

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR PASIVO

Tesis que presenta:

Carlos Eladio Juárez Salinas

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO DE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

“Diseño, construcción y caracterización de un destilador solar pasivo”

Tesis que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

Presenta:

Carlos Eladio Juárez Salinas

Matricula: 2161801405

Comité tutorial:

Director: Dr. Enrique Barrera Calva
Co-Director: Dr. Joel Hernández Wong

Jurado:

Presidente: Dr. Raúl Lugo Leyte
Vocal: M. C. Norberto Chargoy del Valle
Secretario: Dr. Federico González García

Iztapalapa, Ciudad de México, 11 de junio de 2019

Agradecimientos.

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio 003893; por lo que agradece la beca recibida, a través del convenio No. 597994 para el desarrollo de esta tesis.

Agradecimientos personales

Por sobre todas las cosas al arquitecto y sustentador del universo Adonai יהוה por permitirme alcanzar una meta más.

Shir haMaalot

*lishlomo im-YeHoVaH lo-yivene bayit shav amlu vonav
bo im-YeHoVaH lo-yishomer-ir shav shakad shomer*

Si יהוה no edifica la

*bayit, sus constructores trabajan en vano; Si יהוה no
guarda la ciudad, en vano hacemos guardia;
En vano te levantas temprano y retrasas el sueño, y
trabajas arduamente para ganarte el sustento; porque a
sus amados Él los provee, aun cuando duermen;*

Tehillim 127:1-2

*Miren, Elohim es grande, más allá de lo que podemos
conocer; el número de sus años es incontable;
El hace las gotas de agua, que se condensan en lluvia de su
niebla;*

*La cual destilan las nubes goteando en abundancia sobre los hombres;
¿Puede alguien penetrar el despliegue de las nubes, o los
estallidos que vienen de su bóveda?
¿Miren como Él dispersa sus relámpagos sobre ellas, y
cubre las raíces del mar;*

Iyov 36:26-30

A mi padre Eladio Juárez Jiménez por **bendecirme** cuando tome la decisión de emprender este proyecto, por **guiarme** y **apoyarme** en todo momento.

A mi familia por su pronta ayuda, compañía y por el ánimo que me infunden.

A mis directores de tesis, el doctor Enrique Barrera Calva y el doctor Joel Hernández Wong por enseñarme y guiarme, y por la gran paciencia que han tenido conmigo.

A todos mis maestros por brindarme de su conocimiento, les agradezco por darme parte de su tiempo y esfuerzo, es decir, por darme parte de su vida.

Comité tutorial

Director:

Dr. Enrique Barrera Calva. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

Co-director:

Dr. Joel Hernández Wong. Laboratorio de instrumentación y caracterización. Posgrado en tecnología avanzada. Cátedras CONACYT asignado al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Legaria, Instituto Politécnico Nacional.

El jurado designado por la
Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente
de la Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó
CARLOS ELADIO JUÁREZ SALINAS
El día 11 de junio del 2019

Miembros del Jurado

Dr. Raúl Lugo Leyte

Presidente

Dr. Federico González García

Secretario

M. C. Norberto Chargoy del Valle

Vocal

Índice General.

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tablas.	vii
Nomenclatura.	ix
Resumen.....	xiii
Abstract.	xv
Introducción.	1
Capítulo 1.....	5
1.1 Antecedentes.	5
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Justificación.	11
1.4 Pregunta de investigación.	12
1.5 Objetivos.	13
1.5.1 Objetivo general.....	13
1.5.2 Objetivos particulares.	13
1.6 Metodología.	14
Capítulo 2. Fundamentos y conceptos generales sobre destilación solar pasiva.	17
2.1 Elementos de un destilador solar y su funcionamiento.....	17
2.2 Procesos físicos dentro del destilador.	22
2.2.1 Transporte de energía.....	23

2.2.2 Transporte de cantidad de movimiento.....	27
2.2.3 Transporte de masa.	29
Capítulo 3. Diseño y caracterización experimental de materiales.	33
3.1 Cubiertas condensadoras.....	34
3.2 Película absorbadora.	38
3.3 Geometría y dimensiones.....	45
3.4 Pruebas preliminares de algunos módulos de destilación.....	47
3.5 Consideraciones para la construcción del dispositivo.	48
Capítulo 4. Construcción del destilador solar.	51
4.1 Materiales y dimensiones.....	51
4.2 Construcción	54
Capítulo 5. Caracterización.....	57
5.1.1 Medición del recurso solar y sensores de temperatura.....	57
5.1.2 Mediciones de la operación del destilador.....	58
5.2 Eficiencia térmica.	71
5.3 Calidad de agua.....	72
Capítulo 6. Desarrollo de la simulación numérica.....	77
6.1 Preprocesamiento.....	80
6.2 Procesamiento.	83
6.3 Resultados.	84
Conclusiones y recomendaciones.	97
Referencias.....	101

Índice de Figuras.

Figura 1. Central de destilación solar en el desierto de Atacama.....	5
Figura 2. a) Vista panorámica de la planta de destilación en la isla de Patmos. b) Vista cercana de la estructura de la planta de destilación pasiva.	7
Figura 3. Planta de destilación solar de The Coober-Pedy en Australia.....	8
Figura 4. Planta de destilación solar de Puerto Lobos, Sonora.	9
Figura 5. Elementos de un destilador solar pasivo.....	17
Figura 6. Destilador solar de una vertiente.	19
Figura 7. Destilador solar de dos vertientes.....	19
Figura 8. Destilador solar de invernadero.	20
Figura 9. Destilador solar de cascada.....	20
Figura 10. Destilador solar de múltiples etapas	21
Figura 11. Destilador solar esférico.....	21
Figura 12. Fenómenos que ocurren en las fronteras del destilador.	23
Figura 13. Espectrofotómetro Varian 5.....	34
Figura 14. Espectrofotómetro Nicolet iS50 FT-IR.....	34
Figura 15. Vidrio común de 3 mm, 4 mm y 6 mm.	35
Figura 16. Transmitancia para vidrio común	36
Figura 17. Transmitancia para vidrio templado.....	36
Figura 18. Transmitancia para acrílico.....	37
Figura 19. Transmitancia para diversos materiales.....	37
Figura 20. Absortancia para hollín en silicón.....	42
Figura 21. Absortancia para hypalon y hollín.....	42

Figura 22. Absortancias de MnOFeO para diferentes concentraciones.....	43
Figura 23. Absortancia para diferentes materiales.	43
Figura 24. Emitancia para diferentes materiales.	44
Figura 25. Producción de agua destilada dependiente de la inclinación de los condensadores.	46
Figura 26. Producción de agua destilada dependiente de la altura de la columna de agua..	47
Figura 27. Diagrama del destilador.....	52
Figura 28. Base del destilador con la película absorbedora.....	54
Figura 29. Dispositivo durante la colocación de los condensadores.	55
Figura 30. Destilador terminado.....	55
Figura 31. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 27 de octubre del 2017.....	60
Figura 32. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 24 de febrero del 2018.....	61
Figura 33. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 2 de marzo del 2018.	62
Figura 34. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 24 de marzo del 2018.	63
Figura 35. Volumen destilado a diferentes horas para el 11 de noviembre del 2017.	64
Figura 36. Volumen acumulado para el día 11 de noviembre del 2017.....	64
Figura 37. Volumen destilado a diferentes horas para el 24 de febrero del 2018.	66
Figura 38. Volumen acumulado para el día 24 de febrero del 2018.....	66
Figura 39. Volumen destilado a diferentes horas para el 2 de marzo del 2018.	68
Figura 40. Volumen acumulado para el día 2 de marzo del 2018.....	68
Figura 41. Volumen destilado a diferentes horas para el 24 de marzo del 2018.....	70
Figura 42. Volumen acumulado para el día 24 de marzo del 2018.	70
Figura 43. a) Preparación de las muestras. b) Comparación entre el agua simulada de mar de entrada y las dos diluciones del agua de salida del destilador.....	74
Figura 44. Muestras preparadas en lactosa, del agua de entrada y salida para el agua de grifo y agua simulada de mar después de 24 horas.	74
Figura 45. Temperatura ambiente como función del tiempo.....	79
Figura 46. Irradiación como función del tiempo.	80
Figura 47. Esquema del destilador.....	81

Figura 48. Temperaturas teóricas del absorbedor y condensadores	85
Figura 49. Temperatura del destilador en K para las 7:30 am.....	86
Figura 50. Temperatura del destilador en K para las 10:00 am.	86
Figura 51. Temperatura del destilador en K para las 11:30 am.	87
Figura 52. Temperatura del destilador en K para las 3:30 pm.	87
Figura 53. Temperatura del destilador en K para las 7:00 pm.	88
Figura 54. Temperatura del destilador en K para las 9:00 pm.	88
Figura 55. Magnitud de la velocidad para dos puntos dentro del destilador.....	89
Figura 56. Campo de velocidades en el destilador para las 9:00 am	90
Figura 57. Campo de velocidades en el destilador para las 12:00 pm	90
Figura 58. Campo de velocidades en el destilador para las 3:00 pm	91
Figura 59. Campo de velocidades en el destilador para las 6:00 pm	91
Figura 60. Campo de velocidades en el destilador para las 9:00 pm	92
Figura 61. Contenido de vapor.....	92
Figura 62. Humedad relativa en el destilador a 0 h.....	93
Figura 63. Humedad relativa en el destilador a 0.1 h.	93
Figura 64. Humedad relativa en el destilador a 0.2 h.	94
Figura 65. Humedad relativa en el destilador a 0.5 h.	94
Figura 66. Humedad relativa en el destilador a 0.6 h.	95

Índice de Tablas.

Tabla 1. Concentración de hollín en silicón para diferentes muestras.	39
Tabla 2. Concentración de óxidos en silicón para diferentes muestras.....	41
Tabla 3. Valores promedio de absorbancia y transmitancia de diferentes materiales.....	44
Tabla 4. Materiales utilizados para la construcción.	53
Tabla 5. Mediciones de temperatura para el 27 de octubre del 2017.....	59
Tabla 6. Mediciones de temperatura para el 24 de febrero del 2018.....	60
Tabla 7. Mediciones de temperatura para el 2 de marzo del 2018.	61
Tabla 8. Mediciones de temperatura para el 24 de marzo del 2018.....	62
Tabla 9. Volumen destilado e irradiancia para el 11 de noviembre del 2017.....	63
Tabla 10. Volumen destilado e irradiancia para el 24 de febrero del 2018.	65
Tabla 11. Volumen destilado e irradiancia para el 2 de marzo del 2018.....	67
Tabla 12. Volumen destilado e irradiancia para el 24 de marzo del 2018.....	69
Tabla 13. Eficiencia térmica para diferentes días de medición.....	72
Tabla 14. Datos de parámetros medidos para determinar la calidad de agua destilada.	75
Tabla 15. Expresión de la Irradiancia solar como función del tiempo.	79
Tabla 16. Dimensiones características del destilador para el modelo en COMSOL.	81
Tabla 17. Materiales usados para la simulación en COMSOL.....	82
Tabla 18. Valores de los parámetros utilizados en la simulación numérica.....	83

Nomenclatura.

c	Calor específico; [kJ/(kg·K)]
c	Velocidad del sonido; [m/s]
c	Concentración; [mol/m ³]
G	Generación o consumo de calor, [W/m ³]
Gr	Número de Grashof, [-]
g	Aceleración de la gravedad; [m/s ²]
g	Flux de evaporación; [kg / (m ² ·s)]
H	Insolación, [MJ/m ²]
h	Coefficiente de transferencia de calor, [W/(m ² ·K)]
h	Calor latente; [J/kg]
I	Irradiancia; [W/m ²]
K	Tasa de evaporación de vapor, [m/s]
k	Conductividad térmica; [W/(m·K)]
L	Longitud característica; [m]
M	Masa molar; [kg/mol]
$\dot{m}$	Tasa de flujo de masa; [kg/s]
p	Presión; [kPa]
q	Fuente de calor de evaporación, [W/m ²]
R	Tasa de generación o consumo de humedad, [kg/(m ³ ·s)]
R	Constante del gas; [kJ/(kg·K)]
T	Temperatura; [K]
$\bar{u}$	Velocidad; [m/s]

Letras griegas.

α	Absortancia, [-]
β	Coeficiente de expansión volumétrica; [1/°C]
ε	Emitancia; [-]
η	Eficiencia térmica; [-]
μ	Viscosidad dinámica; [Pa·s]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann; [W/(m ² ·K ⁴)]
τ	Transmitancia; [-]
ξ	Xi, [-]
ρ	Densidad; [kg/m ³]
φ	Humedad relativa; [%]

Subíndices.

a	Aire
abs	Absorbedor
e	Evaporación
g	Vidrio
p	Presión constante
s	Cielo
sat	Saturación
v	Vapor
w	Agua
∞	Ambiente

Abreviaturas.

pH	Potencial de hidrógeno
NMP	Número más probable
PARDISO	Partial Differential Solver
TDS	Total Dissolved Solids, [mg/L]
OSW	Office of Saline Water
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
CSM	Chlor Sulfonated Methylene

Resumen.

El proyecto de investigación “Diseño, construcción y caracterización de un destilador solar pasivo” se centra en construir un destilador solar pasivo de agua de mar, con el objetivo de obtener un dispositivo con una alta eficiencia térmica y producción total de agua diaria.

Se describieron los procesos de transferencia de calor y masa que intervienen en la producción de agua destilada de forma numérica, su dependencia respecto de las características de los materiales y de los parámetros físicos y geométricos, considerando los siguientes componentes de interés: el fondo o colector solar, el cuerpo de agua y los condensadores. Después se ha procedido a describir y estudiar experimentalmente las características de los materiales que constituyen cada parte del módulo, particularmente los condensadores y la superficie selectiva absorbadora para proponer mejores materiales de construcción. Posteriormente se ha procedido a construir el dispositivo, incluyendo las mejoras encontradas y que contemplan, la utilización de los mejores materiales para los condensadores, superficie absorbadora, base del destilador, y la selección del ángulo de inclinación de los condensadores. Por último, se procedió a caracterizarlo. El prototipo construido tiene una eficiencia térmica de 22.2 %, requiriendo únicamente la energía del sol para su funcionamiento y el agua producto, es agua destilada, libre de sales, de gran valor potencial para uso y consumo humano.

Abstract.

