximo ángulo de incidencia θ_{\max} de los rayos solares sobre el área de apertura del colector se obtiene también de la ec (2).

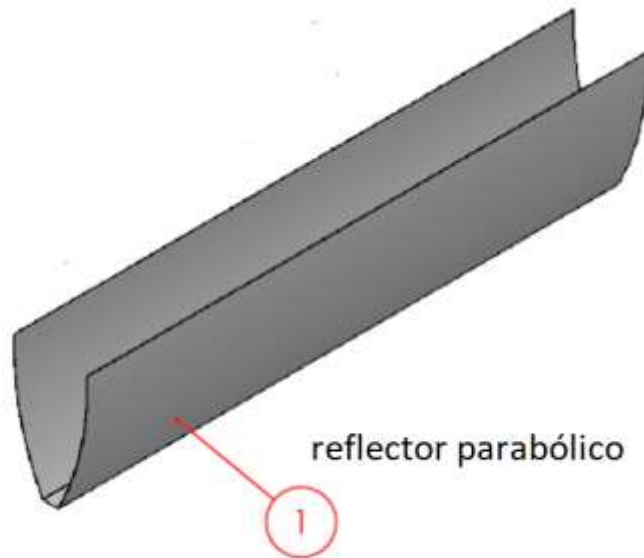


Figura 18: Esquema del reflector parabólico de un colector CHPSC

Fuente: Elaboración propia

Saettone (2014), propone que el parámetro a' de la Figura 13 debe ser igual al radio interno (pintado de negro) del tubo de vidrio de vacío que se utilizará como absorbedor de calor, por lo tanto, $a' = 2,35$ cm. Además, propone que la relación de concentración geométrica del CPC, sea $C_{2D} = 5$. Este poder de concentración permitirá obtener una irradiancia aproximada de 1000 W/m^2 a partir de 200 W/m^2 , es decir, simula la radiación de un día soleado y despejado a partir de un día frío y nublado.

En la Tabla 3, se muestra las coordenadas cartesianas (x,z) que generan la forma de un CPC truncado. El truncamiento de la parábola disminuyendo la altura del CPC, de 69,08 cm a 37,87 cm; cuyo beneficio es un ahorro de material. Estos valores de la Tabla 3 se utilizarán en el proyecto para construir el perfil del CPC sobre un molde de madera en los cuales se apoyan las superficies reflectoras (aluminio de alta reflectancia).

Tabla 3:Coordenadas (x,z) que generan la forma del CPC truncado

X (cm)	Z (cm)	X (cm)	Z (cm)
2,35	0,01	6,85	9,97
2,60	0,32	7,10	10,89
2,85	0,66	7,35	11,87
3,10	1,02	7,60	12,92
3,35	1,40	7,85	14,03
3,60	1,81	8,10	15,22
3,85	2,24	8,35	16,50
4,10	2,70	8,60	17,87
4,35	3,19	8,85	19,34
4,60	3,70	9,10	20,94
4,85	4,25	9,35	22,67
5,10	4,83	9,60	24,55
5,35	5,44	9,85	26,63
5,60	6,09	10,10	28,93
5,85	6,78	10,35	31,51
6,10	7,51	10,60	34,45
6,35	8,28	10,85	37,87
6,60	9,10	-	-

Fuente: Saettone (2014)

2.4. DESTILADORES SOLARES DE MÚLTIPLES ETAPAS

2.4.1. Experimentos modelo con destiladores solares de múltiples etapas

Shatat y Mahkamov (2010), desarrollaron investigaciones experimentales del rendimiento de un destilador de agua de múltiples etapas conectado a un colector solar de tubos de vacío con *heat pipe* (HPSC) con área de apertura de 1,7 m² (Figura 19). El sistema de desalinización del agua del destilador de múltiples etapas fue diseñado para recuperar el calor latente del proceso de vaporización y condensación en 4 etapas. Simularon la variación de la radiación solar durante un día típico a mitad del verano en la región del Medio Oriente

en el aparato experimental usando una matriz de 110 bombillas halógenas que cubrían el área del colector. En sus experimentos utilizaron agua salobre sintética con TDS de 2500 mg/L. Concluyeron que la capacidad de producción de agua dulce del sistema “colector solar de tubos de vacío – destiladora de cuatro etapas” es de aproximadamente 5 kg/m²/día, y que sus colectores solares tienen una eficiencia de 68% aproximadamente. Sin embargo, observaron que la eficiencia global del aparato experimental de laboratorio en esta etapa de la investigación fue de 33% debido a las excesivas pérdidas de calor en el sistema. El análisis del agua destilada mostró que su calidad cumplía con las directrices de la Organización Mundial de la Salud. Desarrollaron un modelo matemático de parámetros agregados para las simulaciones numéricas de los estados transitorios del proceso de destilación en la destiladora de varias etapas combinada con un colector solar de tubos de vacío. La aplicación del modelo para los cálculos de diseño sugiere que para un colector solar de tubos de vacío con una abertura de 1.7 m², el área de evaporación en cada etapa debe ser 1 m², y que el número total debe ser entre 4 ó 5 etapas.

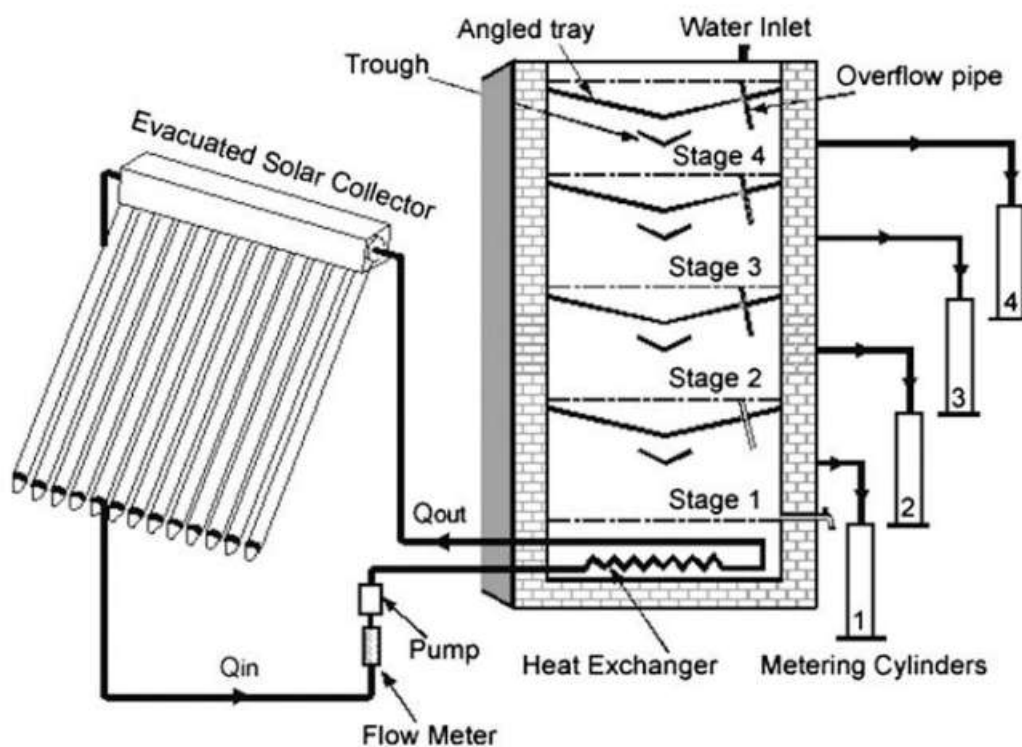


Figura 19: Diagrama esquemático del sistema de desalinización solar desarrollado

Fuente: Shatat y Mahkamov (2010)

Feilizadeh et al. (2015), investigaron el rendimiento al aire libre de un destilador solar de cuatro etapas de tipo activo y conectado a un colector solar de placa plana (Figura 20); midieron la producción de destilado por hora durante 24 horas. Además, estudiaron por primera vez el efecto de la relación CBA (relación del área del colector al área del destilador) sobre el rendimiento de este dispositivo. En sus pruebas utilizaron agua salobre sintética con TDS de 660 mg/L. La superficie efectiva de evaporación del destilador fue de 0,47 m² y el área de cada colector fue de 1,57 m². Conectaron en serie los colectores solares de tal manera que experimentaron con relaciones de CBA de 3,45; 6,90 y 10,35. Además, alternaron sus experimentos durante las estaciones de invierno y verano. Concluyeron que el efecto del CBA mejoró significativamente la eficiencia y productividad de destilado. Por ejemplo, durante el invierno el destilador acoplado a un solo colector (CBA=3,45) ha producido 11,56 kg/m²día. Además, agregando el segundo colector (CBA=6,90) incrementó la producción por 96 %; mientras tanto, agregando el tercer colector (CBA=10,35) mejoró solo 23 %. Sin embargo, en el verano mejoró en un 48 % y 23 % la productividad agregando el segundo y tercer colector respectivamente.

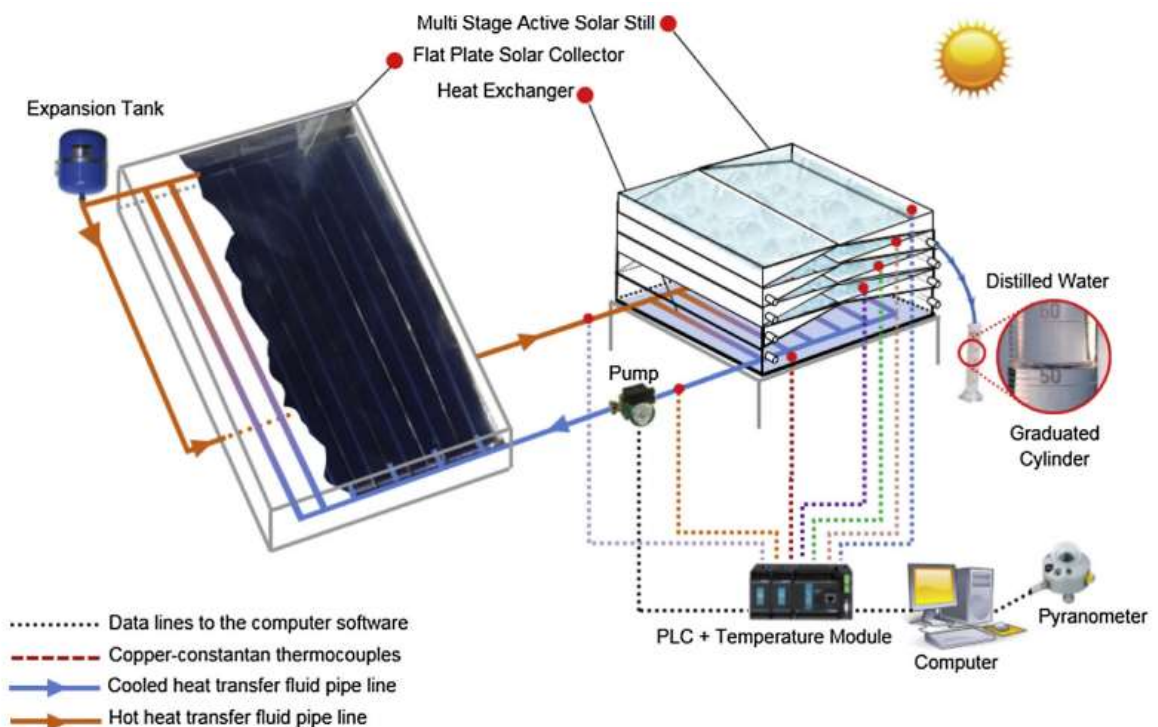


Figura 20 :Esquema de la configuración experimental

Fuente: Feilizadeh *et al.* (2015)

Chen et al. (2017), diseñaron un destilador solar de desalinización de agua de mar con bandejas apiladas multietapa (Figura 21) para evaluar los mecanismos de transferencia de calor y masa, así como el rendimiento de producción de agua fresca tanto en condiciones transitorias y en estado estable. Desarrollaron un modelo matemático que se utilizó para calcular la ecuación de velocidad de transferencia de calor en cada etapa, en la etapa más alta y determinar el coeficiente de rendimiento del destilador. El sistema solo ha requerido de energía solar. El colector de calor se construyó con 7 tubos de vacío tubulares, y 0,9 m² de área del colector; estos tubos fueron conectados directamente con el tanque de almacenamiento de agua caliente en un extremo. Después de un período de funcionamiento, observaron indicios de incrustaciones en el dispositivo. Para solucionar este problema, aumentaron el volumen de entrada para lavar la bandeja de agua en cada etapa utilizaron el agente de limpieza cuando fue necesario. Según la situación real, recomendaron que la cubierta de vidrio se retirará para una limpieza a fondo cada medio año a un año. Se observaron grandes diferencias en la tasa de producción de agua entre diferentes bandejas del destilador de desalinización, lo que puede atribuirse a la variación en el tiempo de calentamiento. Concluyeron que en el experimento en condiciones ambientales cuando la cantidad de radiación solar es de 19 – 20 MJ/m²/día y la profundidad de agua en el destilador de 2 cm, 4 cm y 3 cm, la productividad fue de 8,1 kg/m²/día, 5,69 kg/m²/día y 7,29 kg/m²/día, respectivamente. Además, el coeficiente de rendimiento fue de 1,12; 0,78 y 0,98, respectivamente.

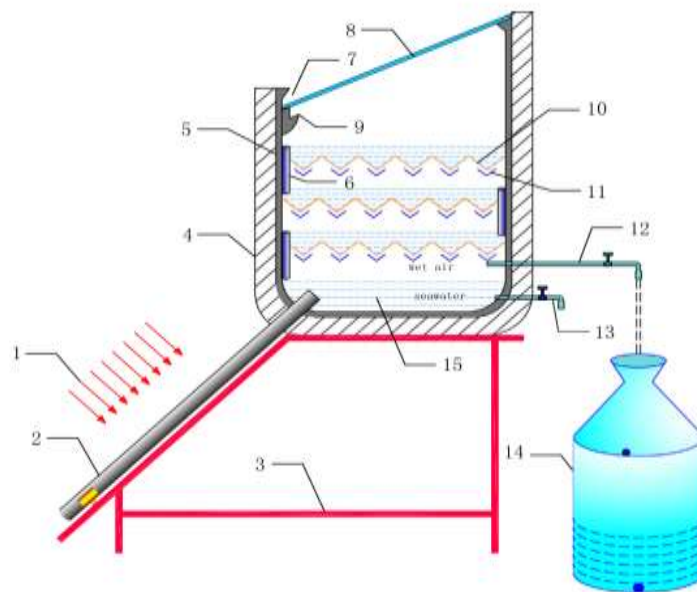


Figura 21: La estructura y operación de un destilador solar con bandejas apiladas multietapa

- 1 Luz solar 2 Colector solar 3 Soporte 4 Capa de aislamiento 5 Armazón
 6 Tubos de nivelación 7 Canal de colección de agua de lluvia 8 Placa de cubierta de vidrio
 9 Canal de colección de agua dulce 10 Una bandeja con superficie de condensación reforzada
 11 Canal de colección de agua fresca 12 Tubería de salida de agua fresca
 13 Tubería de salida de salmuera concentrada 14 Tanque de agua fresca
 15 Tanque de almacenamiento de agua calentada

Fuente: Feilizadeh et al. (2015)

2.4.2. Modelamiento matemático

Shatat y Mahkamov (2010), estudiaron teóricamente y experimentalmente el rendimiento de un destilador de agua de múltiples etapas acoplado a un colector solar tipo HPSC, cuyo modelamiento matemático representa las ecuaciones basadas en los principios de balance de masa y energía en la forma de ecuaciones diferenciales ordinarias. Para dicho propósito los autores utilizaron el esquema mostrado en la Figura 22.

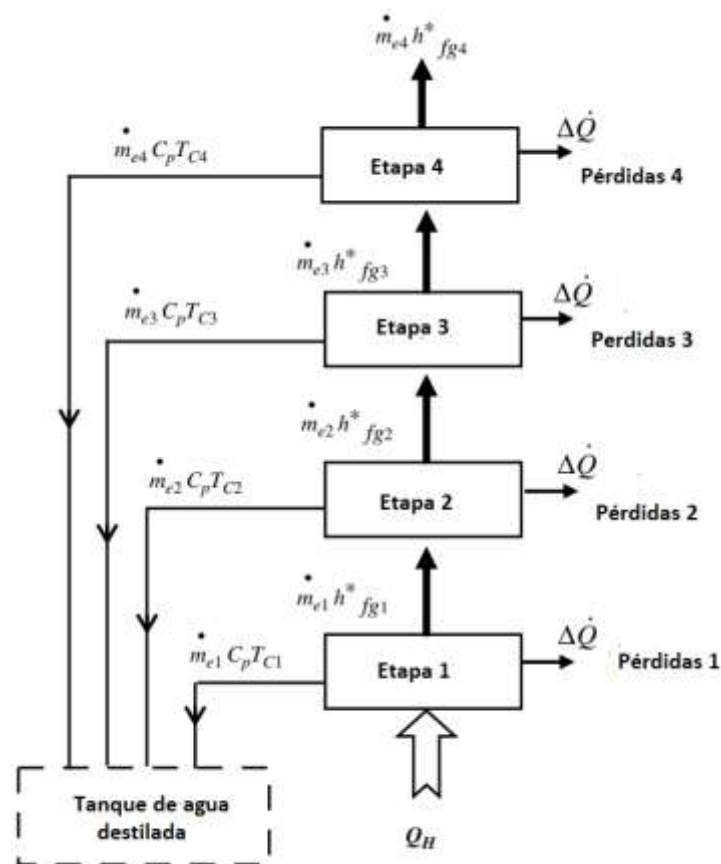


Figura 22: Un esquema del destilador y su diagrama de balance de energía

Las siguientes suposiciones se aplicaron para desarrollar el modelo matemático:

- Las propiedades termofísicas del agua salobre utilizadas en el experimento son iguales al de agua fresca
- El efecto de los gases no condensables que libera el agua cuando se calienta o se expande se desprecia.
- La cantidad de agua evaporada y la cantidad de destilado que sale en cada etapa son iguales.
- El destilado sale del sistema de desalinización a una temperatura igual al de la superficie de condensación.

Las ecuaciones de balance de energía formulados fueron las siguientes:

La primera etapa del destilador;

$$\dot{Q}_H - \dot{m}_{e1}(h_{fg1}^* + c_p T_{c1}) = M_{s1} C_p \frac{dT_{s1}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{losses1} \quad (7)$$

La segunda etapa;

$$\dot{m}_{e1} h_{fg1}^* - \dot{m}_{e2}(h_{fg2}^* + c_p T_{c2}) = M_{s2} C_p \frac{dT_{s2}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{losses2} \quad (8)$$

La tercera etapa;

$$\dot{m}_{e2} h_{fg2}^* - \dot{m}_{e3}(h_{fg3}^* + c_p T_{c3}) = M_{s3} C_p \frac{dT_{s3}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{losses3} \quad (9)$$

La cuarta etapa;

$$\dot{m}_{e3} h_{fg3}^* - \dot{m}_{e4}(h_{fg4}^* + c_p T_{c4}) = M_{s4} C_p \frac{dT_{s4}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{losses4} \quad (10)$$

La ecuación de balance de masa por cada etapa se formuló de la siguiente manera:

$$\frac{dM_{si}}{dt} = -\dot{m}_{ei} \quad (11)$$

Según Chen et al. (2017), el calor suministrado \dot{Q}_H por el colector de calor en la base de la primera etapa puede calcularse según:

$$\dot{Q}_H = \eta \bar{I} A \quad (12)$$

Donde η es la eficiencia térmica del colector de tubos; \bar{I} es la irradiancia solar promedio, y A es el área del colector.

