



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

---

**UNIVERSIDAD DE SONORA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESTUDIO TEÓRICO DE LOS FENÓMENOS DE  
TRANSPORTE EN UN DESTILADOR SOLAR CON  
MATERIAL DE CAMBIO DE FASE**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**I.Q. CARLOS ALBERTO ÁLVAREZ VELASCO**

**DIRECTOR: DR. JESÚS FERNANDO HINOJOSA PALAFOX**

**CO DIRECTOR: DR. ARMANDO PIÑA ORTIZ**

**Hermosillo, Sonora**

**Junio, 2022**

# Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## APROBACION DEL JURADO

de la tesis presentada por:

**Carlos Alberto Álvarez Velasco**

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

5/agosto/2022

Fecha



Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Fecha



Dr. Manuel Pérez Tello.  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Fecha



Dr. Armando Piña Ortiz  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Fecha



Dr. Germán Eduardo Dévora Isiordia  
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

---

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

## AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

5 de Septiembre de 2022.

Por medio de la presente se hace constar que el estudiante **CARLOS ALBERTO ALVAREZ VELASCO**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

*Abraham Rogelio Martín García*  
DR. ABRAHAM ROGELIO MARTÍN GARCÍA

COORDINADOR DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA

## RESUMEN

El consumo de agua dulce para distintas actividades ha cobrado mayor importancia en los últimos tiempos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del planeta; la falta de zonas húmedas y vegetación orienta a los investigadores en optar por energías alternativas para la obtención de agua. En éstas, existe una discrepancia entre el consumo de agua para el mantenimiento de áreas verdes y el consumo humano, por lo que se vuelve complicado el abasto y distribución de esta.

Una opción de solución para el problema de escasez de agua es la desalación de agua de mar con el uso de dispositivos denominados destiladores solares de bandeja, los cuales sólo requieren de radiación solar para separar el agua salobre de las sales disueltas y otros compuestos presentes-

Aun cuando es una solución de bajo costo de construcción y de operación, los destiladores solares se ven limitados por su baja productividad y su dependencia intrínseca de la irradiación solar. Una de las opciones para incrementar la eficiencia de los destiladores es el uso de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés), los cuales son sustancias cuyas propiedades físicas son favorables para el almacenamiento de energía térmica durante el día y su liberación en la noche, con lo que cual se aumenta la eficiencia del sistema.

En el presente trabajo se realizó una simulación con el programa de dinámica de fluidos computacional ANSYS Fluent 18, donde para el cálculo de los términos fuente, la producción acumulada y las fracciones líquido, se escribió una función definida por el usuario (UDF, por sus siglas en inglés) en lenguaje C.

Se realizaron simulaciones con tres tipos de PCM, resultando el PCM con mayor punto de fusión ( $70^{\circ}\text{C}$ ) el que tuvo mayor producción en un día completo con  $5.05 \text{ kg/m}^2\text{h}$ , y con  $15.90\%$  de aumento con respecto al caso de no tener material de cambio de fase. A su vez, el espesor de  $0.25 \text{ cm}$  resultó con una producción de  $5.43 \text{ kg/m}^2\text{h}$  y un aumento de  $24.57\%$  con respecto al caso sin PCM.

## ABSTRACT

The freshwater consumption for many activities has taken more relevance during these times, especially in arid and semi-arid zones around the planet; the lack of humid zones and vegetation motivates investigators to opted out alternatives energies to obtain fresh water. In these zones, there is a disagreement between water consumption to maintain green spaces and human usage, therefore it becomes complicated the demand and distribution in these zones.

An option to resolve the lack of fresh water in these regions are these devices called solar stills, where they only need solar radiation to separate fresh water from those dissolved salts and any other pollutants from dirty water.

Although this is a construction and operational low-cost solution, solar stills are limited for its low productivity and dependence on solar radiation. One of the solutions we can think of to increase the efficiency of solar stills are the phase change materials (PCM), whose physical properties are optimal for energy storage and water evaporation afterward.

Simulations have been made through computational fluid dynamics with ANSYS Fluent 18, and for the estimation of source terms, accumulative production, and liquid fraction, a user defined function (UDF) was written in C language.

Three different PCM were used for simulations, considering the PCM with highest melting point ( $70^{\circ}\text{C}$ ) as the one with higher production in one complete day with  $5.05\text{ kg/m}^2\text{h}$ , and  $15.90\%$  higher than the case without PCM, approving its improvement. At the same time, the PCM's thickness of  $0.25\text{ cm}$  was better with an overall production of  $5.43\text{ kg/m}^2\text{h}$ .

---

---

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>V</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificación.</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Objetivo General.</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Objetivos Específicos.</b>	<b>4</b>
<b>CAPITULO 2 .....</b>	<b>5</b>
<b>ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Geometría y configuración de los destiladores solares.</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Productividad de un destilador solar desde un punto de vista     teórico.</b>	<b>9</b>
<b>2.3 Uso de los materiales de cambio de fase en destiladores solares.</b>	<b>11</b>

---

<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>15</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Descripción del problema.</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Modelo matemático y condiciones de frontera.</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1. Modelo matemático.</b>	<b>16</b>
<b>3.2.2. Condiciones iniciales y de frontera.</b>	<b>23</b>
<b>3.3. Propiedades termo físicas y ópticas.</b>	<b>27</b>
<b>3.4. Condiciones ambientales</b>	<b>28</b>
<b>3.5 Solución numérica.</b>	<b>29</b>
<b>3.6 Independencia de malla</b>	<b>32</b>
<b>3.7 Validación del modelo computacional</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>35</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Efecto del PCM en la producción del agua.</b>	<b>35</b>
<b>4.2. Efecto del grosor de PCM en la producción del agua.</b>	<b>38</b>
<b>4.3. Variación horaria de las temperaturas del agua</b>	<b>43</b>
<b>4.4. Productividad y comparación en tiempos del día.</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>5.1 Conclusiones</b>	<b>56</b>
<b>5.2 Recomendaciones</b>	<b>57</b>
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>58</b>

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	Diagrama del destilador solar.	16
2	Condiciones ambientales de Hermosillo. a) Radiación solar global, b) Temperatura ambiental.	31
3	Estructura de la malla. a) Malla completa, b) Acercamiento al dominio del PCM.	33
4	Validación del modelo computacional.	34
5	Producción horaria de agua para el 21 de junio para diferentes tipos de PCM.	37
6	Producción acumulada de agua en el día 21 de junio según el tipo de PCM usado.	37
7	Fracción líquido del PCM en el día 21 de junio según el tipo de PCM.	38
8	Producción horaria de agua variando el grosor del PCM para el 21 de junio.	39
9	Producción acumulada de agua en el día 21 de junio según el grosor del PCM.	40
10	Fracción líquido del PCM en el día 21 de junio según el grosor de PCM.	41
11	Producción acumulada de agua en el día 21 de diciembre según el tipo de PCM.	42
12	Historia de temperaturas variando el tipo de PCM.	44
13	Historia de temperaturas variando el grosor de PCM.	44
14	Historia de temperaturas en el día 21 de diciembre variando el grosor de PCM.	45
15	Contornos de temperatura, a) Sin PCM, b) 1 cm, c) 0.5 cm, d) 0.25 cm.	46

16	Contornos de temperatura con PCM 0.25 cm, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM, d) 9 PM.	48
17	Contornos de fracción masa de agua con PCM 0.25 cm, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM, d) 9 PM.	49
18	Vectores de velocidad con PCM 0.25 cm, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM, d) 9 PM.	51
19	Comparación entre tiempos del día para diferentes PCM con un grosor de 0.25 cm.	52
20	Contornos de temperatura con PCM de 0.25 cm el 21 de diciembre, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.	53
21	Contornos de fracción masa de agua con PCM de 0.25 cm el 21 de diciembre. a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.	54
22	Vectores de velocidad con PCM 0.25 cm el 21 de diciembre, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.	55

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
1	Dimensiones del destilador solar.	15
2	Propiedades termo físicas de los materiales.	27
3	Propiedades ópticas de los materiales.	28
4	Coefficientes de ajuste al polinomio de condiciones ambientales.	29
5	Resultados del estudio de independencia de malla.	32
6	Comparación de casos en producción acumulada según el tipo de PCM utilizado.	36
7	Comparación de casos de producción acumulada según el grosor del PCM utilizado.	40
8	Comparación de casos de producción acumulada según el tipo de PCM en invierno.	42

## NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidades
$g$	Aceleración gravitacional	$\frac{m}{s^2}$
$A$	Área transversal	$m^2$
$c_p$	Calor específico	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$a$	Coefficiente de absorción	$m^{-1}$
$D_m$	Coefficiente de difusión del vapor de agua en el aire	$\frac{m^2}{s}$
$K$	Coefficiente de transferencia de masa	$\frac{kg}{m^2 \cdot K \cdot s}$
$Y_M$	Contribución de la dilatación fluctuante en el fluido turbulento al promedio de disipación total	$\frac{W}{m^3}$
$\rho$	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
$\varepsilon$	Disipación de energía cinética turbulenta	$\frac{J}{kg}$
$k$	Energía cinética turbulenta	$\frac{J}{kg}$
$h_j$	Entalpía específica de compuesto j	$\frac{J}{kg}$
$\dot{m}$	Flujo másico	$\frac{kg}{s}$
$J_j$	Flux difusivo de compuesto j	$\frac{kg}{m^2 s}$

$Y_i$	Fracción masa de especie i	Adimensional
$G_b$	Generación de energía cinética turbulenta debido a fuerzas de flotación	$\frac{W}{m^3}$
$G_k$	Generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes de velocidad promedio	$\frac{W}{m^3}$
$S_h$	Generación o sumidero de calor dentro del volumen por calor radiactivo	$\frac{W}{m^3}$
$S_L$	Generación o sumidero de calor dentro del volumen por condensación o evaporación	$\frac{W}{m^3}$
$n$	Índice de refracción	Adimensional
$I$	Intensidad radiactiva	$\frac{W}{m^2}$
$L$	Largo	$m$
$Bo$	Número de Bond	Adimensional
$Gr$	Número de Grashof	Adimensional
$Nu$	Número de Nusselt	Adimensional
$Pr$	Número de Prandtl	Adimensional
$Ra$	Número de Rayleigh	Adimensional
$Re$	Número de Reynolds	Adimensional
$Sc_t$	Número de Schmidt turbulento	Adimensional

$P_{cr}$	Presión crítica	$Pa$
$P_{sat}$	Presión de saturación	$Pa$
$w$	Tasa de humedad	Adimensional
$T_{cr}$	Temperatura crítica	$K$
$T_0$	Temperatura inicial	$K$
$\bar{u}_i$	Velocidad instantánea turbulenta	$\frac{m}{s}$
$V$	Volumen del dominio	$m^3$

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidades</b>
$\alpha$	Coefficiente de proporción de calor latente absorbido/liberado.	Adimensional
$\beta$	Coefficiente de expansión térmica	$K^{-1}$
$\gamma$	Ángulo de inclinación	Adimensional
$\delta$	Fracción líquido	Adimensional
$\varepsilon$	Disipación de energía cinética turbulenta	$\frac{J}{kg}$
$\lambda$	Conductividad térmica	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\lambda_{eff}$	Conductividad térmica efectiva	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\mu_{eff}$	Viscosidad efectiva	$\frac{kg}{m \cdot s}$

$\mu_t$	Viscosidad turbulenta	$\frac{kg}{m \cdot s}$
$v$	Velocidad instantánea	$\frac{m}{s}$
$\rho$	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
$\sigma_s$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
$\tau_{eff}$	Esfuerzo cortante efectivo	$\frac{N}{m^2}$
$\varphi$	Humedad relativa	Adimensional

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

#### 1.1. Introducción.

El consumo de agua dulce para distintas actividades ha cobrado mayor importancia en los últimos tiempos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del planeta. La falta de zonas húmedas y vegetación orienta a los investigadores en optar por energías alternativas para la obtención de agua [1]. En estas zonas, existe una discrepancia entre el consumo de agua para el mantenimiento de áreas verdes y el consumo humano, por lo que se vuelve complicado el abasto y distribución de agua. En ciudades como Hermosillo, Sonora, la demanda de agua rebasa tres veces el uso personal recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que es de 50 a 100 litros al día y no hay fuentes abundantes de agua en la ciudad aunado al creciente desarrollo urbano en los últimos años [2].

La OMS ha establecido diecisiete objetivos de desarrollo sostenible (ODS) con el fin de alcanzar paz y equidad entre todas las naciones, donde el objetivo número seis se relaciona al uso de agua limpia y saneamiento [3]. Las metas que tiene la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con base en los ODS están relacionadas no solamente con el acceso equitativo de este recurso, sino también se busca una calidad de agua adecuada para los países en desarrollo. En un punto dentro de estos ODS, se establece que los países desarrollados apoyen con el progreso de tecnologías para el uso eficiente de recursos hídricos y el saneamiento de éstos [4].

Es de suma importancia que el abasto de agua limpia sea suficiente para todos ya que existen enfermedades ocasionadas por el uso de agua no apta para consumo como el cólera, diarrea, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis [3].

Con base en lo declarado en los ODS, referente al número seis, la energía solar es una alternativa para obtener agua dulce sin necesidad de recurrir a energías generadas por recursos fósiles o la electricidad. En México, según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés), se tienen regiones cuya posición geográfica son favorables para el uso de este recurso donde se recibe, en promedio, 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día. Cabe destacar que la zona noroeste del país es la zona con mayor radiación solar donde se calcula 8 kWh/m<sup>2</sup>/día durante la primavera y el verano.

A pesar del potencial que tiene el país por su ubicación geográfica, el recurso no se aprovecha apropiadamente. Según la IRENA, en el 2014 se compararon distintos países con respecto a su espacio territorial, la radiación solar y la generación de energía solar. Se observó que países como Alemania que es aproximadamente 6 veces más pequeño en comparación con México se aprovechan de manera provechosa los recursos de la energía solar a pesar de tener una radiación solar 5 veces menor que la de nuestro país, y China con un vasto territorio y menor radiación solar que México aprovechan la generación de energía de manera sustancial. Esto nos muestra que hace falta desarrollar políticas y alternativas para el manejo de recursos energéticos alternativos en el país [1].

Una opción de solución para el problema de escasez de agua dulce en estas regiones son los dispositivos denominados destiladores solares, los cuales sólo requieren de radiación solar para que separen el agua dulce de las sales disueltas

y otros contaminantes del agua salobre. En un estudio realizado por Saravanan y Murugan [5], se hicieron pruebas de muestras agua destilada producida por un destilador solar piramidal y el agua salada, llegando a tener 20 ppm de sólidos disueltos, un pH de 7.5 y conductividad eléctrica de 0.009 (unidades), los cuales son valores aceptables según los estándares de calidad de agua de la OMS [6].

Aunque es una solución de bajo costo de construcción y de operación, los destiladores solares se ven limitados por su baja productividad y su dependencia intrínseca de la irradiación solar. Se siguen investigando alternativas para mejorar la productividad de éstos, en especial para que no operen de manera intermitente y sin necesidad de la irradiación solar [7].

Una de estas opciones para incrementar la eficiencia de los destiladores es el uso de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) cuyas propiedades físicas son favorables para el almacenamiento de energía térmica y la posterior evaporación del agua. Entre las ventajas de estos materiales tenemos que pueden almacenar una cantidad considerable de energía sin necesidad de un cambio de temperatura significativo, conductividad térmica alta que apoya a la carga y descarga de energía, además de ser de bajo costo y abundantes en la naturaleza. Cabe mencionar que el uso de PCM aumentó la productividad hasta un 83.5% [8]-[9].

## **1.2. Justificación.**

Se han hecho estudios experimentales acerca de la eficiencia y la producción de agua durante ciertos periodos del día y estaciones del año, y a su vez se han hecho estudios numéricos por dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para destiladores solares; sin embargo, no se han hecho investigaciones

teóricas sobre cómo los PCM intervienen en la producción de agua dulce y los fenómenos que ocurren en éstos.

### **1.3. Objetivo General.**

Realizar un estudio teórico mediante dinámica de fluidos computacional de los procesos de transferencia de calor y masa involucrados en la operación de un destilador solar agregando un material de cambio de fase.

### **1.4. Objetivos Específicos.**

- Analizar el efecto en la producción de agua destilada de la incorporación de un material de cambio de fase.
- Realizar un estudio numérico mediante un software comercial de dinámica de fluidos computacional de la transferencia de calor y de masa en un destilador solar.
- Emplear un estudio paramétrico para la optimización de un destilador solar aplicando un material de cambio de fase.