The research project "Design, construction and characterization of a passive solar still" focuses on building a passive solar water still, with the aim of obtaining a device with high thermal efficiency and total daily water production.

The heat and mass transfer processes involved in the production of distilled water were described numerically, their dependence on the characteristics of the materials and the physical and geometric parameters, considering the following components of interest: the fund or collector solar, the body of water and the condensers. Then, the characteristics of the materials that make up each part of the module, particularly the condensers and the selective absorber surface to propose better construction materials, have been described and studied experimentally. Subsequently, the device has been built, including the improvements found and contemplated, the use of the best materials for the condensers, absorber surface, base of the distiller, and the selection of the angle of inclination of the condensers. Finally, it has been characterized. The built prototype has a thermal efficiency of 22.2 %, requiring only the energy of the sun for its operation and the product water, is distilled water, free of salts, of great potential value for human use and consumption.

Introducción.

La producción de agua para consumo humano mediante la destilación solar se ha presentado como una alternativa atractiva, ya que el agua destilada por la acción del sol es generalmente muy pura, recibiendo una considerable atención a partir de la segunda mitad del siglo XX en muchas regiones del mundo donde el agua marina abunda, la potable escasea y la irradiación solar es alta, como en el caso de México, y es de esperar que este interés aumente rápidamente en los próximos años (Zhang, Sivakumar, Yang, Enever & Ramezaniapour, 2018).

La misma naturaleza, a partir del ciclo del agua que siguen los océanos, es el claro ejemplo de cómo obtener agua potable. Siendo la destilación solar, la vía que sigue el agua del planeta para llevar a cabo su ciclo, resulta fehaciente emular dicho proceso para la obtención de agua potable a partir del agua de mar o agua salobre.

Los equipos utilizados para destilar agua usando la radiación proveniente del sol, llamados destiladores solares, son útiles en climas cálidos y en lugares en donde la demanda de agua no es muy alta. En cuanto a su producción, dependen en gran medida del dimensionamiento del dispositivo y de los materiales que se utilicen en su fabricación, por lo que son factibles de mejoras en términos de su eficiencia y en la producción total diaria de agua destilada.

En muchas partes del mundo hay falta de agua, incluso en algunos lugares en donde ahora el agua es abundante, existe preocupación por el suministro futuro. Esto ha originado un interés por la implementación de procesos para la producción de agua potable a partir de agua salada en diversas plantas y que involucran un gran consumo de combustibles fósiles por lo que, con el paso del tiempo, estos procesos serán más caros. En contraparte la destilación solar, para unidades pequeñas que van desde algunos litros de agua y hasta plantas de producción de a lo más algunas decenas de miles de litros al día, es mucho más económica, puesto que lo único que se requiere para su operación es la energía proveniente del sol. En este punto es necesario resaltar la gran cantidad de contaminantes que se depositan en la atmósfera por muchos procesos de destilación respecto de la nula emisión de los destiladores solares pasivos. Después de la destilación del agua de mar, se obtiene solamente un concentrado salobre que debe ser devuelto al mar, de manera que su dilución sea de manera inmediata causando el menor impacto posible a la flora y fauna marina. Algunos métodos consisten en diluir la salmuera antes del vertido con más agua de mar, vertido en desembocaduras donde alguna especie vulnerable resulte menos afectada por haber una considerable distancia de alejamiento y el vertido en zonas de fuertes rompientes. En algunos casos se ha procedido a distribuir la salmuera, utilizando difusores que funcionan a través de la agitación, que hace que se homogenice la salinidad de toda la masa de agua de mar que circunda al difusor como cuando se agita sal en un vaso con agua para igualar la concentración.

Respecto del dimensionamiento y componentes, los destiladores solares pasivos tienen muchas formas y son muy variados los materiales usados en su fabricación (Aayush, 2010; Tiris C., Tiris M. & Ture I.E., 1996), pero en todos, el proceso de destilación es semejante (Chiroque, 2018). Entre los principales diseños se puede encontrar a los destiladores solares de una vertiente, en forma de caseta (también llamado australiano o de dos vertientes), en cascada o de múltiple efecto, los que son de tipo invernadero, en forma de pirámide (Nayi & Modi, 2018), los que utilizan concentradores solares (Sathyamurthy & Arunkumar, 2018), los de bandeja inclinada (McCracken, 1965), así

como los que son de forma tubular y en forma de esfera, entre otros (Mahdi, Smith & Sharif, 2011). La mayoría usa como cubierta colectora a distintos tipos de vidrio o acrílico, las tinajas colectoras pueden ser de vidrio, fibra de vidrio (Fonseca et al., 2005), diferentes tipos de acrílico, acero e incluso hay algunos prototipos que están contruidos de ferrocemento (Xiao et al., 2013). Los materiales aislantes son de muchos tipos también y entre ellos se puede mencionar a la lana de vidrio, cartón y el poliuretano.

Haciendo referencia a la problemática actual del país, existen diversos lugares alejados de las ciudades que carecen de agua potable, pero que cuentan con aguas duras o salobres tanto de forma superficial, subterránea y marítima que podrían ser aprovechadas a través de métodos de purificación que sean viables económicamente y acordes con el equilibrio ambiental. De acuerdo al Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (Conagua, 2014), casi nueve millones de personas carecen de agua potable (cinco millones están en zonas rurales) y 11 millones de alcantarillado (7.8 millones en zonas rurales), por lo que resulta indispensable atender el problema de desabasto de agua, volviéndose indispensable utilizar de manera seria la energía solar para desalar agua de mar, en lugares en donde se dan condiciones únicas tanto hidrológicas, geográficas y físicas con costos competitivos.

Capítulo 1.

1.1 Antecedentes.

El dispositivo de destilación solar convencional fue diseñado y construido en 1872 por Carlos Wilson, un ingeniero suizo, para proveer de agua potable a trabajadores (y sus familias) de una mina de salitre y una mina de plata en la zona minera de Las Salinas en el desierto de Atacama cerca de Antofagasta en Chile y que funcionó durante 35 años.

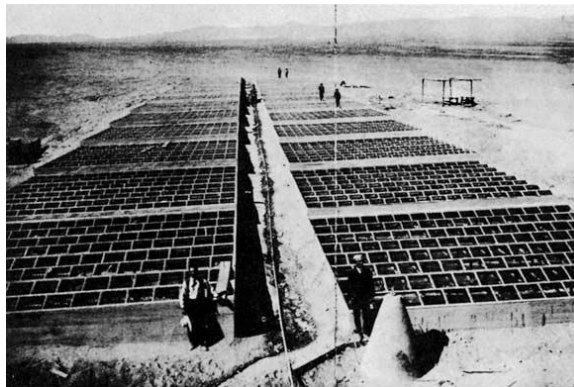


Figura 1. Central de destilación solar en el desierto de Atacama.

Esta planta de destilación producía hasta 23 mil litros diarios de agua y tenía una extensión de 4,450 m². Para el funcionamiento de dicha planta se usaron los efluentes de la mina de salitre, de muy alta salinidad (140 g/L o 140,000 ppm) y el material esencial para su construcción consistió en madera; la planta estuvo en operación hasta que las minas fueron agotadas (Delyannys, 2003).

La siguiente referencia importante sobre el uso de destiladores solares fue al término de la segunda guerra mundial, donde se tiene el registro de que en muchas partes del mundo se probaron diversos módulos de destilación. En el año 1952, fue creada en Estados Unidos la Office of Saline Water of the Department of the Interior (OSW) que incentivó mediante el financiamiento de proyectos, investigaciones sobre la desalación de agua marina. Georg Löf, María Telkes, Bjorksten Research Laboratories y Du Pont iniciaron proyectos de investigación sobre cuatro diferentes tipos de destiladores solares. Para el año de 1955, durante la conferencia internacional sobre el empleo de la energía solar, celebrada en Arizona, se habló sobre experimentos de destilación solar en varios países como Argelia, Australia, Estados Unidos, Italia y la URSS, entre otros (Delyannys, 2003).

La revista Solar Energy durante la década de los sesentas publicó algunos artículos que se centraron en la caracterización del funcionamiento de diversos destiladores solares. Sin embargo, no es sino hasta la publicación de los trabajos de Cooper (Cooper 1969; 1972) que la compleja dinámica de los fluidos en el interior de un destilador solar empieza a entenderse. Cooper presentó un conjunto sistematizado de ecuaciones que describen los flujos de calor y masa y la forma empírica de sus coeficientes de transferencia en un modelo integral de parámetros concentrados que describe el proceso de intercambio de calor y masa entre el agua caliente del destilador solar y la superficie interior del cristal condensador, o cristales condensadores.

Se realizaron grandes instalaciones de destiladores solares en Australia (Wilson, 1957), España, Grecia y Túnez y en diversas islas del Pacífico Meridional funcionaban otras unidades. Ejemplos específicos de instalaciones de destilación solar son las hechas en

algunas islas griegas entre el año de 1965 y 1970 siendo la instalación de la isla de Patmos la más importante, produciendo hasta 40 m^3 de agua al día con $8,500 \text{ m}^2$ de área de captación de energía solar, convirtiéndose en la planta de destilación solar pasiva más grande del mundo en su tiempo. El diseño de los alambiques solares corrió por cuenta de la Universidad Técnica de Atenas, teniendo una estructura de aluminio con cubiertas condensadoras de vidrio y empleando agua de mar (Pocaterra, 2002; Benet, 1967).

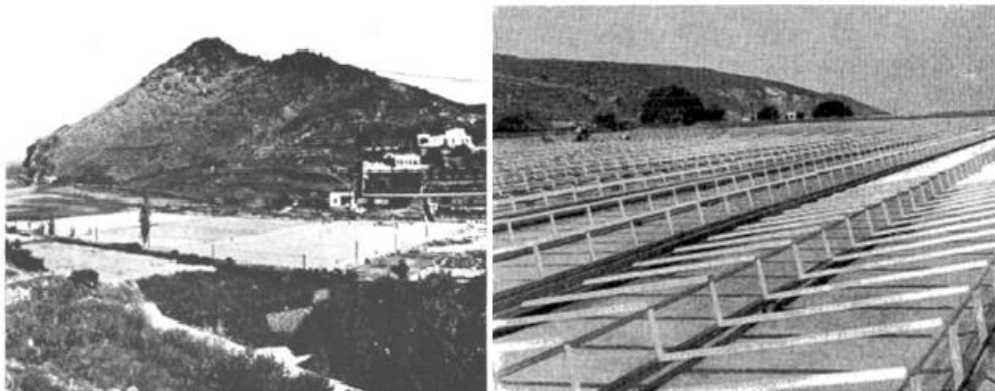


Figura 2. a) Vista panorámica de la planta de destilación en la isla de Patmos. b) Vista cercana de la estructura de la planta de destilación pasiva.

Otro caso importante es el de Australia que fue el único país industrializado que al paso del tiempo continuó con las investigaciones de forma enérgica y cuyo esfuerzo ultimó en notables avances en la descripción de procesos físicos y sobre todo en el diseño de módulos solares. La Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO por sus siglas en inglés) desarrolló plantas de destilación solar en el desierto australiano siendo la más grande de ellas, la planta de destilación solar instalada en Coober Pedy con cubiertas de vidrio (Cooper, 1969), utilizando agua de un pozo salobre.

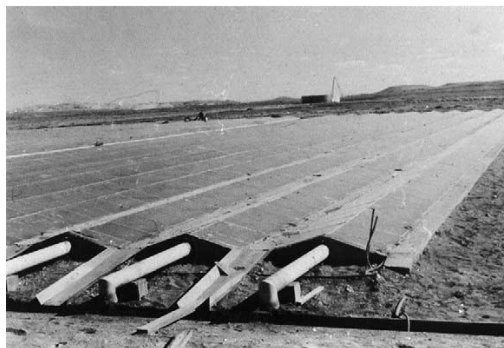


Figura 3. Planta de destilación solar de The Coober-Pedy en Australia.

En México se han desarrollado proyectos de indagación sobre destilación solar (Rincón, 1999), tanto en centros de investigación, universidades e instituciones gubernamentales. Lo anterior incluye la caracterización de diversos aspectos de esta tecnología (Rubio, 2002), como las diversas condiciones de operación (Porta, Chargoy & Fernández, 1997; Rubio, Fernández & Porta, 2004), la determinación de coeficientes de transferencia de calor o la visualización de campos de velocidades (Porta, Rubio & Fernández, 1998), hasta el análisis y desarrollo de simulaciones numéricas. La UAM, la UNAM, la UABCS, el I.T. de La Paz, la ITESO, el CINVESTAV-Mérida, etc., son algunas de las instituciones en el país que han adquirido experiencia en el desarrollo de la desalación a lo largo de décadas, proponiendo mejoras y colaborando con el gobierno en la implementación de esta tecnología.

Un ejemplo de planes gubernamentales radica en los esfuerzos de la oficina de aguas salinas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos que construyó destiladores tipo caseta para lugares apartados durante los años setenta. Se han realizado estudios que permitieron aumentar la producción de agua incorporando mejoras al destilador tipo McCracken¹ de modo que la producción de agua potable aumentó alrededor de un 40% (Chargoy, 2010).

¹ Este destilador es un módulo de una vertiente (ver sección 2.2) con estructura de madera y absorbedor de silicón diseñado por el investigador Horace McCracken (McCracken, 1990)

Desde la década de los setenta, han existido ciertos intentos para instalar plantas de destilación solar en algunas regiones del país. Por ejemplo, en Baja California Sur se instaló una planta (proyecto entre Alemania y México) instalada en el estero de Palmira y que funcionaba con energía solar. Esta colaboración dio paso al proyecto que posteriormente fue conocido como Sonntlán, una planta de destilación solar de múltiples etapas, ubicada en la localidad de Las Barracas, que entró en funcionamiento en 1980 y que consistió en un cluster de concentradores solares de canal parabólico (Bermudez-Contreras, Thomson & Infield, 2008; Pérez & Tanner, 1985).

Otra referencia importante es la planta de destilación solar que se construyó en Puerto Lobos, Sonora, formado por 500 m² de destiladores solares tipo McCracken, con una producción de agua destilada promedio de 1500 litros por día (Chargoy, 2010) pero alcanzando valores máximos de 2000 litros en verano.



Figura 4. Planta de destilación solar de Puerto Lobos, Sonora.