Para Shatat y Mahkamov (2010), el flujo de salida de destilado en cada etapa se puede tomar igual a la tasa de evaporación de masa del agua salobre en la correspondiente etapa; y estos se pueden calcular como:

$$\dot{m}_{ei} = \frac{(T_{si} - T_{ci})h_{ewi}A_{si}}{h_{fgi}} \quad (13)$$

donde h_{ewi} es el coeficiente de transferencia de calor de evaporación, T_{si} es la temperatura del fondo del agua, T_{ci} es la temperatura de la superficie de condensación, A_{si} es el área superficial de evaporación, y h_{fgi} es el calor latente de vaporización por cada etapa.

La eficiencia térmica global de todo el sistema puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^4 \dot{m}h_{fg}}{\bar{I}A_{col}} \quad (14)$$

Donde \bar{I} es la irradiancia solar promedio (o intensidad de radiación solar promedio), y A es el área del colector de calor

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. Materiales para el destilador solar

- Planchas de acero inoxidable AISI 316L de 1,5 mm de espesor
- Planchas de aluminio anodizado plateado brillante de 0,4 mm de espesor
- Paneles de lana mineral de roca de 40 mm de espesor
- Tubos heat pipe de 1800 x 58 mm
- Tubo cuadrado de fierro A36
- Tubo de cobre de 19 mm de diámetro y 1 mm de espesor
- Barras de acero redondas y sólidas de 1½”
- Cintillos de plástico para sujeción
- Pintura anticorrosiva para metal
- Pintura esmalte para metal

3.1.2. Materiales para el sistema de adquisición de datos

- PLC Siemens modelo S7-1200 CPU 1214C
- Memoria SD Siemens modelo 6ES7 954-8LF03-0AA0
- Transmisores de temperatura de 4-20 mA para sensor PT100, Potencia: 24 V
- Sensores de temperatura PT100 de acero inoxidable, rango medición: -70 a 500 °C
- Fuente de alimentación estabilizada, Entrada: AC 100-240 V Salida: DC 12 V/1,9A.
- Llave termomagnética Schneider Electric modelo iC60N Easy9
- Módulo de entradas analógicas Siemens modelo Simatic S7 1200 SM 1231
- Piranómetro LSI-LASTEM modelo DPA863 Rango: 0...1500W/m²
- Indicador LED verde Siemens modelo 3SU1152-6AA40-1AA0
- Balanza de precisión digital marca PATRICK'S, Capacidad 30 kg
- Medidor digital multiparámetro tipo bolígrafo, mide pH, TDS, % sales y µS/cm
- Manguera industrial de PVC transparente de Diámetro ¾”

- Bidón de plástico con cierre de ballesta, capacidad 30 litros
- Baldes de plástico Rey de 25 litros
- Recipientes de plástico Rey de 4 litros

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1. Localización

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo durante todo el mes de marzo del presente año 2021 en la azotea del pabellón W de la Universidad de Lima ($12^{\circ}05'04''S$; $76^{\circ}50'16''$)

3.2.2. Condiciones climáticas

El lugar de la prueba, por estar ubicado en la costa, presenta un clima Semi-Cálido (Desértico-Árido-Sub tropical) y húmedo debido a la corriente fría marina peruana (MINAGRI 2018).

Las condiciones climáticas bajo las que se trabajó en esta investigación (marzo 2021) se presentan en la Tabla 4. Los parámetros meteorológicos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación fueron recolectados de la estación meteorológica Von Humboldt de la UNALM.

Tabla 4: Condiciones climáticas durante la etapa de investigación

ESTACIÓN METEREOLÓGICA VON HUMBOLDT UNALM				
Fecha	Temperatura Media (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad Viento (m/s)	Precipitación (mm)
1/03/2021	25,0	65	3,5	0
2/03/2021	25,9	61	3,5	0
3/03/2021	25,4	64	3,5	0
4/03/2021	23,8	72	3,0	0
5/03/2021	24,8	66	3,2	0
6/03/2021	24,8	67	3,5	0
7/03/2021	24,4	70	3,4	0
8/03/2021	25,0	68	3,6	0
9/03/2021	24,9	66	3,5	0
10/03/2021	25,3	63	4,0	0
11/03/2021	24,0	67	3,6	0
12/03/2021	24,0	68	3,1	0
13/03/2021	23,4	73	3,3	0
14/03/2021	24,4	68	3,2	0
15/03/2021	24,7	66	3,5	0
16/03/2021	24,2	65	3,6	0
17/03/2021	24,3	66	3,4	0

<<Continuación>>

18/03/2021	22,9	68	3,3	0
19/03/2021	22,7	66	2,8	0
20/03/2021	23,4	67	3,1	0
21/03/2021	23,3	68	2,9	0
22/03/2021	23,5	67	3,7	0
23/03/2021	23,1	67	3,6	0
24/03/2021	23,2	69	3,7	0
25/03/2021	22,3	70	3,5	0
26/03/2021	21,8	71	3,4	0
27/03/2021	21,8	70	3,3	0
28/03/2021	22,1	70	3,4	0
29/03/2021	22,5	68	3,3	0
30/03/2021	21,9	71	2,9	0
31/03/2021	21,7	72	3,7	0
	23,7	68	3,4	0

Fuente: SENAMHI (2021)

3.3. DISEÑO DEL DESTILADOR SOLAR

3.3.1. Metodología

El destilador solar de múltiples etapas del estudio es similar al destilador de agua de múltiples etapas de Shatat y Mahkamov (2010). El destilador propuesto se diseñó manteniendo las mismas características técnicas de las 4 etapas de su antecesor; sin embargo, se diseñó un nuevo colector solar de última generación CHPSC en lugar de un colector HPSC. Además, dichos colectores CHPSC se acoplaron directamente (por ambos lados) al destilador solar. Por consiguiente, dicho destilador no requirió de bomba, ni de fluido de transferencia de calor externo, según puede observarse en la Figura 23.

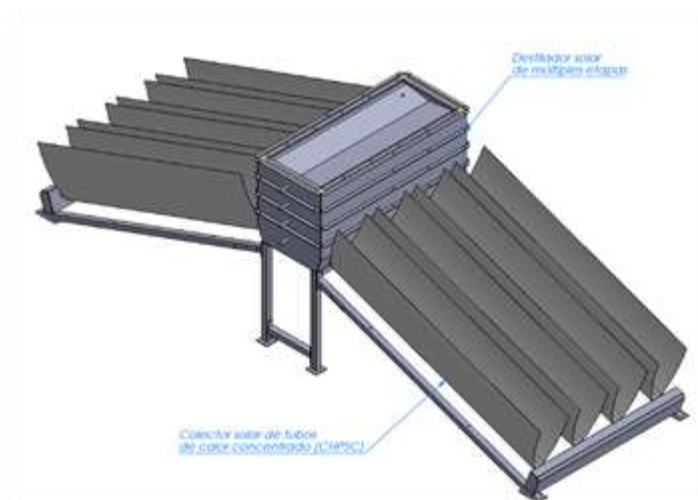


Figura 23: Prototipo del destilador solar en 3D

Fuente: Elaboración propia

El máximo número de colectores solares (en total 8) dependió de la longitud de la primera etapa del destilador (Figura 23). Finalmente, los colectores solares se diseñaron siguiendo la metodología de Tapia (2009), y la metodología de Saettone (2014).

3.3.2. Diseño conceptual

Para el diseño conceptual del destilador solar y los colectores solares se utilizó el programa SolidWorks versión 2016.

El destilador es un prototipo desmontable compuesto por 4 etapas (cada etapa es un tanque desmontable). En la Figura 24 se muestran detalles del dimensionamiento del prototipo del destilador solar.

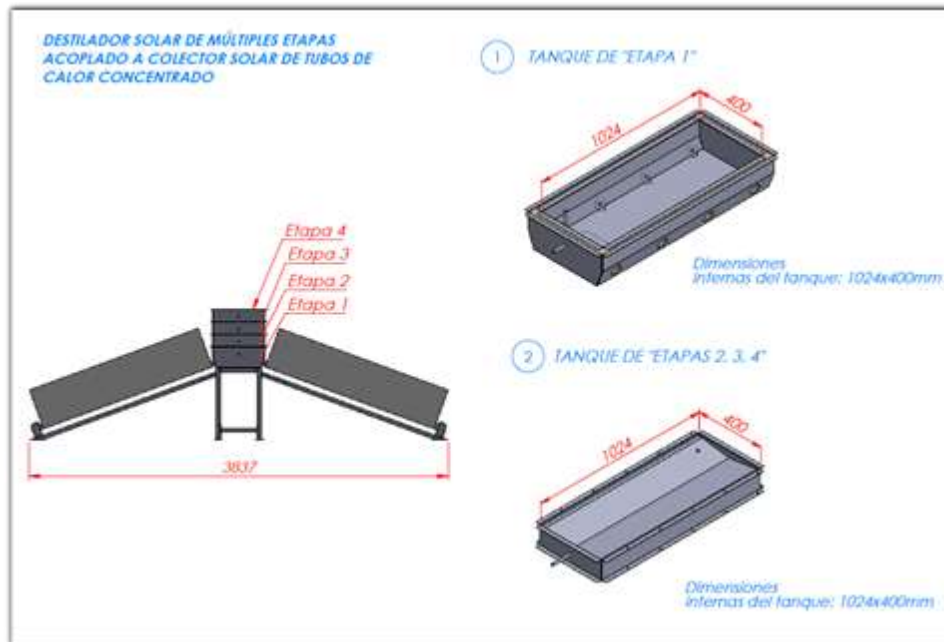


Figura 24: Dimensionamiento del destilador solar en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25, el detalle A muestra la estructura del destilador, compuesto por una capa de 40 mm de lana mineral entre un tanque externo y un tanque interno. El detalle B muestra el diseño de la superficie extendida de transferencia de calor (aletas) y su colocación dentro de la primera etapa del destilador; este componente apuesta a mejorar la transferencia de calor desde el condensador de los tubos *heat pipe* hacia el líquido en calentamiento. Por último, el detalle C muestra el diseño del colector solar que está compuesto por un reflector

parabólico, en cuya base está ubicado el tubo de vacío dentro del cual se ubica el tubo *heat pipe*.

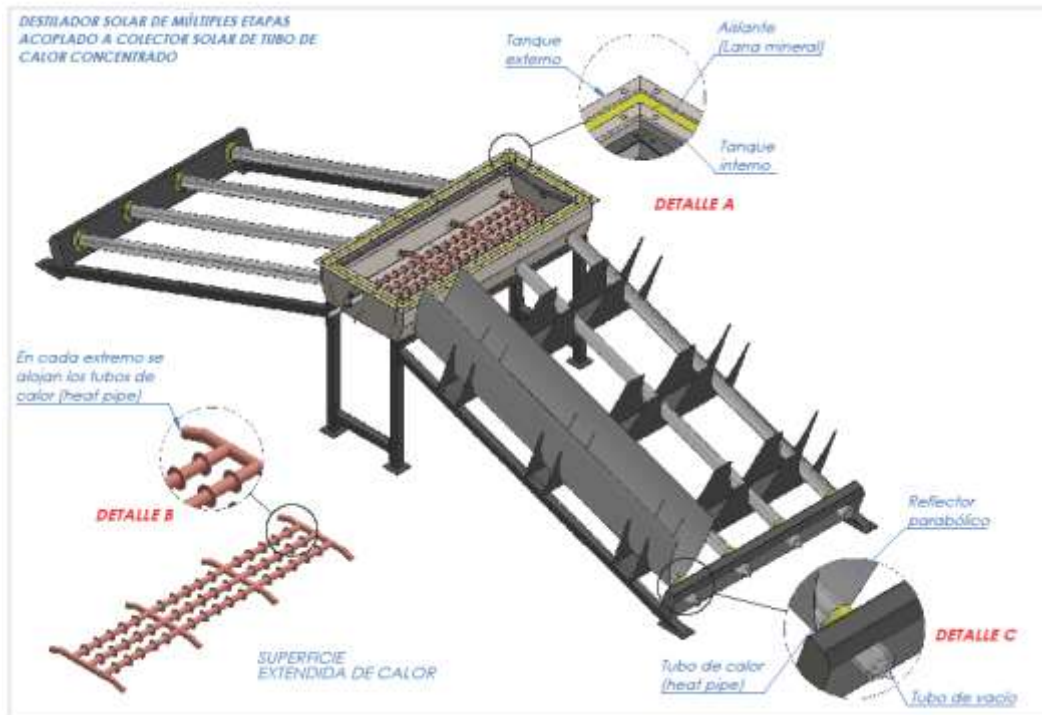


Figura 25: Componentes del destilador solar en 3D

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26, se muestran los detalles del diseño de la inclinación y de la canaleta por cada etapa.

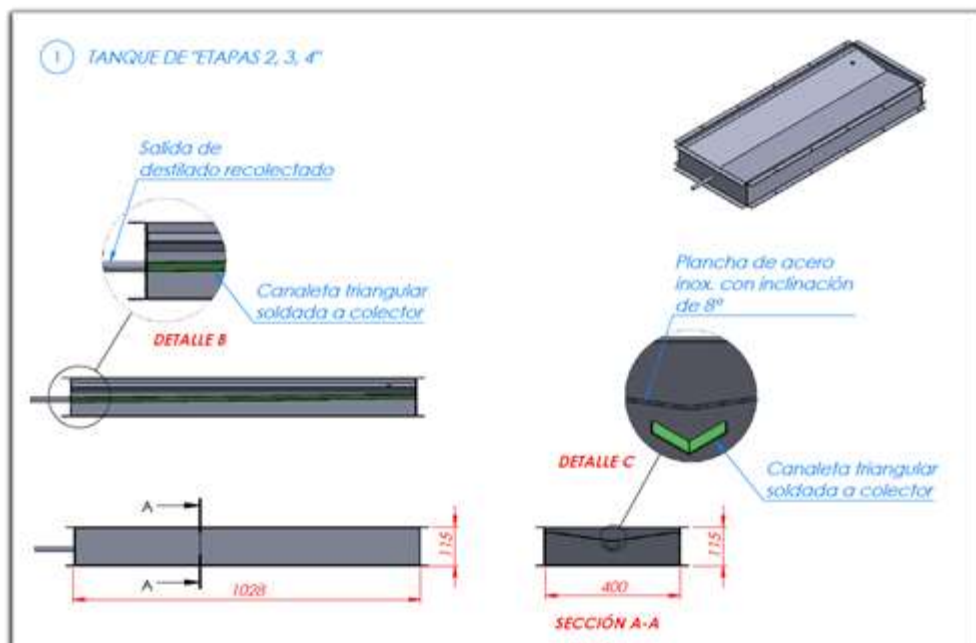


Figura 26: Diseño de la inclinación y canaleta del destilador

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27, se muestra los componentes del colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC), cuyo reflector parabólico compuesto (conocido también como concentrador parabólico compuesto, CPC), se diseñó siguiendo la metodología de Saettone (2014) utilizando las dimensiones de la Tabla 3, y cuya figura corresponde al de una “parábola truncada”. El tubo de vacío es un tubo de borosilicato al vacío (o también conocido como tubo tipo Sydney), cuya dimensión de 1,80 m y de 58 mm de diámetro exterior corresponden a un “tubo comercial”. El tubo *heat pipe* es una varilla de cobre hueca en cuyo interior se encuentra un “alcohol solar” como fluido de transferencia de calor, que al absorber calor en la sección del evaporador el calor se transfiere por convección y conducción hacia la sección del condensador, para luego retornar a la sección del evaporador. Este componente se incluye comercialmente en la compra de los tubos de vacío.

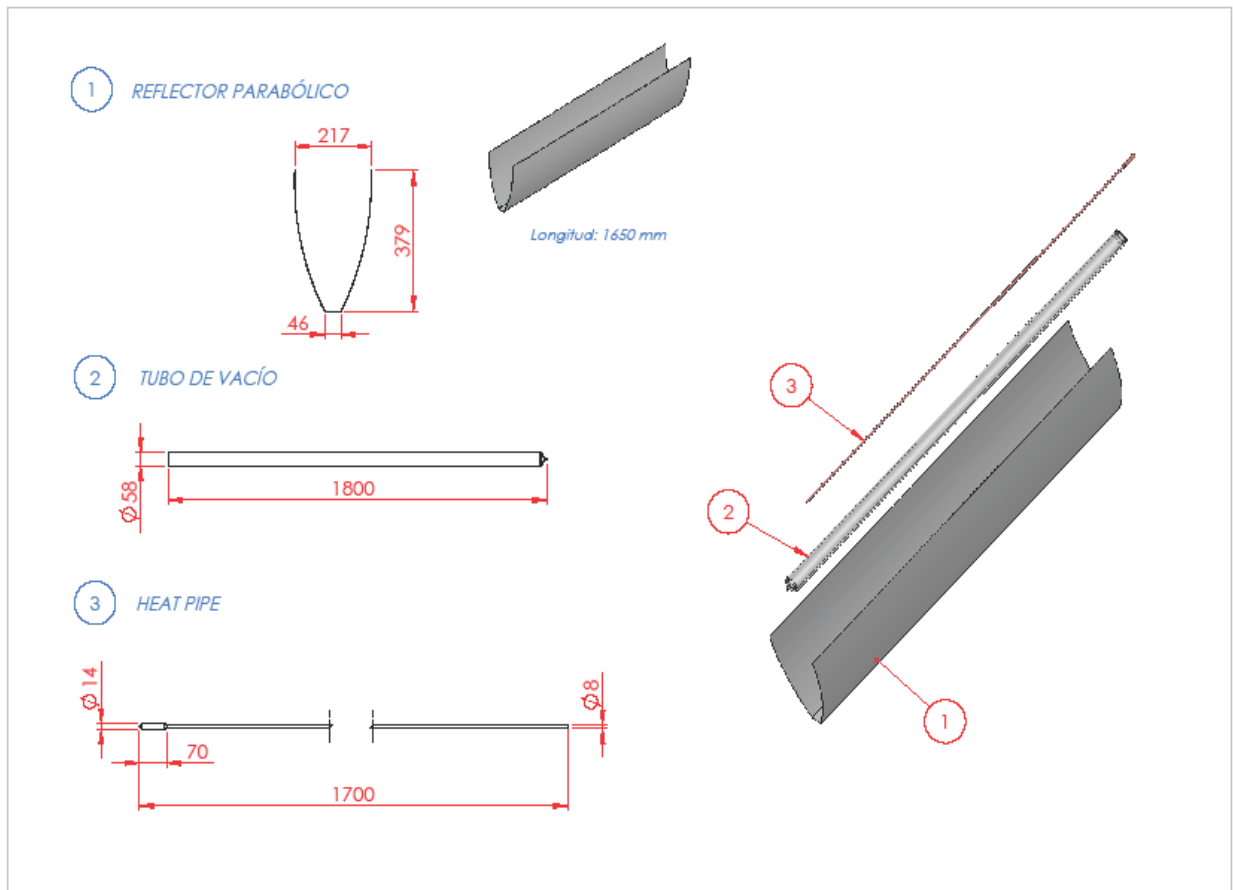


Figura 27: Componentes del colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC) Fuente: Elaboración propia

3.4. EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DEL DESTILADOR SOLAR

3.4.1. Metodología

El experimento se diseñó para realizarse en dos escenarios: primero ensamblando la superficie extendida en la base del destilador (experimento con superficie extendida), Figura 28; luego, retirando la superficie extendida de la base del destilador (experimento sin superficie extendida). Este componente de la superficie extendida pretende mejorar la transferencia de calor entre el condensador del *heat pipe* y el agua de la base del destilador.