## CAPITULO II

### ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

#### 2.1 Geometría y configuración de los destiladores solares

Maloeb *et al.* [10] realizaron un estudio experimental donde se probaron distintas geometrías en la cubierta de cristal en la parte superior del destilador: inclinada simple, triangular y semicircular con un tambor rotatorio, además de un experimento con la cubierta triangular, pero sin el tambor. Los resultados indican que se obtiene una mayor productividad con un destilador inclinado simple (single sloped) en agosto y septiembre, aunque en otros meses del año el destilador curvo dio mejor productividad (de mayo a julio). También se aprecia una productividad creciente con el incremento de la temperatura del agua. Por otra parte, se establece que no hay un efecto significativo en la obtención de agua por la diferencia de temperaturas entre la película y la cubierta. Al final se concluye que no existe una cubierta que ofrezca una productividad óptima, y que ésta depende de la hora del día y el mes del año.

Elbar y Hassan [11] propusieron para mejorar la productividad de un destilador solar híbrido, conectar un panel solar en la parte trasera del equipo para calentar el agua antes que ingrese a la bandeja y, a su vez, enfriar el panel solar; para mejorar la productividad, optaron por usar un material poroso (fibra de lana de acero) que incrementa la transferencia de calor por convección y radiación para la evaporación del agua salada. Se pusieron diez litros de agua en una bandeja, cambiando su proporción de agua pre-calentada con agua sin calentar en un 40, 50 y 60%; también se hicieron pruebas usando la fibra de lana de acero y con un destilador sin

ninguna modificación. Los autores lograron incrementar la proporción de agua caliente existe una mejoría en la eficiencia de energía de un 38.07% en la prueba con 60% de agua pre-calentada a comparación de un destilador simple, la diferencia de temperatura entre el agua salada y el vidrio, y la producción de agua destilada en el día incluyendo la fibra de lana de acero aumenta en un 51.4% a comparación del destilador convencional sin ninguna modificación. Se concluye que el destilador solar con panel solar, proporción de 60% de agua pre-calentada con fibra de lana de acero es la mejor opción por productividad, eficiencia de energía y costo.

Saravanaan y Murugan [5] evaluaron la eficiencia de un destilador solar piramidal de base cuadrada con varios materiales hechos de cuerda combustible como poliéster, felpa, yute y lana; se utilizan este tipo de materiales para proliferar la evaporación. También se hizo un experimento para ver a qué profundidad se tiene una mayor producción de agua destilada antes de irse por los materiales antes mencionados, de 2, 3, 4, 5 y 6 cm. Los investigadores obtuvieron un resultado favorable en la producción de agua con un nivel de 2 cm, donde se acumularon 4.35 kg/m<sup>2</sup> a comparación de 3.8, 3.5, 3.3 y 3.1 kg/m<sup>2</sup> por día con 3, 4, 5 y 6 cm de profundidad, respectivamente. A partir de aquí, se añadió el material colgando en la parte superior del destilador con una profundidad de 2 cm, y se logró una productividad de 5.8 kg/m<sup>2</sup> por día usando lana que resultó ser superior por un 9.4, 20.9, 33.1 y 40.3% a comparación del yute, felpa y poliéster, respectivamente. En eficiencia, la prueba con lana dio un 37.4%, esto debido a la capilaridad del material que favorece a la evaporación del agua; a comparación del destilador convencional a 2 cm de agua de profundidad, se tiene un 35.5% de eficiencia superior con el destilador con lana.

Abderachid y Abdenacer [12] estudiaron el efecto de la orientación en el rendimiento de un destilador solar simétrico (de dos paredes inclinadas) y del destilador asimétrico de doble efecto. En esta investigación se dedica a hacer una

comparación entre los dos dispositivos, enfocándose en la radiación solar y la orientación como variables a considerar, además de la inclinación del vidrio con respecto al suelo y profundidades del agua. Las orientaciones usadas fueron sur-norte y este-oeste, donde el destilador asimétrico voltea en cara al sur; las inclinaciones usadas son 10, 20 y 30°. El modelo matemático está en régimen cuasi-estacionario, se considera que no se escapa vapor, los coeficientes de transferencia de calor no son constantes y dependen de la temperatura, el nivel del agua se mantiene constante, la absorción radiactiva del agua es despreciable y las paredes se cubren con aislante. Se obtuvo que la radiación solar recibida tiene un pico máximo estable, es decir, a la misma hora; la radiación solar a esta hora llega a ser mayor conforme disminuimos el ángulo de inclinación, mientras que en la orientación este-oeste el pico máximo varía con respecto a la hora. El factor que más influye en estos resultados es la radiación solar y la distancia entre el agua y el primer vidrio o efecto.

El-Sebaili [13] consideró el efecto que tienen los destiladores solares activos y pasivos cuando se cambia la velocidad del viento mediante una solución numérica. Según el autor, la productividad diaria aumenta conforme incrementamos la velocidad del viento, y es independiente de la forma del destilador y de la capacidad calorífica de los materiales, sin embargo, depende del tiempo y estación del año. Se hicieron pruebas tanto con destiladores pasivos de uno y dos vidrios inclinados con diferentes efectos y con dos destiladores activos verticales y de un vidrio inclinado. Los mecanismos de transporte de calor son mayormente por convección, radiación y evaporación, donde los coeficientes de transferencia de calor del viento se calculan mediante correlaciones especificadas en el artículo, las correlaciones de Dunkle y mediante la teoría de Spalding para el destilador vertical. Se concluye que, en destiladores activos, la productividad en destiladores activos y pasivos de multi-efecto se ve en aumento conforme incrementa la velocidad del viento hasta llegar a una velocidad donde no existe cambios significativos en la productividad.

En el caso de los destiladores pasivos, la productividad depende también de la cantidad de masa de agua líquida que esté en la cuenca, siendo así que tenemos una “masa crítica” de 4.5 kg donde al disminuir la velocidad del viento, también disminuye la productividad. Al final se encuentra que la velocidad típica (la cual es cuando no existe cambios de la productividad) solamente depende de la estación del año, siendo que el verano tiene un valor de 10 m/s y en el invierno 8 m/s.

Kabeel y Abdelgaied [14] optaron por mejorar un destilador solar piramidal utilizando una placa de grafito en la parte inferior de la bandeja de agua y usar agua fría en la superficie exterior del cristal para mejorar la condensación de vapor de agua. El estudio experimental se llevó a cabo con un destilador solar piramidal convencional y uno modificado durante un verano en horas donde se tiene irradiación solar (de 8:00 a.m. a 9:00 p.m. en la Universidad de Tanta, Egipto) y se midieron las temperaturas del agua en la bandeja, agua condensada, vidrio y grafito, además de intensidad de radiación solar, velocidad del viento y cantidad de agua destilada. Los resultados arrojan que se obtiene 9.29 litros/m<sup>2</sup> al día de agua limpia en el destilador modificado frente a 4.43 litros/m<sup>2</sup> al día del destilador convencional. El efecto que provoca el agua fría es que la diferencia entre la temperatura del vidrio y el agua sin destilar en el dispositivo modificado es mayor que el convencional, además que, si el vidrio se mantiene frío, apoya para que se condense el vapor de manera veloz.

Feilzadeh *et al.* [15] optaron por hacer un modelo donde se considera la radiación y cómo actúa en todas las partes de un destilador solar, esto como un término en un balance macroscópico en todas las partes del dispositivo. En este estudio se buscó optimizar un destilador solar simple a partir de la producción de agua, cambiando el largo, ancho y altura. Los resultados de esta investigación fueron que el modelo predice adecuadamente cómo afecta la geometría a la cantidad de radiación solar que recibe el agua y todas las partes del dispositivo, además que al aumentar la altura tenemos, en general, una menor producción de agua (esto

porque las paredes laterales hacen que el contacto del sol con el agua sea menor) y la altura óptima sería de 0.10 m, mientras que un incremento en el ancho hace que el destilador tenga una producción mayor y para el ancho se tiene un máximo en una razón de 0.4 entre el ancho y el largo del destilador.

## **2.2 Productividad de un destilador solar desde un punto de vista teórico**

En estos trabajos mencionados a continuación se hace un análisis teórico y numérico mediante modelos matemáticos aplicados mediante la dinámica de fluidos computacional donde se muestran los cambios de temperatura y de concentración de agua en la fase vapor.

Rahbar y Esfahani [16] estimaron la productividad de un destilador mediante dinámica de fluidos computacional, justificando que este método es relativamente menos costoso en dinero y tiempo. Se diseña un dispositivo en régimen estacionario, cuya fase vapor es un fluido newtoniano en régimen laminar, propiedades físicas constantes y se comporta como un gas ideal; la temperatura del cristal y de la superficie agua líquida-vapor se consideran constantes. Las paredes laterales del destilador son impermeables y adiabáticas, con una condición de no deslizamiento; se toma en cuenta la convección natural dentro del destilador, y las condiciones son apropiadas para aplicar la aproximación de Boussinesq. Para resolver las ecuaciones gobernantes se usa el algoritmo SIMPLEC (semi-implicit method for pressure linked equations corrected) con un método de discretización de primer orden. Se comprueba que con el uso de CFD se llega a una aproximación aceptable con otros modelos empíricos (como la relación Chilton-Colburn); también mediante este enfoque se analiza cómo varía la productividad si cambiamos la geometría del sistema, donde se ve que si dejamos el ancho del destilador constante y disminuimos la altura la productividad se incrementa. Si la altura del

destilador se deja fija, podemos tener un ancho óptimo donde se obtiene la productividad máxima (que en este estudio es de 0.56 m). Se concluye que el uso de CFD para predecir la productividad de un destilador solar es conveniente para ver cómo usar la energía de manera adecuada y optimizar el diseño de éstos.

Khare *et al.* [17] realizaron un estudio paramétrico de manera teórica en tres dimensiones mediante el uso de CFD y experimental para observar la productividad del destilador, además estudiaron los coeficientes de transferencia de calor y de masa dentro del dispositivo. Se formuló un modelo matemático cuyas ecuaciones gobernantes son de momentum, energía y de masa en estado transitorio, además de utilizar el modelo  $k-\epsilon$  para la turbulencia. Las ecuaciones se resolvieron numéricamente con ayuda del software ANSYS Fluent. Los resultados dan que, al incrementar la temperatura, la fracción volumen del vapor aumenta significativamente, con lo que conlleva que la fracción vapor de aire disminuya. También se observa que a las 14:00 hay un máximo en la productividad del destilador y que esto se obtiene tanto experimental como en la simulación, y que los datos de ambos siguen el mismo patrón. En el estudio paramétrico se toman como parámetros la profundidad del agua líquida y el material que se usa para la fabricación del destilador, donde se concluye que a menor profundidad se tiene mayor productividad en general, y que el mejor material que ayuda a aprovechar la irradiación solar es el caucho.

Setoodeh *et al.* [18] modeló y determinó los coeficientes de calor dentro de un destilador solar simple mediante el uso de CFD. Para esta investigación, se optó por usar un modelo multifase llamado “volumen del fluido” (VOF, en sus siglas en inglés) acopladas con ecuaciones de continuidad, momentum y de masa en régimen laminar. Dentro de las ecuaciones gobernantes, se agregaron términos de generación de transferencia de masa global en las ecuaciones de continuidad y de masa, generación por fuerzas en la interfase para la ecuación de momentum y

generación de energía en la interfase para la ecuación de energía. Las simulaciones se llevaron a cabo en el resolovedor CFX 11 en tres dimensiones donde el objetivo fue, además de estimar coeficientes de transferencia de calor, ver el comportamiento de los fenómenos de evaporación y condensación en destiladores solares. Por la parte de la estimación de coeficientes de transferencia de calor, los investigadores lograron tener un resultado en las simulaciones con respecto al modelo de Dunkle para la producción de agua diaria, pero en el caso de la temperatura del agua si llega discrepancia. Sin embargo, el modelo usado predice bien los fenómenos que ocurren en el destilador, como las fuerzas de flotación y la temperatura de la fase gaseosa.

### **2.3 Uso de los materiales de cambio de fase en destiladores solares**

Kabeel *et al.* [19] compararon diversos PCM de origen orgánico e inorgánico y estudiaron el efecto que se obtiene dependiendo de sus características físicas en la eficiencia del destilador. En este estudio, el espesor de la capa de PCM se estuvo variando y se probaron con distintos materiales, donde el A28 de origen orgánico destaca por su productividad (en un espesor de 4 cm) del 92% a comparación del destilador solar convencional y buena relación costo-beneficio, además que tiene menor impacto ambiental, al contrario del ácido palmítico que ofrece mayor productividad y menos costo, sin embargo tiene un impacto ambiental negativo; de la misma manera, se comprobó que el efecto de cambiar el espesor no afecta a la productividad del destilador.

El-Sebaai *et al.* [8] estudió el efecto térmico en un destilador solar simple con PCM (ácido esteárico) desde un enfoque macroscópico en estado transitorio. En esta investigación se encontró que al aumentar la masa de PCM, la productividad del destilador aumenta de manera significativa en un 85.3% a comparación del

destilador sin material de cambio de fase. Dentro del mismo estudio, se encuentra que, si aumentamos la cantidad de material de cambio de fase en el sistema, la productividad del dispositivo aumenta significativamente durante la noche y el día en general, pero disminuye durante el tiempo donde se expone al sol; durante la temporada de invierno, se establece que se obtiene mayor productividad a una cantidad de PCM baja.

Mousa y Naser [20] estudiaron desde un punto de vista teórico cómo cambia la temperatura del agua en un destilador solar al usar materiales de cambio de fase y qué etapas predominan cuando éste se solidifica y se derrite durante el día. En esta investigación se establecen 5 etapas durante todo el proceso: la etapa 1 donde la masa de PCM se mantiene sólida hasta llegar al punto donde se empieza a derretir, que es la etapa 2 donde se mantiene una temperatura constante. Posteriormente, cuando el PCM se derrite y se mantiene líquido por un periodo de tiempo considerable, y se dice que llega a la etapa 3. Después de este fenómeno, la temperatura del PCM disminuye hasta que llega a solidificarse nuevamente y esto es la etapa 4 y también tiene una temperatura constante, hasta que tenemos el material completamente sólido en la etapa 5. En el estudio se demuestra, mediante una solución analítica, que la cantidad de PCM afecta a la duración de la etapa 2 y 4, donde si la cantidad de éste se incrementa, mayor es la duración de dichas etapas, concluyendo que una manera de controlar la temperatura del agua en el destilador solar es mediante la masa de PCM que usamos en el sistema.

Mousa *et al.* [21] hicieron un estudio experimental para el análisis de un destilador solar con material de cambio de fase, haciendo énfasis en la temperatura del agua y la productividad del dispositivo. Los investigadores construyeron un destilador solar simple con una inclinación de 30° con respecto a la pared chica, usando tubos de cobre pintados de negro llenos de PCM sumergidos en la película acuosa. Los experimentos se realizaron durante el verano del 2018, durante un día completo y

se extrajo la temperatura del agua, el PCM, el ambiente y el vapor, además del pH y la conductividad del agua recolectada. Los resultados indican que mientras la cantidad de PCM sea mayor, la temperatura del PCM se mantiene constante durante mayor tiempo cuando éste empieza a solidificarse, y la producción de agua en general se ve afectada al momento de aumentar la cantidad de material de cambio de fase que es inversamente proporcional, sin embargo, la producción va aumentando conforme incrementamos la cantidad de PCM. Una cantidad óptima de material de cambio de fase es un tema de investigación que queda pendiente dentro de este estudio.

Patel y Kumar [22] realizaron un experimento para comparar la eficiencia de un destilador solar pasivo usando diferentes materiales de almacenamiento por calor sensible (SHSM, en sus siglas en inglés) y variando la altura de la pared frontal del dispositivo. El SHSM empleado es aceite térmico en un experimento, en otro se incrementó la pared frontal del destilador y el último es un dispositivo convencional sin ninguna modificación; además de los cambios de configuración del destilador, se fue variando la profundidad del agua en 2, 3 y 4 cm. A partir de estos experimentos, se concluyó que mientras exista una mayor diferencia entre la temperatura de división entre el agua y el SHSM, habrá un incremento significativo en la producción de agua; dentro de lo que se concluyó también que es recomendable una profundidad baja para el caso que usemos un SHSM, ya que con la referencia (es decir, el destilador solar pasivo sin modificaciones) provee una mayor productividad cuando la profundidad es más alta (es decir, 4 cm), y que una altura óptima para esta configuración es entre 50 y 70 milímetros.

El presente trabajo buscará en englobar la importancia de la producción de agua en distintas épocas del año y del día dentro de un ecosistema árido para la producción de agua, además de observar cómo se varía la temperatura del agua y como éste puede afectar otras variables dentro de la simulación. También es importante resaltar que el uso de tecnologías para el uso de CFD ayuda a reducir costos de

experimentación, llegando a estimar el proceso y ayudar con el diseño de destiladores solares donde se varíe su geometría, sus parámetros y propiedades del PCM durante un día completo.