La Secretaría de Marina ha mostrado un gran interés en instalar módulos solares pasivos en islas de su jurisdicción donde cuenta con población y en donde el aprovisionamiento de agua potable es un problema. Lo anterior ha derivado en un trabajo en conjunto entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la UAM-I a través del departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica (Muñoz et al., 2016).

Aunque el tratamiento de aguas con energía solar es una alternativa viable económicamente en México, de las casi 500 plantas de desalación que hay actualmente

en el país, sólo existen 13 plantas de desalación de agua de mar usando energía solar. Estas plantas están ubicadas en Baja California Norte, Baja California Sur, Campeche, Coahuila, Ciudad de México, Jalisco, Quintana Roo, Sonora y Veracruz (Dévora-Isiordia, González-Enríquez, & Ruiz-Cruz 2013).

1.2 Planteamiento del problema.

En lo que respecta a la producción de agua potable, los módulos de destilación dependen en gran medida de las características geométricas, así como el tipo de materiales utilizados para su construcción (Velmurugan & Srithar, 2011; Ali, Muftah, & Alghoul, 2014). Un ejemplo de esto es que la energía solar que pueden aprovechar cada uno de los elementos del equipo es afectada por las características de los materiales utilizados, por lo tanto, resulta indispensable describir experimentalmente la transmitancia, absortancia y reflectancia, para radiación incidente de los materiales condensadores y la membrana absorbedora en la base del destilador.

Es un hecho que el comportamiento del destilador cambia si la resistencia térmica (espesor dividido entre la conductividad térmica), de los aislantes en la membrana del destilador cambia. Mediciones hechas sobre algunos dispositivos revelan que la producción de agua en el destilador cambia al variar el nivel inicial de agua, la inclinación de la cubierta condensadora o las dimensiones de la sección horizontal (Almanza, 1994).

La combinación de todos los factores geométricos y físicos mencionados arriba determina en gran medida la cantidad de agua destilada posible, de manera que la problemática a resolver es la de encontrar las mejores características geométricas y los materiales más apropiados para que el dispositivo tenga una alta eficiencia.

1.3 Justificación.

La destilación de agua de mar por medio de la energía solar es un tema cada vez más estudiado, y aplicado en numerosos países, debido a la demanda creciente de agua potable en muchas partes del mundo. Refiriéndose a nuestro país, la investigación y el desarrollo de nuevas técnicas para la obtención de agua dulce es un asunto primordial, ya que México no es la excepción a la gran demanda del vital líquido.

En el país existen más de 100,000 localidades rurales marginadas (30% de la población mexicana) que padecen los escasos de agua potable, muchas de ellas solamente disponen de agua salina como es el caso de las comunidades pesqueras. Sumado a lo anterior, es importante recalcar la gran contaminación que presentan los cuerpos de agua en todo el país, debido al desmedido desarrollo industrial, incrementando el problema de obtener fuentes de agua factibles para su consumo. También hay que mencionar el crecimiento poblacional, la sobreexplotación de los acuíferos y la falta de infraestructura para llevar el agua a regiones distantes, motivos que dan una gran relevancia a los estudios enfocados a la obtención de agua potable.

México es uno de los países con mayor radiación solar promedio anual, aproximadamente 5 kWh/m²-día inciden en promedio sobre la ciudad de México. También existen en el norte y noroeste del país zonas con radiación total que va de los 5.6 kWh/m²-día a 6.1 kWh/m²-día (Aleman-Nava et al., 2014), esta alta radiación puede ser utilizada para la obtención de agua potable a partir de agua de mar, salobre o de baja calidad por medio de procesos de destilación solar, sobre todo porque el país cuenta con extensas costas que proporcionan agua de mar. Por lo anterior, la desalación mediante evaporación con la energía solar resulta idónea en muchas regiones, ofrece también grandes ventajas debido al bajo costo respecto al transporte de agua potable desde centros de abastecimiento, o la construcción, instalación y operación de los equipos que suministren agua potable a partir de agua salobre que resultan insostenibles para las comunidades alejadas de las grandes ciudades. Es importante

resaltar que, en la evaporación de agua salobre, el sol es el único requerimiento energético de los dispositivos destiladores pasivos.

Por lo dicho hasta ahora, a sabiendas de las características privilegiadas con que cuenta el país en el recurso solar y por otra parte la carencia de agua de alta calidad en diversas partes del territorio nacional, la investigación en el diseño y la implementación de mejoras en la manufactura de módulos de destilación solar se muestran como una gran alternativa para la obtención de agua potable.

1.4 Pregunta de investigación.

De manera general, las preguntas de investigación que contribuyen a clarificar el planteamiento del problema son las siguientes:

¿Qué características debe tener un destilador solar pasivo para generar la mayor cantidad de agua diaria posible? ¿Cómo afectan la forma y dimensiones del dispositivo, el tipo de materiales y sus características en el aprovechamiento de la radiación que recibe y en la eficiencia para destilar?

En cuanto a las características físicas de los materiales usados:

¿Cómo son la absorptancia y emitancia de la superficie selectiva absorbidora de silicón con pigmentos selectivos y cuál es su impacto en los coeficientes de transferencia de calor y masa?

¿Cómo cambia la transmitancia espectral para distintos materiales de cubiertas condensadoras?

En cuanto al problema de dimensionamiento:

¿Cuáles son las dimensiones óptimas del dispositivo para obtener la mayor producción instantánea?

¿Cuál es el espesor óptimo del espejo de agua y su relación con la producción total del destilado?

¿Qué ángulo deben formar los condensadores respecto de la horizontal para favorecer la condensación e incrementar la producción?

En cuanto a la caracterización del dispositivo:

¿Cuál es la producción diaria? ¿Cuál es la eficiencia del dispositivo?

¿Cuál es la variación en las temperaturas de los condensadores, la temperatura del fondo del destilador y el agua?

¿Cuáles son las características físico-químicas del agua destilada?

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

El objetivo general consiste en implementar mejoras en la construcción de un destilador solar pasivo para aumentar la eficiencia (cantidad de calor útil total a lo largo del día entre la cantidad de insolación total recibida), una mayor productividad total diaria que es la cantidad de líquido condensado por unidad de área por día usando materiales resistentes a las condiciones reales de operación, de tal manera que consiga un prototipo funcional con características que permitan su uso de manera prolongada.

1.5.2 Objetivos particulares.

Para poder obtener el prototipo de destilación buscado y evaluar su desempeño, se pretende cumplir con los siguientes objetivos:

- Determinar los mejores materiales de fabricación, mediante el estudio de su comportamiento, para ser utilizados en las cubiertas condensadoras y membrana colectora.
- Construir el destilador solar de bajo costo, pero de los materiales apropiados que permitan durabilidad y flexibilidad en la operación y mantenimiento, haciendo uso de los resultados de los estudios previos.
- Caracterizar el destilador solar de acuerdo con la producción de agua, eficiencia y calidad del agua.
- Desarrollar una simulación numérica.

1.6 Metodología.

La metodología a seguir comienza en la revisión del estado del arte. Una clara comprensión de los procesos físicos dentro del destilador solar permitirá una descripción que conduzca a la incorporación de mejoras. La revisión bibliográfica se centra, primeramente, en la búsqueda de información que describa el funcionamiento de los destiladores solares respecto de los procesos físicos de transferencia de calor (tanto en dominios sólidos como fluidos), de momento (flujo de fluidos) y de transporte de especies químicas (Vapor de agua en aire seco) incluyendo naturalmente, las ecuaciones que representan dichos procesos y las condiciones de frontera en cada contorno del módulo.

Otro punto importante dentro de la revisión bibliográfica consiste en la integración de información referente a los valores de los parámetros involucrados como pueden ser el calor específico, la conductividad térmica, la densidad, la viscosidad dinámica, la difusividad másica, la emitancia, absorptancia y transmitancia de la radiación solar, etc. de cada elemento que constituye al dispositivo (Meinel, 1982; Howe & Tleimat, 1977).

En lo referente a la geometría y dimensiones, se ha puesto interés en la revisión de los distintos tipos de destiladores para seleccionar a aquel o aquellos que serán objeto de estudio tomando en cuenta puntualmente el costo de fabricación, el tamaño, operación y mantenimiento, así como su portabilidad.

También se deben considerar en la revisión, la información relacionada con la producción de agua destilada y su relación con el dimensionamiento como puede ser la inclinación de las cubiertas condensadoras y la altura de la columna de agua salobre. Por último, es necesario hacer una revisión de las plantas de destilación solar que se han puesto en funcionamiento a fin de verificar su implementación y continuidad de uso, utilidad y dificultades de operación, tanto en el mundo como en el caso particular de México.

En segunda instancia se pretende hacer un estudio sobre los materiales que podrían utilizarse para la superficie absorbadora. En particular se debe considerar al hypalon, que es un caucho sintético, también conocido por su abreviatura internacional como CSM (Chlor Sulfonated Methylene), y que es usado de manera comercial en la fabricación de destiladores solares. Éste servirá como referencia respecto de los materiales a considerar: Silicón con pigmentos comerciales, así como hollín u óxidos de hierro-manganeso en una matriz de silicón. El estudio consiste en analizar la emitancia y la absortancia de estas películas para un rango de longitudes de onda que van desde la región ultravioleta, pasando por el intervalo del espectro visible, hasta la región del NIR. Los mejores materiales serán aquellos con una alta absortancia de la radiación solar, ya sea que se asemejen al hypalon o que tengan un comportamiento mejor.

Posteriormente se deben analizar distintos materiales para el elemento condensador del módulo. El parámetro a considerar es la transmitancia espectral para un rango amplio de longitudes de onda. Los materiales considerados son el acrílico, el vidrio comercial, el vidrio extra claro y el vidrio templado. Todos estos materiales serán analizados para diferentes grosores y que van de los 3 mm a los 6 mm. Debe tomarse

en cuenta la transmitancia promedio de manera que los materiales que tengan el valor más alto, serán los candidatos para su uso como superficies absorbedoras.

Por último, haciendo uso de la información recopilada, se procede a construir el módulo de prueba y a caracterizarlo respecto de la producción de agua, eficiencia térmica y calidad del agua destilada (calidad fisicoquímica y bacteriológica), además de cuantificar la variación en la temperatura del condensador, la temperatura del fondo del destilador y el agua a lo largo del día para tener un punto de comparación respecto de los resultados teóricos obtenidos en la simulación numérica.

A la par de la construcción y la caracterización del destilador se desarrollará un modelo tridimensional, que contemple las características geométricas, los valores de los parámetros físicos involucrados en el fenómeno de la destilación y la inclusión de las ecuaciones de balance térmico y de momento, que pueda reproducir los perfiles de temperatura y el flujo y que además considere la variación de la radiación solar a lo largo del día y a lo largo del año, así como la posición geográfica y la variación de la temperatura ambiente a lo largo del día.

Capítulo 2. Fundamentos y conceptos generales sobre destilación solar pasiva.

2.1 Elementos de un destilador solar y su funcionamiento.

Las formas y materiales en que están constituidos los módulos de destilación solar son muy variados, sin embargo y de manera general, un destilador solar simula el ciclo natural del agua del planeta en cada una de sus etapas a pequeña escala independiente del tipo que sea.

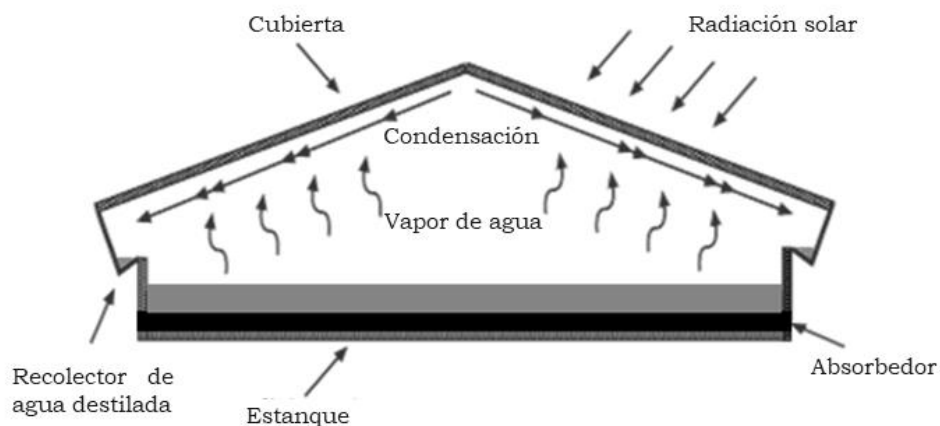


Figura 5. Elementos de un destilador solar pasivo.

El módulo destilador consiste en un espacio cerrado que contiene por lo menos un estanque con un fondo de color negro, en donde se deposita el agua contaminada o salobre que se va a destilar. El fondo de color negro en realidad es una superficie absorbidora de la radiación solar, que debe tener una alta absorptancia y una baja emitancia, de manera que maximice el aprovechamiento del calor por radiación solar recibida para calentar el agua en el estanque favoreciendo la evaporación del agua (Tiara, 2003).

Por encima del estanque hay por lo menos una superficie condensadora transparente (en la Figura 5 se muestra un destilador con 2 cubiertas condensadoras) con una alta transmitancia, permitiendo pasar la mayor cantidad de radiación solar posible y reteniendo la humedad en el interior del dispositivo. El vapor de agua asciende entonces por convección natural hasta llegar a la cubierta. Finalmente, es en este punto en donde el vapor se condensa formando gotas, que por gravedad migran hacia los canales colectores de agua destilada de manera que las canaletas llevan el agua fuera del módulo para ser recolectada.

Como se mencionó anteriormente, existen diversos prototipos de destilación que siguen el funcionamiento ya descrito; algunos de los destiladores más usados son:

Destilador solar de una vertiente. Consiste en un destilador con sólo un cristal condensador inclinado, el agua condensa y viaja por el condensador hasta llegar al canal que se encuentra del lado más bajo del cristal para después ser recolectada (Yadav, & Prasad, 1991).