Figura 28: Fotografía mostrando la superficie extendida en la base del destilador

Para determinar la productividad (en $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$) en cada escenario experimental se midió cada hora, utilizando una balanza de precisión, el peso acumulado de agua condensada provenientes de las 4 etapas del destilador solar y se dividió entre el área efectiva de evaporación del destilador.

La eficiencia es otro parámetro que se define como la razón de la energía utilizada en la vaporización del agua en el destilador a la energía solar incidente sobre el sistema, y puede ser calculada con la siguiente ecuación (Jahangiri Mamouri et al. 2014).

$$\eta = \frac{mh_{fg}}{IA_{col}} \quad (15)$$

en el cual η es la eficiencia térmica, m es la masa de agua condensada en kg, h_{fg} es el calor latente de vaporización en kJ/kg, I es la intensidad en W/m^2 de la radiación solar, y A_{col} es el área efectiva en m^2 del colector solar. Kargar Sharif Abad et al. (2013), consideran que $h_{fg} = 2390$ kJ/kg.

Además, según Shatat y Mahkamov (2010), el flujo de salida de destilado, \dot{m}_{ei} por cada etapa está relacionada directamente con la diferencia de temperatura ($T_{ei} - T_{ci}$) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{ei} = \frac{(T_{ei} - T_{ci}) h_{ew} A_{ei}}{h_{fg}} \quad (16)$$

donde T_{ei} es la temperatura del fondo del agua, T_{ci} es la temperatura de la superficie de condensación (que se asume igual a la temperatura de salida de destilado), h_{ew} es el coeficiente de transferencia de calor de evaporación, A_{ei} es el área superficial de evaporación, y h_{fg} es el calor latente de vaporización.

3.4.2. Productividad vs temperatura

Las variaciones horarias de los parámetros medidos, tales como como la intensidad de la radiación solar, la productividad de agua destilada (rendimiento) y las temperaturas del agua por etapas (niveles) de los experimentos realizados los días Mar 9, 2021 y Mar 30, 2021 se muestran en las Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente.

Tabla 5: Productividad y temperatura de agua por etapas vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021)

Tiempo (h)	Intens solar (W/m^2)	Productividad ($kg/m^2/h$)	Temperatura de agua por etapas			
			T_{e1} ($^{\circ}C$)	T_{e2} ($^{\circ}C$)	T_{e3} ($^{\circ}C$)	T_{e4} ($^{\circ}C$)
11	1050	0,110	53,46	46,22	36,56	36,68
12	1096	0,320	62,50	49,45	39,38	34,01
13	1240	0,332	79,94	65,77	52,82	42,85
14	1047	0,869	88,91	73,13	61,14	49,12
15	789	0,916	88,51	71,88	60,66	50,80
16	551	0,852	83,84	66,55	56,13	46,76
17	453	0,583	81,82	65,29	54,50	45,31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 : Productividad y temperatura de agua por etapas vs tiempo (sin superficie extendida; Marzo 30, 2021)

Tiempo (h)	Intens solar (W/m ²)	Productividad (kg/m ² /h)	Temperatura de agua por etapas			
			T _{e1} (°C)	T _{e2} (°C)	T _{e3} (°C)	T _{e4} (°C)
11	886	0,081	46,35	36,21	30,92	27,92
12	1069	0,332	49,32	42,22	33,97	32,41
13	1137	0,261	60,23	49,96	39,06	36,41
14	997	0,552	69,12	58,03	46,67	42,46
15	747	0,317	71,30	57,02	47,90	42,13
16	612	0,422	68,44	55,50	48,34	41,48
17	538	0,352	66,46	54,85	47,24	40,10

Fuente: Elaboración propia

Las variaciones horarias de la productividad de agua condensada (rendimiento) y las diferencias entre la temperatura del fondo de agua y la temperatura de la superficie de condensación por etapas, en función del tiempo se muestran en las Tablas 7 y 8, cuyos experimentos fueron realizados los días Mar 9, 2021 y Mar 30, 2021, respectivamente.

Tabla 7 : Productividad y diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021)

Tiempo (h)	Productividad (kg/m ² /h)	Diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación (°C)											
		T _{e1}	T _{c1}	(T _{e1} -T _{c1})	T _{e2}	T _{c2}	(T _{e2} -T _{c2})	T _{e3}	T _{c3}	(T _{e3} -T _{c3})	T _{e4}	T _{c4}	(T _{e4} -T _{c4})
11	0,110	53,46	39,16	14,30	46,22	31,72	14,50	36,56	34,18	2,38	36,68	39,83	-3,16
12	0,320	62,50	43,39	19,11	49,45	32,45	17,00	39,38	34,09	5,29	37,01	39,63	-2,62
13	0,332	79,94	51,61	28,33	65,77	35,31	30,46	52,82	35,76	17,06	42,85	41,96	0,89
14	0,869	88,91	51,29	37,62	73,13	35,69	37,45	61,14	40,21	20,93	49,12	41,21	7,91
15	0,916	88,51	49,08	39,42	71,88	36,20	35,67	60,66	40,66	20,01	50,80	39,93	10,87
16	0,852	83,84	42,70	41,14	66,55	33,20	33,36	56,13	36,48	19,65	46,76	39,93	6,83
17	0,583	81,82	42,21	39,61	65,29	34,19	31,10	54,50	36,97	17,53	45,31	39,00	6,31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 : Productividad y diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación vs tiempo (sin superficie extendida; Marzo 30, 2021)

Tiempo (h)	Productividad (kg/m ² /h)	Diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación (°C)											
		T _{e1}	T _{c1}	(T _{e1} -T _{c1})	T _{e2}	T _{c2}	(T _{e2} -T _{c2})	T _{e3}	T _{c3}	(T _{e3} -T _{c3})	T _{e4}	T _{c4}	(T _{e4} -T _{c4})
11	0,081	46,35	26,15	20,20	36,21	33,78	2,43	30,92	33,04	-2,12	27,92	31,27	-3,35
12	0,332	49,32	26,20	23,12	42,22	37,26	4,96	33,97	34,86	-0,89	32,41	33,06	-0,65
13	0,261	60,23	30,92	29,30	49,96	40,61	9,35	39,06	37,62	1,44	36,41	34,81	1,61
14	0,552	69,12	32,39	36,73	58,03	44,44	13,59	46,67	37,65	9,02	42,46	35,21	7,25
15	0,317	71,30	30,24	41,06	57,02	44,01	13,01	47,90	36,91	10,99	42,13	33,81	8,32
16	0,422	68,44	28,54	39,89	55,50	43,25	12,24	48,34	36,59	11,75	41,48	34,15	7,33
17	0,352	66,46	28,27	38,19	54,85	42,63	12,21	47,24	33,17	14,07	40,10	32,93	7,17

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Eficiencia térmica vs tiempo

En las tablas 9 y 10 se muestran los cálculos de la eficiencia térmica vs tiempo siguiendo la metodología de la ecuación (15), en el cual se ha considerado un factor de conversión, y cuyos experimentos fueron realizados los días Mar 9, 2021 y Mar 30, 2021, respectivamente.

Tabla 9: Eficiencia térmica vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021)

Tiempo (h)	Productividad (kg/m ² /h)	Intens solar (W/m ²)	Area de evap (m ²)	h _{fg} (kJ/kg)	Area colector (m ²)	Factor conversión	Eficiencia térmica (%)
11	0,110	1050	0,4096	2390	2,86	3,6	1,00
12	0,320	1096	0,4096	2390	2,86	3,6	2,78
13	0,332	1240	0,4096	2390	2,86	3,6	2,55
14	0,869	1047	0,4096	2390	2,86	3,6	7,89
15	0,916	789	0,4096	2390	2,86	3,6	11,04
16	0,852	551	0,4096	2390	2,86	3,6	14,70
17	0,583	453	0,4096	2390	2,86	3,6	12,24
Fuente: Elaboración propia							

Tabla 10 : Eficiencia térmica vs tiempo (sin superficie extendida; Mar 30, 2021)

Tiempo (h)	Productividad (kg/m ² /h)	Intens solar (W/m ²)	Area de evap (m ²)	h _{fg} (kJ/kg)	Area colector (m ²)	Factor conversión	Eficiencia térmica (%)
11	0,081	886	0,4096	2390	2,86	3,6	0,87
12	0,332	1069	0,4096	2390	2,86	3,6	2,95
13	0,261	1137	0,4096	2390	2,86	3,6	2,18
14	0,552	997	0,4096	2390	2,86	3,6	5,26
15	0,317	747	0,4096	2390	2,86	3,6	4,03
16	0,422	612	0,4096	2390	2,86	3,6	6,56
17	0,352	538	0,4096	2390	2,86	3,6	6,22

Fuente: Elaboración propia

3.5. CALIDAD DEL AGUA DESALINIZADA

3.5.1. Metodología

Para analizar la calidad del agua desalinizada se registró, utilizando un equipo multiparámetro, los sólidos totales disueltos (TDS), conductividad eléctrica, salinidad y pH, respectivamente. Además, se registró para el agua de mar los mismos parámetros con el propósito de comparar con la calidad del agua desalinizada.

En general, el agua desalinizada obtenido por el proceso de evaporación por destilación solar es un agua condensada de alta calidad que lo denominaremos “agua fresca”; y cuyos resultados se han comparado con las características del agua para consumo humano.

3.5.2. Mediciones

En las Tablas 11, 12 y 13 se muestran las mediciones del agua de mar recolectada en la Costa Verde; las mediciones en el sistema desalinizador del agua condensada del caso a) con superficie extendida, y del agua condensada del caso b) sin superficie extendida, respectivamente.

Tabla 11: Agua de mar de la Costa Verde (Lima-Perú)

Parámetros medidos	Mar 09/2021	Mar 10/2021	Mar 11/2021	Mar 12/2021
Sólidos totales disueltos, TDS (mg/L)	23300	23600	23300	23300
Conductividad eléctrica (µS/cm)	46600	47100	46600	46600
Salinidad (%)	2,85	2,85	2,85	2,85
pH	6,74	7,1	6,74	6,74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 : Agua condensada a) con superficie extendida

Parámetros medidos	Mar 09/2021	Mar 10/2021	Mar 11/2021	Mar 12/2021
Sólidos totales disueltos, TDS (mg/L)	20	20	91	38
Conductividad eléctrica (µS/cm)	41	41	182	77
Salinidad (%)	0	0	0	0
pH	7	7	6,11	7,13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 : Agua condensada b) sin superficie extendida

Parámetros medidos	Mar 26/2021	Mar 29/2021	Mar 30/2021	Mar 31/2021
Sólidos totales disueltos, TDS (mg/L)	187	162	139	48
Conductividad eléctrica (µS/cm)	379	321	279	95
Salinidad (%)	0,02	0,02	0,01	0,01
pH	6,93	7,02	7,04	7,4

Fuente: Elaboración propia

3.6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con el propósito de poner en marcha el destilador ya ensamblado primero se hizo pruebas con agua osmotizada con baja salinidad y conductividad eléctrica. Luego, se utilizó agua de mar recolectado del circuito de playas de Costa Verde con altos valores de salinidad y conductividad eléctrica. El procedimiento consistió en llenar con agua el destilador por un solo punto de entrada que está ubicado en la parte más alta del destilador. El nivel de agua en cada etapa se controló ajustando la altura del tubo especial de rebosamiento ubicado en la primera etapa. Cada etapa tiene un tubo de rebosamiento. Aproximadamente un volumen total de 40 litros de agua se cargó al destilador; 30 litros en la primera etapa y en el resto 3 litros por cada etapa. La profundidad de agua en la primera etapa fue de 80 mm a fin de cubrir toda la superficie extendida que alcanzó una altura de 60 mm.

El proceso consiste en que la energía solar primero es absorbida por el colector solar (CHPSC) para luego transferir calor directamente al agua de la primera etapa y evaporándola, el vapor generado se condensará en la superficie inclinada de la segunda etapa cuyas gotas de condensado fluirán por gravedad hacia el exterior del destilador y luego se recolectarán por los recipientes; el calor latente del vapor que se condensa de la primera etapa se utilizará para evaporar el agua de la segunda etapa, y por tanto se condensará en la superficie inclinada de la tercera etapa, y así sucesivamente.

Se utilizó el esquema de la Figura 29 para el registro automático de la irradiación solar y de nueve temperaturas de las cuatro etapas del destilador solar cargados con agua de mar. El sistema automático de registro de datos utilizó el software step 7 (tia portal v15) y un equipo controlador como es un PLC S7-1200 el cual proporcionó a través de las instrucciones de "DATA LOG" guardar datos de proceso en una memoria SD en formato CSV (valores separados por coma) el cual se puede abrir en el software Microsoft Excel y así poder obtener las gráficas correspondientes.

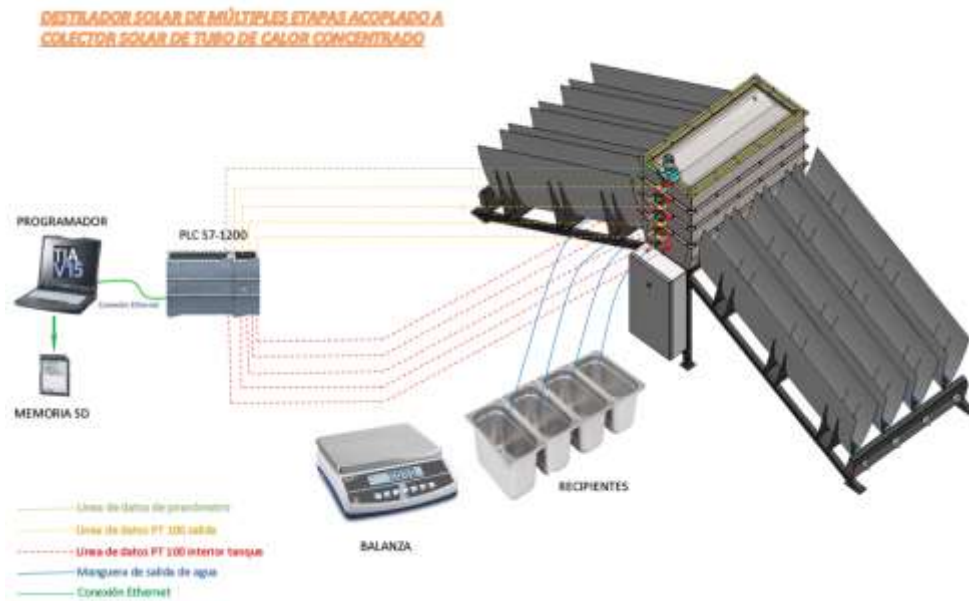


Figura 29: Un esquema de la configuración experimental

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó un piranómetro de segunda clase modelo DPA863 con salida de señal analógica normada para registrar la intensidad de la irradiación solar (en W/m^2) durante las horas de sol aproximadamente entre las 9 am hasta las 6:30 pm. Así mismo, se utilizó sensores PT 100 para el registro de cuatro temperaturas de salida de los condensados y el registro de cinco temperaturas del interior de los tanques. Además, se recolectó el condensado por cada etapa durante el mismo período registrándose la masa acumulada. Finalmente, para realizar un análisis de la calidad del agua se registró los sólidos totales disueltos (TDS), conductividad eléctrica, y pH, antes y después del proceso de destilación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR SOLAR

4.1.1. Destilador solar de múltiples etapas

El prototipo del destilador solar de múltiples etapas se construyó en un taller mecánico privado ubicado en Villa María del Triunfo.

El destilador de 4 etapas se construyó de acero inoxidable AISI 316L, siendo de 1,5 mm para el tanque externo y 1,5 mm para el tanque interno. La altura de la primera etapa es de 150 mm, y la altura de las demás etapas de 115 mm, respectivamente. La profundidad de agua en la primera etapa es de 80 mm y cubre toda la superficie extendida que alcanza una altura de 60 mm. El diseño de las otras etapas está formado por una plancha de acero inoxidable de 1,5 mm con una inclinación de 8 °, y soldadas a las paredes laterales del destilador. Una canaleta triangular está debajo de cada uno de las planchas de acero inoxidable, y con el extremo inferior hacia el exterior para que el destilado recolectado fluya hacia los recipientes colectores (Shatat y Mahkamov 2010)

La construcción propiamente del destilador se inició con el proceso de corte de las planchas de acero inoxidable en un CNC de corte láser el cual dejó las planchas listas para ser soldadas. Para soldar los tanques del destilador se utilizó soldadura TIG. Para la fabricación de la estructura de fierro se cortaron los tubos a medida y se taladraron los agujeros según los planos. Luego se soldó la estructura con soldadura MIG-MAG. Para finalmente pintar con anticorrosivo y pintura esmalte. Con el objetivo de minimizar las pérdidas de calor a través de las paredes del destilador cada etapa, se relleno con 40 mm de lana mineral entre el tanque interno y el tanque externo (Figura 30)



Figura 30: Fotografía mostrando 3 etapas desmontables del destilador

4.1.2. Superficie extendida de transferencia de calor

Para la fabricación de la superficie extendida de transferencia de calor (Figura 31) se utilizó tubo de cobre de 19 mm de diámetro y con espesor de 1mm. El proceso de fabricación consistió en el corte del material de acuerdo a las medidas que indicaba el plano. En la mayoría de los tubos se tuvo que realizar un corte en forma de boca de pescado. Una vez preparado todos los cortes listos se procedió al proceso de soldado de estas utilizando soldadura TIG, y el material de aporte fue alambres de cobre calibre 14 AWG. De esta manera se soldó todas las partes hasta obtener la pieza final, luego de esto para limpiar el cambio de color por la soldadura se lijaron las partes soldadas y se pulió con un paño pulidor 3 M. Finalmente se insertaron 8 bocinas de cobre de un diámetro interno de 14 mm en los brazos de la superficie extendida, para que se inserten en los tubos de cobre que también tenía 14 mm de diámetro (Anexo 1 para mayor detalle).

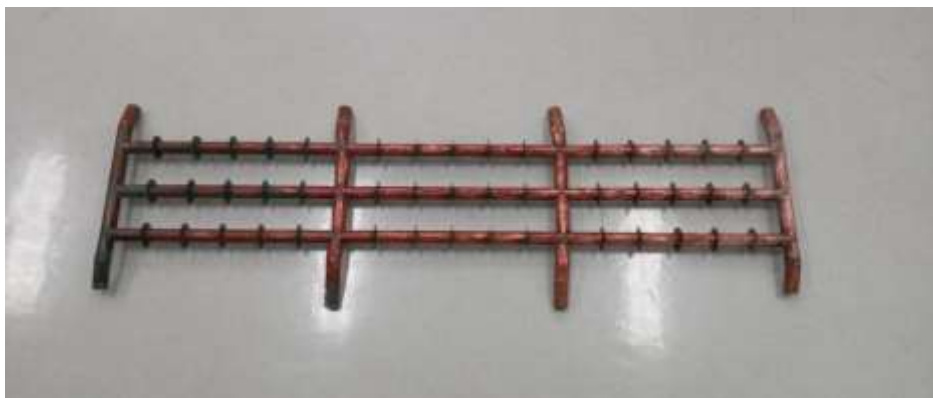


Figura 31: Fotografía de la superficie extendida de transferencia de calor

En la Tabla 14 se resume sus especificaciones técnicas.