## CAPITULO III

### MODELO MATEMÁTICO Y METODOLOGÍA

#### 3.1. Descripción del problema

Para este problema se tiene un destilador solar inclinado simple con cuatro partes a considerar: el cristal que cubre la parte superior, la mezcla aire-vapor de agua, el agua líquida y finalmente la capa de PCM. El cristal tiene un espesor de 0.004 m y en la parte superior de éste entra un flux de calor que varía en el transcurso de un día, que es la irradiación solar, y las paredes laterales e inferior se consideran aisladas. La temperatura que se tomará en todo el sistema es la ambiental, la cual se está variando según el transcurso de un día. Las dimensiones del destilador solar se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Dimensiones del destilador solar.

Superficie	Longitud
Pared lateral menor	0.08 m
Pared inferior	0.75 m
Cristal	0.87 m
Pared lateral mayor	0.49 m

Además, se cuenta con una película de agua con espesor de 0.02 m y otra de PCM acoplada con un valor de 1, 0.5 y 0.25 cm.

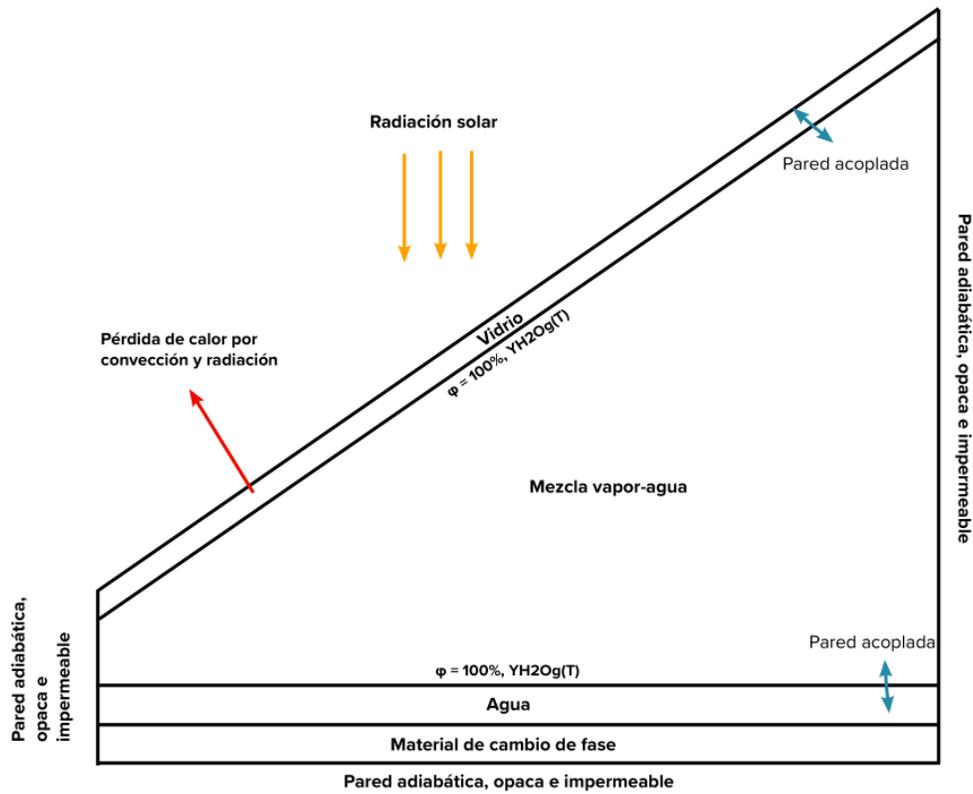


Fig 1. Diagrama del destilador solar.

### 3.2 Modelo matemático y condiciones de frontera.

#### 3.2.1. Modelo matemático.

Para la solución de este problema, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Estado transitorio.

- Las ecuaciones gobernantes están con base en las ecuaciones de Navier-Stokes con esfuerzos de Reynolds promediados (modelo RANS), por lo que se considera flujo turbulento dentro de la mezcla vapor-agua.
- Para la modelación de la turbulencia, se utilizará el modelo k-ε estándar.
- Tanto el aire como el agua y el PCM líquido se comportan como líquidos newtonianos.
- El flujo de la mezcla aire-vapor de agua se aproxima por la aproximación de Boussinesq.
- Las paredes laterales e inferior se consideran adiabáticas (no hay salidas de calor por esas paredes), impermeables, opacas y cumplen con la condición de no deslizamiento
- Las propiedades del PCM variarán entre sus puntos de fusión de 54°C, 67°C y 70°C.
- Basándose en el modelo de Keshtkar et al. [23], necesitamos dos términos dentro de la ecuación de energía que representan la generación por condensación y evaporación y la energía absorbida por radiación en todas las partes del destilador.

Con todas estas consideraciones, las ecuaciones gobernantes se expresan de la siguiente manera en su notación vectorial:

- Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Donde se considera una velocidad media debido al modelo de turbulencia que se maneja en este estudio.

- Momentum:
  - Para la mezcla aire-vapor de agua:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}_{eff}) + \rho \bar{g} \quad (2)$$

Esta mezcla fluye en un régimen turbulento, por lo que se toma en cuenta los esfuerzos cortantes efectivos ( $\bar{\tau}_{eff}$ ) resultantes del modelo k-ε. También se considera que dentro de la cavidad existe fluctuaciones en el fluido y su densidad depende de la temperatura mediante la ley de gases ideales.

- Para el agua:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \bar{g} \beta (T - T_0) \quad (3)$$

Esta región se encuentra en régimen laminar y se usa la aproximación de Boussinesq en el término de flotación del fluido.

- Energía:
  - Para la mezcla aire-vapor de agua:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{E}) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho \bar{E} + \bar{P})) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla \bar{T} - \sum_j \bar{h}_{E,j} \bar{J}_j) + S_h + S_L \quad (4)$$

- Para el agua:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_h + S_L \quad (5)$$

- Para el vidrio:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_h + S_L \quad (6)$$

Los términos  $S_h$  y  $S_L$  representan a la generación o sumidero de calor dentro del volumen de control por calor absorbido por radiación y por efectos de condensación o evaporación, respectivamente. La ecuación (3) toma en consideración los esfuerzos de Reynolds promediados y la conductividad térmica por conducción efectiva, que se obtiene mediante el modelo de turbulencia k- $\epsilon$ .

El término  $S_L$  indica la cantidad de calor latente de evaporación o condensación que se comporta como fuente o sumidero, considerando que una cantidad de energía se absorbe una parte por el agua y otra por el aire; también el uso de este término hace que se pueda descartar los modelos multifásicos incluidos en el software ANSYS Fluent. Se puede calcular en término de una constante  $\alpha$  que representa el porcentaje de calor latente que es tomado por el agua o cedido al vidrio y la tasa de masa de agua transferida por evaporación o condensación dependiendo del componente del destilador solar. A continuación, se presentan las expresiones matemáticas utilizadas:

$$S_L = \left\{ \begin{array}{l} + \frac{\alpha \dot{m}_c h_{fg,g} A_g}{V_g} \\ - \frac{\alpha \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_w} \\ \frac{+(1-\alpha) \dot{m}_c h_{fg,g} A_g - (1-\alpha) \dot{m}_e h_{fg,w} A_w}{V_a} \end{array} \right. \quad (7)$$

En la ecuación (7), se toma en consideración las entalpías de condensación y evaporación a la temperatura del vidrio y del agua como  $h_{fg,g}$  y  $h_{fg,w}$ , respectivamente. También requerimos el área superficial del vidrio y del agua ( $A_g$  y  $A_w$ ), además de sus volúmenes ( $V_g$  y  $V_w$ ); de igual manera, para el modelo de energía de la mezcla vapor-aire se necesita saber el volumen del espacio en que se encuentra esta mezcla ( $V_a$ ). El coeficiente semi-empírico de  $\alpha$  representa el porcentaje de calor latente absorbido o liberado durante el cambio de fase en cada dominio, cuyo valor es de 0.5.

La tasa de evaporación y condensación por unidad de área se calculan a partir de la primera ley de Fick, cuyo gradiente considera el cambio de concentración en la superficie interna del vidrio y la superficie superior del agua a cada paso del tiempo. En forma matemática:

$$\dot{m}_c = \frac{-\rho D_m}{L_g} \int_0^{L_g} \frac{dY}{dy} \Big|_{\text{vidrio}} dx \quad (8)$$

$$\dot{m}_e = \frac{-\rho D_m}{L_w} \int_0^{L_w} \frac{dY}{dy'} \Big|_{\text{agua}} dx' \quad (9)$$

Donde se toma a consideración la longitud del vidrio y del agua,  $D_m$  es el coeficiente de transferencia de masa molecular del vapor de agua en el aire, y las coordenadas verticales  $y$  y  $y'$  que son perpendiculares a las superficies del vidrio y del agua.

Por otra parte, el término  $S_h$  simboliza la cantidad de energía absorbida mediante radiación solar. Se resuelve, de manera simultánea a las ecuaciones de conservación, a partir de la ecuación de transferencia radiativa [24]:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (10)$$

[24]

En la ecuación (10), la intensidad radiactiva se muestra con la letra  $I$ ,  $a$  y  $n$  como el coeficiente de absorción e índice de refracción, respectivamente, y  $\sigma$  como la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67E-8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ).

- Transporte de especies químicas:

La ecuación de especies calcula la concentración de vapor de agua en todos los puntos del dominio dentro del aire húmedo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{Y}_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{Y}_i) = -\nabla \cdot (\bar{J}_i) \quad (11)$$

$$\bar{J}_i = -\left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \bar{Y}_i \quad (12)$$

El segundo término dentro del paréntesis representa la difusividad turbulenta y se calcula mediante las ecuaciones (11) y (12).

- Turbulencia:

El modelo de k-ε se usa para este caso, y constituye en estas dos ecuaciones:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (14)$$

Los resultados de k y ε se usan para calcular la viscosidad turbulenta efectiva de la ecuación (2), la conductividad térmica efectiva de la ecuación (4) y la difusividad turbulenta de la ecuación (10). Para más información sobre las constantes y los términos dentro de las ecuaciones (13) y (14) se puede consultar en la referencia [24].

### 3.2.2. Condiciones iniciales y de frontera.

Para todas las regiones del destilador se tomó en consideración la siguiente condición inicial para las variables de estudio:

$$\begin{aligned}
 & T = 302 \text{ K} \\
 t = 0 & \quad v_x = 0 \\
 & \quad v_y = 0 \\
 & \quad Y = 0
 \end{aligned}$$

Para las condiciones frontera, se toma una consideración de no deslizamiento en todas las paredes del destilador y de la interfase entre el vidrio y la mezcla, pero en el caso de la interfase agua-mezcla se toma una cantidad de esfuerzo cortante igual a cero.

Las condiciones fronteras para la temperatura y especies son adiabáticas e impermeables, como se presenta a continuación en forma matemática:

$$\begin{array}{llll}
 t > 0 & x = 0 & 0 \leq y \leq L_{sw} & \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\
 t > 0 & x = L_w & 0 \leq y \leq L_{tw} & \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\
 t > 0 & 0 \leq x \leq L_w & y = 0 & \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\
 t > 0 & x = 0 & 0 \leq y \leq L_{sw} & \frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \\
 t > 0 & x = L_w & 0 \leq y \leq L_{tw} & \frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \\
 t > 0 & 0 \leq x \leq L_w & y = 0 & \frac{\partial Y}{\partial y} = 0
 \end{array}$$

Las dos interfases permanecen acopladas, por lo que sus condiciones frontera para la temperatura son de la siguiente manera:

$t > 0$	en la interfase agua-mezcla	$T_{agua} = T_{mezcla}$
$t > 0$	en la interfase mezcla-vidrio	$T_{mezcla} = T_{vidrio}$
$t > 0$	en la interfase agua-mezcla	$\lambda_{agua} \frac{\partial T_{agua}}{\partial y} = \lambda_{mezcla} \frac{\partial T_{mezcla}}{\partial y}$
$t > 0$	en la interfase mezcla-vidrio	$\lambda_{mezcla} \frac{\partial T_{mezcla}}{\partial y'} = \lambda_{vidrio} \frac{\partial T_{vidrio}}{\partial y}$

Las condiciones frontera para las especies en las interfases se rigen mediante las siguientes ecuaciones que consideran una saturación de vapor de agua del 100% para así conocer cuánta agua se llega a condensar y evaporar según sea el caso:

$$P_{sat}(T) = P_{cr} \left( 10^{K \left( 1 - \frac{T_{cr}}{T} \right)} \right) \quad (15)$$

$$K = 4.39553 - 6.2442 \left( \frac{T}{1000} \right) + 9.953 \left( \frac{T}{1000} \right)^2 - 5.151 \left( \frac{T}{1000} \right)^3 \quad (16)$$

$$w = 0.622 \frac{\phi P_{sat}}{P - \phi P_{sat}} \quad (17)$$

$$Y = \frac{1}{1 + \frac{1}{w}} \quad (18)$$

Donde  $P_{sat}$  es la presión de saturación en función de la temperatura,  $P_{cr}$  es la presión crítica del agua (22.1 MPa),  $T_{cr}$  es la temperatura crítica del agua (647.3 K),  $K$  es el coeficiente de transferencia de masa,  $P$  es la presión total,  $\varphi$  es la humedad relativa y  $w$  la tasa de humedad.

Las correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor se basan en una suma entre los coeficientes en convección libre y forzada en el aire:

$$\overline{Nu}_{Lg} = 0.14 \left[ Ra_{Lg}^{1/3} - Ra_{cr}^{1/3} \right] + 0.56 (Ra_{cr} \cos \gamma)^{1/4} \quad (23)$$

$$Ra_{Lg} = Pr Gr_{Lg} = \frac{g \beta L_g^3 \rho^2 c_p (T_s - T_\infty)}{\mu \lambda} \quad (24)$$

$$\overline{Nu}_{Lg} = A(Pr) \sqrt{Re_{Lg}} \left[ 1 + \left( \frac{B(Pr)}{A(Pr)} Bo^{1/5} \right)^3 \right]^{1/3} \quad (25)$$

$$A(Pr) = 2 \times 0.464 Pr^{1/3} \left[ 1 + \left( \frac{0.0207}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{-1/4} \quad (26)$$

$$B(Pr) = \frac{5}{4} \times Pr^{2/5} \left[ 4 + 9\sqrt{Pr} + 10Pr \right]^{-1/5} \quad (27)$$

$$Bo = \frac{(Gr_{Lg} \cos \gamma)}{Re_{Lg}^{5/2}} \quad (28)$$

$$h_{cv} = \left[ h_{libre}^3 + h_{forzada}^3 \right]^{1/3} \quad (29)$$

Siendo la ecuación (23) y (24) para la convección natural y las ecuaciones (25) a la (28) para la convección forzada.

Para modelar la fase con PCM, se utiliza el modelo de solidificación y fundición incluido en el software “ANSYS Fluent”, el cual se basa en el método de entalpía-porosidad; dicha técnica considera la fase líquida como una zona “pseudo” porosa cuya fracción líquida puede ir de 0 a 1, al igual que su porosidad; cuando esta zona llegue a ser totalmente sólida, la porosidad es de 0.

Para este modelo, consideramos las siguientes ecuaciones de energía:

$$H = h + \Delta H \quad (30)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (31)$$

Donde  $h_{ref}$  es la entalpía de referencia,  $T_{ref}$  la temperatura de referencia y  $c_p$  la capacidad calorífica a presión constante.

La fracción líquida, definida como  $\delta$  se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \delta &= 0 & \text{si} & T < T_{\text{solidus}} \\
 \delta &= 1 & \text{si} & T > T_{\text{liquidus}} \\
 \delta &= \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & \text{si} & T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}}
 \end{aligned} \tag{32}$$

El contenido de calor latente ahora se puede escribir en términos del calor latente del material,  $L$ , el cual puede ser entre 0 (para un sólido) y  $L$  (para un líquido):

$$\Delta H = \beta L \tag{33}$$

### 3.3. Propiedades termo físicas y ópticas.

Las propiedades termo físicas y ópticas se toman como constantes, a excepción de la densidad del aire y del vapor de agua que se aproximan a la ley de gases ideales, mientras que la densidad de la mezcla se obtiene mediante un promedio ponderado. Estas propiedades se tomaron del artículo de Keshtkar *et al.* [25].