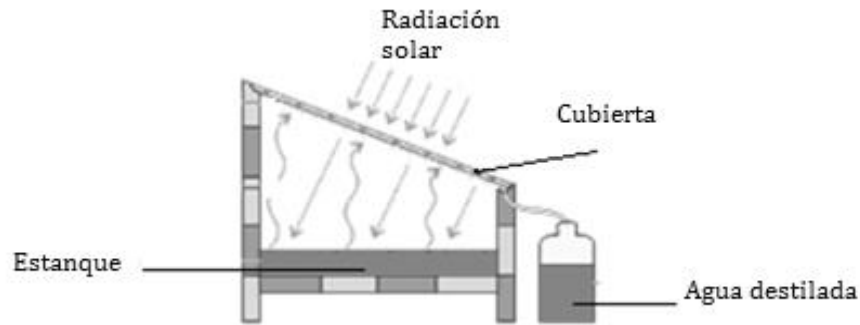


Figura 6. Destilador solar de una vertiente.

Destilador solar de dos vertientes. Este modelo también llamado australiano, consta de un “tejado” de material transparente. Las gotas de agua que se han condensado en el panel transparente se deslizan por los lados y precipitan a un depósito situado bajo la bandeja o a los canales que recolectan el líquido para posteriormente recolectarla por alguna salida (Rubio, Porta, & Fernández, 2000; Rubio, Porta, & Fernández, 2002).

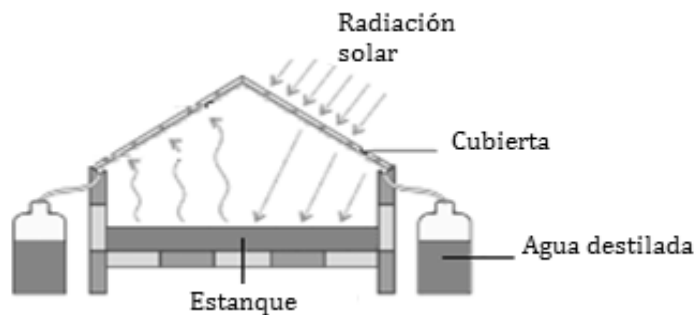


Figura 7. Destilador solar de dos vertientes.

Destilador solar de invernadero. Como su nombre lo indica, tiene una estructura de invernadero, muy similar al destilador de dos vertientes salvo por tener mayores dimensiones.

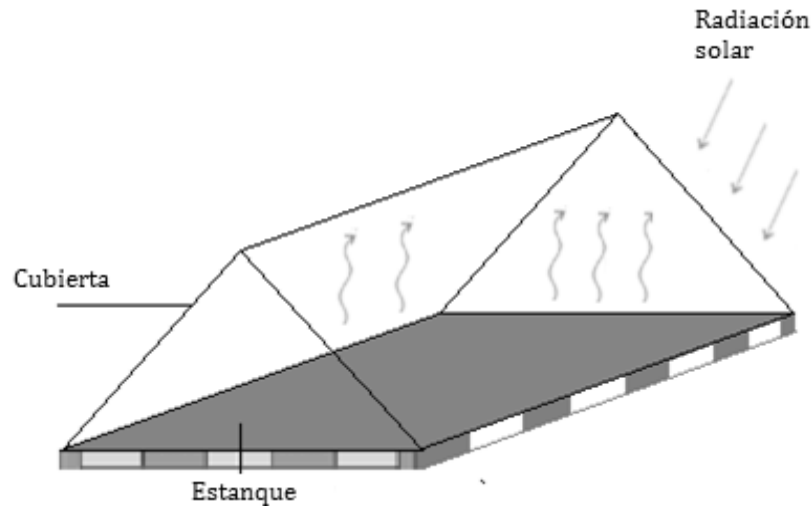


Figura 8. Destilador solar de invernadero.

Destilador solar de cascada. Consiste en un destilador de múltiples estanques cada uno con su respectiva superficie absorbidora de la radiación, al igual que en los casos anteriores, el vapor de agua se condensa en un vidrio que lleva a las gotas de agua hasta la zona de captación de agua destilada (Sarkar M.N.I., Sifat A.S., Reza S.M.S., & Sadique, M.S., 2017).

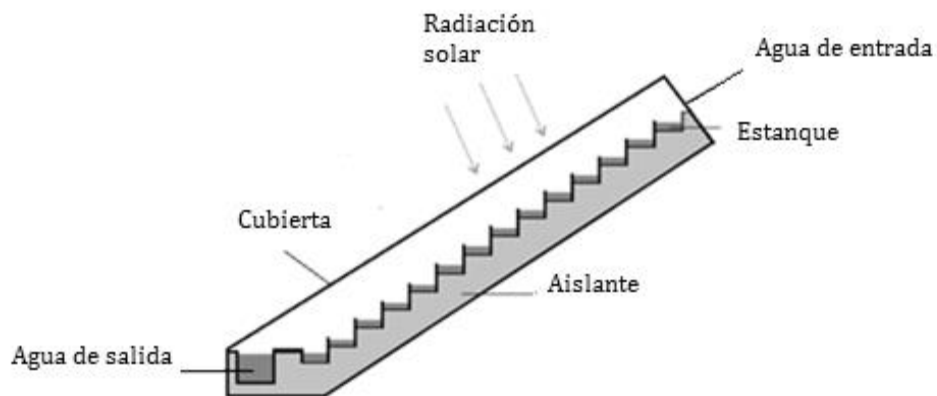


Figura 9. Destilador solar de cascada.

Destilador solar de múltiples etapas. Es un destilador que está compuesto por dos o más estanques ubicados uno arriba del otro como se ve en la Figura 10. Utiliza el calor

latente de vaporización que es liberado por el cristal del estanque inferior para calentar el agua del que se encuentra arriba, evitando así, las pérdidas de calor hacia el ambiente. El reservorio superior funciona también como la cubierta transparente para la cuenca inferior (Fernández & Chargoy, 1990).

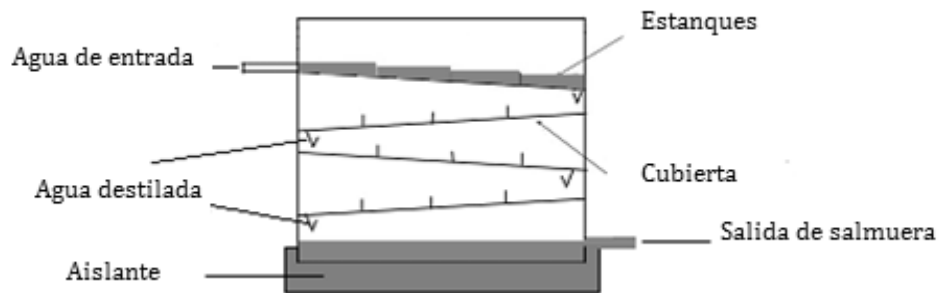


Figura 10. Destilador solar de múltiples etapas

Destilador solar esférico. Como su nombre lo declara, la forma esférica del material transparente es la principal característica de este tipo de destiladores.

Es necesario resaltar que estos dispositivos son necesariamente de acrílico, por lo que es ineludible una barredera para juntar el agua y que recorre su cara interna. En el fondo de la esfera se deposita el agua destilada

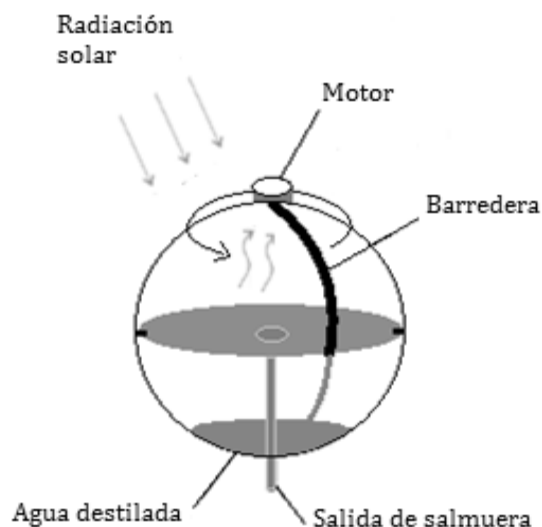


Figura 11. Destilador solar esférico.

Los destiladores solares dependen en gran medida de las condiciones ambientales (tales como la temperatura y la irradiación). Las regiones con mayor temperatura y radiación solar son las idóneas para el uso de la destilación solar, pues tienen un mejor desempeño. En estas regiones óptimas es posible ahorrar hasta 300 kg de petróleo por metro cuadrado y por ende el ahorro económico es importante si se compara con el costo de fabricarlos.

La fracción de energía solar útil para destilar agua a través de los módulos solares se encuentran entre el 20% y 30%, es decir, hasta un tercio de la energía radiante es aprovechada para obtener agua potable de manera que es posible obtener de 3 a 5 litros de agua apta para consumo por cada m^2 de área de destilación

2.2 Procesos físicos dentro del destilador.

Para describir los procesos físicos que ocurren en los destiladores solares pasivos se puede considerar a manera de ejemplo, el destilador que se muestra en la Figura 12, en donde se pueden visualizar los elementos que lo componen y la orientación que tiene respecto de los ejes coordenados (los demás tipos de destiladores pueden ser estudiados de manera semejante, incluyendo las variaciones geométricas y coordenadas pertinentes).

Los procesos de transporte en el destilador involucran la transferencia de calor por convección natural y por conducción además de la transferencia por radiación proveniente del sol, tomando en cuenta las fracciones de ésta que llegan a cada parte del dispositivo debidas a la descomposición del haz inicial y que se relacionan con la transmitancia, absortancia y reflectancia de cada región del destilador. Respecto del flujo de fluidos hay que considerar la convección natural en la columna de agua y en el aire dentro del destilador, además de la migración del vapor de agua en la región del aire que migra desde el espejo de agua hasta el condensador y que se relaciona con los calores latentes de evaporación en la frontera agua-aire y de condensación en el vidrio.

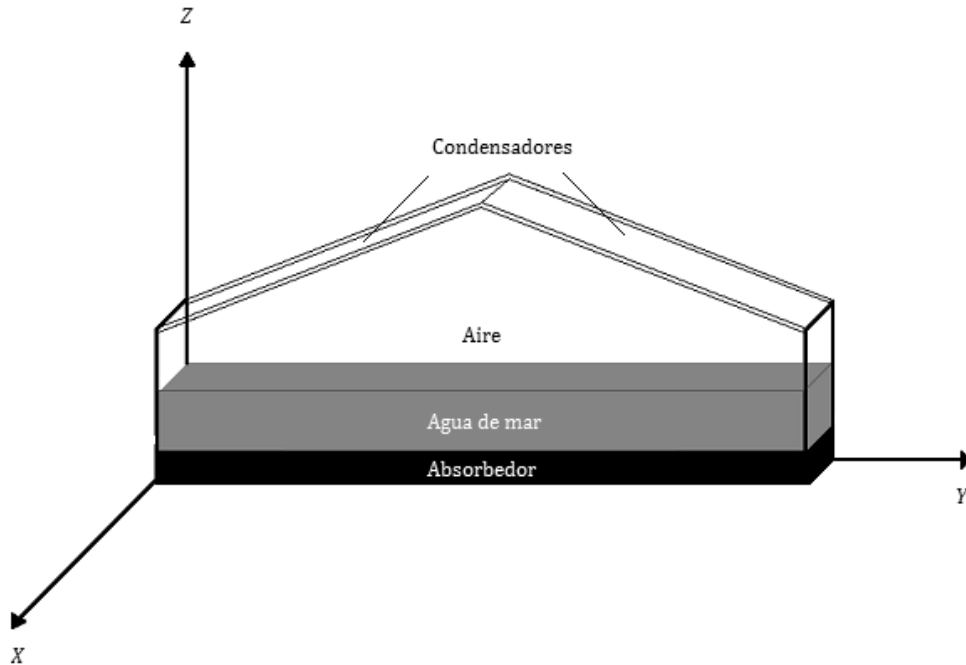


Figura 12. Fenómenos que ocurren en las fronteras del destilador.

En general, hay que describir el transporte de energía, de momento y de masa a partir de sus respectivas leyes y ecuaciones de conservación. Existe una gran similitud entre las diferentes leyes de conservación y éstas pueden resumirse en una expresión general de balance de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{(tasa de acumulacion de } \xi \text{ en un tiempo dado)} \\
 &= \text{(tasa de entrada de } \xi) - \text{(tasa de salida de } \xi) \\
 &+ \text{(tasa de generación de } \xi) - \text{(tasa de consumo de } \xi)
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde ξ representa la energía, cantidad de movimiento o masa.

2.2.1 Transporte de energía.

Si se desea describir el comportamiento de la temperatura en algún sistema se utiliza la primera ley de la termodinámica. En ella se considera el cambio de energía interna como el resultado del suministro de energía por calor y por trabajo, así como la

generación y consumo de la misma (Cengel, 2007). Por lo anterior, el balance térmico en el sistema de estudio está regido por la ecuación:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \bar{v} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + G \quad (2)$$

aquí T representa a la temperatura medida en Kelvin, ρ es la densidad del medio en kg/m^3 , c_p es el calor específico a presión constante en $\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$, k representa a la conductividad térmica con unidades de $\text{W/kg}^\circ\text{K}$ y G es el termino de generación o consumo de energía en el medio en W/m^3 . En la ecuación (2) $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ es el término acumulativo, $\rho c_p \bar{v} \cdot \nabla T$ es el flujo de calor por convección y $k \nabla^2 T$ representa el calor por conducción.

La condición de frontera en la interface vidrio-aire es

$$-k_g \frac{dT_g}{dz} = h_g(T_g - T_\infty) - Q_r + \varepsilon_g \sigma [T_g^4 - T_s^4] \quad (3)$$

Donde $-k_g \frac{dT_g}{dz}$ representa el flujo de calor debido a varios fenómenos: la convección del vidrio al ambiente dado por la expresión $h_g(T_g - T_\infty)$, la radiación incidente del sol sobre el dispositivo Q_r , y el calor perdido por radiación del vidrio (ley de Stefan-Boltzmann) $\varepsilon_g \sigma [T_g^4 - T_s^4]$.

La ecuación de balance de energía dentro del vidrio, partiendo de la ecuación (1) queda como

$$\rho_g c_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} = -k_g \nabla^2 T_g \quad (4)$$

Donde el primer término representa la tasa con la cual se suministra energía al vidrio y el segundo miembro, el transporte de energía térmica por conducción.