Tabla 14: Especificaciones de la superficie extendida

Descripción	Especificaciones
Material	Cobre
Diámetro exterior	19 mm
Diámetro interior	17 mm
Espesor	1 mm
Longitud aprox.	920 mm
Ancho aprox.	280 mm
Diámetro de las aletas	36 mm
Area de la superficie extendida	2960 cm ²

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC)

Para la construcción de los reflectores parabólicos del colector solar CHPSC (ver Figura 32) se utilizó aluminio anodizado plateado brillante de 0,4 mm de espesor. Luego se cortó y se dobló para darle la forma final de la parábola según las coordenadas de la Tabla 3. Además, se utilizó cintillos para sujetarlos sobre una estructura de acero inclinado 30°. Estos cintillos ayudan al mantenimiento y desmontaje de dichos reflectores.

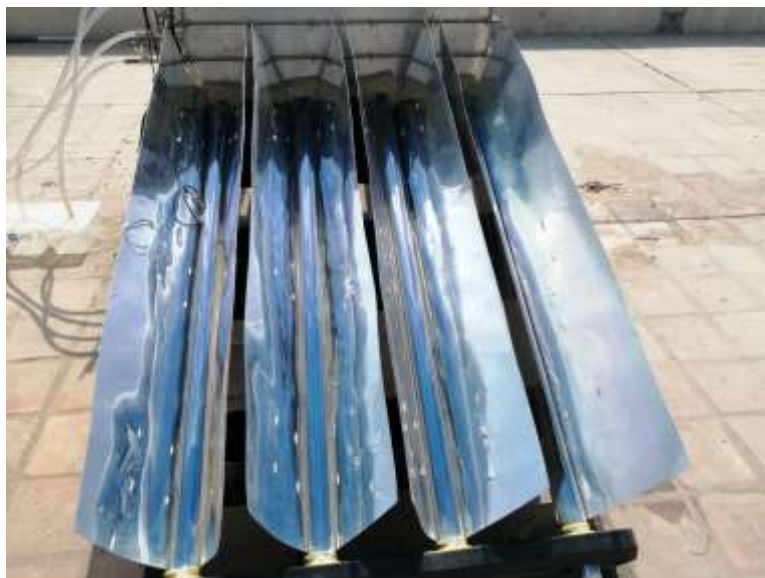


Figura 32: Fotografía del colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC)

En la Tabla 15 se muestra las especificaciones del colector solar

Tabla 15 : Especificaciones del colector solar

Descripción	Especificaciones
Longitud	1650 mm
Ancho de apertura	217 mm
Concentración geométrica	5
Angulo de aceptación	$\pm 11,53^\circ$
Area del colector (8 tubos)	2,86 m ²
Material	Aluminio plateado

Fuente: Elaboración propia

Los tubos absorbedores de calor han sido colocados en la parte baja de los reflectores parabólicos y sujetos rígidamente por soportes metálicos anclados a la estructura metálica. Cada tubo absorbente tiene dos tubos de vidrio concéntricos cerrados en un extremo con un espacio de vacío anular y un absorbente de superficie selectivo en la superficie exterior del tubo interior (lado del vacío). En el interior un *heat pipe* de cobre está unido a una placa reflectora de aluminio que absorbe calor dentro del tubo sellado al vacío, según puede observarse en la Figura 33.



Figura 33: Fotografía de los tubos de vacío integrado con *heat pipe*

En la Tabla 16 se muestran las especificaciones de los tubos de vacío de la Figura 33.

Tabla 16 : Especificaciones de los tubos de vacío

Descripción	Especificaciones
Material	Vidrio de borosilicato
Longitud	1800 mm
Diámetro exterior	58 mm
Diámetro interior	48 mm
Espesor del vidrio	1,60 mm
Interior del tubo al vacío	Pipeta de cobre con aleta de aluminio
Superficie absorbente por cada tubo	0,135 m ²

Fuente: TERMOINOX S.A.C.

En la Tabla 17 se muestran las especificaciones de los tubos *heat pipe* de la Fig. 33.

Tabla 17 : Especificaciones de los tubos heat pipe

Descripción	Especificaciones
Material	Cobre
Longitud del evaporador	1630 mm
Longitud del condensador	70 mm
Diámetro del evaporador	8 mm
Diámetro del condensador	14 mm
Area del condensador (8 <i>heat pipe</i>)	246,30 cm ²
Fluido de trabajo	Alcohol solar

Fuente: TERMOINOX S.A.C.

4.1.4. Ensamblado del destilador solar

El ensamblado del destilador se realizó de acuerdo a los siguientes pasos (ver Anexo 2 para mayor detalle):

- 1) Se colocó los sensores de temperatura en cada uno de los agujeros roscados de los tanques internos. Los sensores se colocaron con una arandela de teflón para asegurar su hermeticidad y evitar haya fuga de agua.
- 2) Se ensambló los tanques internos uno sobre otro empleando pernos hexagonales. Se aseguraron que todos los sensores se encuentren en un mismo lado y que los tubos de rebose estén en posiciones alternadas.
- 3) Se colocó material aislante (lana mineral) en las paredes externas de los tanques internos. La lana mineral quedó adherida a las paredes de los tanques por presión.
- 4) Se ensambló los tanques externos uno sobre otro empleando pernos hexagonales. Se tuvo cuidado con los sensores de temperatura.
- 5) Se instaló la tubería para la recolección de condensado. En esta misma tubería se colocó sensores que registraron las temperaturas de los condensados.
- 6) Se procedió al ensamblado del tanque de la base: primero se enroscó en el tanque de la base interior el sensor de temperatura, luego se colocó el material aislante entre los tanques interior y exterior, y finalmente se instaló la tubería de recolección de condensado. En esta etapa, a diferencia de las otras tres, la tapa inclinada puede desmontarse para colocar y/o retirar la superficie extendida.

En la Figura 34 se muestra una fotografía del destilador solar de múltiples etapas ensamblado que incluye el colector solar y la configuración experimental del registro de datos.



Figura 34: Fotografía del destilador solar de múltiples etapas acoplado a un colector solar de tubos de calor concentrado (CHPSC)

4.2 PRODUCTIVIDAD DE AGUA DESTILADA

En la Figura 35 se observa que la intensidad de radiación solar de los días Mar 9, 2021 y Mar 30, 2021 están aproximadamente superpuestos, indicando una misma radiación solar promedio de 844 W/m^2 . Además, se observa que la gráfica de la productividad a) con superficie extendida está por encima de la gráfica de la productividad b) sin superficie extendida. Por lo tanto, es evidente que el sistema desalinizador operando con superficie extendida tiene mayor productividad que si operase sin superficie extendida. Así mismo, se observa que las variaciones horarias de la productividad se correlacionan con las variaciones horarias de la intensidad de radiación solar.

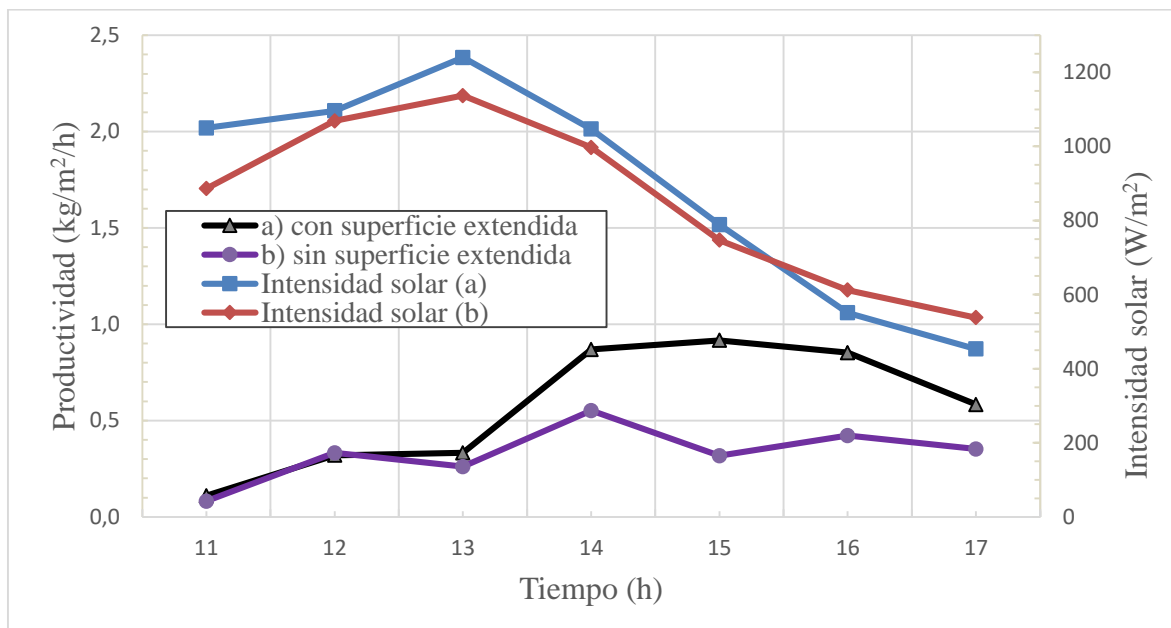
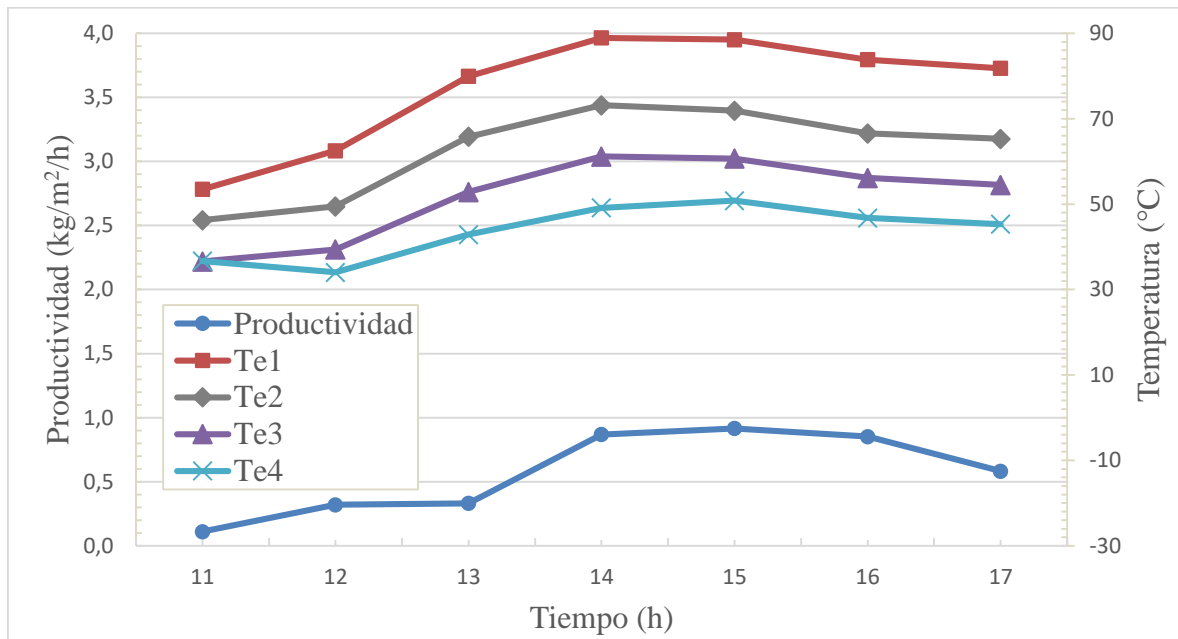


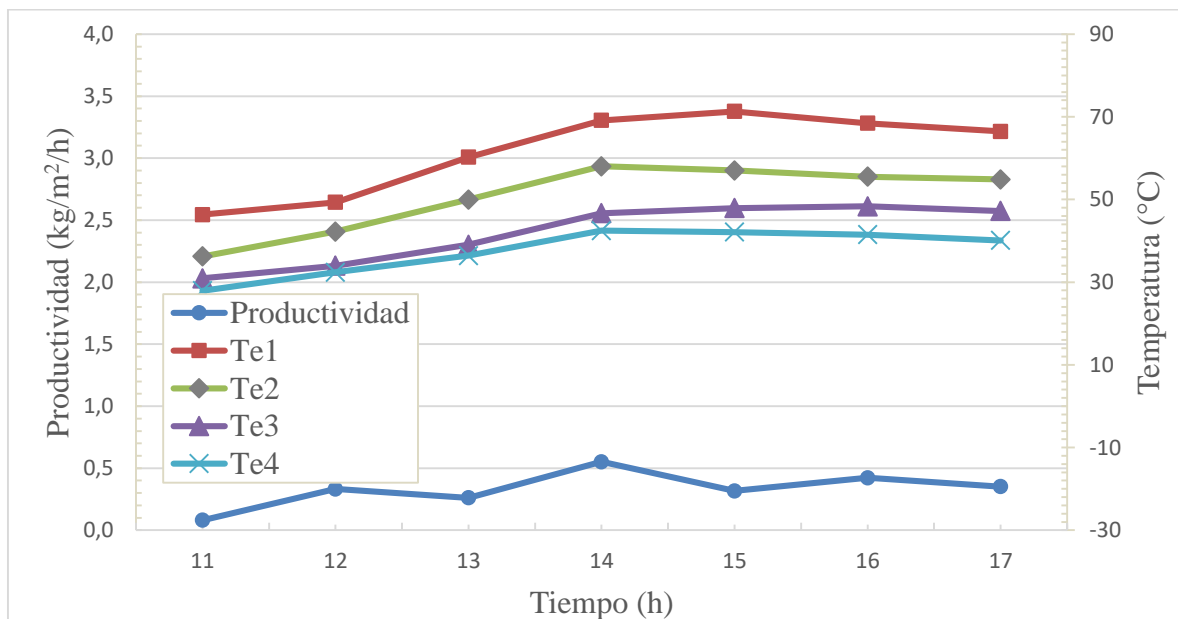
Figura 28: Productividad e intensidad de radiación solar vs tiempo (con superficie extendida; Marzo 9, 2021 y sin superficie extendida; Mar 30, 2021)

Las variaciones de la productividad y las temperaturas medidas del agua por etapas en función del tiempo se muestran en la Figura 36 (a: con superficie extendida, b: sin superficie extendida). Se observa que en ambos casos a) y b) los cambios de temperatura guardan relación con las variaciones de productividad del agua condensada. Este hecho es de esperar ya que el sistema desalinizador estuvo debidamente aislado. Por otro lado, otros estudios anteriores, tales como, Kargar Sharif Abad *et al.* (2013) lograron una correlación similar usando una combinación de un sistema de desalinización solar con un colector solar tipo heat pipe pulsante (PHP); Jahangiri Mamouri *et al.* (2014) obtuvo la misma correlación utilizando una combinación de un sistema de desalinización solar con un colector solar de tubos de vacío y acoplado un *heat pipe* tipo termosifón; Shatat y Mahkamov (2010)

alcanzaron la misma correlación utilizando una combinación de un destilador solar de múltiples etapas con un colector solar de tubos de vacío y acoplado con un *heat pipe*.



(a: con superficie extendida; Marzo 9, 2021)

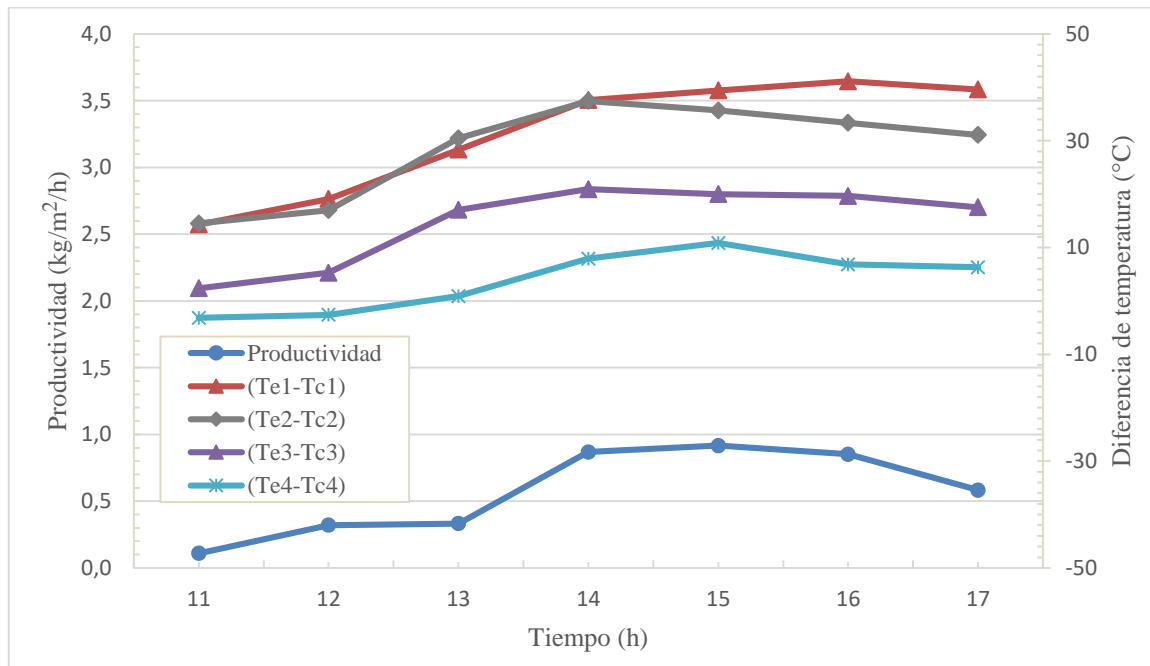


(b: sin superficie extendida; Marzo 30, 2021)

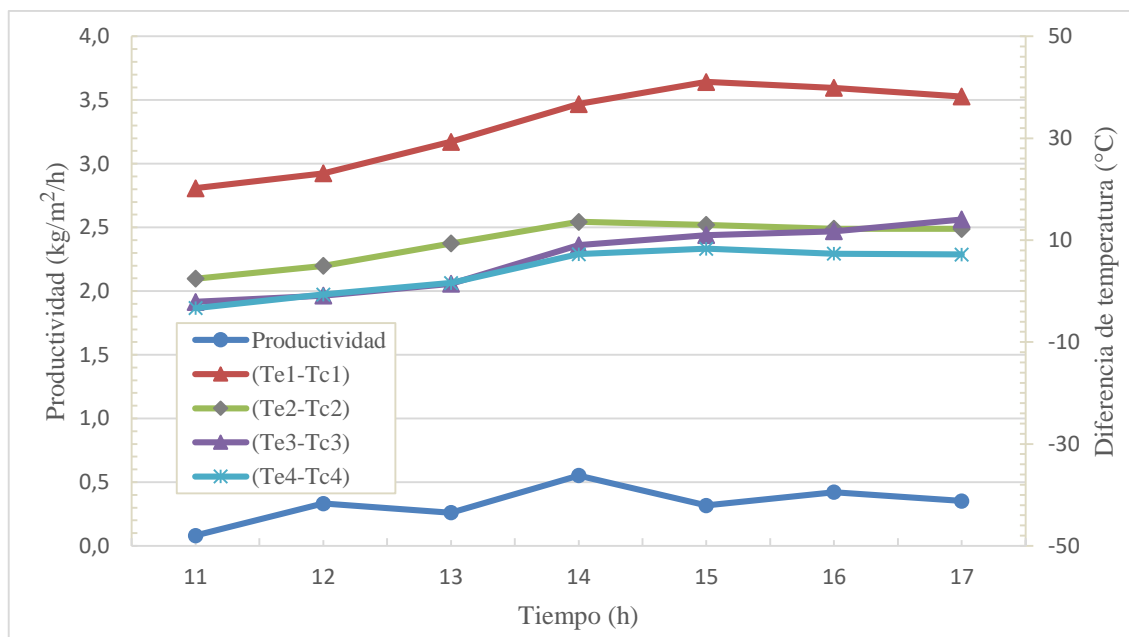
Figura 29: Productividad y temperatura de agua por etapas vs tiempo

En la Figura 37 (a: con superficie extendida, b: sin superficie extendida) se observa que la productividad se correlaciona directamente con la diferencia de temperatura ($T_{ei} - T_{ci}$),

considerando que ambas temperaturas han sido medidas experimentalmente. Este resultado gráfico valida el modelamiento de Shatat y Mahkamov (2010), según la ecuación (16).