**Tabla 2.** Propiedades termo físicas de los materiales.

Propiedad	Aire	Vapor de agua	Agua	Vidrio	Aluminio
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Gas ideal	Gas ideal	998.2	2700	2719
Capacidad Calorífica (J/kgK)	1006.43	2014	4182	840	871
Conductividad térmica (W/m K)	0.028	0.0261	0.6	0.96	202.4

<b>Viscosidad (kg/m s)</b>	$1.7894 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-5}$	0.001003		
<b>Constante de gas relativa (J/kg K)</b>	287	461.4			

**Tabla 3.** Propiedades ópticas de los materiales.

<b>Propiedad</b>	<b>Agua</b>	<b>Vidrio</b>	<b>Aluminio</b>
<b>Emisividad</b>	0.96	0.94	0.09
<b>Coefficiente de absorción (1/m)</b>	0.15	0.2	3500
<b>Índice de refracción</b>	1.33	1.5	1

### 3.4 Condiciones ambientales.

Se tomaron los datos ambientales de Hermosillo, Sonora, México, el cual tiene un clima semidesértico. Los datos meteorológicos fueron tomados de los dos solsticios (21 de junio y 21 de diciembre), donde se usa la temperatura ambiental y la radiación global [26]. La velocidad del viento a considerar es de 2 y 3.5 m/s para la fecha en diciembre y junio, respectivamente, tomándolo como constante en un año meteorológico. Para la simulación, se ajustó la radiación global y la temperatura ambiental en un polinomio, cuyos coeficientes se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Coeficientes del ajuste al polinomio de condiciones ambientales.

$P(t) = A+Bt+Ct^2+Dt^3+Et^4+Ft^5+Gt^6+Ht^7+It^8+Jt^9+Kt^{10}$				
21 de junio			21 de diciembre	
	Radiación global	Temperatura ambiente	Radiación global	Temperatura ambiente
<b>A</b>	$-6.27 \times 10^2$	$2.99 \times 10^2$	1.76E+07	2.82E+02
<b>B</b>	0	-5.36486	-1.37E+07	-3.70178
<b>C</b>	$2.13 \times 10^1$	6.958917	4.70E+06	3.505042
<b>D</b>	0	-3.8924	-9.26E+05	-1.40632
<b>E</b>	$-6.76 \times 10^{-2}$	1.057645	1.16E+05	2.64E-01
<b>F</b>	0	$-1.59 \times 10^{-1}$	-9.54E+03	-2.57E-02
<b>G</b>	$-7.10 \times 10^{-5}$	1.44E-02	5.18E+02	1.35E-03
<b>H</b>	0	-8.02E-04	-1.79E+01	-3.43E-05
<b>I</b>	$4.20 \times 10^{-7}$	2.71E-05	3.56E-01	1.30E-07
<b>J</b>	0	-5.08E-07	-3.11E-03	1.19E-08
<b>K</b>	$-3.26 \times 10^{-10}$	4.07E-09	0	-1.81E-10

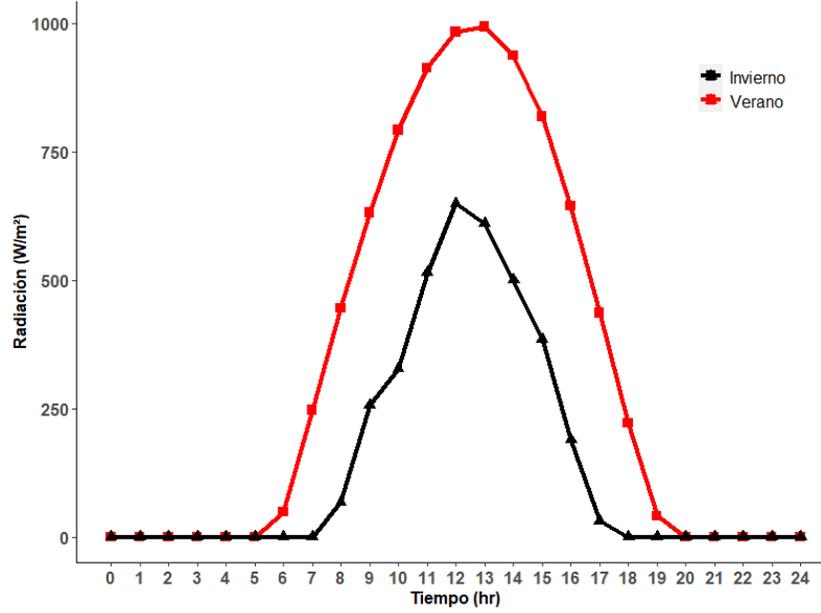
### 3.5 Solución numérica.

Se realizó una simulación en el programa de dinámica de fluidos computacional ANSYS Fluent 18, resolviendo las ecuaciones dentro de la sección 3.2. Para simplificar el problema, usamos el algoritmo SIMPLE para resolver las ecuaciones de momentum y continuidad, además, tanto los términos convectivos como el tiempo, se pusieron en un nivel de discretización de segundo orden. El método para resolver la presión dentro del sistema fue PRESTO, tomando en consideración que el problema representa una simulación de volumen dentro del fluido y resulta conveniente este método de discretización [27]. El residual que se usó para todos los casos fue de  $10^{-3}$ , a excepción de las variables de energía que se ajustó a  $10^{-6}$ , el cual representa un criterio de convergencia dentro del modelo. El paso de tiempo elegido fue de 10 segundos con 20 iteraciones en cada paso de tiempo.

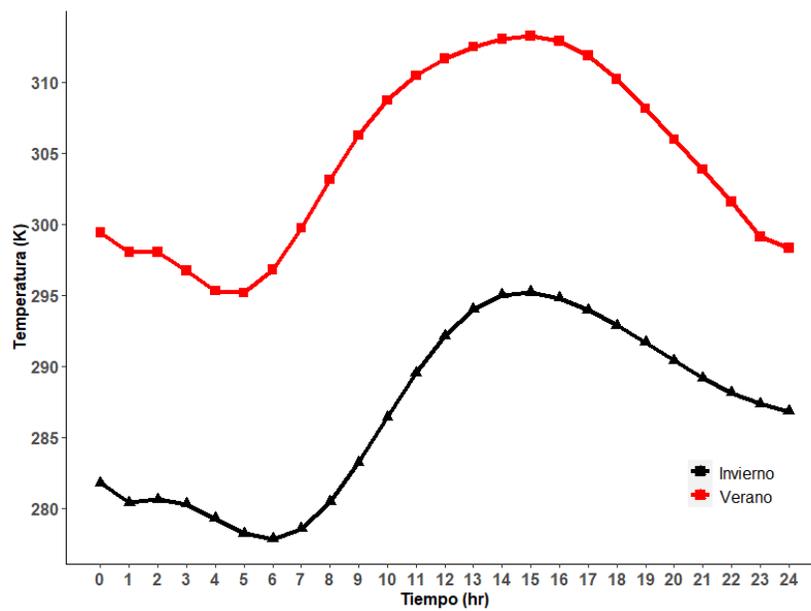
Para el cálculo de los términos fuente, la producción acumulada y las fracciones líquido, se escribió una UDF (User Defined Function) en lenguaje C, basándose en la metodología de Keshtkar *et al.* [23]. El método consiste en calcular las integrales el valor de cada iteración para resolver las ecuaciones del modelo matemático haciendo un ajuste a sus variables, esto resulta importante al momento de calcular la producción, temperatura y presión en las regiones de interfase en el vidrio y el agua líquida; a su vez, en dichas regiones se escribió un código para estimar el coeficiente de difusión y la densidad en función de la temperatura.

Las integrales por resolver son los gradientes de concentración de las ecuaciones (8) y (9), posteriormente calculando el flujo de masa de condensación y evaporación en cada paso de tiempo. La UDF también abarca las condiciones ambientales vistas en la sección 3.4, que sirven como variables de entrada, además de otros cálculos como la producción acumulada en cada paso de tiempo, y la fracción líquido del PCM.

Las simulaciones se hicieron con un procesador AMD Ryzen 7 3700X, que va de 3.6 GHz a 4.4 GHz y con 32 GB de RAM; con este equipo se lograron hacer simulaciones de 12 a 18 horas.



a)



b)

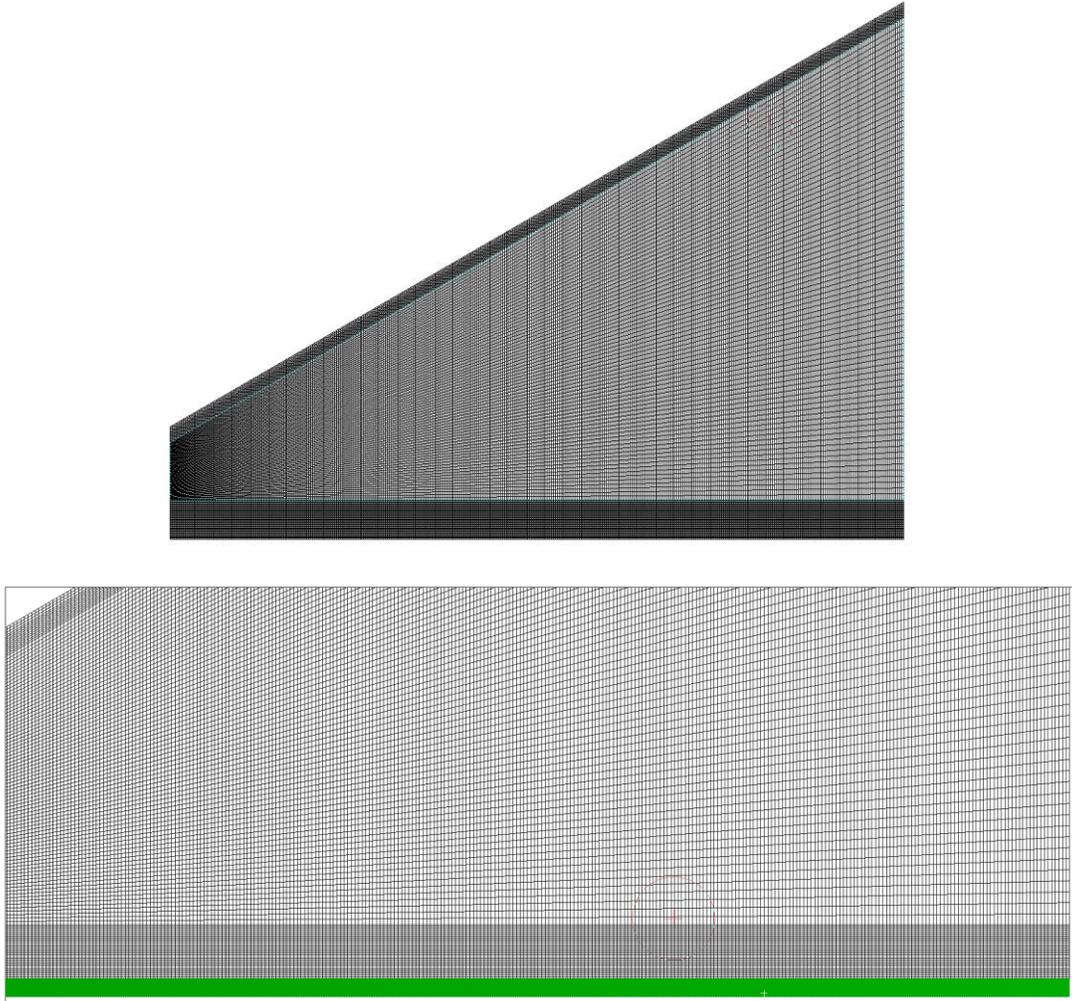
**Fig. 2.** Condiciones ambientales de Hermosillo. a) Radiación solar global, b) Temperatura ambiente.

### 3.6 Independencia de malla

Este estudio se realizó específicamente con los datos ambientales del solsticio de verano, con el PCM de RT70HC con un 1 cm de grosor. La malla estructurada consiste en cuatro dominios: vidrio, la mezcla de aire-vapor, agua líquida y PCM. El grosor del material de cambio de fase va cambiando la apariencia de la malla, mientras que los demás dominios permanecen constantes. Se realizaron varias pruebas, tomando en consideración la producción acumulada final en cada malla. Las mallas utilizadas fueron de 10232, 24924, 50384 y 75844 nodos. Los resultados se muestran en la Tabla 5. Como se puede observar, la diferencia entre 50384 y 75844 resulta ser nula, por lo que no es necesario tener una malla más fina que 50384, siendo así la malla utilizada durante toda la investigación. Se procura, a su vez, que la cantidad de nodos permanezca igual para todos los grosores y tipos de PCM.

**Tabla 5.** Resultados del estudio de independencia de malla.

<b>Nodos</b>	<b>Producción acumulativa (kg/m<sup>2</sup>hr)</b>	<b>Diferencia relativa (%)</b>
10232	4.39	16.40
24924	5.11	0.37
<b>50384</b>	<b>5.13</b>	<b>0.02</b>
75844	5.13	-



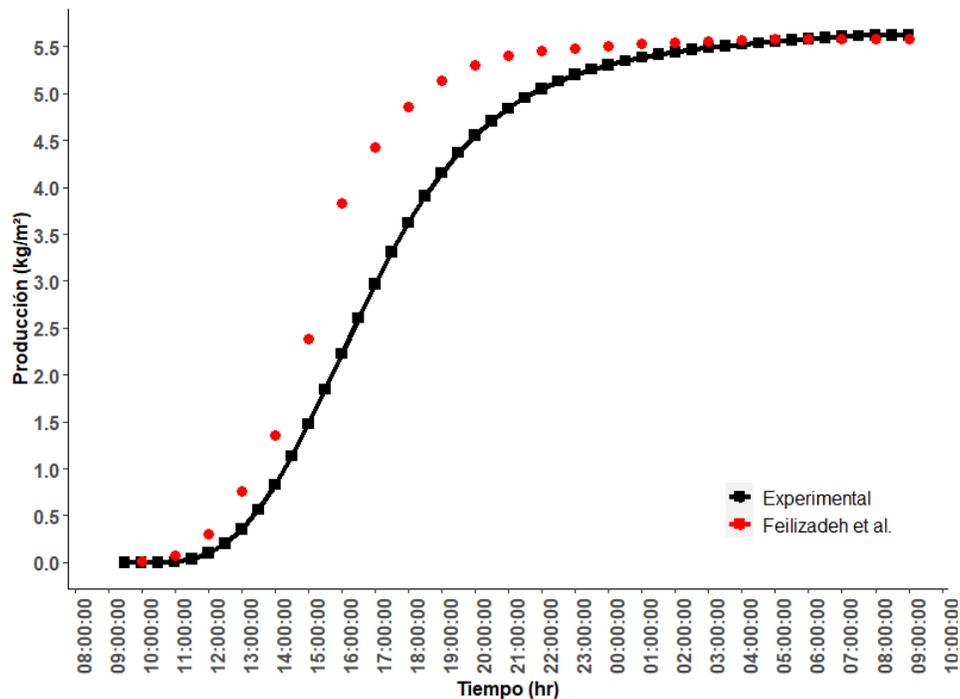
**Fig. 3.** Estructura de la malla. a) Malla completa, b) Acercamiento al dominio del PCM.

### 3.7 Validación del modelo computacional

La validación del modelo se realizó en comparación a los datos experimentales presentados por Feilizadeh *et al.* [15], siendo ésta la validación de la UDF sin la presencia de PCM. Se tomó en cuenta las dimensiones del problema, siendo una base de 0.75 x 0.75 m con el vidrio inclinado 30° con respecto a la base, una pared

lateral chica de 0.1 m y una película de agua de 0.02 m. Los experimentos se realizaron en Shiraz, Irán.

En la Fig. 4, podemos observar que la producción acumulada tiene una diferencia despreciable cuando vamos a estimar la producción obtenida durante todo el día. El autor del artículo obtuvo una producción de 5.58 kg/m<sup>2</sup>hr, mientras que la nuestra fue de 5.62 kg/m<sup>2</sup>hr, teniendo una diferencia porcentual de 0.71%.



**Fig. 4.** Validación del modelo computacional. Comparación de la producción acumulada.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

En este capítulo, se tomarán en cuenta, como se mencionó anteriormente, el solsticio de verano e invierno en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. Estos días fueron seleccionados debido a que representan el día con mayor y menor radiación solar, respectivamente [26]. Se hizo un estudio comparativo entre los dos días, y los parámetros importantes como el grosor y tipo de PCM. También se toma a consideración el comportamiento de las temperaturas del agua y la fracción líquido del PCM a cada hora de la simulación.