Para la frontera vidrio aire (dentro del destilador) se tiene la condición:

$$-k_g \frac{dT_g}{dz} = -h_g(T_g - T_a) - \tau_g Q_r + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g}} [T_w^4 - T_g^4] - \dot{m}_{cond} h_{fg} \quad (5)$$

Donde la tasa con la que se suministra energía se debe al transporte convectivo $h_g(T_g - T_a)$; a la radiación incidente multiplicada por la transmitancia del vidrio $\tau_g Q_r$, la radiación que incide desde el espejo de agua $\frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g}} [T_w^4 - T_g^4]$ y el calor obtenido por condensación del agua evaporada desde la interfaz agua- aire y que es el calor latente multiplicado por el flujo de masa de agua condensada $\dot{m} h_{fg}$

Considerando la continuidad del flujo se tiene

$$k_g \frac{dT_g}{dz} = k_a \frac{dT_a}{dz} \quad (6)$$

Para la columna de aire dentro del destilador se tiene que

$$\rho_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a c_{pa} \bar{u}_a \cdot \nabla T_a = k_a \nabla^2 T_a \quad (7)$$

Siendo $\rho_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial t}$ la acumulación; $\rho_a c_{pa} \bar{v}_a \cdot \nabla T_a$ el transporte por convección; y $k_a \nabla^2 T_a$ el transporte por conducción.

En la frontera aire-agua se tiene que

$$\begin{aligned} -k_w \frac{dT_w}{dz} = & -h_w(T_w - T_a) - \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g}} [(T_w + 273.15)^4 - (T_g + 273.15)^4] \\ & + \tau_g Q_r - \dot{m} h_{fg} \end{aligned} \quad (8)$$

Donde $-h_w(T_w - T_a)$ es el transporte por convección; $-\frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g}} \left[(T_w + 273.15)^4 - (T_g + 273.15)^4 \right]$ es la radiación emitida por el espejo de agua; $\tau_g Q_r$ es la radiación solar que llega; y $-\dot{m}h_{fg}$ el flujo de calor de evaporación.

Con la condición adicional que establece la continuidad del flujo

$$k_a \frac{dT_a}{dz} = k_w \frac{dT_w}{dz} \quad (9)$$

En la región del agua la ecuación que establece el balance de energía térmica es:

$$\rho_w c_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \rho_w c_{pw} \bar{u}_w \cdot \nabla T_w = k_w \nabla^2 T_w \quad (10)$$

Para la frontera agua-absorbedor se tienen las condiciones de frontera

$$-k_{abs} \frac{dT_{abs}}{dz} = -h_{abs}(T_{abs} - T_w) - \tau_w \tau_g Q_r \quad (11)$$

Y

$$k_{abs} \frac{dT_{abs}}{dz} = k_w \frac{dT_w}{dz} \quad (12)$$

Donde $-h_{abs}(T_{abs} - T_w)$ es el término convectivo; $-\tau_w \tau_g Q_r$ es el término radiativo que representa la radiación que llega del sol multiplicada por las transmitancias del vidrio y del agua.

Finalmente, para el absorbedor la ecuación que obedece es

$$\rho_{abs} c_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} = -k_{abs} \nabla^2 T_{abs} \quad (13)$$

Ya que el destilador está aislado en la parte inferior se tiene la condición de frontera

$$k_{abs} \frac{dT_{abs}}{dz} = 0 \quad (14)$$

2.2.2 Transporte de cantidad de movimiento.

Hasta aquí solamente se han tomado en cuenta los procesos de transferencia de calor; sin embargo, es un hecho que hay un flujo convectivo natural de vapor de agua hacia el vidrio colector del módulo de destilación, así como un movimiento convectivo de la columna de agua que está en contacto con el recubrimiento selectivo en el fondo del destilador. Para ambos casos es necesario considerar las ecuaciones de Navier-Stokes, así como por la ecuación de continuidad. Las ecuaciones de Navier-Stokes determinan el movimiento de los fluidos y representan la segunda ley del movimiento de Newton aplicado a líquidos y gases. En el caso de un fluido compresible, se tiene que:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \bar{v} + (\nabla \bar{v})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \bar{v}) \mathbf{I} \right) + \rho \bar{g} \quad (15)$$

donde $\bar{v}$ es la velocidad; p la presión; ρ la densidad; y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Los términos en orden de aparición en la ecuación (15) corresponden a las fuerzas de inercia, las fuerzas de presión, las fuerzas viscosas y las fuerzas externas aplicadas al fluido.

Estas ecuaciones siempre se resuelven junto con la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (16)$$

donde $\rho = \rho(p, T)$

Las ecuaciones de Navier-Stokes representan la conservación del momento, mientras que la ecuación de continuidad representa la conservación de la masa.

Si se desea considerar un fluido incompresible como podría ser una aproximación aceptable para la columna de agua, la ecuación (15) se reduce a:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{v} + \rho \bar{g} \quad (17)$$

Para obtener una expresión de la dependencia funcional de la densidad respecto de la temperatura y presión se puede proceder de la siguiente manera: la variación de la densidad puede suponerse como función del gradiente térmico y despreciarse las variaciones de densidad en el fluido excepto en el término gravitatorio de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en dirección vertical, esto se conoce como la aproximación de Boussinesq (Bejan, 1995). Para considerar que esta aproximación es válida se debe cumplir lo siguiente:

1. El número de Mach, denotado por Ma y definido como el cociente entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido, es pequeño. Esto implica que las velocidades en el fluido deben ser mucho menores que la velocidad del sonido c (Cengel & Boles, 2007). De esta manera se asegura que la densidad no depende de la velocidad de flujo.
2. La escala vertical del movimiento debe ser menor a c^2/g . Esto asegura que a medida que la presión aumenta con la profundidad, el incremento en la presión sólo produce pequeños aumentos en la densidad.

Por lo anterior, la densidad se supone que varía solamente con la temperatura, de la siguiente manera:

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (18)$$

Donde β es el coeficiente de expansión volumétrica y ρ_0 es una densidad de referencia. Sustituyendo (18) en (17) y reacomodando términos se tiene que:

$$\rho_0 \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho_0 \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = -\nabla(p - p_0) + \mu \nabla^2 \bar{v} + \rho_0 \beta (T - T_0) \bar{g} \quad (19)$$

Para la solución de las ecuaciones anteriores, es necesario considerar un conjunto de condiciones de frontera y que son: condiciones de entrada, condiciones de salida y condiciones de pared (estas últimas se dividen en condiciones de deslizamiento y condiciones de no deslizamiento). En el caso del destilador, no hay entradas, sólo se supone una salida en los condensadores, y no hay deslizamiento en las paredes del módulo.

Es de gran importancia verificar si el flujo es laminar o turbulento. Para un problema de convección natural, esto se hace calculando el número de Grashof (Malik, Tiwari, Kumar, & Sodha, 1982):

$$Gr = \frac{g(T_s - T_a)L^3}{\nu^2 T_a} \quad (20)$$

El número de Grashof es la relación entre la flotabilidad y las fuerzas viscosas. Dependiendo del valor obtenido para este parámetro, se determina si la convección es despreciable, si el flujo es laminar, o si el flujo es turbulento. Cálculos realizados para el número de Grashof en condiciones comunes a los destiladores solares, indican que, para el caso del aire dentro del dispositivo, por lo general, el flujo es turbulento.

2.2.3 Transporte de masa.

Por último, hay que considerar el transporte de vapor de agua en aire seco. la expresión que describe dicho proceso es la ecuación de transporte de una especie química y que tiene la forma:

$$M_v \left(\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c_v) + \bar{v} \cdot \nabla c_v \right) = R \quad (21)$$

M_v representa la masa molar del vapor de agua en kg/mol, c_v es la concentración molar en mol/m³, D es la difusividad con unidades de m²/s, $\bar{v}$ es la velocidad del fluido en m/s y R la generación o consumo de humedad en kg/(m³·s). Los términos que están en

la ecuación (21) corresponden en orden de aparición a la acumulación de concentración, el transporte convectivo, el transporte difusivo y el término de generación o consumo.

Una variable estándar utilizada para cuantificar la cantidad de humedad en el aire es la humedad relativa φ , ésta expresa un estado relativo hacia la saturación y es la relación entre la presión parcial del vapor en el aire p_v y la presión de saturación a una temperatura dada $p_{sat}(T)$:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{sat}(T)} \quad (22)$$

Como primera aproximación, se supone que la presión parcial p_v es homogénea. Sin embargo, debido a la dependencia de la presión de saturación de la temperatura, se debe tener en cuenta que la humedad relativa no es realmente homogénea, ya que los gradientes de temperatura están presentes.

La relación entre la humedad relativa y la concentración de vapor está dada por:

$$c_v = \varphi c_{sat}(T) \quad (23)$$

con $c_{sat}(T)$ como la concentración de saturación de vapor.

Para establecer las condiciones de frontera para el transporte de vapor es necesario considerar que la destilación ocurre desde la superficie del agua debido al flujo del aire. La evaporación crea un estado de vapor saturado (en función de la temperatura) en la interfaz aire-agua líquida, donde se transporta y se repone con aire no saturado mediante convección y difusión.

La energía requerida para mantener la evaporación se extrae de la energía interna del agua líquida y como resultado se enfría a menos que haya una fuente de calor que suministre energía al cuerpo de agua (superficie absorbadora). En el modelo, la evaporación se produce cuando la concentración de vapor se mantiene por debajo del

estado de saturación y justo por encima de la superficie del líquido. El flux de evaporación se expresa como:

$$g_e = M_v K (c_{sat} - c_v) \quad (24)$$

donde g_e se mide en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; M_v en kg/mol ; K es el factor de tasa de evaporación en m/s ; y c_{sat} y c_v son la concentración de saturación de vapor y la concentración de vapor respectivamente, en mol/m^3 .

La fuente de calor de evaporación q en W/m^2 , será entonces, la multiplicación del flujo de evaporación por el calor latente de evaporación h_{fg} :

$$q = -h_{fg} g_e \quad (25)$$

donde h_{fg} es el calor latente de la evaporación del agua en J/kg .

Capítulo 3. Diseño y caracterización experimental de materiales.

Para el diseño del módulo de destilación se deben realizar estudios sobre los materiales a utilizar en cada sección del prototipo, así como la geometría y dimensiones apropiadas para el mismo. De manera puntual, se deben hacer estudios en cuanto a la transmitancia de los condensadores y la dependencia que tienen del tipo de material y del grosor; también hay que experimentar con la emitancia y absortancia de distintos materiales que se pueden utilizar para el absorbedor (Cooper, 1969b; Christoph, Hernández, Muñoz, Ventura & Büscher, 2018). Entre las dimensiones óptimas del destilador a considerar se encuentran la altura del espejo de agua, el espaciamiento entre ella y el condensador, la inclinación de los condensadores, etc., pues son éstos los que influyen en la producción de agua diaria.

Para el estudio de las transmitancias y absortancias se utilizó un espectrofotómetro VARIAN 5E (Figura 13) que trabaja en las regiones UV / Vis / NIR [250 nm, 2500 nm] así como un espectrofotómetro Nicolet iS50 FT-IR (Figura 14) para las emitancias y que

opera de $[2.5 \mu m, 25 \mu m]$ ambos con un paso de 1nm de resolución en respuesta espectral para la correspondiente propiedad óptica.



Figura 13. Espectrofotómetro Varian 5.



Figura 14. Espectrofotómetro Nicolet iS50 FT-IR.

3.1 Cubiertas condensadoras.

El condensador realiza funciones muy importantes en la operación de un destilador solar pasivo. Además de llevar a cabo la condensación por pérdida de calor hacia el ambiente, debe tener una transmisión de la radiación solar elevada. En otras palabras, la transmitancia en el rango que va de los 250 nm a los 2500 nm debe ser alta. Por el contrario, τ debe ser baja para longitudes de onda largas, de los 3000 nm en adelante,

este rango corresponde a la radiación emitida por el absorbedor lo que implica que se genere un efecto invernadero dentro del módulo favoreciendo el proceso de destilación. La transmitancia depende del material que se evalúe y también del grosor del mismo, por lo que resulta importante estudiar diferentes materiales para los condensadores y diferentes grosores de los mismos.

Entre los materiales a considerar se encuentra el vidrio común de ventana, el vidrio templado, el vidrio extraclaro y el acrílico entre otros. Para cada uno de estos materiales y considerando el valor de τ dependiente de la longitud de onda, se deben considerar y analizar diferentes grosores, de esta manera es posible encontrar él o los candidatos idóneos para las cubiertas condensadoras.

Se utilizó un espectrofotómetro VARIAN 5E para evaluar el comportamiento de τ en un intervalo de longitudes de onda de [250nm, 2500nm] con un paso de 1nm.

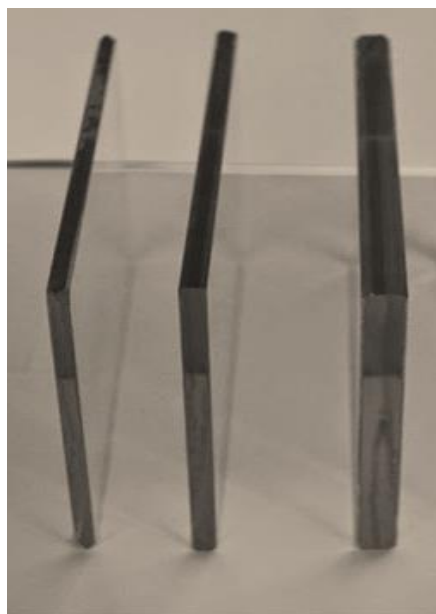


Figura 15. Vidrio común de 3 mm, 4 mm y 6 mm.

Para el caso del vidrio común y para grosores que van de los 3 mm a los 6 mm se encontró que valores para la transmitancia promedio son de 80.1%, 77.4%, 72.1% y 70.1% para vidrios de 3 mm, 4 mm, 5 mm y 6 mm, respectivamente (ver Figura 16).