(a: con superficie extendida; Marzo 9, 2021)



(b: sin superficie extendida; Marzo 30, 2021)

Figura 30: Productividad y diferencias de temperatura del agua por etapas y de condensación versus tiempo

4.3 EFICIENCIA TÉRMICA DEL SISTEMA

En la Figura 38 se observa los cambios de la eficiencia térmica con respecto a las diferentes horas del día para los dos casos: a) con superficie extendida y b) sin superficie extendida, respectivamente. El caso a) tiene mayor eficiencia térmica que el caso b) en las diferentes horas del día.

De acuerdo a la Figura 38 la más alta eficiencia en el caso a) es de 14,7 %, y en el caso b) es de 6,6 %, respectivamente. Además, en nuestro estudio en el caso a) la máxima productividad fue de 0,916 kg/m²/h; y en el caso b) la máxima productividad fue de 0,552 kg/m²/h. Por otro lado, otros estudios anteriores, tales como, Kargar Sharif Abad et al. (2013) lograron una eficiencia máxima de 17% con una productividad máxima de 0,875 kg/m²/h usando una combinación de un sistema de desalinización solar con un colector solar tipo heat pipe pulsante (PHP); Jahangiri Mamouri et al. (2014) obtuvieron una eficiencia máxima de 22,9 % con una productividad máxima de 1,02 kg/m²/h utilizando una combinación de un sistema de desalinización solar con un colector solar de tubos de vacío y acoplado un heat pipe tipo termosifón; Shatat y Mahkamov (2010) alcanzaron una eficiencia global aproximada de 33% con una productividad de 1,1 kg/m²/h utilizando una combinación de un destilador solar de múltiples etapas con un colector solar de tubos de vacío y acoplado con un heat pipe.

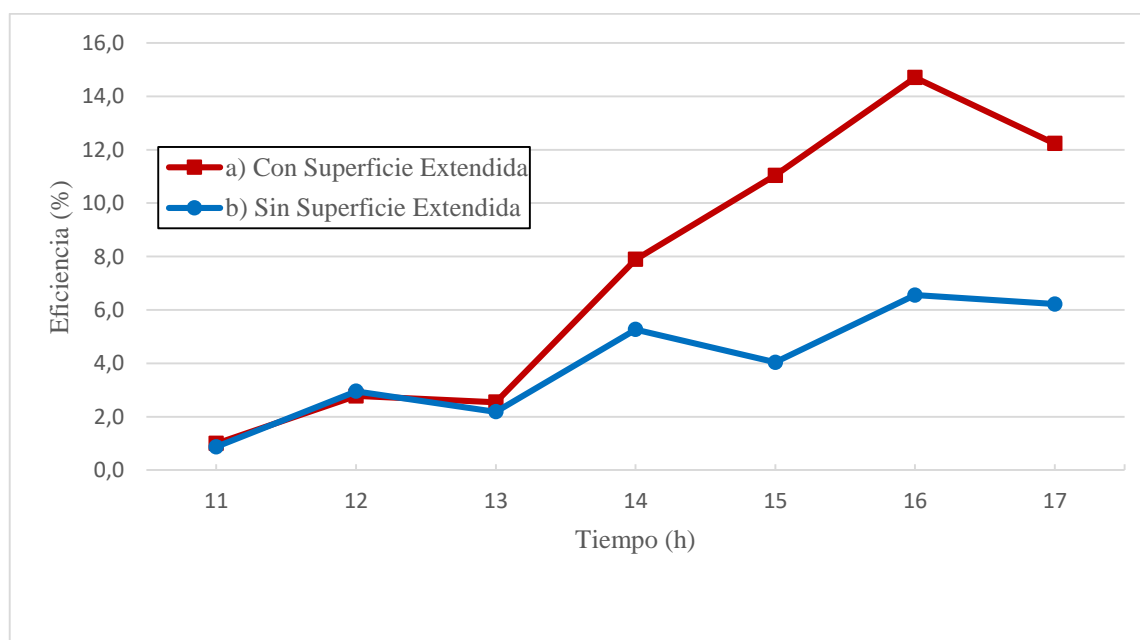


Figura 31: Eficiencia térmica vs tiempo para los dos casos: a) con superficie extendida; Mar 9, 2021 y b) sin superficie extendida; Mar 30, 2021)

4.4. ESTADISTICA: PRUEBA DE HIPÓTESIS

En la Figura 39 se muestra un esquema del diseño experimental del presente trabajo de investigación donde se identifican algunos de los factores controlables y no controlables más relevantes para el análisis estadístico respectivo.

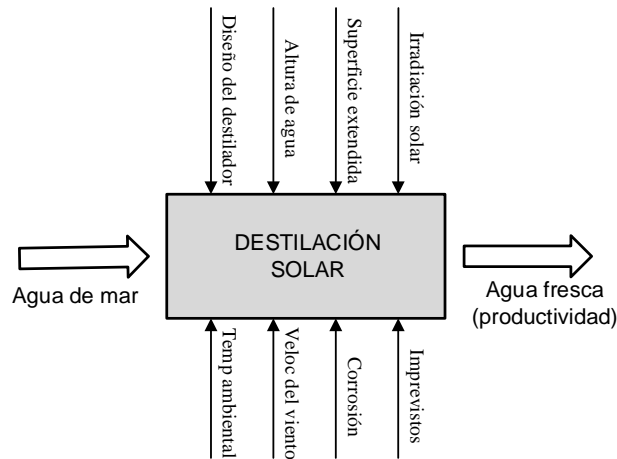


Figura 32: Un esquema del diseño experimental del proyecto

Fuente: Elaboración propia

El estudio comprende el efecto del factor superficie extendida sobre la productividad de agua fresca a partir de agua de mar, manteniendo el resto de factores constantes.

En la tabla 18 se muestra la producción de agua fresca de 8 días del mes de marzo con una intensidad de radiación solar promedio de 896 W/m^2 , considerando ambos escenarios A y B, respectivamente.

Tabla 18: Producción de agua fresca; Mar 09,10,11,12, 26, 29, 30, 31, 2021

Corrida experimental	Producción de agua fresca (g/día)			
A) Con superficie extendida	1631	1515	1414	1337
B) Sin superficie extendida	1172	1383	949	949

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis estadístico aplicaremos el procedimiento de Barreno et al. (2010), sabiendo que el diseño experimental corresponde al tipo de diseño completamente aleatorio con modelo de efectos fijos.

Unidad experimental: Destilador solar

Factor: Superficie extendida

Tratamiento: A) con superficie extendida

B) sin superficie extendida

El procedimiento de la prueba de hipótesis para las medias de los tratamientos es el siguiente:

Modelo estadístico: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij}$ $i = 1,2$ $j = 1, \dots, 4$ $a = 2$ $n = 4$ $N = 8$

Donde: Y_{ij} : Producción de agua fresca en g/día registrado usando el i-ésimo tipo de corrida, en el j-ésimo dato experimental.

a) Formulación de la hipótesis

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \text{Al menos un } \mu_i \neq \mu_j \text{ donde } i \neq j$$

b) Nivel de significación: $\alpha = 0,05$

c) Cálculo de la estadística de prueba: $F_o = \frac{CMTrat}{CME}$

$$\text{Suma de cuadrados entre tratamientos: } SCTrat = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i*}^2}{n} - \frac{y_{**}^2}{N} = 260\ 642$$

$$\text{Suma de cuadrados del total: } SCT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{**}^2}{N} = 439\ 513,5$$

$$\text{Suma de cuadrados del error: } SCE = SCT - SCTrat = 439\ 513,5 - 260\ 642 = 178\ 871,5$$

Obteniendo los cuadrados medios:

$$\text{Cuadrado medio entre tratamientos: } CMTrat = \frac{SCTrat}{a-1} = \frac{260\ 642}{2-1} = 260\ 642$$

$$\text{Cuadrado medio del error: } CME = \frac{SCE}{a(n-1)} = \frac{178\ 871,5}{2(4-1)} = 29\ 811,92$$

$$\text{Por lo tanto: } F_o = \frac{CMTrat}{CME} = \frac{260\ 642}{29\ 811,92} = 8,74$$

d) Obteniendo el valor crítico:

$$\text{De acuerdo a Montgomery (2010), } F_c = F_{(\alpha, a-1, N-a)} = F_{(0,05, 1, 6)} = 5,99$$

e) Conclusión:

Como $F_o > F_c$ es decir $8,74 > 5,99$, se rechaza la hipótesis nula; se puede afirmar entonces que hay diferencia en la productividad debido al uso de la superficie extendida, con un nivel de confianza del 95 %.

f) Cálculo del P-value:

Haciendo uso del software Minitab

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TRAT	1	260642	260642	8,74	0,025
Error	6	178872	29812		
Total	7	439514			

Por lo tanto: $P(F > 8,74) = 0,025$

g) Conclusión:

Como $P < 0,05$ es decir $0,025 < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula; se puede afirmar entonces que hay diferencia en la productividad debido al uso de la superficie extendida, con un nivel de confianza del 95 %.

4.5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA

De acuerdo con el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (DS N°031-2010-SA), se considera que el agua con TDS menor que 1000 mg/L es satisfactoria. Los TDS del agua de mar recolectado era de 23 300 mg/L; mientras que el valor promedio del TDS del agua condensada del caso a) con superficie extendida es de 42 mg/L, y del caso b) sin superficie extendida es de 134 mg/L, respectivamente.

Así mismo, de acuerdo al Reglamento de Calidad mencionado, se considera que el agua con una conductividad eléctrica menor que 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es satisfactoria. La conductividad del agua de mar recolectado era de 46 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$; mientras que el valor promedio de la conductividad del agua condensada del caso a) con superficie extendida es de 85 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y del caso b) sin superficie extendida es de 268 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente.

Además, de acuerdo al Reglamento mencionado, se considera que un valor de pH aceptable varía entre 6,5 a 8,5. El agua de mar recolectado alcanzó valores de pH de 6,74 a 7,10; mientras que los valores de pH del agua condensada del caso a) con superficie extendida ha variado de 6,11 a 7,13, y del caso b) sin superficie extendida ha variado de 6,93 a 7,40, respectivamente.

Finalmente, el “agua fresca” cumple con algunos parámetros de calidad del “agua potable” y ciertamente siendo estrictos faltaría analizar más parámetros de calidad para concluir con esta última denominación.

4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Debido a que nuestro sistema en estudio no requiere de bomba y otros dispositivos que consumen electricidad; por lo tanto, se espera que tenga un costo de capital más bajo en comparación con otros sistemas similares. En la tabla 19 se muestra un resumen del análisis económico de nuestro sistema de desalinización, el cual se realizó según el procedimiento de Behnam y Shafii (2016). El costo de capital del estudio es de US\$ 325, y se ha supuesto una vida útil del sistema para $n = 10$ años y una tasa de interés anual de $i = 12\%$, respectivamente. Además, se ha considerado una productividad de 3 L/día de agua fresca.

Tabla 19 : Resumen del análisis económico del sistema desalinizador

Parámetro	Unidad	Valor
Costo de capital (P)	US\$	325
Valor de rescate ($S=0,2 \times P$)	US\$	65
Vida útil (n)	año	10
Tasa de interés anual (i)	%	12
Factor de recuperación de capital (CRF)		0,177
Factor de fondo de amortización (SFF)		0,056
Costo anual del primer año ($FAC = P \times CRF$)	US\$	57,525
Valor de rescate anual ($ASV = SFF \times S$)	US\$	3,64
Costo de mantenimiento anual ($AMC = 0,15 \times FAC$)	US\$	8,629
Costo anual ($AC = FAC + AMC - ASV$)	US\$	62,514
Productividad anual ($M = \text{productividad diario promedio} \times 365$)	L	1095
Costo por litro de agua fresca producido ($CPL = AC/M$)	US\$/L	0,057

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 19 el costo del agua fresca producido (CPL) del presente trabajo es de 0,057 US\$/L para una productividad de 7,32 kg/m²/día, considerando el caso a) desalinizador que opera con superficie extendida. Por otro lado, otros estudios anteriores, tales como Behnam y Shafii (2016) lograron un CPL de 0,028 US\$/L para una productividad de 6,275 kg/m²/día utilizando un sistema de desalinización solar HDH equipado con una combinación de tubos de calor (HP), colector de tubos de vacío (ETC) y un humidificador de columna de burbujas de aire; Elminshawy *et al.* (2015) obtuvieron un CPL de 0,035 US\$/L para una productividad de 30,3 kg/m²/día utilizando un sistema de desalinización

HDH con calentadores de agua y un reflector; Mamouri et al. (2014) alcanzaron un CPL de 0,0092 US\$/L para una productividad de 6,35 kg/m²/día utilizando un destilador tipo

recipiente de vidrio de base simple modificado con colectores solares de tubos de vacío (ETCs) y tubos de calor (HP); Ahmed et al. (2009) lograron un CPL de 0,0067 US\$/L para una producción de agua fresca de 3,78 m³/día y con una productividad de 9 kg/m²/día; utilizando un sistema de desalinización solar de múltiples etapas en vacío acoplado a un colector solar.

V. CONCLUSIONES

1. Se diseñó y construyó un destilador solar de 4 etapas acoplado a un colector solar de tubos de calor concentrado de $2,86 \text{ m}^2$ de área de colección, y un poder de concentración de $C_{2D} = 5$.
2. Se ha determinado experimentalmente una productividad de $7,32 \text{ kg/m}^2/\text{día}$ y una eficiencia térmica del $14,7 \%$ para el destilador solar operando con a) superficie extendida; y una productividad de $4,42 \text{ kg/m}^2/\text{día}$ y una eficiencia térmica del $6,6 \%$ para el destilador operando b) sin superficie extendida.
3. Se puede afirmar que es estadísticamente significativo la diferencia en la productividad, entre el destilador con superficie extendida comparado con el destilador sin superficie extendida, con un nivel de confianza del 95% .
4. Los parámetros de calidad del agua fresca obtenido por destilación solar a partir de agua de mar, tales como sólidos totales disueltos (TDS), conductividad eléctrica y pH, cumple con algunos parámetros del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (DS N°031-2010-SA).
5. Se ha estimado que el costo del agua fresca producido (CPL) del presente trabajo es de $0,057 \text{ US\$/L}$ para una productividad de $7,32 \text{ kg/m}^2/\text{día}$, considerando el caso a) desalinizador que opera con superficie extendida.

VI. RECOMENDACIONES

1. Mantener la construcción del destilador con planchas de acero inoxidable AISI 316L de 1,5 mm de espesor ya que soportaron la corrosión del agua de mar.
2. Re-diseñar la superficie extendida de cobre para reducir la altura de agua en la primera etapa del destilador.
3. Re-diseñar el destilador de 4 etapas para incluir en la primera etapa una válvula de descarga del agua de mar concentrada.
4. Re-diseñar la inclinación de los tubos de descarga de condensado del destilador.
5. Utilizar sensores de acero inoxidable para la medición de las temperaturas.
6. Realizar experimentos con el desalinizador en otros lugares fuera de Lima para estudiar el efecto del clima sobre la productividad.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abed, F. M., Eleiwi, M. A., Hasanuzzaman, M., Islam, M. M., & Mohammed, K. I. 2020. Design, development and effects of operational conditions on the performance of concentrated solar collector based desalination system operating in Iraq. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100886.

Abdallah, S., Badran, O., & Abu-Khader, M. M. (2008). Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still. *Desalination*, 219(1-3), 222–230.

Abdessemed, A., Bougriou, C., Guerraiche, D., & Abachi, R. (2019). Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria. *Renewable Energy*, 132, 1134–1140.

Adhikari, R. S., & Kumar, A. 1993. Transient simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still. *Desalination*, 91(1), 1–20.

Adhikari, R. S., Kumar, A., & Sootha, G. D. 1995. Simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still. *Solar Energy*, 54(5), 317–325.

Ahmed, M. I., Hrairi, M., & Ismail, A. F. 2009. On the characteristics of multistage evacuated solar distillation. *Renewable Energy*, 34(6), 1471–1478.

Ali, M. T., Fath, H. E. S., & Armstrong, P. R. (2011). A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4187–4199.

Arunkumar, T., Vinothkumar, K., Ahsan, A., Jayaprakash, R. y Kumar, S. 2012. Experimental Study on Various Solar Still Designs. *ISRN Renewable Energy*, 2012, 1–10.

Arunkumar, T., Raj, K., Dsilva Winfred Rufuss, D., Denkenberger, D., Tingting, G., Xuan, L. y Velraj, R. 2019. A review of efficient high productivity solar stills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 101, pp. 197–220.

Ayoub, J. y Alward, R. 1996. Water requirements and remote arid areas: the need for small-scale desalination. *Desalination*, 107(2), 131–147.

Badran, O. O. y Al-Tahaine, H. A. 2005. The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity. *Desalination*, 183(1–3), 137–142.

Bait, O., & Si-Ameur, M. 2016. Numerical investigation of a multi-stage solar still under Batna climatic conditions: Effect of radiation term on mass and heat energy balances. *Energy*, 98, 308–323.

Behnam, P., & Shafii, M. B. 2016. Examination of a solar desalination system equipped with an air bubble column humidifier, evacuated tube collectors and thermosyphon heat pipes. *Desalination*, 397, 30–37.

Buros, O.K. 1991. *The World of Desalting*, Paper presented at the Second Brace Research Institute Conference, McGill University, Montreal.

Buros, O.K. 2000. *The ABCs of Desalting* (2nd ed.). Massachusetts, USA: IDA.

Chamsa-Ard, W., Sukchai, S., Sonsaree, S., & Sirisamphanwong, C. 2014. Thermal Performance Testing of Heat Pipe Evacuated Tube with Compound Parabolic Concentrating Solar Collector by ISO 9806 - 1. *Energy Procedia*, 56(C), 237–246.

Chen, Z., Peng, J., Chen, G., Hou, L., Yu, T., Yao, Y., & Zheng, H. 2017. Analysis of heat and mass transferring mechanism of multi-stage stacked-tray solar seawater desalination still and experimental research on its performance. *Solar Energy*, 142, 278–287.

Chong, T. L., Huang, B. J., Wu, P. H., & Kao, Y. C. 2014. Multiple-effect diffusion solar still coupled with a vacuum-tube collector and heat pipe. *Desalination*, 347, 66–76.