#### 4.1. Efecto del PCM en la producción del agua.

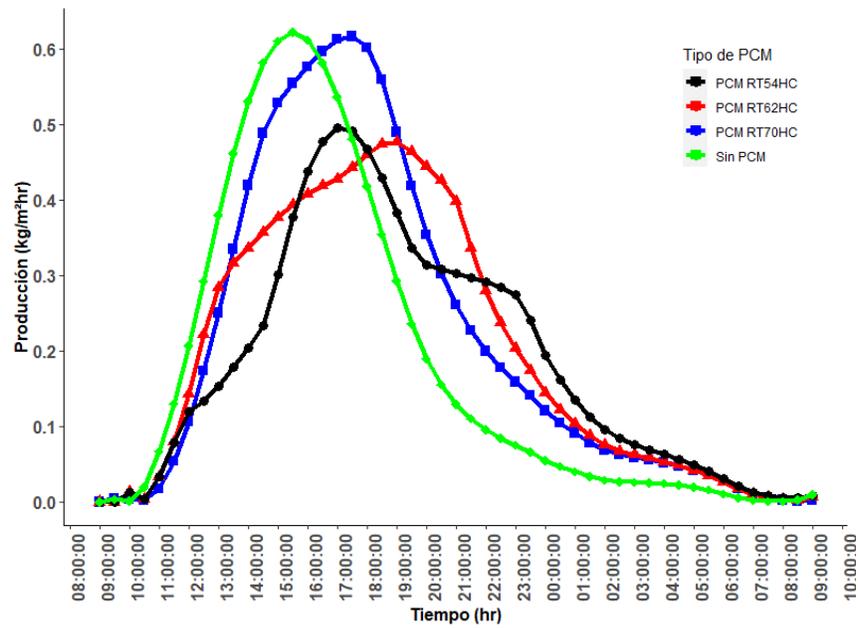
Durante el solsticio de verano en la Fig. 5, se observa la tendencia que tiene la producción del agua al momento de alcanzar las 5 de la tarde el primer día, donde se alcanza un máximo de aproximadamente  $0.617 \text{ kg/m}^2\text{hr}$  para el PCM RT70HC y  $0.496 \text{ kg/m}^2\text{hr}$  para el RT54HC, mientras que para el caso del RT62HC el máximo se encuentra más tarde, aproximadamente a las 7 de la tarde con una producción de  $0.476 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ . A comparación del caso donde no se tiene PCM, a pesar de que el máximo se alcanza en un tiempo menor, la producción se ve disminuida sustancialmente durante la noche; aquí vemos las ventajas de tener un PCM para un destilador solar, que puede funcionar incluso sin la necesidad del Sol. A su vez, la producción del RT70HC se asemeja a la de la producción sin PCM en su comportamiento y pico, sin embargo, la producción durante el tiempo de noche llega a ser mayor en el caso del PCM.

En la Fig. 6, la producción acumulada se reconoce la importancia del PCM a comparación del resultado obtenido sin la presencia de éste. En la Tabla 6, vemos que la producción de PCM mayor se obtiene con la variante RT70HC, aumentando hasta un 15.90% durante un día completo. A su vez, la producción incrementa en un 1.83 y 10.04% para las variantes RT54HC y RT62HC, respectivamente.

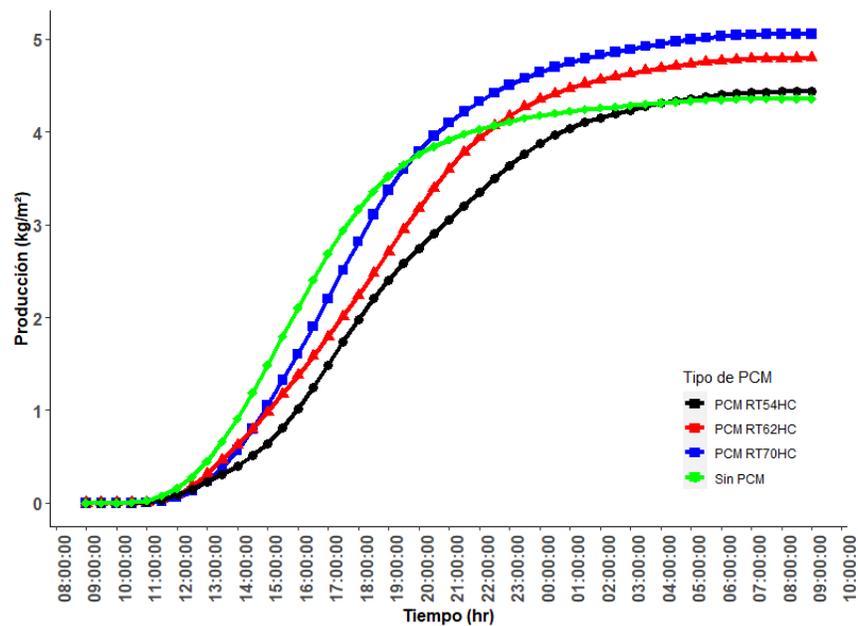
**Tabla 6.** Comparación de casos en producción acumulada según tipo de PCM usado.

<b>Verano con PCM</b>		
<b>Tipo PCM</b>	<b>Producción acumulada (kg/m<sup>2</sup>hr)</b>	<b>Comparativo (%)</b>
<b>No PCM</b>	4.357	-
<b>RT54HC</b>	4.437	1.83
<b>RT62HC</b>	4.795	10.04
<b>RT70HC</b>	5.05	15.90

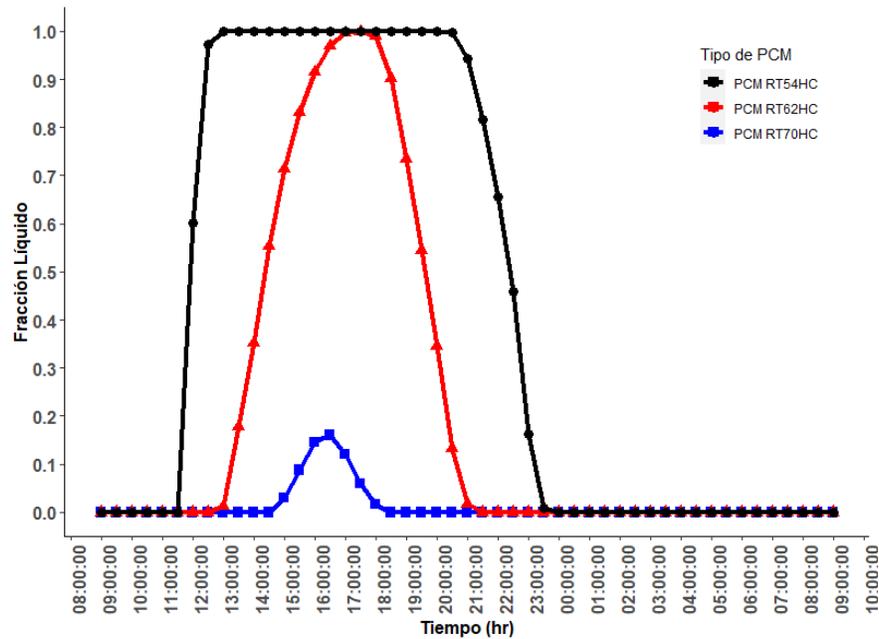
En la Fig. 7, la fracción líquido muestra de manera directa el efecto que se observa en la Fig. 1, donde se observan diferentes comportamientos en el caso del RT54HC y RT62HC. Con respecto al primero, el material se encuentra totalmente derretido por aproximadamente 12 horas, donde el comportamiento en la Fig. 1 no tiene una uniformidad como el RT70HC, esto debido a que el material transporta calor sensible; similar a lo que sucede con el RT62HC, que se llega a derretir en un intervalo de tiempo menor, aunque significativo, ya que entre las 5 hasta las 7 de la tarde se tiene un comportamiento menos uniforme debido al mismo efecto que ocurre con el RT54HC. Afortunadamente, con el RT70HC, el material se mantiene menor a la fracción líquido de 1 durante todo el proceso, obteniendo así el resultado más favorable.



**Fig. 5** Producción horaria de agua para el 21 de junio para diferentes tipos de PCM.



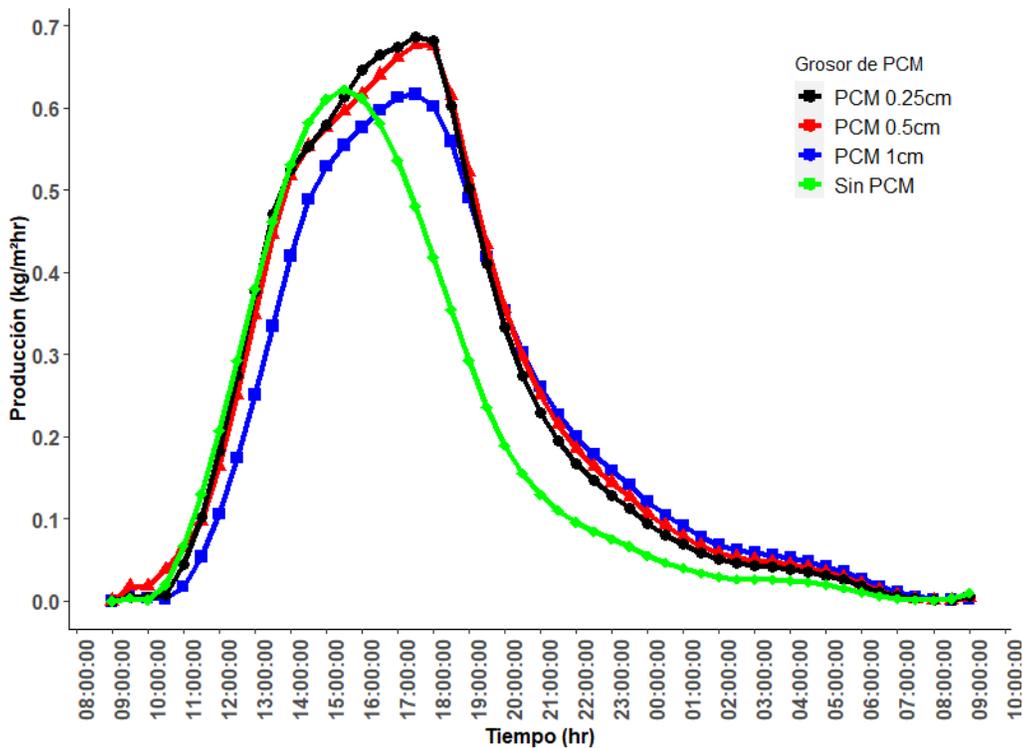
**Fig. 6** Producción acumulada de agua en el día 21 de junio para diferentes tipos de PCM.



**Fig. 7** Fracción líquida del PCM en el día 21 de junio para diferentes tipos de PCM.

#### 4.2. Efecto del grosor de PCM en la producción del agua.

La Fig. 8 describe el efecto del grosor del PCM en la producción de agua en el mejor caso de tipo de PCM, el RT70HC, en comparación al caso donde no hay PCM. Se observa el incremento de la producción conforme vamos disminuyendo el grosor del PCM, concluyendo que la producción de agua en el destilador es inversamente proporcional al grosor del PCM que se usa. Los máximos se encuentran en 0.617, 0.677 y 0.687 kg/m<sup>2</sup>hr para 1, 0.5 y 0.25 cm, respectivamente. De igual manera, podemos ver que la masa de PCM juega un papel importante en esto, ya que es menor la cantidad que se mantiene almacenada en el material y conlleva a que se transporte el calor con más facilidad al agua.

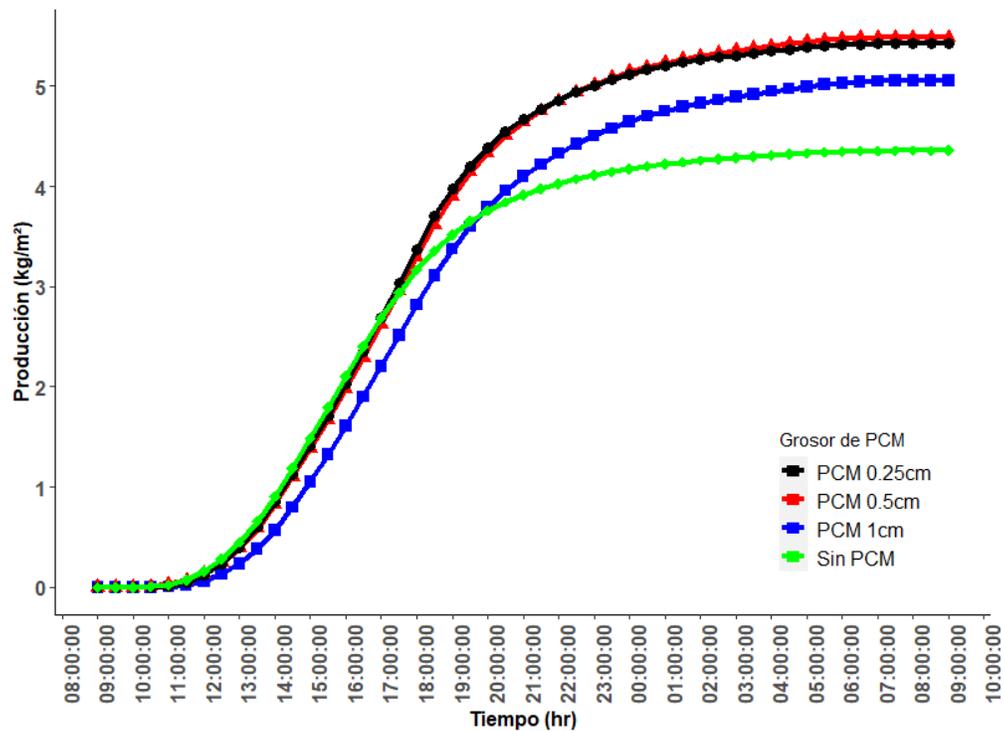


**Fig. 8** Producción horaria de agua variando el grosor del PCM para el 21 de junio.

Pasando a la producción acumulada en la Fig. 9, hay una semejanza entre los resultados de 0.25 y 0.5 cm, cuya producción diaria llega a ser 5.424 y 5.488 kg/m<sup>2</sup>hr, respectivamente. Podemos concluir que, considerando un punto de vista económico y de eficiencia, que el uso de 0.25 cm de capa de PCM es conveniente en cara a 0.5 cm, usando menos material y que, observando la Fig. 4, eventualmente este caso produciría más agua.

En la Tabla 7, destacamos el uso de PCM con respecto al caso sin éste, el cual tenemos un aumento de producción de 16.02, 25.94 y 24.57% para los casos de 1, 0.5 y 0.25 cm, respectivamente. Es evidente que la producción de agua llega a ser

inversamente proporcional al grosor de la capa de PCM en el fondo del destilador solar.



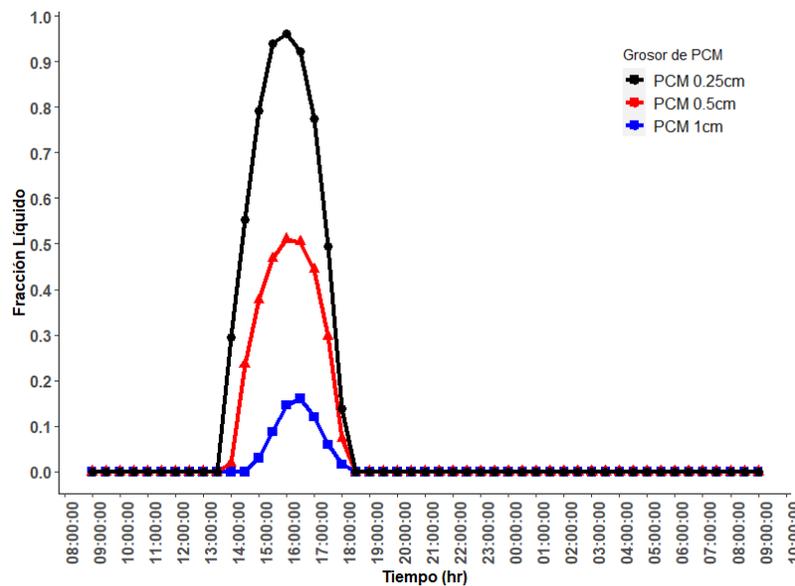
**Fig. 9** Producción acumulada de agua variando el grosor de PCM el 21 de junio.