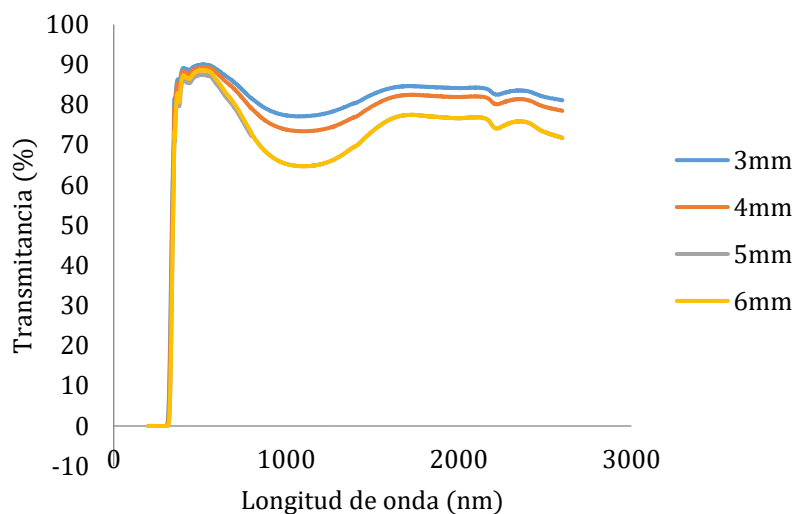


Figura 16. Transmitancia para vidrio común

En el caso del vidrio templado también se analizaron los valores de τ para vidrios con grosores que van de 3 mm a 6 mm. Los valores para la transmitancia promedio son de 78.2%, 75.8%, 70.4% y 70.2% para vidrios templados de 3 mm, 4 mm, 5 mm y 6 mm, respectivamente (ver Figura 17).

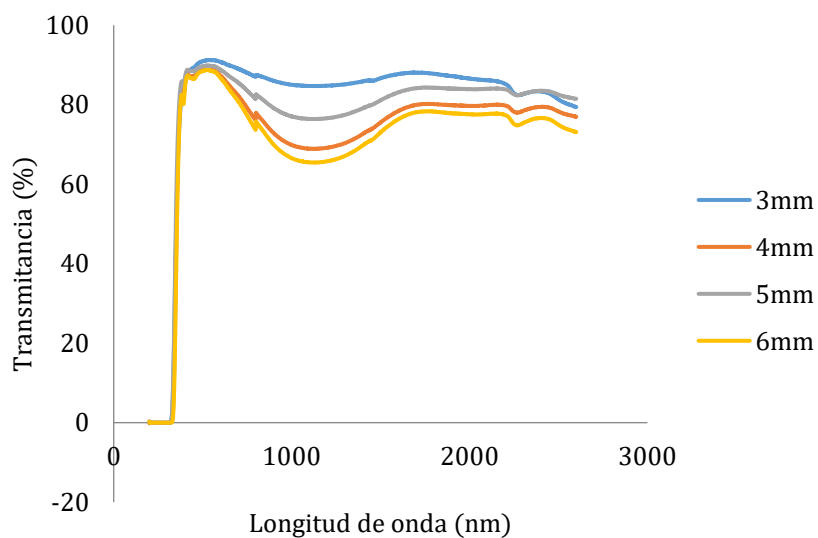


Figura 17. Transmitancia para vidrio templado.

Para el acrílico sólo se evaluaron los valores de τ para muestras de 3 mm y 6 mm (Figura 18) debido a las dificultades para conseguir acrílico en otros grosores. Los valores promedio son 52.5% y 45.2% para grosores de 3 mm y 6 mm, respectivamente.

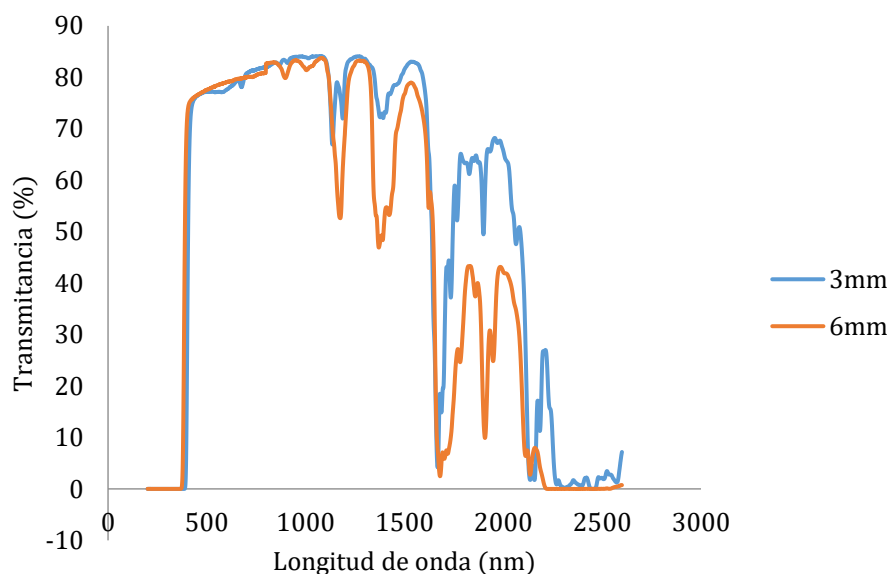


Figura 18. Transmitancia para acrílico.

En este punto resulta apropiado seleccionar los diversos materiales con mejores transmitancias. En la Figura 19 se muestran las gráficas obtenidas.

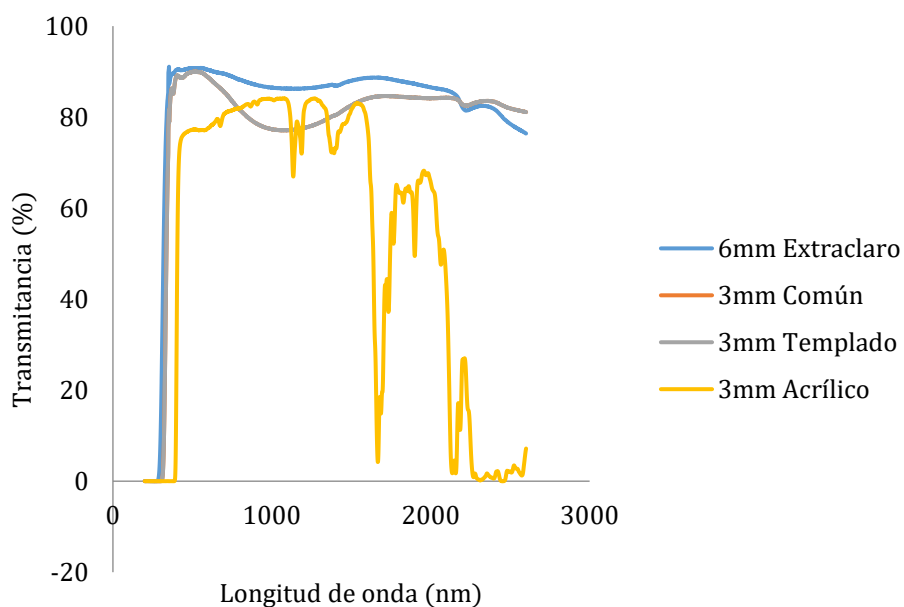


Figura 19. Transmitancia para diversos materiales.

Es importante resaltar que se pudo evaluar la transmitancia en vidrio extraclaro (aunque solo se hizo con una muestra de 6 mm de un grosor debido a la dificultad para obtener muestras de otros grosores), obteniendo una transmitancia promedio de 82.3% (Figura 19). De las medidas experimentales realizadas se discrimina el acrílico para ser considerado como un material apropiado de cubierta, ya que su transmitancia espectral es muy baja debido a las fuertes bandas de absorción asociado a su composición fisicoquímica. También es evidente, salvo el vidrio extraclaro, que los vidrios con más de 4 mm de espesor disminuyen su transmitancia solar integrada en 5% y hasta 10% menos que los materiales como el vidrio de 3 mm en un rango de 300 nm a 2500 nm, por esta razón y por otras que se mencionan más adelante, resulta conveniente la utilización de vidrios de 3 mm de grosor.

3.2 Película absorbidora.

Resulta de suma importancia hacer una selección apropiada de los materiales que pueden funcionar como películas absorbedoras de la radiación solar, los parámetros importantes aquí resultan ser la absorptancia y emitancia del material que al igual que la transmitancia para el condensador dependen de la longitud de onda del haz de luz que reciba. El estudio consiste en analizar el comportamiento de estos parámetros para un rango de longitudes de onda que van desde la región ultravioleta, pasando por el intervalo del espectro visible, hasta la región del NIR.

Un material comercial que se usa en la construcción de destiladores solares es un polímero denominado *hypalon* (Caucho de Polietileno Clorosulfonado). Este material tiene una densidad de 1.5 gr/cm^3 ; un campo de temperaturas entre -35°C y 140°C ; una excelente resistencia a la luz solar y a la intemperie. Es importante contrastar los resultados de los candidatos para ser película absorbidora con los obtenidos para este polímero. Los mejores materiales serán aquellos con una alta absorptancia de la radiación solar ya sea que se asemejen al hypalon o que tengan un comportamiento

mejor. Los materiales a considerar son: silicón con pigmentos comerciales, el hollín en una matriz de silicón comercial y óxidos de hierro-manganeso también en silicón comercial. A continuación, se describe el procedimiento para la preparación de las muestras.

Muestras de hollín.

Para la preparación de las muestras de hollín se necesitaron los siguientes materiales:

4 vidrios espejos de 3.5cm × 3.5cm con un grosor de 4mm.

15 g de silicón comercial

5g de hollín de chimenea

Mortero de ágata

Balanza electrónica

Espátula

Procedimiento de elaboración.

En la elaboración se consideran 0.007g, 0.015g 0.03g y 0.04g de hollín en bases de silicón de 3 g dando concentraciones de 2.3%, 4.7%, 9.1% y 11.8%, respectivamente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Concentración de hollín en silicón para diferentes muestras.

Cantidad de hollín (g)	Cantidad de silicón (g)	Concentración (%)
0.007	0.3	2.3
0.015	0.3	4.7
0.030	0.3	9.1
0.040	0.3	11.8

Finalmente, la colocación de la película absorbadora con hollín se realiza con una espátula y un rodillo para uniformizar el espesor en los cristales de 3.5 cm × 3.5 cm. Las muestras tienen un espesor aproximado de 2 mm.

Muestras de óxidos mixtos de hierro-manganeso.

Para la preparación de las muestras se necesitaron los siguientes materiales:

4 vidrios espejos de 3.5cm × 3.5cm con un grosor de 4mm.

15 g de silicón comercial

300 ml de hidróxido de amonio NH_4OH (28%, Sigma-Aldrich)

6g de cloruro férrico hexahidratado $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (97%, Sigma-Aldrich)

4.5 g de cloruro de manganeso tetrahidratado $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, (97%, Sigma-Aldrich)

Vaso de precipitados de 500 ml

1 parrilla

Mufla

Mortero de ágata

Balanza electrónica

Espátula

Síntesis de óxidos mixtos de hierro-manganeso.

La síntesis de los óxidos de hierro manganeso se llevó a cabo mediante el método de precipitación. Para su elaboración se utilizó cloruro de manganeso tetrahidratado $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, (97%, Sigma-Aldrich) y cloruro férrico hexahidratado $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (97%, Sigma-Aldrich), ambos se disolvieron en agua desionizada y se mezclaron en la cantidad apropiada para obtener la concentración molar de $\text{Fe} / \text{Mn} = 1$ que es la buscada. La mezcla se precipitó usando una solución concentrada de hidróxido de amonio NH_4OH (28%, Sigma-Aldrich) bajo agitación a una temperatura de 70 °C. Durante todo el proceso de precipitación, el pH se mantuvo por encima de 10. El precipitado resultante se lavó varias veces con agua destilada y se calcinó a 800 ° C durante 24 h.

Una vez obtenidos los óxidos, éstos se mezclan en silicón comercial con ayuda de una espátula en las siguientes concentraciones (Tabla 2)

Tabla 2. Concentración de óxidos en silicón para diferentes muestras.

Cantidad de óxidos (g)	Cantidad de silicón (g)	Concentración (%)
0.007	0.3	2.3
0.015	0.3	4.9
0.030	0.3	9.1
0.044	0.3	13

Finalmente se depositan sobre los espejos de 3.5 cm × 3.5 cm con ayuda de la espátula y un rodillo para uniformizar el espesor, antes de dejar secar y poder medir las propiedades ópticas. Las muestras tienen un espesor aproximado de 2 mm.

A continuación, se presentan gráficas de absorción respecto de la longitud de onda para muestras de hollín en silicón, óxidos de hierro manganeso en silicón, silicón con pigmentos comerciales y una muestra de hypalon.

Primeramente, para el hollín en silicón, con diferentes concentraciones se obtuvieron las siguientes gráficas de absorción respecto de la longitud de onda:

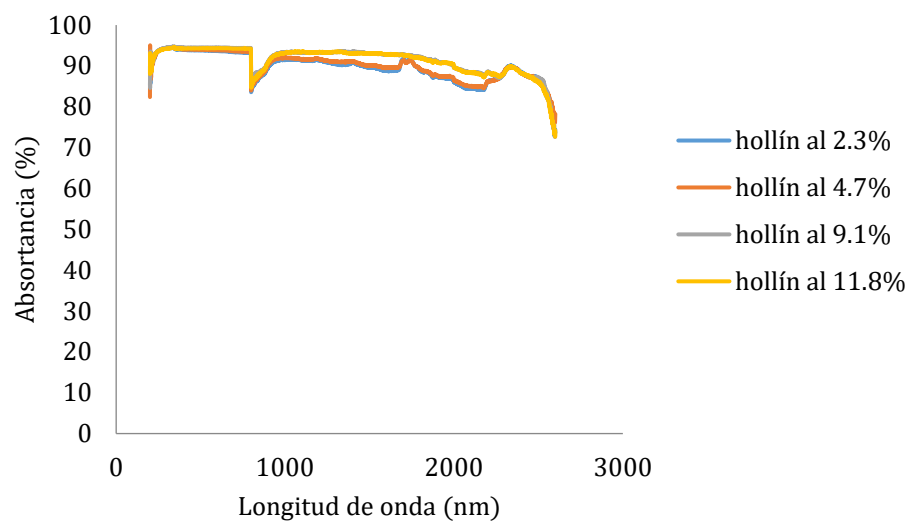


Figura 20. Absortancia para hollín en silicón.