Dimri, V., Sarkar, B., Singh, U., & Tiwari, G. N. (2008). Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation. *Desalination*, 227(1–3), 178–189.

Dwivedi, V. K. y Tiwari, G. N. 2009. Comparison of internal heat transfer coefficients in passive solar stills by different thermal models: An experimental validation. *Desalination*, 246(1–3), 304–318.

Elminshawy, N. A. S., Siddiqui, F. R., & Addas, M. F. 2015. Experimental and analytical study on productivity augmentation of a novel solar humidification-dehumidification (HDH) system. *Desalination*, 365, 36–45.

Fath, H. E. S., El-Samanoudy, M., Fahmy, K., & Hassabou, A. 2003. Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. *Desalination*, 159(1), 69–79.

Feilizadeh, M., Karimi Estahbanati, M. R., Ardekani, A. S., Zakeri, S. M. E., & Jafarpur, K. 2015. Effects of amount and mode of input energy on the performance of a multi-stage solar still: An experimental study. *Desalination*, 375, 108–115.

Feilizadeh, M., Karimi Estahbanati, M. R., Jafarpur, K., Roostaazad, R., Feilizadeh, M., & Taghvaei, H. 2015. Year-round outdoor experiments on a multi-stage active solar still with different numbers of solar collectors. *Applied Energy*, 152, 39–46.

Felinski, P., Sekret, R., 2016. Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as PCM. *Energy* 114, 1063–1072.

Feliński, P., & Sekret, R. 2017. Effect of a low cost parabolic reflector on the charging efficiency of an evacuated tube collector/storage system with a PCM. *Solar Energy*, 144, 758–766.

Gorjian, S., Ebadi, H., Calise, F., Shukla, A., & Ingraio, C. 2020. A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 222, 113246.

Intiaz Hussain, M., Ménézo, C., & Kim, J. T. 2018. Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 187, 123–139.

Jafari Mosleh, H., Jahangiri Mamouri, S., Shafii, M. B. y Hakim Sima, A. 2015. A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 99, 141–150.

Jahangiri Mamouri, S., Gholami Derami, H., Ghiasi, M., Shafii, M. B., & Shiee, Z. (2014). Experimental investigation of the effect of using thermosyphon heat pipes and vacuum glass on the performance of solar still. *Energy*, 75, 501–507.

Jiang C, Yu L, Yang S, Li K, Wang J, Lund PD, Zhang Y. A review of the compound parabolic concentrator (CPC) with a tubular absorber. *Energies*, 2020 - mdpi.com.

Jubran, B. A., Ahmed, M. I., Ismail, A. F., & Abakar, Y. A. 2000. Numerical modelling of a multi-stage solar still. *Energy Conversion and Management*, 41(11), 1107–1121.

Kalogirou, S. 2008. Recent Patents in Solar Energy Collectors and Applications. *Recent Patents on Engineering*, 1(1), 23–33.

Kargar Sharif Abad, H., Ghiasi, M., Jahangiri Mamouri, S., & Shafii, M. B. (2013). A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe. *Desalination*, 311, 206–210.

Lim, B. J., Lee, G. R., Choi, S. M., Chung, K. Y., & Park, C. D. 2020. Model optimization and economic analysis of a multi-effect diffusion solar distiller. *Desalination*, 485, 114446.

Liu, Z. H., Guan, H. Y., & Wang, G. S. 2014. Performance optimization study on an integrated solar desalination system with multi-stage evaporation/heat recovery processes. *Energy*, 76, 1001–1010.

Liu, Z. hua, Hu, R. L., & Chen, X. juan. 2014. A novel integrated solar desalination system with multi-stage evaporation/heat recovery processes. *Renewable Energy*, 64, 26–33.

Manikandan, V., Shanmugasundaram, K., Shanmugan, S., Janarthanan, B., & Chandrasekaran, J. 2013. Wick type solar stills: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 322–335.

Mekhilef, S., Saidur, R. y Safari, A. 2011. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1777–1790.

MINAGRI. 2018. Clima de la costa, sierra y selva de Perú. Ministerio de Agricultura 1(2):15

Nkwetta, D. N., & Smyth, M. 2012. Performance analysis and comparison of concentrated evacuated tube heat pipe solar collectors. *Applied Energy*, 98, 22–32.

Omar, A., Nashed, A., Li, Q., & Taylor, R. A. 2021. Experimental and numerical evaluation of the energy requirement of multi-stage vacuum membrane distillation designs. *Separation and Purification Technology*, 257, 117303.

Quiblawey, H. M. y Banat, F. 2008. Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, 220(1–3), 633–644.

Rajaseenivasan, T., Murugavel, K. K., Elango, T. y Hansen, R. S. 2013. A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 248–259.

Reddy, K. S., Kumar, K. R., O'Donovan, T. S., & Mallick, T. K. 2012. Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system. *Desalination*, 288, 80–92.

Saettone, E. 2014. Utilización de tubos de borosilicato al vacío para aplicaciones tecnológicas con energía termosolar. Informe final de investigación presentado al Instituto de Investigación Científica (IDIC) de la Universidad de Lima.

Salgado-Tránsito, I., Jiménez-González, A. E., Ramón-García, M. L., Pineda-Arellano, C. A., & Estrada-Gasca, C. A. 2015. Design of a novel CPC collector for the photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio. *Solar Energy*, 115, 537–551.

Shafieian, A., Khiadani, M. y Nosrati, A. 2018. A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95(July), 273–304.

Shafieian, A., Khiadani, M., & Nosrati, A. (2019). Strategies to improve the thermal performance of heat pipe solar collectors in solar systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 183, 307–331.

Shatat, M. I. M. y Mahkamov, K. 2010. Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modelling. *Renewable Energy*, 35(1), 52–61.

Singh, R. V., Kumar, S., Hasan, M. M., Khan, M. E., & Tiwari, G. N. 2013. Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode. *Desalination*, 318, 25–33.

Singh, A. K., Yadav, R. K., Mishra, D., Prasad, R., Gupta, L. K., & Kumar, P. 2020. Active solar distillation technology: A wide overview. *Desalination*, 493, 114652.

Tapia S., S. y Del Rio P., J.A. Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. *Rev. mex. fís. E* [online]. 2009, vol.55, n.2, pp.141-153.

Vijayakumar, P; Kumaresan, G.; Anish kumar, S.; Faizal1, U.M.; Vijay Chandran, G.R. and Vishnu Adharsh, K.S. (2019). Performance evaluation of compound parabolic concentrator with evacuated tube heat pipe. Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology, Coimbatore, Tamilnadu, India.

Vijayakumar, P., Kumaresan, G., Kumar, S. G., & Eswaran, M. 2021. A review on applications of nanofluid in evacuated tube heat pipe integrated with compound parabolic concentrator. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1227–1232.

Xiong, J., Xie, G., & Zheng, H. 2013. Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface. *Energy Conversion and Management*, 73, 176–185.

Zhang, L., Xu, Z., Bhatia, B., Li, B., Zhao, L., & Wang, E. N. 2020. Modeling and performance analysis of high-efficiency thermally-localized multistage solar stills. *Applied Energy*, 266, 114864.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Proceso de fabricación de la superficie extendida

Para con construcción de la superficie extendida se utilizó tubo de cobre de un diámetro de 19 mm con pared de 1mm. El proceso de fabricación consistió en el corte del material de acuerdo a las medidas que indicaba el plano. En la mayoría de tubos se tuvo que realizar un corte en forma de boca de pescado como se muestra en la fotografía adjunto.



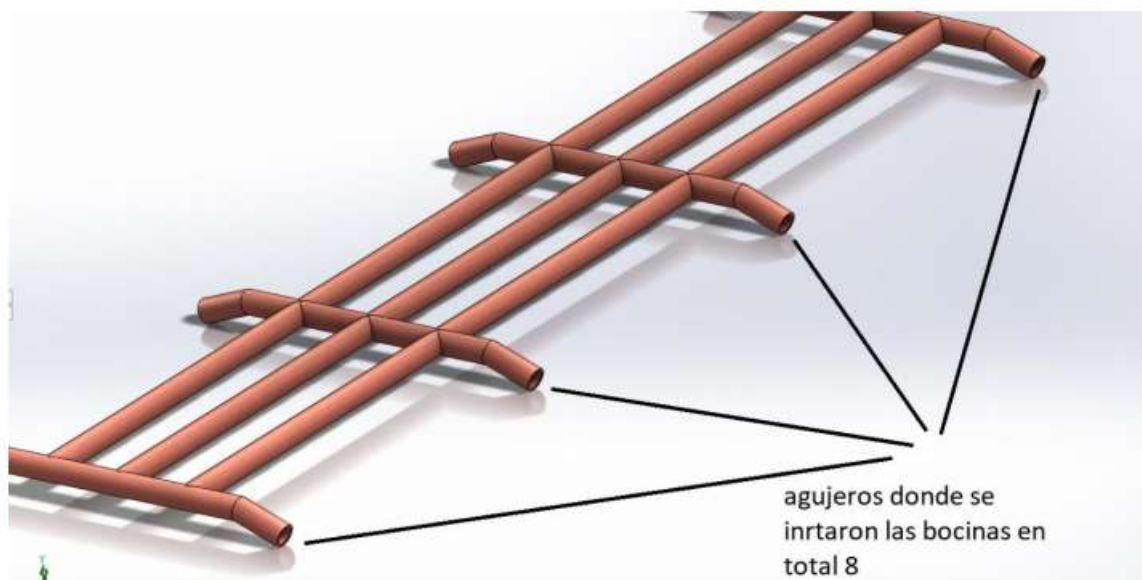
Para esto se utilizó la siguiente herramienta:



Una vez que se tuvo todos los cortes listos se procedió al soldado de estas utilizando soldadura TIG, y el material de aporte fue alambres de cobre calibre 14 AWG. De esta manera se soldó todas las partes hasta obtener la pieza final, enseguida para limpiar el cambio de color producido por la soldadura se lijaron las partes soldadas y se pulió con un paño pulidor 3 M.



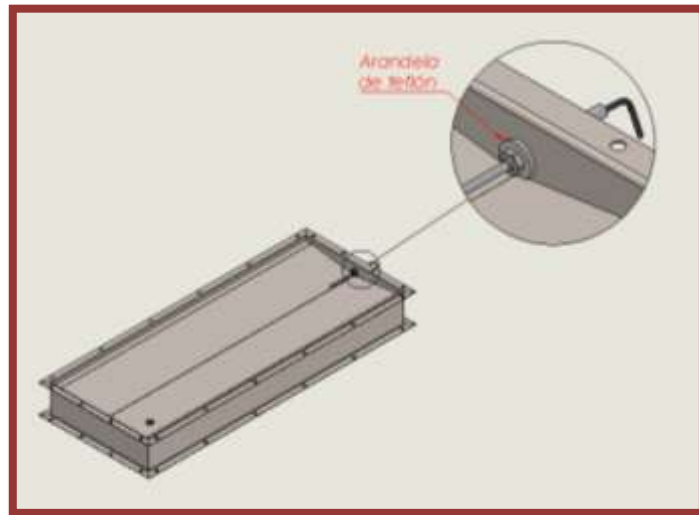
Finalmente se insertaron 8 bocinas de cobre de un diámetro interno de 14 mm en los brazos de la superficie extendida, para que se inserten en los tubos de cobre que también tenía 14 mm de diámetro.



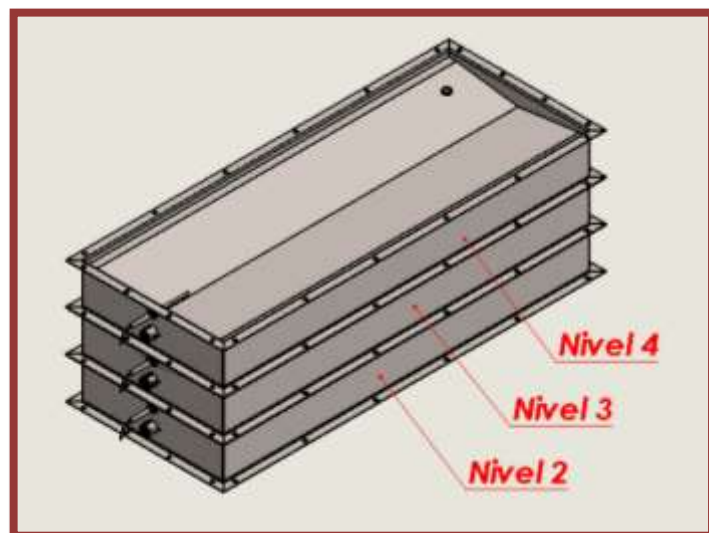
Anexo 2: Procedimiento de ensamblado del destilador

PASOS PARA EL ENSAMBLAJE DE LOS TANQUES

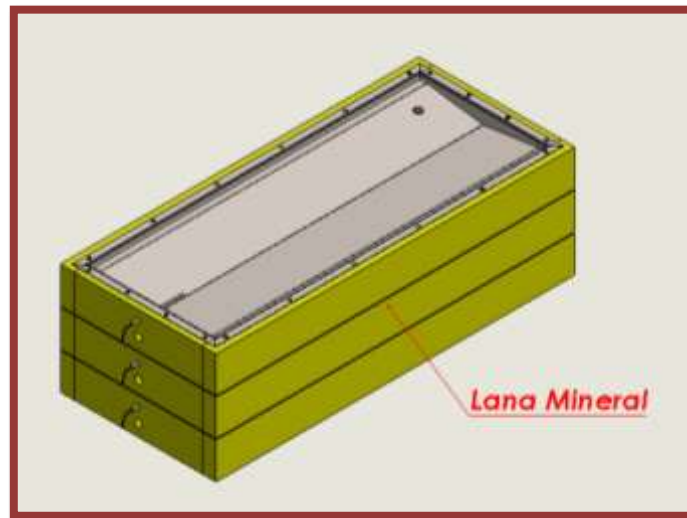
1) Colocar los sensores de temperatura en cada uno de los agujeros roscados de los tanques internos. Los sensores deberán de colocarse con una arandela de teflón para asegurar su hermeticidad y evitar haya fuga de agua.



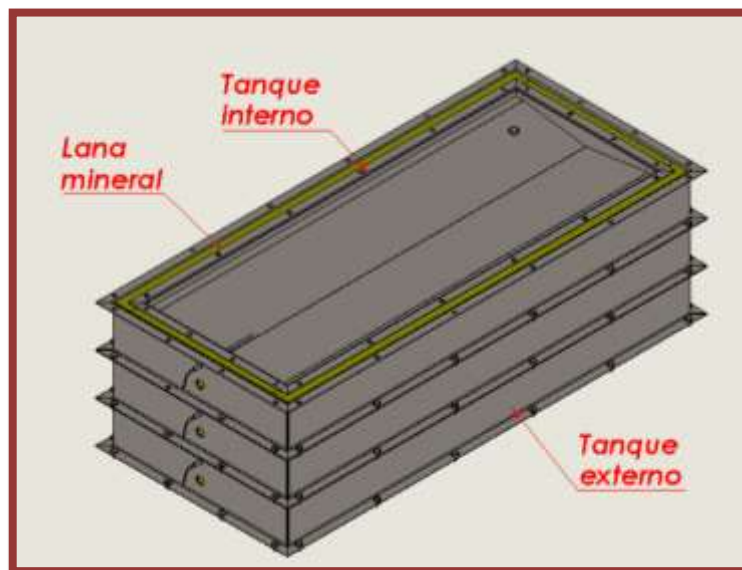
2) Luego de colocar los sensores en cada etapa, ensamblar los tanques internos uno sobre otro empleando pernos hexagonales. Se debe asegurar que todos los sensores se encuentren en un mismo lado y que los tubos de rebose estén en posiciones alternadas.



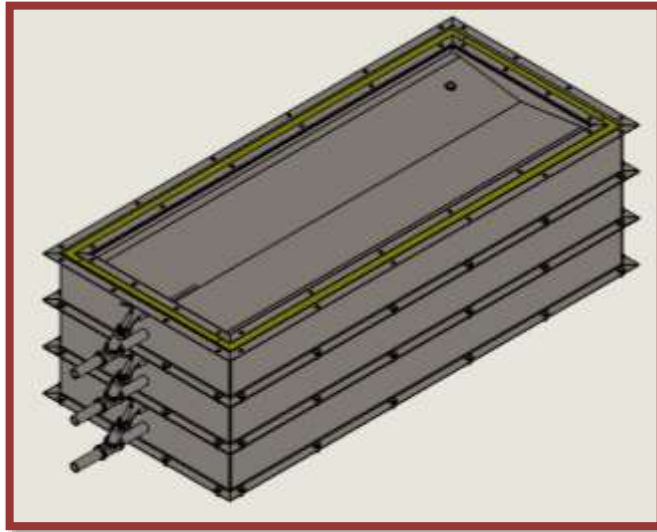
3) Colocar material aislante (lana mineral) en las paredes externas de los tanques internos. La lana mineral estará adherida a las paredes de los tanques por presión.



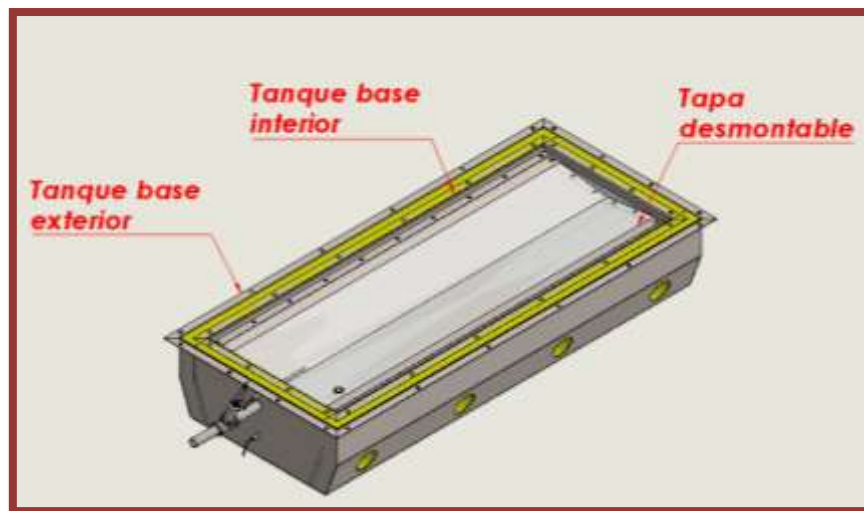
4) Ubicar los tanques externos uno a uno teniendo cuidado con los sensores de temperatura. Ensamblar los tanques externos uno sobre otro empleando pernos hexagonales. Se deberá tener cuidado con los sensores de temperatura.



5) Instalar la tubería para la recolección de condensado. En esta misma tubería se colocarán sensores que registrarán la temperatura del agua de condensado.