**Tabla 7.** Comparación de casos de producción acumulada según el grosor del PCM usado.

Efecto de grosor (verano)		
Tipo PCM	Producción acumulada (kg/m <sup>2</sup> hr)	Diferencia (%)
Sin PCM	4.35721	-
1 cm	5.05524	16.02
0.5 cm	5.4878	25.95

0.25 cm	5.4278	24.57
---------	--------	-------

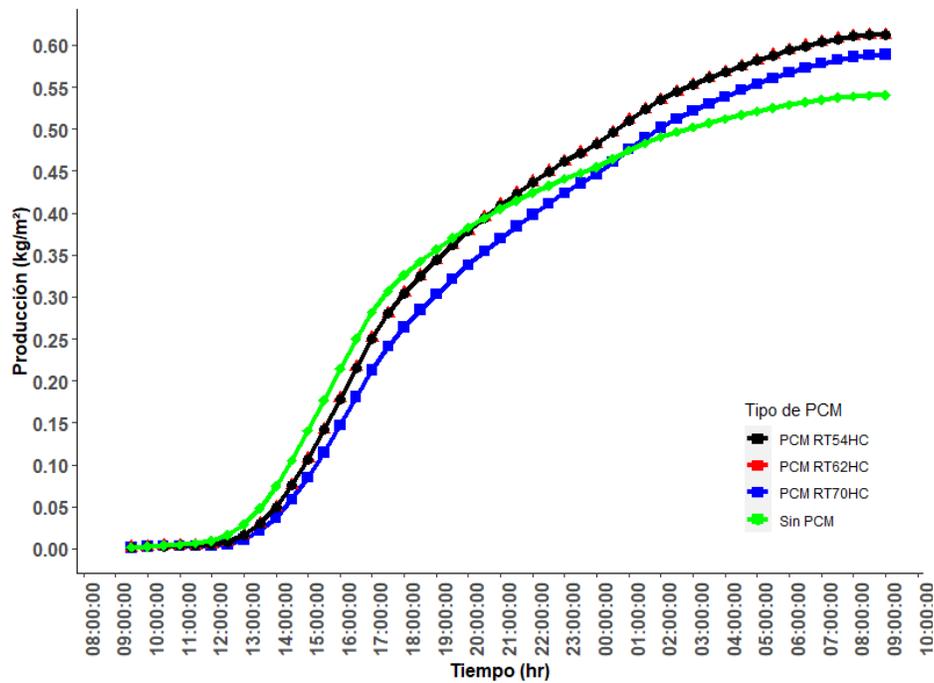
La fracción de líquido mostrada en la Fig. 10 muestra un comportamiento esperado, donde dependiendo de la cantidad de material que se encuentra en transición de cambio de fase, la producción de agua aumenta mientras se calienta más el PCM, independientemente de la masa de este. El mejor caso, como se muestra, es el de 0.25 cm, cuyo máximo es 0.961 y con una cantidad considerable de líquido. En todos los casos, se tuvo un máximo aproximadamente a las 4 de la tarde, y se empezó a derretir a partir de la 1 de la tarde en los casos de 0.25 y 0.5 cm, mientras que para 1 cm fue aproximadamente a las 2 de la tarde.



**Fig. 10.** Fracción líquido del PCM en el día 21 de junio según el grosor de PCM.

Considerando el caso simulado para el 21 de diciembre (Tabla 8), la producción es mayor en comparación del resultado obtenido sin la presencia del PCM. Sin embargo, no alcanza los niveles de producción acumulada como en el verano debido al efecto de la temperatura. En la Fig. 11, se observa cómo se incrementa la producción en un día a comparación del PCM, además de cómo al momento de

cambiar el PCM a una con menor punto de fusión, no se observan cambios significativos.



**Fig. 11.** Producción acumulada de agua en el día 21 de diciembre variando el tipo de PCM.

**Tabla 8.** Comparación de casos de producción acumulada según el tipo del PCM en invierno.

Invierno con PCM		
Tipo PCM	Producción acumulada (kg/m <sup>2</sup> hr)	Diferencia (%)
Sin PCM	0.540	-
RT54HC	0.612	13.38
RT62HC	0.612	11.80
RT70HC	0.588	8.23

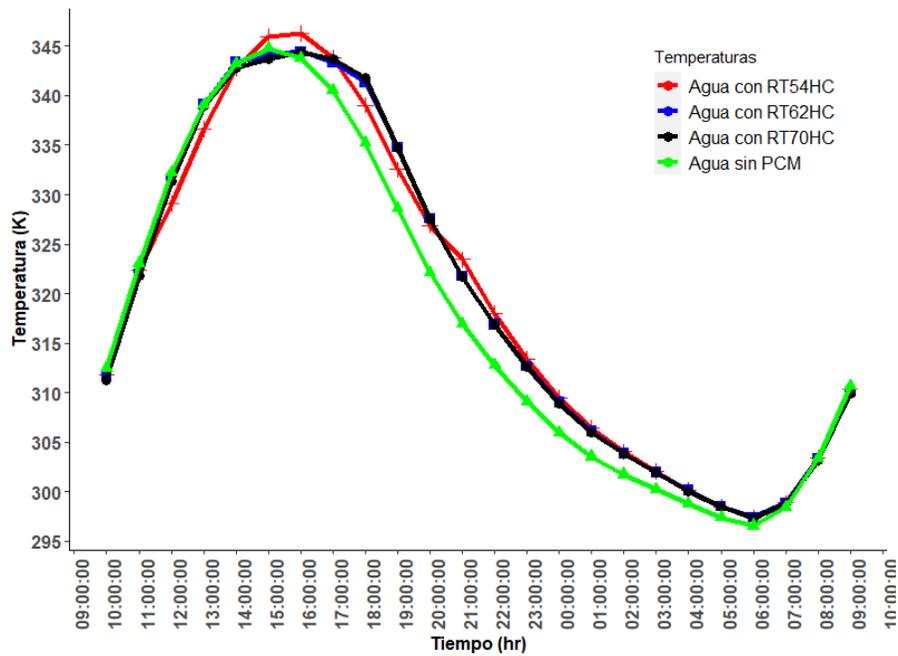
### 4.3. Variación horaria de la temperatura del agua

Se analizó cómo cambia la temperatura del agua en el transcurso de las horas del proceso, dependiendo del cambio de grosor y el tipo de PCM. Se tomó solamente el caso donde tenemos un grosor de 0.25 cm de PCM (que resultó ser el mejor caso) para nuestro análisis de tipo de PCM en la Fig. 12. Se observa un aumento significativo en la temperatura del agua en todos los casos donde incluimos el material en la base a comparación del caso sin éste. Las temperaturas máximas son de 346.3, 344.4 y 344.4 K para el RT54HC, RT62HC y RT70HC, respectivamente. A pesar de que la diferencia es mínima, lo importante resulta al momento de comparar la temperatura en las noches, y cómo la temperatura se mantiene más estable en los casos de RT70HC y RT62HC desde aproximadamente las 2 de la tarde hasta las 7 de la tarde, y que sus temperaturas resultan mayores, en gran parte del tiempo en la noche, en estos dos casos anterior a comparación del de RT54HC.

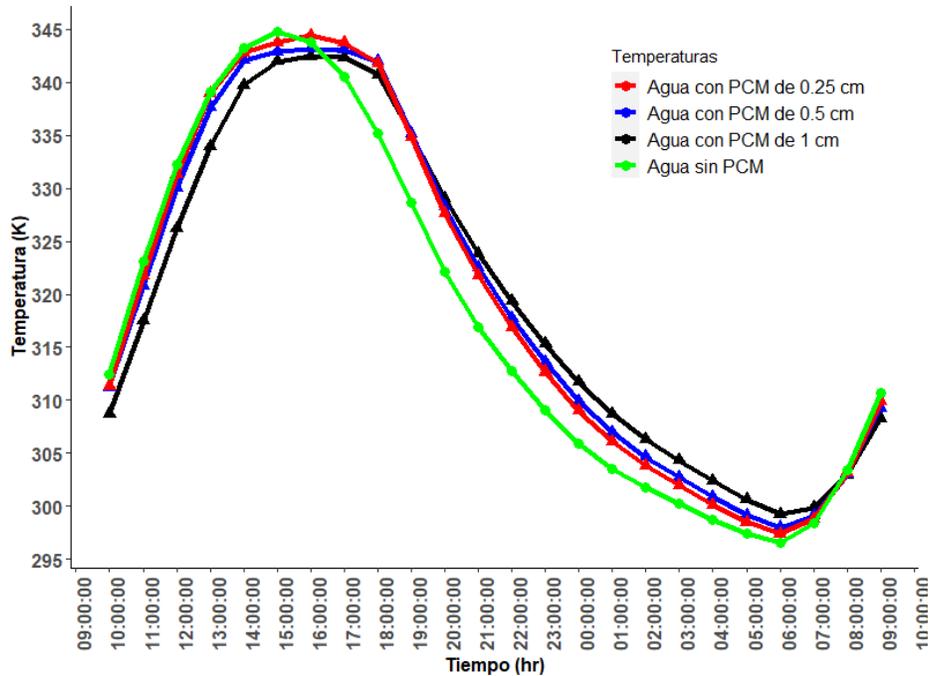
Con la Fig. 13, se denota el aumento de temperatura con diferentes grosores usando solamente el PCM RT70HC. Se destaca el aumento de temperatura, prolongado en un mayor tiempo en el grosor de 0.25 cm, aumentando el agua considerablemente y tener una mayor producción de agua.

Sin embargo, si nos vamos al tiempo nocturno, el agua obtiene una temperatura más alta con el PCM de 1 cm, lo cual es apropiado debido a que tenemos una mayor cantidad de masa en la base del destilador, aumentando así la transmisión de calor

sensible durante las noches, y este efecto resulta ser inversamente proporcional al grosor del PCM.

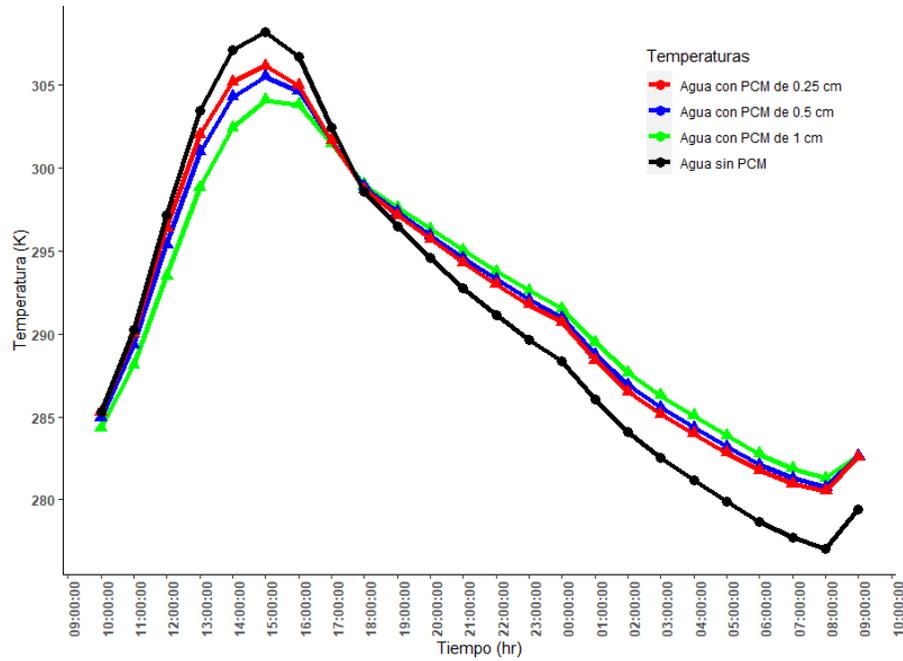


**Fig. 12.** Variación horaria de la temperatura del agua con respecto al tipo de PCM el 21 de junio.

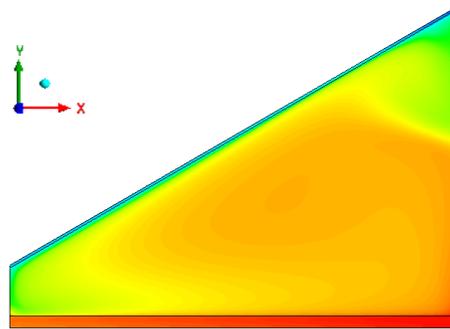


**Fig. 13.** Variación horaria de la temperatura del agua con el grosor de PCM el 21 de junio.

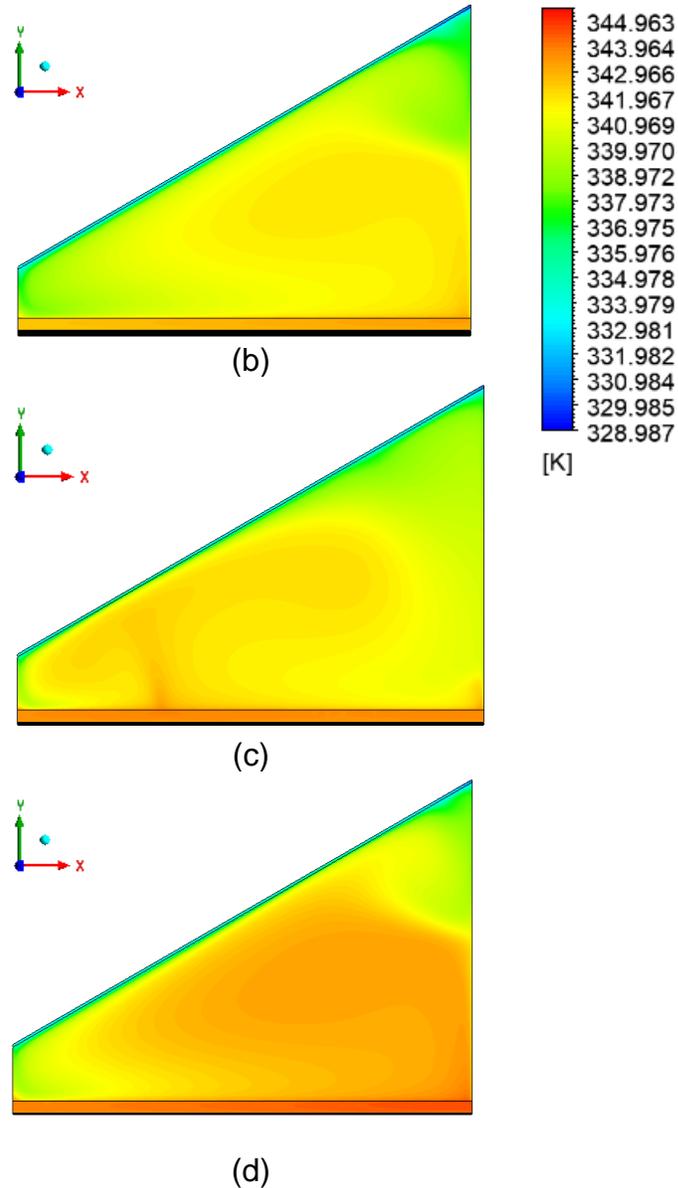
En el caso de las temperaturas en invierno, se obtiene un aumento significativo de éstas durante la noche, y un crecimiento mayor durante el tiempo diurno en el caso del destilador sin PCM. En la Fig. 14, se hace una comparación con el PCM RT54HC, haciendo diferencia entre grosores en el destilador. Se puede denotar que el agua no alcanza la temperatura del caso sin PCM, por lo que podemos inferir que, si hacemos la prueba con diferentes tipos de PCM, obtendríamos un resultado similar, haciendo saber de la misma manera que no alcanza el punto de fusión y ésta permanece en un estado sólido (fracción líquido de 0). En este periodo del año, el material funciona como un almacenador de energía a calor sensible.



**Fig. 14.** Variación horaria de la temperatura del agua con el grosor de PCM para el 21 de diciembre.



(a)



**Fig. 15.** Contornos de temperatura (K). a) Sin PCM, b) 1 cm, c) 0.5 cm y d) 0.25 cm.

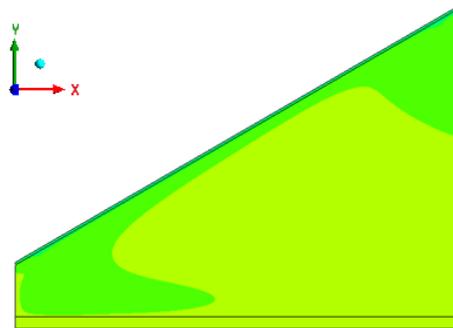
#### 4.4. Productividad y comparación en tiempos del día.