En la Figura 21 se muestra una comparación del hollín (con la mejor absorción encontrada) y el hypalon:

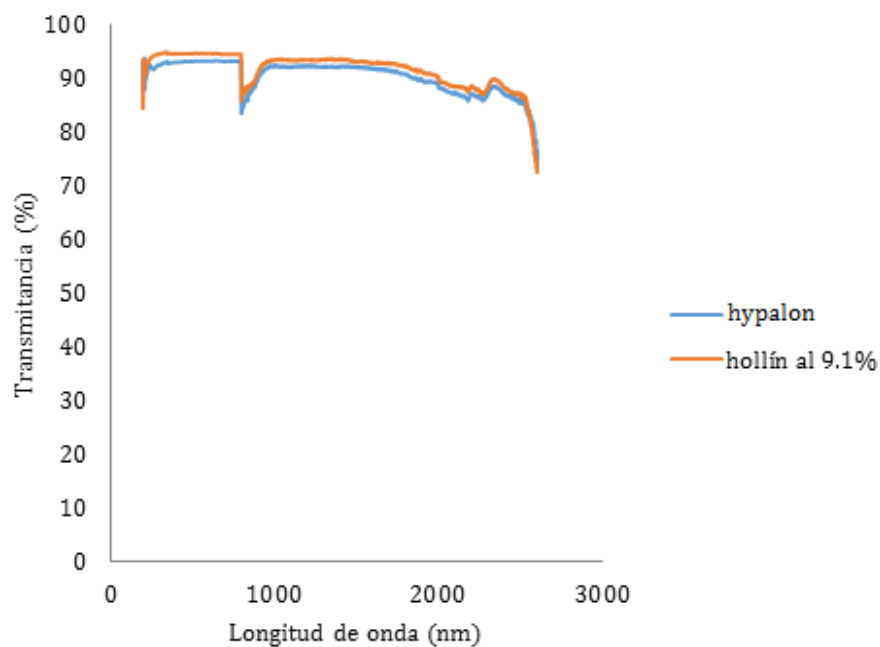


Figura 21. Absortancia para hypalon y hollín.

Para el caso de los óxidos de hierro-manganeso se obtuvieron los siguientes comportamientos:

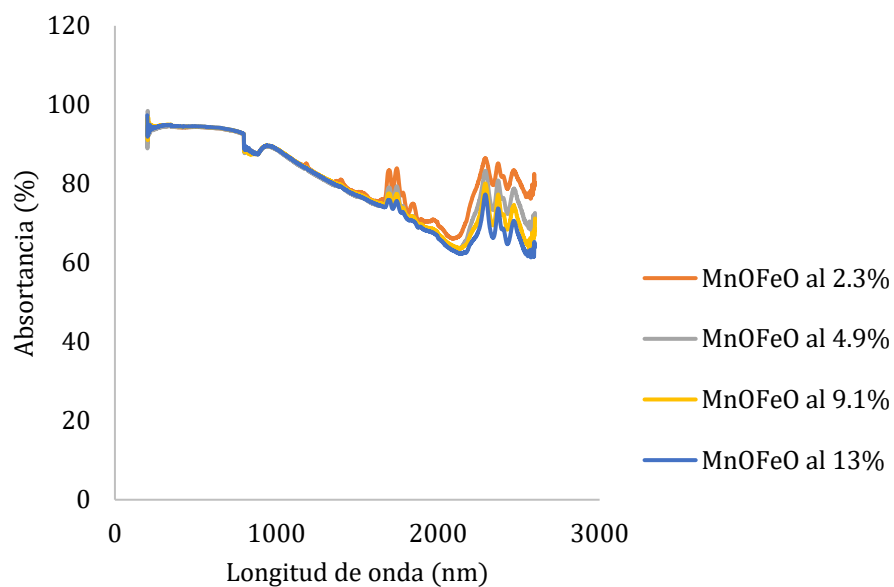


Figura 22. Absortancias de MnOFeO para diferentes concentraciones.

En la Figura 23 se comparan los valores obtenidos para los diversos materiales con las mejores absortancias.

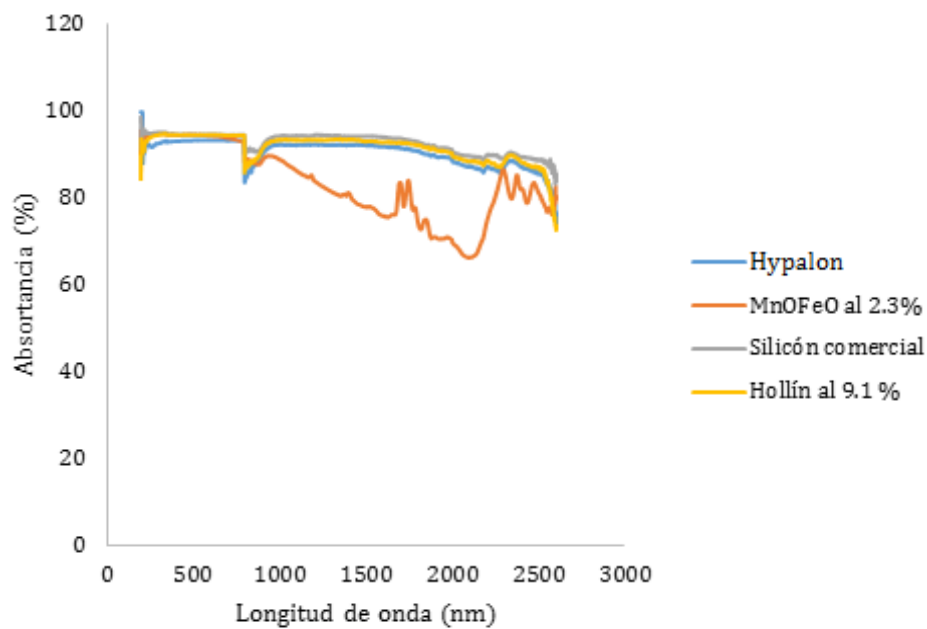


Figura 23. Absortancia para diferentes materiales.

En la Figura 24 se presentan los valores de la emitancia para los mismos materiales de la Figura 23.

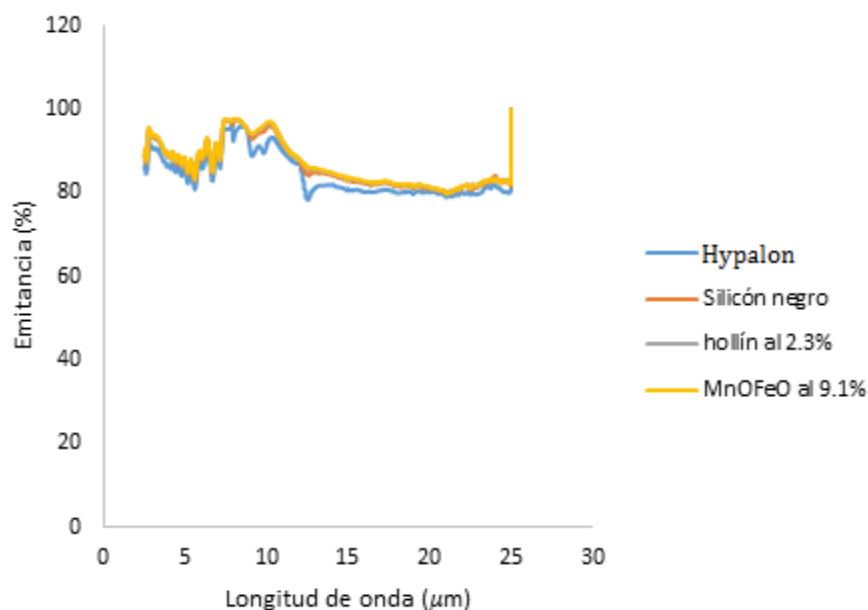


Figura 24. Emitancia para diferentes materiales.

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio ponderados de la absorptancia y emitancia para los materiales estudiados que exhiben la mayor absorptancia y menor emitancia. El promedio se hizo tomando en cuenta la metodología reportada en la bibliografía (Duffie & Beckman, 2013) y que consiste en dividir en intervalos de longitud de onda que correspondan a intervalos de energía iguales, seleccionando de dichas franjas una longitud de onda representativa y tomando el valor de la absorptancia y emitancia asociado a esa longitud de onda.

Tabla 3. Valores promedio de absorptancia y emitancia de diferentes materiales.

Material	Absorptancia (% $\pm 0.001\%$)	Emitancia (% $\pm 0.001\%$)
Hypalon	91.765	84.7400
MnOFeO al 2.3%	88.704	88.2145
Silicón comercial	93.705	87.5659
Hollín al 9.1 %	92.967	87.9007

Como se observa en los valores obtenidos, el comportamiento de la absorción en el caso del hollín y el silicón comercial es superior al hypalon en 1.3% y 2.18%, respectivamente. Sin embargo, si se considera el costo del polímero comparado con el hollín y el silicón comercial (el hypalon, es un producto de importación, lo que dificulta su utilización por el alto costo que habría que hacer para su disposición en México), éstos resultan ser muy económicos y accesibles por lo que es factible utilizarlos en sustitución del polímero de importación.

Por último, se ha observado que los pigmentos negros a base de óxidos de Fe y Mn muestran gran estabilidad al agua salina caliente, por lo que resultan factibles en su utilización, aunque su absorción sea menor.

3.3 Geometría y dimensiones.

Para seleccionar el tipo de destilador a estudiar se deben tomar en cuenta diversos factores entre los que destacan el costo de fabricación, el tamaño, operación y mantenimiento, así como su portabilidad. De acuerdo con comparaciones hechas en otros trabajos, la selección de la geometría del destilador se reduce a considerar al destilador somero (de un solo condensador) y el australiano también llamado de caseta (2 condensadores). Esto se debe principalmente a los costos de fabricación y a la operación y mantenimiento, que en otros tipos de destilador suelen ser complicadas.

El área efectiva de captación de radiación solar reportado comúnmente en la bibliografía corresponde a un metro cuadrado, por lo que se escogió este tamaño para la construcción del prototipo de destilación.

Respecto de la inclinación de las cubiertas condensadoras, se han hecho estudios empíricos que establecen los criterios para determinar la pendiente requerida en estos dispositivos (Almanza, 1994). Para el caso del destilador de una sola vertiente se recomienda tener una orientación norte-sur con una inclinación igual a la latitud del lugar en el que se vaya a instalar, con el condensador mirando hacia el ecuador (Sarkar et al., 2017; Singh & Tiwari, 2004).

Para el destilador tipo caseta se recomienda una orientación este-oeste en donde la inclinación de los condensadores permite un máximo de producción de agua potable para valores que van de los 15 a los 20 grados como se muestra en la Figura 25

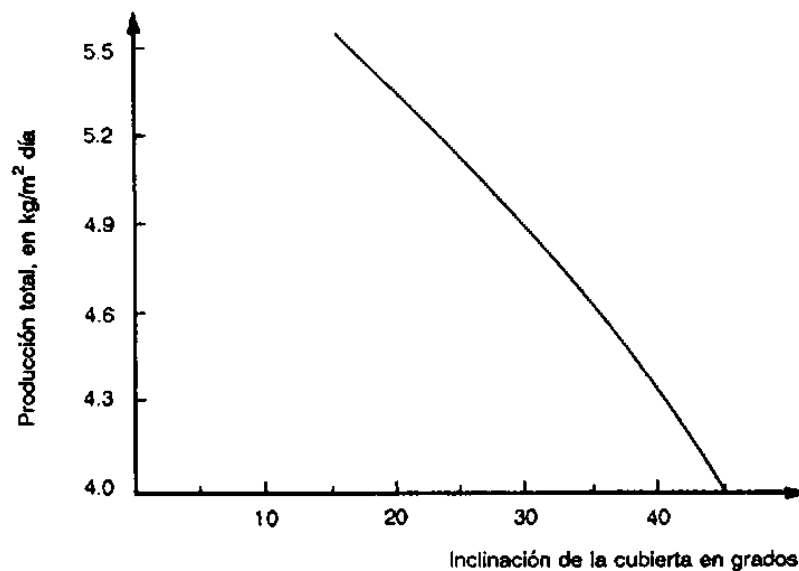


Figura 25. Producción de agua destilada dependiente de la inclinación de los condensadores.

Fuente: Almanza R (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.

El grosor para la cubierta condensadora está relacionado con la producción de agua. Para condensadores delgados de entre 3 mm y 4 mm se incrementa la diferencia de temperatura entre la superficie interna de la cubierta y el espejo de agua favoreciendo la producción (Sarkar et al., 2017; Ghoneyem & Ileri, 1997).

La productividad crece cuando la masa de agua en el estanque es menor, por lo que una columna de agua de poca altura es lo recomendable pues aumenta la eficiencia (Mahdi et al. ,2011). La altura de la columna de agua de mar tiene un máximo de producción de agua potable para valores cercanos a un centímetro de altura como se muestra en la Figura 26 (Almanza, 1994); de acuerdo a esta Figura y a la experiencia aprendida en la operación de estos sistemas experimentales, el espesor apropiado debe estar entre 1 cm y 4 cm de espesor de agua, ya que menores espesores, podrían conducir a rápidas incrustaciones de la membrana absorbedora, lo que no ocurre cuando el espesor es mayor. Por lo anterior, aunque baje la producción de destilado, se tiene la ventaja de una operación estable sin deterioro de los materiales del equipo utilizado.

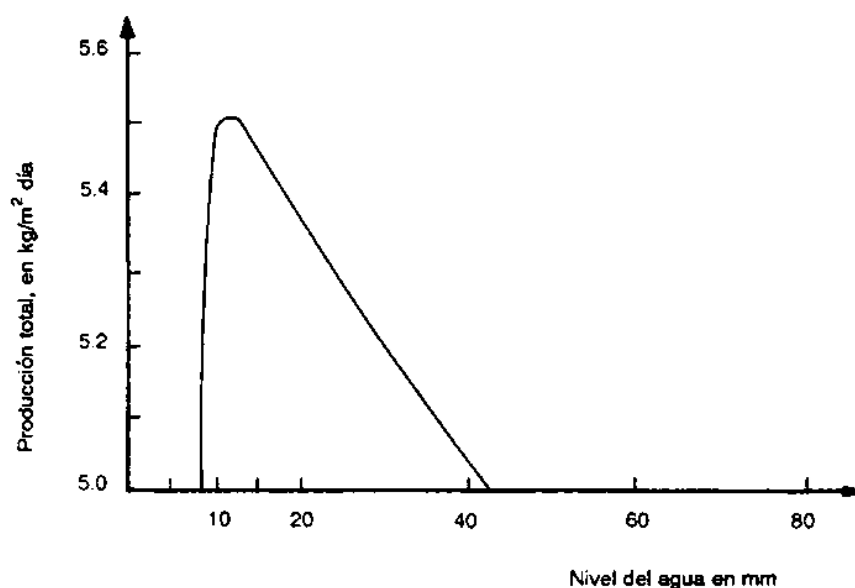


Figura 26. Producción de agua destilada dependiente de la altura de la columna de agua.