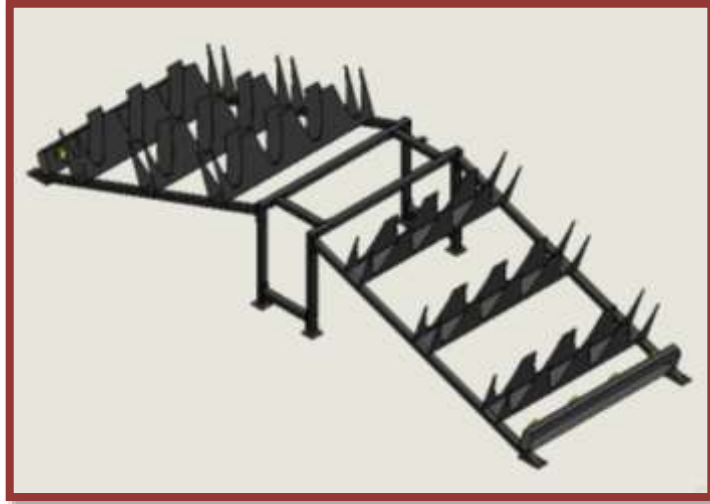


6) Para el armado del tanque de la base es similar a los tanques anteriores: se enrosca en el tanque de la base interior el sensor de temperatura, luego se coloca el material aislante entre el tanque de la base interior y exterior, después se ubicará el tanque base interno dentro del tanque base externo para finalmente instalar la tubería de recolección de condensado. En esta etapa, a diferencia de las otras tres, la tapa inclinada será desmontable para poder tener acceso al tanque y poder colocar y/o retirar la superficie extendida.



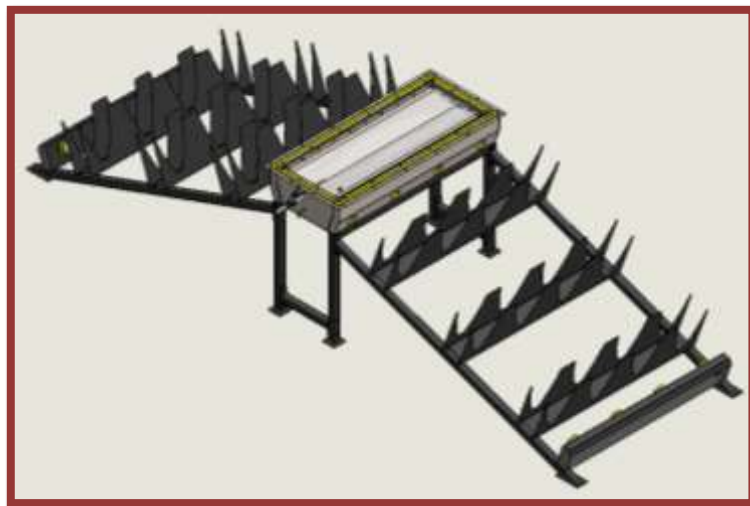
PASOS PARA EL ENSAMBLAJE DEL SOPORTE

1) Unir todas las partes de la estructura del soporte empleando pernos hexagonales M8 tal como se puede apreciar en el Dibujo 1



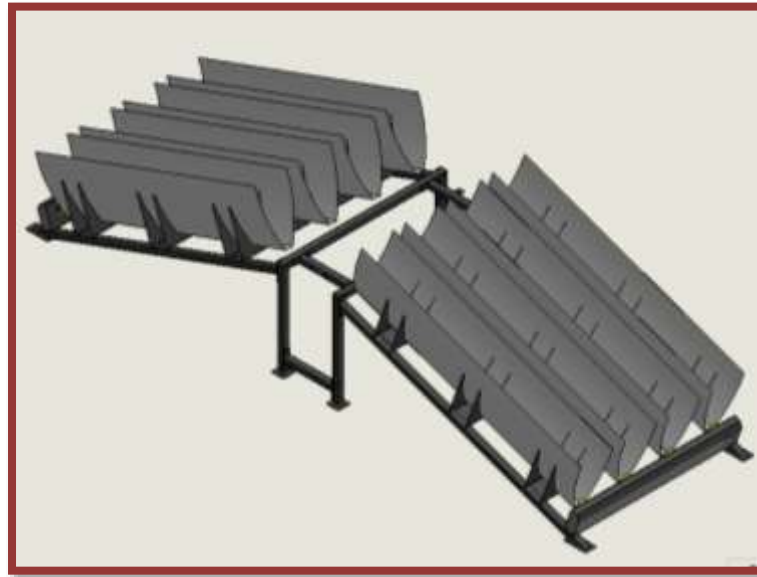
Dibujo 1

2) Luego de armado el soporte, se ubicará el tanque base como se aprecia en el Dibujo 2. Este tanque base estará unido al soporte por medio de dos pernos ubicados en la parte inferior de dicho tanque.



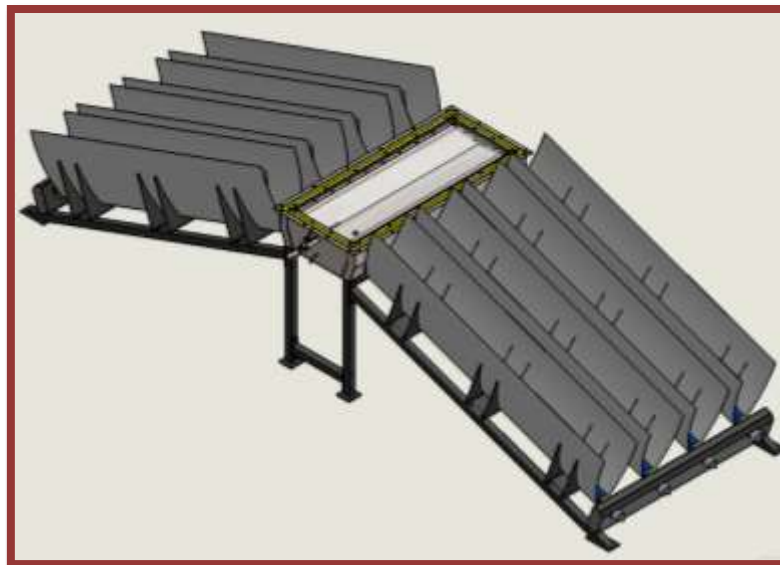
Dibujo 2

- 3) Se colocarán los reflectores parabólicos en la estructura tal como se aprecia en el Dibujo 3. Estos reflectores irán fijados por medio de cintillos.



Dibujo 3

- 4) Ubicar los ocho tubos de vacío en los orificios del tanque base. Se deberá tener en cuenta que la parte del condensador del heat pipe sobresalga en la parte interna del tanque base. Para asegurar la hermeticidad de esta parte, se le aplicara una capa de sellador a los bordes del condensador del heat pipe.



Dibujo 4

Anexo 3: Registros de temperatura

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 09/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	11:12	39,16	31,72	34,18	39,83	53,46	46,22	36,56	36,68	38,15	1050,13
2	11:27	39,16	31,85	34,10	38,85	53,43	46,25	36,56	36,75	38,19	1050,13
3	11:42	41,52	32,44	33,98	42,15	58,17	44,66	37,73	33,85	39,21	1074,76
4	11:57	43,39	32,45	34,09	39,63	62,50	49,45	39,38	37,01	41,41	1096,19
5	12:12	51,16	33,13	34,32	41,91	66,57	54,15	41,83	35,20	40,93	772,95
6	12:27	48,44	31,35	32,52	37,30	69,75	56,73	44,72	36,68	39,52	1145,73
7	12:42	48,67	33,45	34,35	38,39	72,72	59,48	47,38	38,74	41,04	1247,34
8	12:57	48,32	33,94	35,13	41,56	76,53	62,64	49,99	40,91	40,86	757,38
9	13:12	51,61	35,31	35,76	41,96	79,94	65,77	52,82	42,85	40,91	1240,13
10	13:27	55,20	36,97	36,81	41,68	83,60	68,94	55,96	45,01	40,95	1211,86
11	13:42	52,89	36,54	38,79	38,10	86,71	72,16	59,13	47,12	41,45	1086,53
12	13:57	51,29	35,69	40,21	41,21	88,91	73,13	61,14	49,12	40,60	1047,09
13	14:12	51,84	37,31	39,45	40,20	90,55	73,45	61,94	50,27	40,36	1050,78
14	14:28	50,01	36,66	40,45	39,14	90,70	74,67	62,15	51,23	40,26	1021,92
15	14:43	51,48	37,05	40,89	41,35	89,65	71,95	61,85	51,52	39,56	981,50
16	14:58	49,08	36,20	40,66	39,93	88,51	71,88	60,66	50,80	38,26	788,68
17	15:13	45,67	34,62	39,37	38,06	87,25	72,01	59,55	49,99	37,07	789,71
18	15:28	46,06	34,74	38,79	37,92	86,06	69,70	58,32	48,87	36,63	740,99
19	15:43	42,66	33,21	37,45	37,87	84,82	68,66	56,90	47,83	35,70	680,39
20	15:58	42,70	33,20	36,48	37,84	83,84	66,55	56,13	46,76	35,37	551,22
21	16:13	42,01	33,20	37,66	38,88	82,94	66,49	55,66	46,27	34,98	533,64
22	16:28	42,21	34,19	36,97	39,00	81,82	65,29	54,50	45,31	34,22	453,40
23	16:43	39,46	32,43	35,44	36,35	80,80	65,03	53,57	44,66	33,81	284,99
24	16:58	35,83	29,13	32,96	35,07	79,62	61,31	51,98	43,42	32,16	293,24
25	17:13	35,08	28,39	32,68	35,19	78,71	60,42	50,68	42,26	31,10	255,53
26	17:28	36,17	28,89	31,75	33,15	77,88	60,56	49,96	41,19	31,38	249,02
27	17:43	35,03	28,14	30,49	35,06	77,05	59,69	49,00	40,10	30,49	163,85
28	17:58	35,23	27,72	29,64	33,34	76,08	59,48	48,42	39,60	30,08	107,42

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 10/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	10:32	35,81	28,19	30,78	38,55	44,28	37,92	32,45	30,06	34,29	801,49
2	10:47	35,84	28,52	30,82	41,13	44,31	37,93	32,49	30,09	34,31	801,70
3	11:02	35,63	28,95	30,38	39,26	45,32	35,91	31,39	28,89	36,94	859,75
4	11:17	36,82	29,63	31,34	38,50	45,25	37,12	32,36	29,76	39,13	901,31
5	11:32	39,50	31,24	33,42	41,56	45,59	38,57	33,42	30,74	40,36	929,90
6	11:47	40,59	32,09	34,43	41,12	46,68	40,12	34,43	31,77	40,97	932,67
7	12:02	42,64	33,08	35,71	41,96	48,34	41,93	35,62	32,80	41,28	972,33
8	12:17	42,04	33,71	35,37	40,56	50,97	44,24	36,98	33,80	42,12	977,16
9	12:32	43,22	33,73	34,96	42,13	54,42	47,05	38,57	34,84	41,71	981,07
10	12:47	45,59	34,59	35,84	41,20	58,39	50,16	40,48	35,95	41,84	985,57
11	13:02	43,56	33,38	34,31	40,58	62,72	53,11	42,72	37,14	41,82	1065,16
12	13:17	48,12	36,41	36,05	41,99	67,14	56,71	45,11	38,43	40,00	1067,06
13	13:32	48,26	35,18	35,24	39,57	71,49	59,98	47,64	40,02	40,76	1001,09
14	13:47	52,07	37,28	36,31	42,72	75,82	63,87	50,36	41,70	40,43	1082,74
15	14:02	52,26	37,53	35,84	42,65	79,94	66,81	52,92	43,29	39,82	1062,55
16	14:17	50,15	37,17	35,59	40,28	83,61	70,12	55,77	45,17	39,93	967,94
17	14:32	50,33	36,91	35,10	40,38	86,36	71,41	57,45	46,60	38,13	938,04
18	14:47	49,84	37,68	35,26	39,37	88,16	73,38	58,68	47,74	37,15	910,37
19	15:02	48,97	37,77	36,11	39,36	89,16	72,44	58,71	48,00	37,33	1025,28
20	15:17	49,23	38,51	37,03	40,07	89,79	72,93	58,67	48,13	37,80	1020,94
21	15:32	46,99	37,28	36,21	38,96	89,87	71,47	58,48	47,90	36,94	736,65
22	15:47	44,91	37,16	36,58	38,34	89,13	69,31	57,02	47,48	36,24	996,80
23	16:02	43,34	35,76	36,11	38,69	88,02	70,47	55,77	46,69	35,26	906,74
24	16:17	48,14	37,55	37,11	40,89	86,92	68,50	55,38	45,73	36,39	853,73
25	16:32	45,80	37,89	37,61	40,94	85,88	68,30	54,54	45,95	35,98	793,02
26	16:48	44,20	37,42	37,17	40,39	84,66	67,09	53,40	45,24	35,66	703,78
27	17:03	43,95	37,41	37,01	40,60	83,48	65,80	52,46	44,63	34,94	643,45
28	17:18	41,02	35,75	35,35	38,70	82,19	65,13	51,09	43,50	33,64	554,20
29	17:33	39,94	34,71	35,02	38,34	80,93	64,24	50,06	42,51	32,70	486,38
30	17:48	37,12	31,85	32,77	37,65	79,69	62,82	49,00	41,57	31,58	385,36

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 11/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	10:02	36,47	29,56	32,15	40,42	42,27	38,44	34,01	33,97	37,67	900,61
2	10:17	36,47	29,69	32,15	40,31	42,27	38,51	34,01	34,03	37,67	900,77
3	10:33	37,96	31,11	33,39	41,64	43,63	36,91	34,52	32,20	38,76	933,97
4	10:48	37,02	29,99	32,34	38,90	44,00	38,50	35,23	33,00	41,82	975,10
5	11:03	38,59	31,12	33,70	39,26	45,22	40,34	36,79	34,43	41,67	1031,96
6	11:18	39,62	32,45	33,77	38,65	47,38	42,82	36,79	34,45	41,67	1031,96
7	11:33	40,82	32,34	33,51	38,70	51,44	45,53	37,98	35,13	42,17	1054,20
8	11:48	40,23	31,73	33,04	37,96	56,22	48,83	39,47	35,89	42,43	1069,50
9	12:03	42,32	32,00	32,96	37,63	61,68	52,84	42,19	36,78	42,66	1077,20
10	12:18	44,86	32,40	33,26	37,66	67,43	57,00	44,75	38,15	42,69	1083,71
11	12:33	46,09	32,47	32,39	37,12	73,18	61,36	47,71	39,73	42,69	1096,08
12	12:48	50,68	33,33	32,77	37,65	78,46	65,70	51,04	41,70	43,12	1090,01
13	13:03	54,76	34,96	33,70	38,60	83,22	69,76	54,77	43,94	42,93	1115,02
14	13:18	55,96	35,67	33,07	37,65	87,60	73,47	58,13	46,51	42,64	1111,22
15	13:33	52,39	37,55	35,67	37,29	91,47	78,30	61,13	48,63	42,99	1098,90
16	13:48	52,24	37,71	36,32	36,71	94,66	79,22	62,31	51,07	42,49	1087,51
17	14:03	50,06	38,02	36,73	36,51	96,30	77,43	62,50	51,45	42,27	1070,20
18	14:18	47,90	37,89	36,57	36,63	95,91	75,93	61,39	51,36	39,74	1041,50
19	14:33	46,67	38,13	37,06	37,35	95,15	75,95	60,30	50,43	38,78	1008,36
20	14:48	47,18	37,07	36,68	38,22	94,15	74,62	60,13	49,38	38,32	917,97
21	15:03	43,49	36,29	37,77	37,16	92,71	73,73	58,61	49,44	38,52	916,99
22	15:18	43,37	35,26	36,43	38,77	91,31	71,93	57,48	48,55	38,56	860,35
23	15:33	42,04	35,67	34,96	37,41	89,88	72,95	55,96	47,61	37,00	800,24
24	15:48	43,11	36,02	35,79	37,58	88,61	71,04	54,92	46,76	36,74	727,54
25	16:03	43,61	36,29	36,81	37,79	87,39	70,65	53,96	45,76	35,96	645,45
26	16:18	42,08	35,67	35,75	36,96	85,94	70,50	52,95	45,07	34,24	566,51
27	16:33	41,96	35,63	35,39	37,23	84,51	68,98	52,03	43,87	33,64	478,57
28	16:48	36,49	30,85	32,53	35,54	83,14	67,38	51,09	43,13	33,55	396,65
29	17:03	34,65	28,63	30,92	32,25	81,79	66,20	49,86	42,14	31,16	109,05
30	17:18	33,62	27,52	30,46	30,77	80,56	65,08	48,61	40,65	29,30	68,25
31	17:33	33,54	26,79	28,50	30,40	79,37	63,47	47,74	39,57	27,93	59,24
32	17:48	33,21	26,66	28,82	30,22	78,25	62,51	46,83	38,27	27,60	48,18

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 12/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	11:02	38,30	31,11	33,59	37,47	49,75	46,04	37,99	39,31	45,49	984,70
2	11:17	38,85	31,85	33,80	37,89	53,32	49,33	38,89	40,25	47,24	1014,05
3	11:32	39,44	32,43	34,09	38,32	58,06	53,78	40,23	41,19	49,63	1049,64
4	11:47	41,18	33,71	35,39	38,53	63,66	58,19	41,81	42,10	52,15	1055,50
5	12:02	43,34	34,79	36,60	39,36	70,02	62,91	43,81	43,14	53,86	1068,03
6	12:17	43,71	34,43	36,24	39,84	76,37	67,81	45,83	44,52	55,66	1081,06
7	12:32	44,74	34,69	36,37	40,16	83,32	72,01	48,21	46,12	57,20	995,01
8	12:47	43,55	33,58	34,47	38,63	90,35	76,13	50,17	47,79	56,01	994,36
9	13:02	42,66	32,60	32,93	38,30	99,00	79,40	52,20	49,29	55,77	1088,87
10	13:17	51,33	36,29	34,95	39,33	103,23	80,63	56,31	51,00	56,68	907,39
11	13:32	55,16	37,40	34,19	39,14	103,49	82,93	64,38	54,48	56,60	845,54
12	13:47	52,45	39,38	34,78	39,83	103,46	85,53	67,43	58,84	58,09	1089,95
13	14:02	51,22	39,38	35,10	40,91	103,39	86,76	68,91	61,88	59,07	1035,54
14	14:17	49,67	37,40	35,84	39,69	103,24	85,59	68,88	63,90	60,76	999,51
15	14:32	47,61	39,75	38,10	40,78	102,55	85,60	68,65	64,47	61,70	959,04
16	14:47	46,12	41,00	38,25	40,23	100,95	86,13	67,25	64,25	60,24	902,40
17	15:02	45,16	38,97	37,92	40,65	99,47	84,79	65,99	63,19	59,31	863,01
18	15:17	44,13	37,40	37,28	39,37	98,06	84,16	64,27	62,02	58,01	815,59
19	15:32	42,27	35,80	36,06	39,64	96,75	82,57	63,77	61,21	56,01	509,06
20	15:47	39,40	33,27	33,54	37,54	95,44	81,18	63,61	59,13	52,67	589,36
21	16:02	40,73	33,94	34,64	37,65	94,31	80,63	63,05	57,80	53,84	680,94
22	16:17	41,94	34,82	35,70	38,66	93,44	79,54	62,43	57,32	53,60	491,10
23	16:32	41,54	35,43	36,15	39,58	92,68	79,21	62,09	57,09	53,19	675,46
24	16:47	39,89	33,09	34,88	37,50	91,82	79,47	61,68	55,30	47,20	175,51
25	17:02	37,74	30,22	31,22	35,02	90,83	77,58	60,71	55,24	47,22	175,29
26	17:17	37,71	29,92	33,18	34,42	89,74	76,43	59,69	53,46	45,90	195,75
27	17:32	38,23	29,92	31,74	34,69	88,70	75,46	58,39	52,20	45,25	187,07
28	17:47	36,71	28,90	30,23	33,67	87,60	73,71	57,23	51,17	43,64	122,18