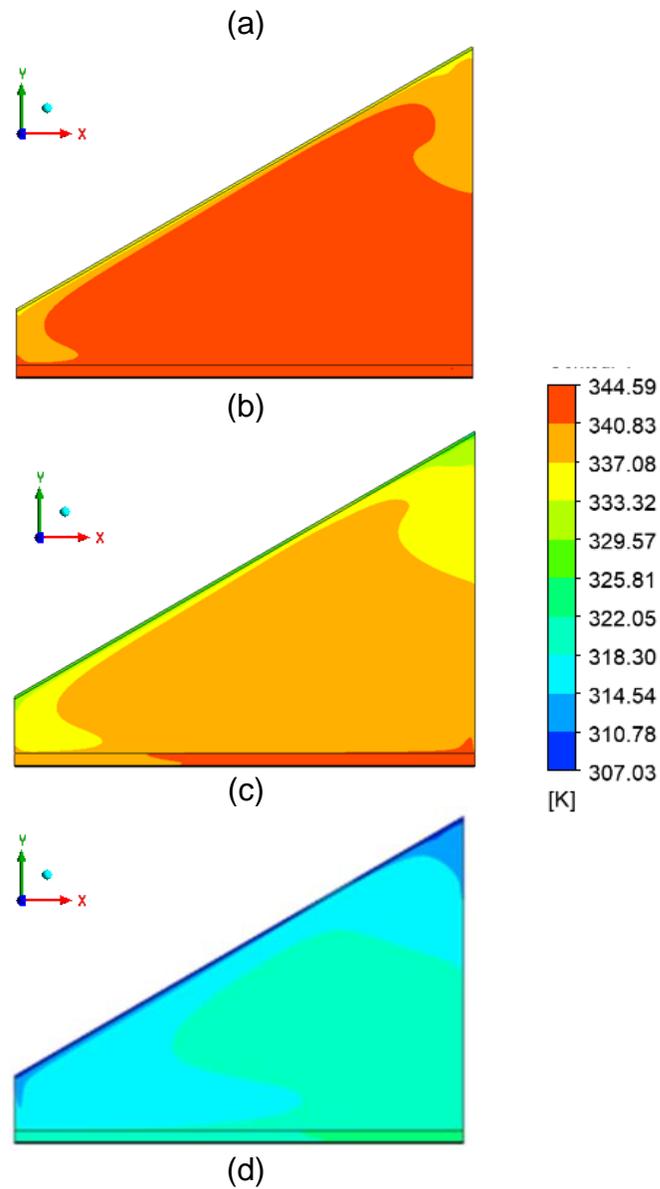
En la Fig. 15, tenemos el campo de temperatura dentro del destilador a las 3 de la tarde, donde aproximadamente tenemos el pico de producción; tomamos como parámetro variable el grosor del PCM RT70HC. Aunque no existen diferencias

palpables en la temperatura del vidrio y la mezcla, se denota la temperatura del agua siendo más alta sin PCM, debido a que no hay almacenamiento de energía por parte del PCM. Mientras tanto, el destilador cuyo grosor es de 0.25 cm presenta una mayor temperatura a comparación de los demás casos. Esto puede deducirse también mediante la Fig. 7.

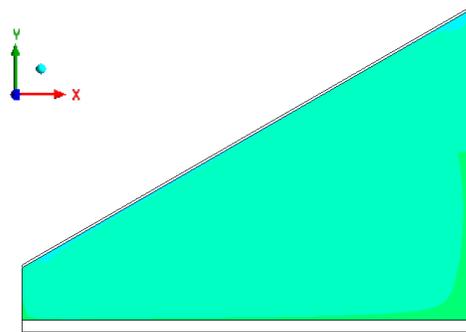
Por otra parte, usamos el mismo PCM y un grosor de 0.25 cm a distintas horas (Fig. 16). Se analiza el comportamiento de la temperatura y fracción masa de agua, además de los vectores de velocidad, a distintas horas del día: 12 del mediodía, 3:00 PM, 6:00 PM y 9:00 PM. La temperatura va aumentando gradualmente y disminuyendo conforme va ocultándose el Sol a partir de las 6:00 PM, mientras se espera que el PCM ya se encuentre en su estado sólido. A las 3:00 PM, como vimos anteriormente, se tiene una temperatura máxima dentro del destilador, en el cual observamos cuando el PCM se encuentra mayormente derretido.

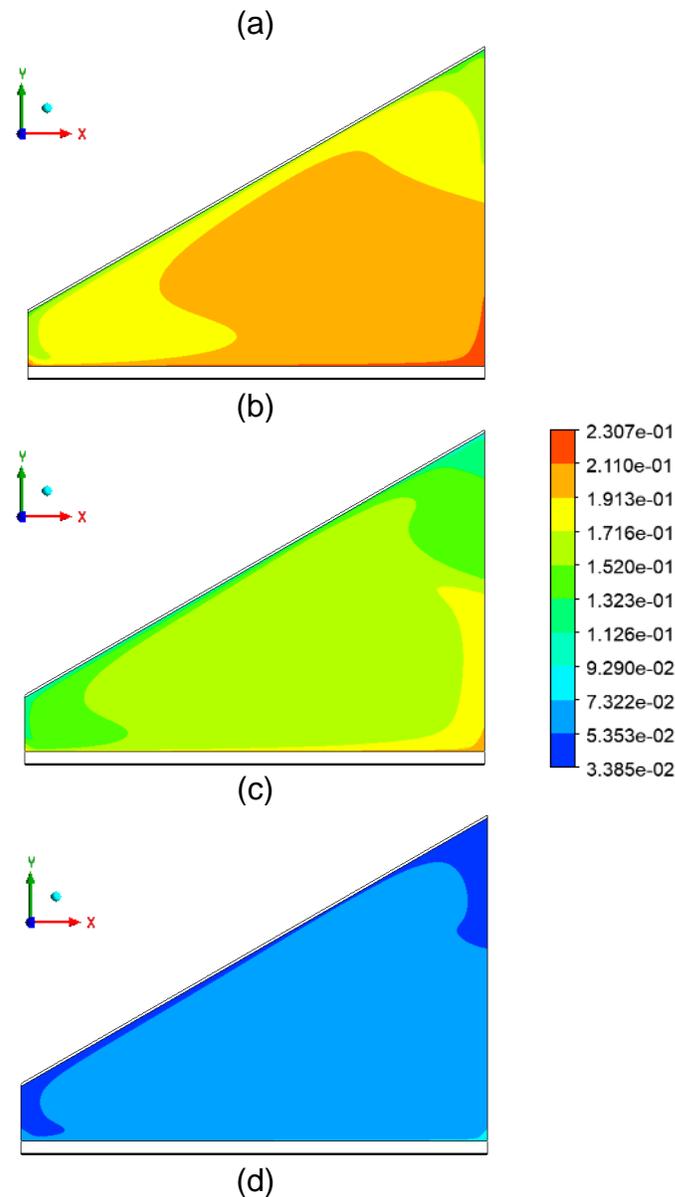
Para la fracción masa de agua dentro de la mezcla, mostrado en la Fig. 17, tenemos un resultado esperado donde conforme pasa el día, en las primeras horas se llega a tener una producción alta hasta de 0.23 kg/m<sup>2</sup>hr a las 3:00 PM, mientras que en la tarde y en la noche se ve disminuida a un mínimo de 0.033 kg/m<sup>2</sup>hr. La fracción masa de agua se mantiene alta en todo momento en la interfase entre la mezcla y el agua líquida, mientras que la interfase del vidrio con la mezcla se mantiene como la más baja.





**Fig. 16.** Contornos de temperatura con PCM de 0.25 cm el 21 de junio, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.





**Fig. 17.** Contornos de fracción masa de agua con PCM de 0.25 cm el 21 de junio.

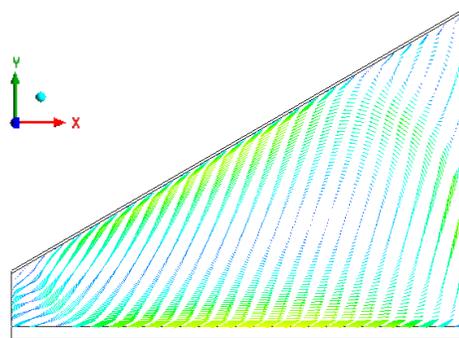
a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.

Para el análisis del flujo, observamos en la Figura- 18 la dirección de éste va en sentido de las manecillas del reloj, creando dos vórtices, el primero en la parte superior entre la pared más alta y el vidrio, y el segundo en la cara a la pared lateral más chica. El flujo máximo se alcanza a las 6:00 PM con un valor de 0.25 m/s. Conforme pasa el tiempo, la temperatura aumenta dentro del destilador y el aire se vuelve menos denso, llegando así que el sentido del fluido llegue a ser conforme a

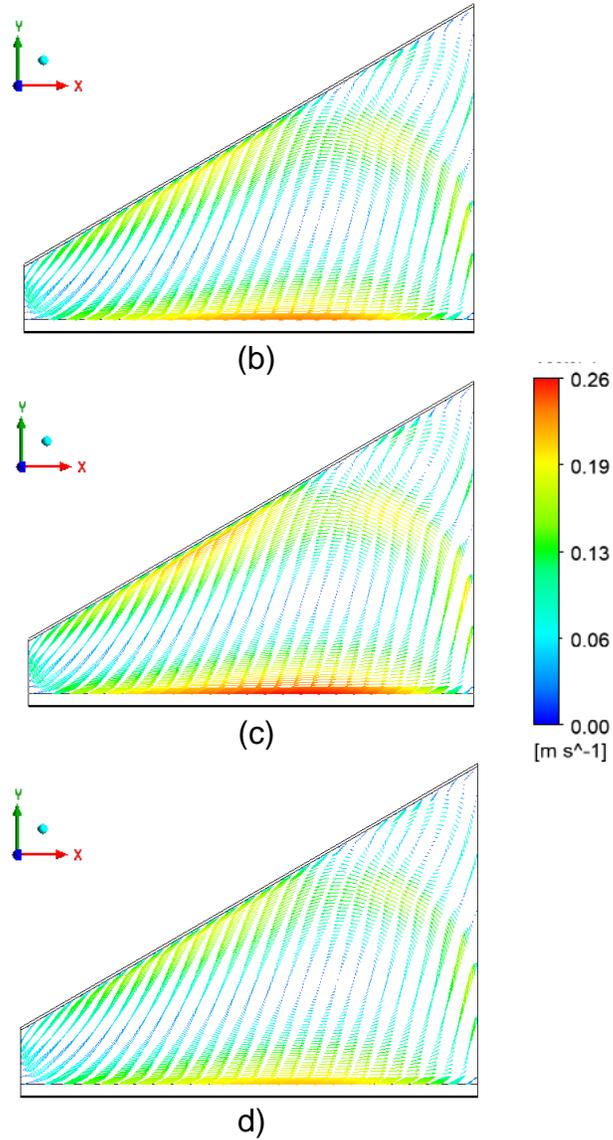
las manecillas del reloj debido a la inclinación del vidrio y la facilidad de movimiento hacia la derecha de la mezcla. También se ve reducido el vórtice en cara a la pared lateral chica, conforme avanza el tiempo y también cuando sube la temperatura, teniendo un estado similar aun cuando baja la temperatura del destilador. El vórtice entre el vidrio y la pared lateral grande permanece igual debido la inclinación del vidrio.

En la Fig. 19, tenemos separadas las producciones acumuladas de agua según el horario del día (horario diurno y nocturno) durante el solsticio de verano. Se observa que la producción de agua resulta ser mayor en los PCM con menor punto de fusión (RT62HC y RT54HC) durante la noche, sin embargo, resulta menor a la producción durante el día con respecto al RT70HC. Podemos deducir que, mientras el punto de fusión sea menor, la cantidad de energía liberada por el PCM resulta ser mayor durante la noche, pero menor durante el día, de esa manera afectando a la producción en general durante un día.

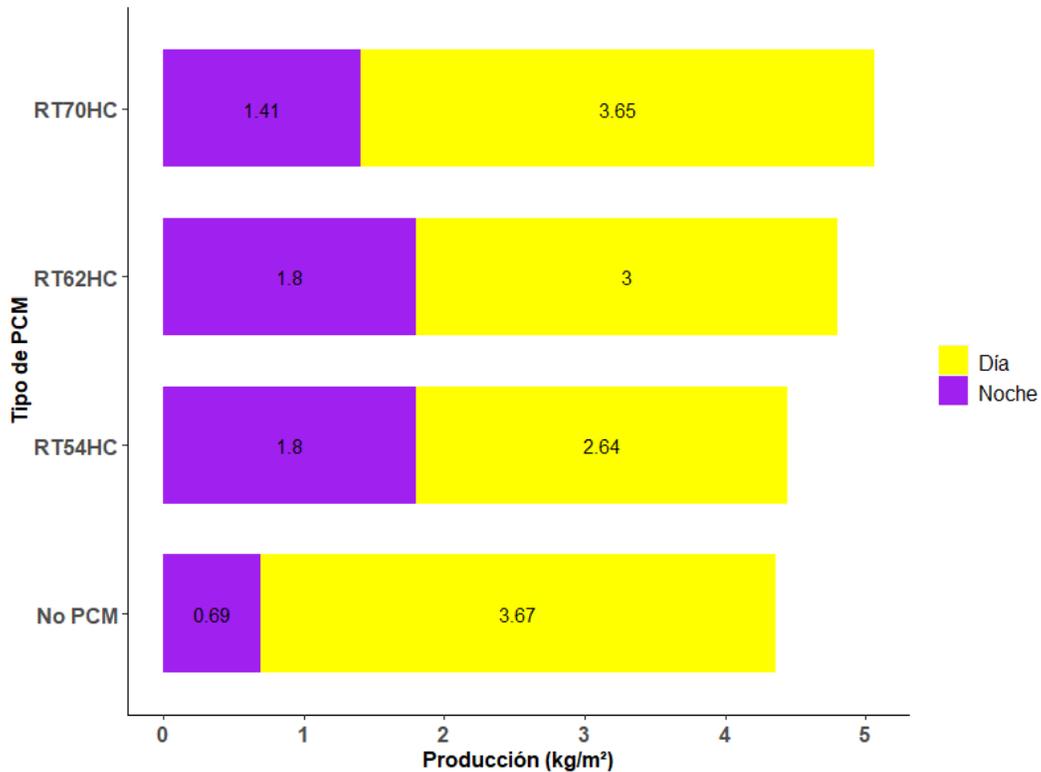
En la misma gráfica, podemos apreciar que la producción sin PCM resulta ser mayor durante el tiempo diurno, sin embargo, se ve afectada la nula presencia de PCM en la noche, disminuyendo su rendimiento. Cabe destacar que la energía se transfiere solamente al agua, y con PCM se agregaría otro material que obtiene cierta cantidad de radiación solar.



(a)

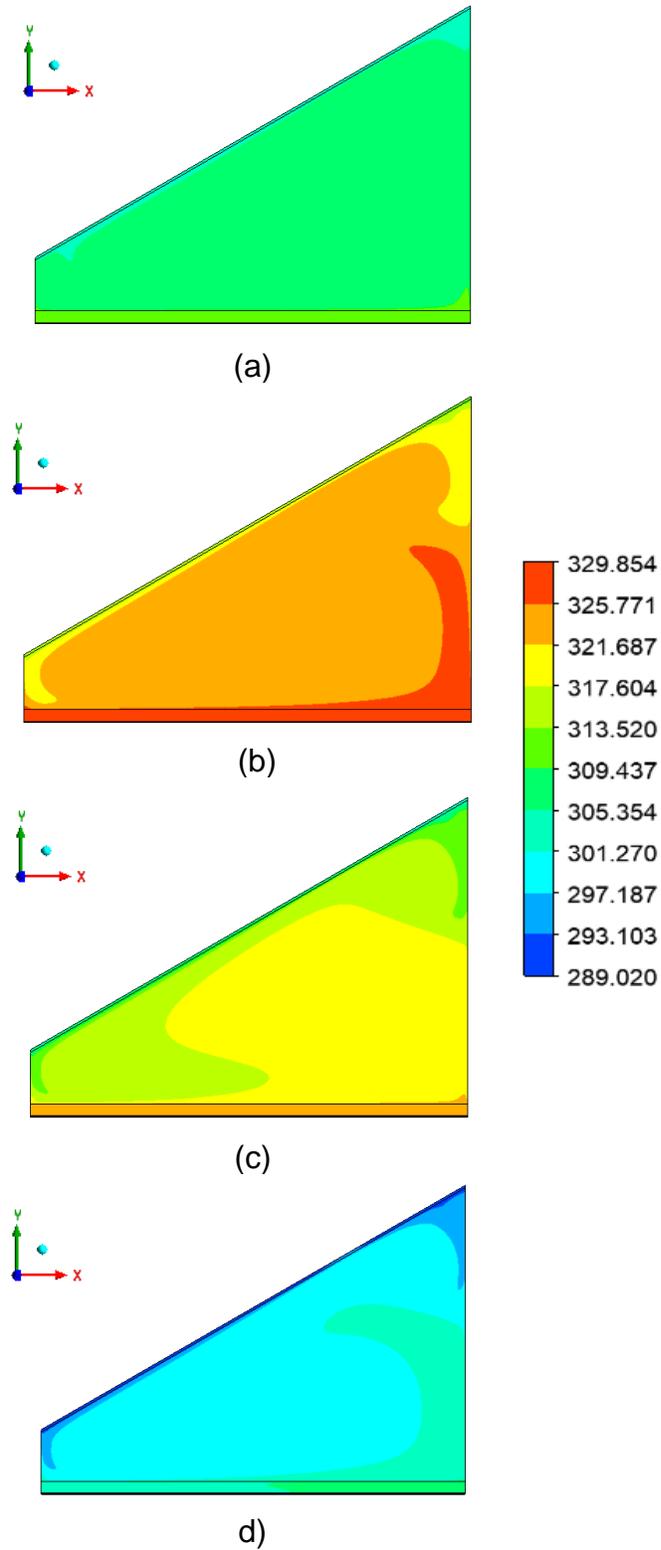


**Fig. 18.** Vectores de velocidad con PCM 0.25 cm el 21 de junio, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.

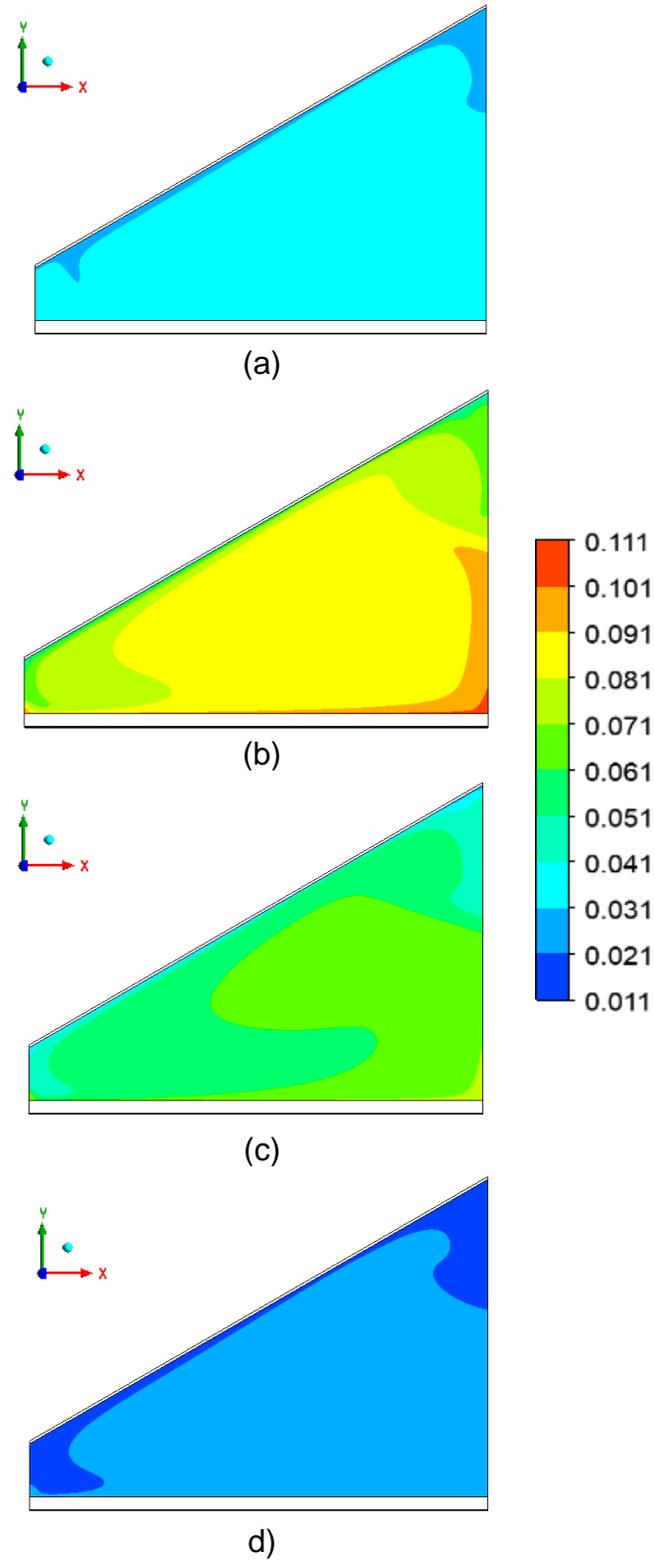


**Fig. 19.** Comparación de la producción diurna y nocturna para diferentes PCM con un grosor de 0.25 cm.

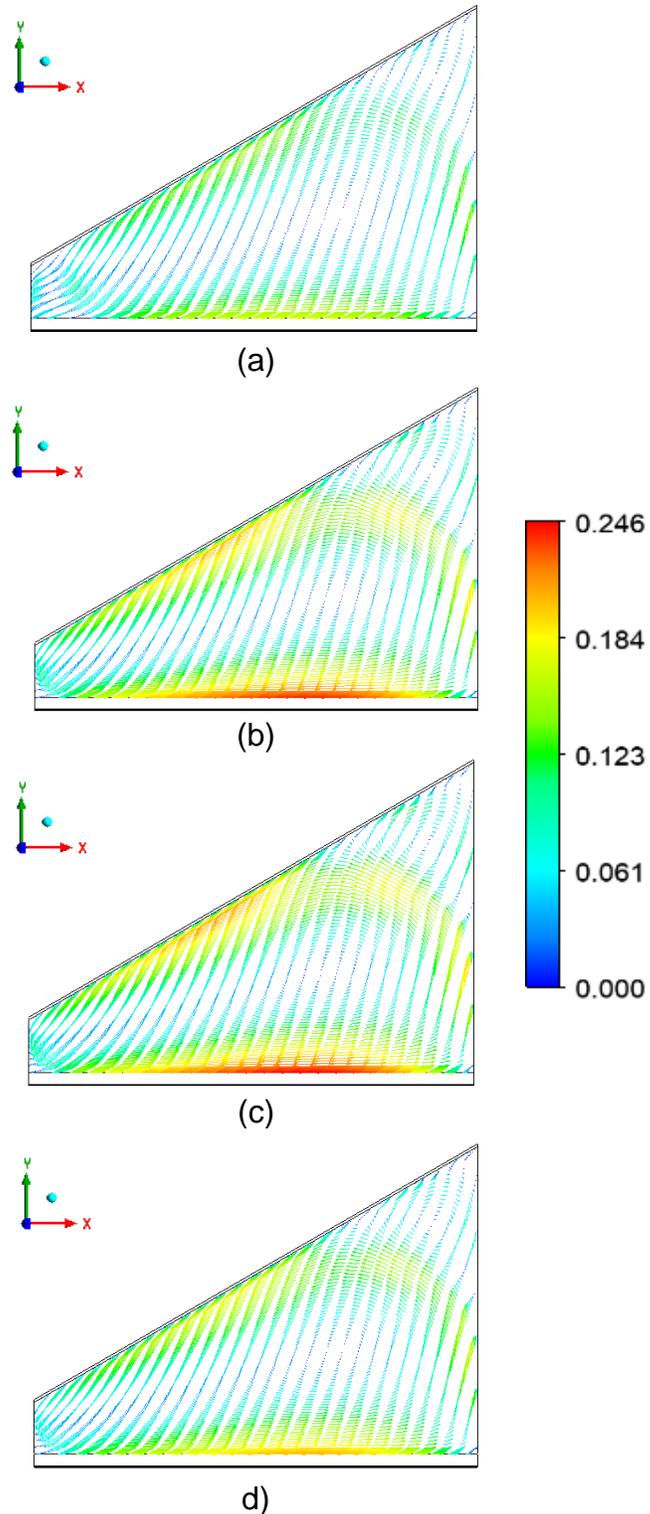
Para el caso del 21 de diciembre, en la Fig. 20, 21 y 22 tenemos los contornos de temperatura según la hora del proceso, la fracción masa de agua y los vectores de flujo en la cavidad de aire, respectivamente. Como se puede observar, no hay un cambio significativo en el comportamiento entre este caso y el de verano. Se tiene el resultado esperado que se tiene una producción menor a comparación de la de verano, debido a que las temperaturas llegan a ser menores. La temperatura inicial en el caso del verano es de 302 K, mientras que la de invierno empieza en 282 K.



**Fig. 20.** Contornos de temperatura con PCM de 0.25 cm el 21 de diciembre, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.



**Fig. 21.** Contornos de fracción masa de agua con PCM de 0.25 cm el 21 de diciembre. a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM.



**Fig. 22.** Vectores de velocidad con PCM 0.25 cm el 21 de diciembre, a) 12 PM, b) 3 PM, c) 6 PM y d) 9 PM

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se realizó un estudio teórico mediante dinámica de fluidos computacional donde se busca una aproximación al comportamiento del agua para cambiar de fase y tener agua limpia mediante el uso de un destilador solar, usando un material de cambio de fase en la base para el funcionamiento del dispositivo en todo el día sin necesidad de la presencia de radiación solar.

Con base en los resultados obtenidos en las simulaciones, podemos concluir lo siguiente:

- Se realizaron las simulaciones con tres tipos de PCM diferentes, resultando el PCM con mayor punto de fusión (70°C) el que tuvo mayor producción en un día completo con 5.05 kg/m<sup>2</sup>hr, y con 15.90% de aumento con respecto al caso de no tener material de cambio de fase, cumpliendo con su efectividad.
- El grosor llega a afectar a la producción, concluyendo que mientras se tenga menor masa en el material, se obtiene un resultado favorable. En nuestro estudio, usando el PCM RT70HC con un grosor de 0.25 cm, la producción durante un día es de 5.4278 kg/m<sup>2</sup>hr, con un aumento de 24.57% mayor con respecto al caso sin el material de cambio de fase. A pesar de que el grosor de

0.50 cm dio un mayor resultado, la diferencia es mínima, y es más conveniente usar 0.25 cm debido a que se usa menos material para un resultado similar.

- El PCM, según su fracción líquido, llega a cambiar de fase mientras disminuye su punto de fusión, funcionando así con calor sensible. A su vez, mientras disminuye su masa, el material tiende a derretirse más en el mismo lapso.
- A pesar de que el agua en el destilador llega a calentarse más sin la presencia de PCM, con el material llega a mantenerse su temperatura por más tiempo y así teniendo un aumento de éste durante la noche, comprobando su eficacia sin la necesidad de la presencia del Sol.
- Teniendo un PCM con un punto de fusión mayor, la producción de agua durante la noche se ve reducida, sin embargo, durante el día se tiene una producción mayor, teniendo así un total de agua producida más grande que con un PCM de menor punto de fusión.

## 5.2 Recomendaciones

Más que probar con diferentes PCM y grosores, un aspecto a considerar es el beneficio que se tiene al hacer estas simulaciones en relación con el costo-beneficio; podemos descartar la construcción y experimentación de un destilador solar, y hacer nuestros modelos de destiladores usando este algoritmo y adaptando el PCM en caso de que sea necesario.

Un aspecto a considerar es el tiempo de computo que se emplea para simular este proceso. Con el uso de un equipo de computo potente, teniendo una unidad de procesamiento de velocidad alta y aplicando un procesamiento en paralelo, el costo-beneficio de diseño de un destilador solar con PCM se puede llegar a reducir significativamente.

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS

- [1] “Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento – CIEP.”  
<https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>  
(accessed Nov. 18, 2019).
- [2] L. A. Navarro, N. and J. L. Moreno V., “Cambios en el paisaje arbolado en Hermosillo: escasez de agua y plantas nativas,” *Región y Soc.*, vol. 28, no. 67, pp. 79–120, 2016, [Online]. Available:  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-39252016000300079&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-39252016000300079&script=sci_arttext&tlng=en).
- [3] “de98a9a143d32115b89ae71d106dc4da74fbb616 @ www.un.org.” [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.
- [4] “Agua y sostenibilidad: algunas claves desde los sistemas áridos.”  
<https://journals.openedition.org/polis/5096> (accessed Oct. 23, 2019).
- [5] A. Saravanan and M. Murugan, “Performance evaluation of square pyramid solar still with various vertical wick materials – An experimental approach,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 19, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100581.
- [6] WHO, “Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum,” 2017, Accessed: Jun. 19, 2022. [Online]. Available:  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/).
- [7] A. Kaushal and Varun, “Solar stills: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 446–453, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2009.05.011.

- [8] A. A. El-Sebaili, A. A. Al-Ghamdi, F. S. Al-Hazmi, and A. S. Faidah, "Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1187–1195, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.10.014.
- [9] A. Shukla, K. Kant, and A. Sharma, "Solar still with latent heat energy storage: A review," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 41. Elsevier Ltd, pp. 34–46, Jun. 01, 2017, doi: 10.1016/j.ifset.2017.01.004.
- [10] L. Malaeb, G. M. Ayoub, and M. Al-Hindi, "The effect of cover geometry on the productivity of a modified solar still desalination unit," in *Energy Procedia*, 2014, vol. 50, pp. 406–413, doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.049.
- [11] A. R. A. Elbar and H. Hassan, "Enhancement of hybrid solar desalination system composed of solar panel and solar still by using porous material and saline water preheating," *Sol. Energy*, vol. 204, pp. 382–394, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.058.
- [12] T. Abderachid and K. Abdenacer, "Effect of orientation on the performance of a symmetric solar still with a double effect solar still (comparison study)," *Desalination*, vol. 329, pp. 68–77, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.DESAL.2013.09.011.
- [13] A. A. El-Sebaili, "Effect of wind speed on active and passive solar stills," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 7–8, pp. 1187–1204, May 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.036.
- [14] A. E. Kabeel and M. Abdelgaied, "Enhancement of pyramid-shaped solar stills performance using a high thermal conductivity absorber plate and cooling the glass cover," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 769–775, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.020.
- [15] M. Feilizadeh, M. Soltanieh, M. R. Karimi Estahbanati, K. Jafarpur, and S.-S.

- Ashrafmansouri, "Optimization of geometrical dimensions of single-slope basin-type solar stills," *Desalination*, vol. 424, pp. 159–168, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.DESAL.2017.08.005.
- [16] N. Rahbar and J. A. Esfahani, "Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis," *Energy*, vol. 49, no. 1, pp. 289–297, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2012.10.023.
- [17] V. R. Khare, A. P. Singh, H. Kumar, and R. Khatri, "Modelling and Performance Enhancement of Single Slope Solar Still Using CFD," *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 447–455, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.03.064.
- [18] N. Setoodeh, R. Rahimi, and A. Ameri, "Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD," *Desalination*, vol. 268, no. 1–3, pp. 103–110, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.desal.2010.10.004.
- [19] A. E. Kabeel, Y. A. F. El-Samadony, and W. M. El-Maghlany, "Comparative study on the solar still performance utilizing different PCM," *Desalination*, vol. 432, pp. 89–96, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.desal.2018.01.016.
- [20] H. Mousa and J. Naser, "The effect of phase change material on the water temperature in a solar basin: Theoretical and experimental investigation," *J. Energy Storage*, vol. 25, p. 100871, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100871.
- [21] H. Mousa, J. Naser, A. M. Gujarathi, and S. Al-Sawafi, "Experimental study and analysis of solar still desalination using phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 26, p. 100959, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.EST.2019.100959.
- [22] P. Patel and R. Kumar, "Comparative Performance Evaluation of Modified Passive Solar Still Using Sensible Heat Storage Material and Increased Frontal Height," *Procedia Technol.*, vol. 23, pp. 431–438, Jan. 2016, doi:

- 10.1016/j.protcy.2016.03.047.
- [23] M. Keshtkar, M. Eslami, and K. Jafarpur, "A novel procedure for transient CFD modeling of basin solar stills: Coupling of species and energy equations," *Desalination*, p. 114350, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.DESAL.2020.114350.
- [24] ANSYS® Academic Research Mechanical, "ANSYS Fluent Theory Guide," *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, no. November, pp. 1–759, 2013, [Online]. Available: [http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS Fluent Theory Guide 15.pdf](http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf).
- [25] M. Keshtkar, M. Eslami, and K. Jafarpur, "A novel procedure for transient CFD modeling of basin solar stills : Coupling of species and energy equations," *Desalination*, no. January, p. 114350, 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114350.
- [26] "(PDF) Generation of the TMY for the Solar Platform of Hermosillo." [https://www.researchgate.net/publication/337316510\\_Generation\\_of\\_the\\_TMY\\_for\\_the\\_Solar\\_Platform\\_of\\_Hermosillo?channel=doi&linkId=5dd1756292851c382f469df0&showFulltext=true](https://www.researchgate.net/publication/337316510_Generation_of_the_TMY_for_the_Solar_Platform_of_Hermosillo?channel=doi&linkId=5dd1756292851c382f469df0&showFulltext=true) (accessed May 08, 2022).
- [27] Ansys Inc, "Ansys Fluent v17 - Customization Manual," vol. 15317, no. January, pp. 724–746, 2016.