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 28/03/2021

°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	8:19	20,06	29,47	29,00	26,76	35,52	32,70	29,66	31,29	24,05	302,46
2	8:34	21,88	30,49	30,28	27,97	39,84	32,96	30,03	30,41	25,74	380,10
3	8:49	23,11	31,44	30,74	29,30	41,28	33,28	30,41	31,63	26,50	437,93
4	9:04	21,11	31,85	30,73	29,71	37,26	33,68	30,76	32,36	27,80	541,34
5	9:19	24,59	31,60	31,42	30,08	39,82	34,03	31,13	33,88	28,80	608,34
6	9:34	22,94	32,80	32,20	31,87	38,00	34,51	31,58	34,55	30,21	697,21
7	9:49	24,39	33,02	32,99	32,78	39,58	35,27	32,15	35,46	30,86	746,53
8	10:04	24,57	32,72	32,24	31,50	36,91	36,20	33,43	37,34	31,38	710,50
9	10:19	26,04	33,80	33,98	32,85	37,56	37,36	33,39	37,25	31,40	710,61
10	10:34	29,09	34,93	36,41	35,22	43,64	38,85	34,16	35,91	32,51	874,62
11	10:49	31,03	36,91	37,65	36,22	45,11	40,61	35,04	37,41	33,79	884,22
12	11:04	31,08	38,18	37,35	34,41	44,94	42,64	36,05	38,72	33,88	929,90
13	11:19	33,21	40,39	39,66	36,20	51,07	45,15	37,50	40,29	36,24	951,61
14	11:34	32,48	40,61	38,85	36,05	52,71	48,47	39,13	41,97	36,26	955,30
15	11:49	30,33	40,49	38,49	37,46	57,81	51,95	41,09	43,84	34,79	924,26
16	12:04	35,50	41,47	40,09	36,75	61,21	55,12	43,11	44,31	36,41	996,15
17	12:19	32,49	40,09	38,65	36,63	64,29	58,64	44,89	45,67	35,74	888,56
18	12:34	34,88	38,94	37,54	35,38	70,24	61,44	46,80	44,79	35,96	1068,31
19	12:49	38,01	41,23	39,72	37,45	74,44	63,83	48,48	46,02	39,06	1103,30
20	13:04	39,01	42,65	41,41	39,98	81,50	64,64	50,58	48,21	40,82	1031,74
21	13:19	39,15	40,61	39,33	38,44	83,38	65,21	51,82	49,15	38,74	1004,61
22	13:34	37,62	40,49	39,24	38,90	81,06	66,29	52,85	50,45	39,82	949,16
23	13:50	37,44	38,15	38,77	37,94	86,20	69,04	53,56	53,07	42,36	885,04
24	14:05	34,92	39,26	38,37	37,92	83,39	63,08	54,35	55,41	46,48	896,92
25	14:20	32,20	38,19	38,23	37,52	83,55	62,53	54,14	56,39	47,03	884,49
26	14:35	32,39	38,39	39,04	38,43	86,21	64,24	53,76	55,63	47,33	857,91
27	14:50	33,61	40,63	40,10	38,01	86,79	70,53	53,63	53,60	47,70	835,77
28	15:05	32,44	40,68	39,77	37,47	85,63	70,99	53,75	56,39	47,55	739,20
29	15:20	32,20	40,49	39,79	37,61	83,37	71,73	53,67	54,54	46,44	674,26
30	15:35	29,56	38,21	38,34	36,55	84,51	70,41	53,34	56,52	43,95	576,82
31	15:50	30,32	38,94	38,69	35,67	83,48	70,40	52,66	53,31	42,60	505,21
32	16:05	27,78	37,53	37,84	34,78	84,64	68,75	52,13	50,93	40,65	537,81
33	16:20	27,72	36,01	36,08	34,05	79,44	67,49	51,66	52,42	38,63	452,04
34	16:35	25,03	33,94	34,29	32,90	79,52	66,87	51,29	51,52	37,59	366,10
35	16:50	23,89	32,43	33,21	31,30	78,96	66,20	50,78	49,93	34,29	115,45
36	17:05	22,54	31,37	32,37	31,37	79,55	65,26	49,88	46,25	31,18	93,21
37	17:20	21,38	30,56	31,36	29,87	75,71	63,92	49,09	48,41	29,84	83,93
38	17:35	20,83	30,50	30,40	28,78	74,58	62,88	48,10	47,61	28,71	69,50

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 29/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja a 3	Bandeja a 4	
1	10:41	25,59	34,54	32,26	29,86	48,19	37,47	25,72	26,78	32,68	726,89
2	10:56	25,80	34,45	32,69	30,13	49,78	37,50	25,77	25,94	32,68	728,14
3	11:11	24,52	33,81	33,56	31,86	46,93	36,17	30,24	33,39	30,30	358,62
4	11:26	27,00	35,80	35,54	33,43	48,54	37,25	31,84	34,75	32,14	923,94
5	11:41	26,88	36,00	35,41	33,43	47,61	38,82	33,38	36,62	32,83	653,92
6	11:56	28,19	37,12	36,59	34,18	50,80	40,47	33,64	35,33	33,53	831,00
7	12:11	28,94	37,95	36,22	34,20	48,29	42,10	34,79	38,73	33,98	787,11
8	12:26	31,15	39,61	38,26	35,60	54,35	44,08	35,78	37,36	34,74	874,67
9	12:41	31,58	40,49	37,71	35,50	55,16	46,34	37,54	40,02	35,07	784,02
10	12:56	32,68	40,49	37,68	35,19	58,96	49,45	38,60	39,40	35,63	1011,83
11	13:11	37,08	42,62	38,85	36,46	62,77	53,20	41,03	39,60	36,28	975,86
12	13:26	37,77	43,95	38,79	36,22	67,46	57,16	43,81	40,67	36,39	1061,80
13	13:41	39,41	43,59	38,98	36,86	72,01	60,73	45,86	44,70	36,83	1014,16
14	13:56	41,74	45,67	38,93	35,97	76,35	64,05	49,00	45,66	36,91	1028,16
15	14:11	40,21	47,88	38,22	35,39	79,03	67,16	52,16	46,92	36,28	1004,77
16	14:26	42,51	52,45	38,38	35,50	81,29	69,18	54,76	49,44	36,18	994,36
17	14:41	41,34	49,69	39,71	35,24	84,32	70,11	56,52	52,01	36,31	983,18
18	14:56	42,57	54,68	41,94	36,08	86,62	70,75	57,26	49,09	36,48	966,80
19	15:11	36,47	52,46	42,66	36,51	83,50	70,05	53,13	51,72	35,11	930,72
20	15:26	40,29	46,91	39,53	34,68	79,46	64,60	47,64	40,99	36,52	891,00
21	15:41	35,50	44,94	39,62	35,07	77,92	64,86	49,44	42,85	37,00	851,35
22	15:56	38,85	45,78	40,77	35,81	77,92	64,50	50,65	43,87	36,35	806,64
23	16:11	33,70	43,79	39,77	34,83	77,84	64,06	52,20	48,18	35,94	762,70
24	16:26	34,72	46,17	39,42	35,56	74,76	63,47	51,40	46,40	34,66	689,67
25	16:41	33,69	43,82	39,46	34,56	74,52	62,91	51,46	46,33	33,36	616,10
26	16:56	31,72	48,33	40,55	35,19	71,51	62,14	52,17	48,58	31,81	516,93
27	17:11	31,26	44,44	37,68	33,29	69,55	61,27	51,36	47,76	31,10	339,68
28	17:26	29,10	40,73	37,89	32,79	69,36	60,50	50,35	45,44	30,38	298,45
29	17:41	27,16	38,64	35,71	31,10	68,67	59,53	49,81	43,74	28,75	240,78
30	17:56	25,30	42,73	34,54	30,47	66,28	58,67	49,28	46,33	28,75	218,10

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 30/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	10:38	26,92	34,19	32,47	30,25	49,28	34,17	26,63	17,98	18,08	472,11
2	10:53	26,23	34,19	32,55	30,50	48,00	34,14	27,07	18,91	18,51	470,70
3	11:08	24,43	33,81	32,29	31,17	44,72	34,65	30,11	25,82	25,63	482,20
4	11:23	23,34	33,89	31,20	30,23	43,27	35,71	30,92	28,59	25,52	384,77
5	11:38	26,15	33,78	33,04	31,27	46,35	36,21	30,92	27,92	26,15	886,34
6	11:53	26,93	36,00	34,91	33,18	44,92	37,51	31,99	30,38	27,58	780,22
7	12:08	28,23	36,89	34,59	32,96	46,10	38,92	32,22	31,55	28,93	521,10
8	12:23	26,67	35,97	33,77	32,17	47,79	40,60	32,70	31,50	27,93	386,83
9	12:38	26,20	37,26	34,86	33,06	49,32	42,22	33,97	32,41	27,26	1069,17
10	12:53	28,84	39,01	35,60	34,38	50,64	43,92	35,13	34,23	29,86	930,72
11	13:08	29,61	38,23	35,70	33,70	55,05	46,40	36,11	36,36	30,30	370,66
12	13:23	28,70	39,75	35,82	33,60	54,96	48,54	37,85	36,46	28,39	642,14
13	13:38	30,92	40,61	37,62	34,81	60,23	49,96	39,06	36,41	30,23	1137,48
14	13:53	31,94	42,70	38,86	36,51	60,57	51,75	41,09	39,60	31,84	967,39
15	14:08	33,58	42,83	38,77	36,59	65,55	53,76	42,40	35,37	32,83	825,52
16	14:23	32,55	42,89	38,09	35,66	67,83	55,58	44,00	36,39	31,64	894,91
17	14:38	34,52	43,54	37,68	35,51	69,23	57,19	45,53	39,42	31,40	554,58
18	14:53	32,39	44,44	37,65	35,21	69,12	58,03	46,67	42,46	31,40	996,96
19	15:08	34,51	44,99	38,28	35,68	71,20	58,68	47,70	40,90	30,88	996,96
20	15:23	30,24	44,01	36,91	33,81	71,30	57,02	47,90	42,13	30,27	747,45
21	15:38	30,83	45,67	37,72	34,34	72,27	56,31	47,96	40,05	29,95	792,97
22	15:53	29,64	42,63	37,65	34,47	70,35	56,90	47,71	42,26	30,21	985,24
23	16:08	31,92	43,89	38,34	35,68	69,99	56,24	48,18	43,88	31,49	869,47
24	16:23	28,54	43,25	36,59	34,15	68,44	55,50	48,34	41,48	29,45	611,55
25	16:38	26,33	42,72	34,20	31,55	70,33	55,50	47,42	39,44	26,69	184,57
26	16:53	28,27	42,63	33,17	32,93	66,46	54,85	47,24	40,10	24,76	537,80
27	17:08	23,52	36,90	32,31	29,42	68,34	54,37	46,05	37,77	23,59	127,39
28	17:23	24,03	36,41	33,05	30,27	65,60	53,54	45,95	41,38	23,44	109,21
29	17:38	23,59	35,05	32,53	29,06	67,02	53,24	44,99	37,80	23,18	102,59
30	17:53	21,93	33,82	31,33	28,75	63,82	52,89	45,02	39,00	23,13	97,11

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 31/03/2021

N°	Tiempo	Temperatura de condensado (°C)				Temperatura de agua en bandejas (°C)					Radiación solar (W/m ²)
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Bandeja Base	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4	
1	8:27	24,35	33,82	32,94	30,88	46,19	38,05	32,62	-7,42	21,59	399,96
2	8:42	25,16	34,56	33,78	32,30	46,72	38,06	32,94	-7,42	22,94	448,57
3	8:57	25,90	34,93	34,02	32,66	46,82	38,70	33,30	-7,88	23,89	520,94
4	9:12	26,38	34,65	34,16	33,16	46,86	39,18	33,80	-7,67	25,82	597,76
5	9:27	27,80	35,51	35,29	34,65	47,03	39,16	34,94	-7,34	29,67	755,86
6	9:42	28,43	36,18	35,50	35,26	47,11	40,39	34,90	-7,26	29,69	757,81
7	9:57	29,66	36,01	36,55	35,88	47,93	41,04	35,46	-7,96	30,86	782,71
8	10:12	31,58	37,26	37,87	37,19	48,08	43,14	36,21	-7,22	33,03	804,90
9	10:27	30,40	37,08	37,57	36,35	49,39	44,10	36,92	-8,03	33,05	866,48
10	10:42	31,59	38,60	38,80	37,16	50,67	46,37	37,95	-7,16	34,33	807,94
11	10:57	31,96	39,85	39,30	37,11	52,47	48,94	38,86	-7,20	35,39	933,16
12	11:12	33,15	41,23	39,93	37,47	56,03	52,73	39,93	-7,36	36,09	755,59
13	11:27	30,31	40,49	37,58	36,04	58,92	56,39	41,19	-7,16	35,09	753,69
14	11:42	29,49	39,05	36,84	34,74	62,30	59,03	42,58	-7,05	34,51	890,68
15	11:58	30,74	40,49	37,57	35,28	66,36	62,25	43,71	-7,71	35,55	953,88
16	12:13	30,86	41,60	36,92	35,35	70,21	65,78	44,60	-6,87	36,20	1013,46
17	12:28	31,77	40,40	37,85	35,60	73,10	69,33	46,18	-7,55	36,94	938,21
18	12:43	34,66	42,64	39,40	37,12	74,10	72,64	47,97	-6,77	39,28	1012,21
19	12:58	34,80	43,24	39,79	37,61	76,74	75,56	49,59	-6,66	40,06	994,57
20	13:13	34,91	44,56	39,96	38,38	77,26	78,39	51,30	-6,90	40,73	979,06
21	13:28	36,94	47,28	40,66	38,52	77,95	80,74	53,02	-6,19	41,58	977,11
22	13:43	34,05	41,56	38,80	37,39	78,87	80,99	54,21	-6,29	41,17	948,24
23	13:58	34,11	42,68	39,67	38,22	78,89	81,84	55,35	-6,39	40,93	905,54
24	14:13	33,07	42,70	38,69	36,90	77,81	81,55	56,18	-6,37	39,28	795,74
25	14:28	32,68	42,69	39,82	37,79	77,77	80,99	56,73	-6,79	38,76	887,91
26	14:43	33,46	43,83	40,34	37,81	77,73	79,57	56,80	-6,64	39,13	771,92
27	14:58	32,93	42,61	39,85	37,24	76,73	78,70	57,10	-6,44	38,65	712,62
28	15:13	33,44	43,82	40,13	37,30	76,54	78,67	57,39	-6,73	37,98	774,90
29	15:28	32,15	42,69	39,47	36,90	76,51	76,94	56,73	-6,97	36,59	583,55
30	15:43	30,92	44,42	39,47	36,43	75,82	76,79	56,73	-6,83	36,48	583,50
31	15:58	29,38	41,47	38,05	35,00	75,80	74,77	56,13	-7,28	32,60	483,67
32	16:13	27,83	41,58	38,12	35,16	75,07	74,26	55,66	-6,92	31,36	468,26
33	16:28	26,13	38,25	35,30	33,06	75,12	72,74	54,73	-7,12	30,49	263,78
34	16:43	25,45	37,08	35,10	31,85	74,78	71,21	53,70	-7,57	28,56	131,89
35	16:58	24,98	36,41	34,91	30,82	73,70	69,73	52,60	-7,00	27,47	116,16
36	17:13	24,46	37,12	35,76	30,51	74,15	68,79	51,46	-7,20	26,37	81,11
37	17:28	24,20	36,91	34,58	30,19	75,82	67,52	50,49	-6,71	91,43	69,82
38	17:43	24,83	35,58	35,18	30,44	74,23	66,41	49,38	-7,02	49,98	106,77

Anexo 4: Registros de condensado, TDS, conductividad, salinidad y pH

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 09/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	45	170	271	579	853	1122	1263
	Nivel 2	0	0	0	0	11	23	51	75	78
	Nivel 3	0	0	0	3	19	48	102	136	197
	Nivel 4	0	0	0	3	11	18	37	59	93

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23,3 ppt	2820 ppm
Conductividad eléctrica	46,6 mS/cm	3230 µS/cm
Salinidad (%)	2,85	0,28
pH	6,74	6,93

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 10/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	71	203	472	783	1105	1221	1257
	Nivel 2	0	0	0	0	7	28	75	75	76
	Nivel 3	0	0	0	6	12	34	90	98	117
	Nivel 4	0	0	0	6	9	17	29	41	65

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23.6 ppt	3560 ppm
Conductividad eléctrica	47.1 mS/cm	7110 µS/cm
Salinidad (%)	2,85	0,34
pH	7,1	6,78

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 11/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	12	119	371	680	1002	1091	1122
	Nivel 2	0	0	0	0	9	24	76	76	76
	Nivel 3	0	0	0	4	17	43	107	126	139
	Nivel 4	0	0	0	4	9	17	34	58	77

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23.3 ppt	3630 ppm
Conductividad eléctrica	46.6 mS/cm	7260 μ S/cm
Salinidad (%)	2,85	0,4
pH	6,74	6,2

Agua de mar con superficie extendida

Fecha: 12/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	48	196	326	800	935	1033	1102
	Nivel 2	0	0	0	4	53	61	61	61	64
	Nivel 3	0	0	0	4	0	51	75	89	109
	Nivel 4	0	0	0	0	0	6	14	38	62

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23.3 ppt	1370 ppm
Conductividad eléctrica	46.6 mS/cm	2770 μ S/cm
Salinidad (%)	2,85	0,14
pH	6,74	6,65

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 28/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	5	40	125	367	507	661	761	873
	Nivel 2	0	5	18	20	49	62	69	87	95
	Nivel 3	0	0	4	5	17	30	63	84	114
	Nivel 4	0	0	3	3	3	12	28	55	90

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23 ppt	187 ppm
Conductividad eléctrica	46.1 mS/cm	379 μ S/cm
Salinidad (%)	2,77	0,02
pH	6,39	6,67

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 29/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	0	139	449	724	997	1096	1192
	Nivel 2	0	0	0	0	27	74	129	156	193
	Nivel 3	0	0	0	2	10	45	92	103	122
	Nivel 4	0	0	0	0	0	0	0	21	40

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23 ppt	162 ppm
Conductividad eléctrica	46.1 mS/cm	321 μ S/cm
Salinidad (%)	2,77	0,02
pH	6,39	7,02

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 30/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	21	125	222	399	480	570	665
	Nivel 2	0	0	7	20	30	60	93	107	119
	Nivel 3	0	0	5	19	19	38	54	91	110
	Nivel 4	0	0	0	5	5	5	5	37	55

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23 ppt	139 ppm
Conductividad eléctrica	46.1 mS/cm	279 μ S/cm
Salinidad (%)	2,77	0,01
pH	6,39	7,04

Agua de mar sin superficie extendida

Fecha: 31/03/2021

		Tiempo								
		08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
Peso de condensado (g)	Nivel 1	0	0	21	125	222	399	480	570	665
	Nivel 2	0	0	7	20	30	60	93	107	119
	Nivel 3	0	0	5	19	19	38	54	91	110
	Nivel 4	0	0	0	5	5	5	5	37	55

	AGUA DE MAR	AGUA CONDENSADA
Sólidos totales disueltos	23 ppt	48 ppm
Conductividad eléctrica	46.1 mS/cm	95 μ S/cm
Salinidad (%)	2,77	0,01
pH	6,39	7,4