Fuente: Almanza R (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.

3.4 Pruebas preliminares de algunos módulos de destilación.

Se han hecho algunas pruebas para evaluar las ventajas que tienen algunos tipos de destiladores sobre otros y los materiales idóneos para la fabricación de la base y las

paredes (Muños et. al. 2017). Se han encontrado que la producción es mayor para el destilador de dos vertientes (de caseta o australiano) que el de una vertiente (somero). Las pruebas hechas para materiales como el ferrocemento, el acrílico, el vidrio y la fibra de vidrio, revelan que esta última, es la más apropiada para la utilización en la base y las paredes (Muños et. al., 2017; Fonseca et. al., 2005). Esto se debe a sus propiedades aislantes que minimizan pérdidas de calor al ambiente, mecánicas mostrando alta durabilidad, a su estabilidad y a su ligereza (que permite una gran facilidad de transportación). Es posible también la manufactura de la caja (base, paredes y canaletas) en una sola pieza a través del diseño de un molde del que se puede fabricar la caja del destilador a partir de la fibra de vidrio minimizando pérdidas por fugas de agua y vapor de agua obteniendo un prototipo de bajo costo. Respecto del absorbedor, el mejor es hollín en base de silicón, aunque los óxidos de hierro manganeso presentan gran estabilidad a condiciones reales de operación por lo que representan una buena opción.

3.5 Consideraciones para la construcción del dispositivo.

Tomando en cuenta la información presentada en los apartados anteriores se pueden seleccionar las dimensiones y los materiales apropiados para la fabricación del prototipo de destilación solar. Este debe tener las siguientes características:

- 1) Un destilador australiano (dos vertientes).
- 2) Debe tener 1 m² de área de captación de radiación solar.
- 3) Las cubiertas condensadoras deben ser de vidrio extraclaro o a lo más claro debido a que este último es bastante económico y de fácil adquisición a diferencia del extra claro.
- 4) El vidrio debe ser delgado. 3mm o 4mm para tener una mejor transmitancia y favorecer el flujo de calor hacia el ambiente desde los condensadores.

- 5) La caja (base paredes y canaletas) debe estar hecha de fibra de vidrio, manufacturada en una pieza, esto se debe a sus características aislantes pues tiene una conductividad térmica de $0.04 \frac{W}{m K}$ y a que si se hace en una sola pieza minimiza perdidas de líquido por fugas.
- 6) El absorbedor puede ser de silicón con pigmentos comerciales, hollín u óxidos de hierro-manganeso, estos últimos deben considerarse debido a la estabilidad que presentan. Todos ellos son mucho más económicos que el hypalon y de fácil obtención por lo que representan una excelente opción.
- 7) La inclinación de las cubiertas debe ser cercana a los 15 grados.
- 8) La altura del espejo de agua debe estar entre 1cm y 4 cm de espesor para asegurar la practicidad de la técnica.

Capítulo 4. Construcción del destilador solar.

4.1 Materiales y dimensiones

Base, paredes y canaletas.

Los datos recabados en el capítulo anterior dieron origen a los valores de los parámetros que se deben utilizar en la construcción del prototipo de destilación. Éste consiste entonces en un prototipo de destilador australiano (de 2 vertientes) con una base de un metro cuadrado de área de captación de radiación solar. Las paredes del destilador tienen alturas de 0.26 m y 0.11 m. Lo anterior permite una inclinación de 16.6° para los vidrios condensadores, pues de acuerdo con la información recabada se requieren ángulos pequeños para maximizar la producción. El grosor de la fibra de vidrio es de aproximadamente 5 mm.

Los materiales usados para las canaletas son tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada con recubrimiento de fibra de vidrio y con un declive de aproximadamente 1.15° . La Figura 27 muestra algunas dimensiones características de la base y las paredes del plano del destilador.

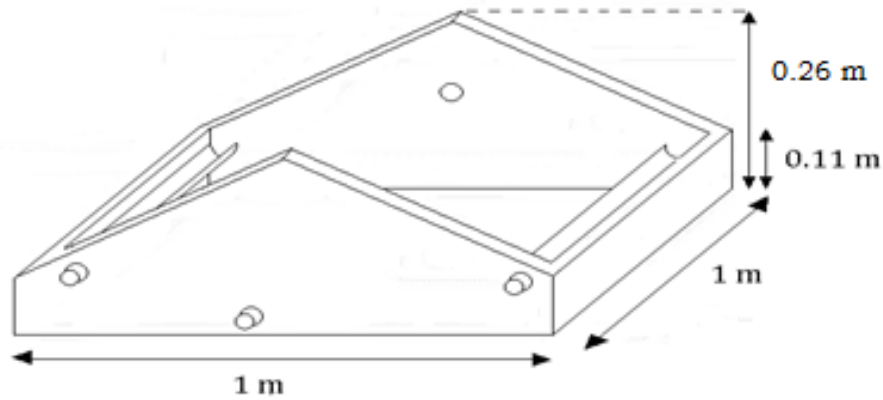


Figura 27. Diagrama del destilador.

Película absorbedora

Respecto de la superficie absorbedora, se ha optado por el silicón comercial con pigmentos comerciales y óxidos de hierro-manganeso para darle estabilidad a condiciones reales de operación. Los óxidos tienen una alta absorción y son económicos, por lo que son ideales para su utilización en esta sección del dispositivo. Para esta sección del destilador se requieren de 2 tubos de 500 ml de silicón negro comercial y 15 g de óxidos mixtos de hierro-manganeso.

Cubiertas condensadoras

El material utilizado para las cubiertas condensadoras son 2 piezas de vidrio claro con un espesor de 3 mm y con dimensiones de 52.7 cm x 100 cm cada una. Si bien es cierto que el vidrio extra claro es el de mayor transmitancia, es un hecho que el vidrio claro es mucho más económico y de fácil adquisición por lo que se ha optado por él.

Silicona Universal

Para la unión y sellado de juntas se ha utilizado silicón transparente

Cantidad utilizada de 2 unidades de 500 ml

Accesorios

Manguera reforzada de ½ pulgada con una extensión de 6 m, así como 8 conectores de ½ pulgada para la entrada del agua, salida de salmuera y dos salidas de agua destilada. Finalmente se tienen 2 recipientes de 10 litros cada uno para almacenar el agua destilada

A continuación, en la Tabla 4 se muestran los materiales utilizados para la construcción.

Tabla 4. Materiales utilizados para la construcción.

Materiales	Dimensiones	Características
Fibra de vidrio	_____	Baja conductividad térmica, impide fugas
Macocel para molde	_____	
Tubo de PVC	2 m de ½ in	Resistencia al intemperismo
Conector	8 piezas de ½ in	Resistencia al intemperismo
Silicón transparente	2 tubos de 500 ml	Inerte, resistencia al intemperismo
Silicón negro	2 tubos de 500 ml	Inerte, alta absorción
Óxidos mixtos de hierro-manganeso	10 g	_____
Vidrio claro	2 piezas de 52.7 cm x 100 cm con un grosor de 3 mm	Alta transmitancia, más económico que el extra claro y fácil obtención
Manguera de polietileno	6 m de ½ in	Resistencia al intemperismo
contenedor	2 contenedores de 10 L cada uno	Inerte, resistencia al intemperismo

4.2 Construcción

Para la construcción de la base y las paredes del destilador se hace un molde en macocel que es un aglomerado derivado de la madera, económico en donde se consideran todas las dimensiones que debe tener la base. Se prepara la fibra de vidrio y se hace la colación en el molde. En esta colación se deben incluir las canaletas de PVC con sus entradas y salidas en donde se unirán las mangueras con sus respectivos conectores. Es necesaria la fabricación en una sola pieza para evitar fugas de vapor de agua y del agua destilada.

Después de la hechura de la base y paredes se procede a preparar y aplicar la película absorbedora. Para la preparación se mezclan los óxidos de hierro-manganeso en silicón negro hasta lograr una mezcla homogénea, después, se procede a aplicar en la base con una espátula buscando que el silicón se extienda con uniformidad y tratando de evitar grumos. En la Figura 28 se muestra la base con la película absorbedora.



Figura 28. Base del destilador con la película absorbedora.

Después de colocar la película absorbidora, se colocan los vidrios condensadores sellando las uniones entre ellos y la base del destilador. En la Figura 29 se muestra el dispositivo durante la colocación de los vidrios, en la imagen se ve al destilador con solamente un condensador colocado a la izquierda.



Figura 29. Dispositivo durante la colocación de los condensadores.

Finalmente se colocan los conectores y las mangueras en la entrada de agua salina, salidas de agua destilada y salida de salmuera. Las mangueras de salida de agua destilada se conectan a los contenedores de plástico de 10 L. El destilador terminado se muestra en la Figura 30.



Figura 30. Destilador terminado.

Capítulo 5. Caracterización.

5.1.1 Medición del recurso solar y sensores de temperatura en los destiladores.

Se utilizó un piranómetro marca Eppley modelo PSP, con el cual se midieron los valores de la irradiancia solar a lo largo del día. Con base en tales valores se estimaron los valores de irradiación solar total diaria, por unidad de superficie, mediante la integración de los primeros datos.

Para la obtención de los perfiles de temperaturas, el destilador se instrumentó con un equipo *Data Loggers HOBOS* de cuatro canales para registrar, mediante termopares de sonda tipo T, la temperatura de la base y las temperaturas de las cubiertas a lo largo del día, así como los valores de la temperatura ambiente.

El equipo consiste en

- I. 1 registrador *Data Loggers HOBOS* modelo *UX120* de cuatro canales.

- II. 4 termopares de sonda *Tipo T 6ft* (Cobre/Constantán) de teflón con aislamiento y sensible sobre un rango de -200 a 100 °C.

Se procedió a instalar dos termopares en las superficies exteriores de cada uno de los dos cristales y en el exterior de la base del módulo, un último termopar se colocó de manera vertical para la toma de los valores de la temperatura ambiente. La instalación del registrador de temperatura se colocó debajo del destilador solar.

5.1.2 Mediciones de la operación del destilador.

La caracterización del destilador se ha realizado por un largo tiempo, pero aquí se muestra una serie de datos representativos para algunos días típicos correspondientes al periodo que va del mes de octubre de 2016 a marzo del 2017. Lo anterior significa que los datos pertenecen a la temporada del año con menor insolación recibida, por lo que representan la producción de agua destilada y eficiencia térmica mínimas en el año. La producción máxima de agua y mayor eficiencia térmica, corresponderán a la temporada del año con mayor radiación y que concierne al verano. Inicialmente, las mediciones del día 23 de octubre de 2017 arrancaron a las 9:00 h, concluyendo a las 19:00 h, para ello se agregaron 30 litros de agua de la llave al dispositivo. Se cuantificó tanto la temperatura de la base y las cubiertas. A continuación, se muestran algunas gráficas para los perfiles de temperatura del día 27 de octubre de 2017, así como del 24 de febrero, 2 y 24 de marzo del 2018 a diferentes horas del día.

En las Tablas 5, 6, 7 y 8, además de las Figuras 31, 32, 33 y 34, se presentan los datos recabados sobre la temperatura de los condensadores oriente y poniente, así como del absorbedor. Se observa que la temperatura de la base absorbedora es, por lo general, superior que las temperaturas de los condensadores tanto oriente como poniente. La temperatura del condensador oriente es mayor durante las primeras horas del día,

cuando hay radiación solar; la temperatura del condensador poniente es mayor que la temperatura del condensador oriente durante las últimas horas del día. Las temperaturas más elevadas, tanto para el absorbedor como para los condensadores, se presentan entre las 2 pm y las 3 pm.

En las Tablas 9, 10, 11 y 12, así como las Figuras 35 a la 42, se presenta la producción de agua destilada por hora, la producción acumulada a cada hora y el volumen total producido por día.

Tabla 5. Mediciones de temperatura para el 27 de octubre del 2017.

Tiempo (h)	T Base (°C)	T Cristal Oriente (°C)	T Cristal Poniente (°C)
9	11.4	8.11	11.64
10	15	12.13	12.17
11	20.88	18.42	18.19
12	23.14	21.22	20.81
13	28.86	28.78	27.85
14	35.26	34.32	32.57
15	40.15	39.4	36.81
16	39.57	38.45	35.99
17	38.58	35.59	33.31
18	36.19	31.64	29.27
19	29.77	22.32	22.43

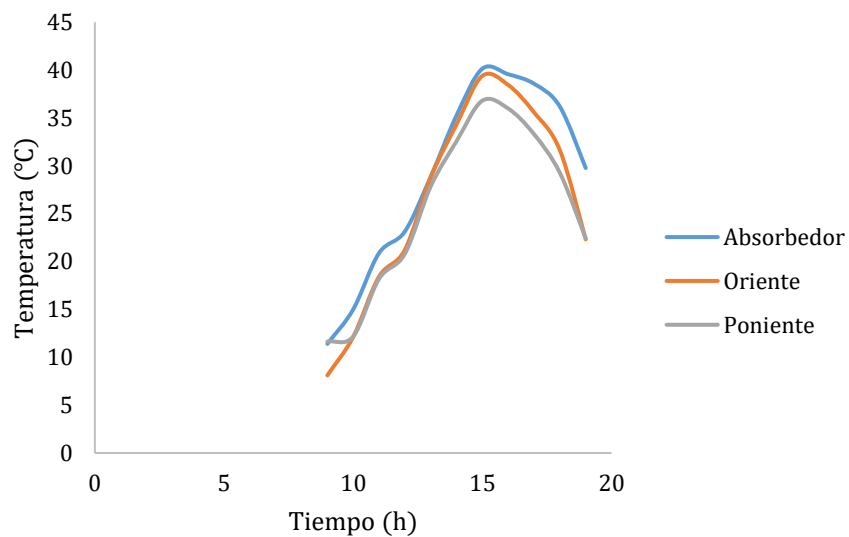


Figura 31. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 27 de octubre del 2017.

Tabla 6. Mediciones de temperatura para el 24 de febrero del 2018.

Tiempo (h)	T Base (°C)	T Cristal Oriente (°C)	T Cristal Poniente (°C)
9	20.73	21.19	21.21
10	24.74	25.62	23.81
11	34.37	33.28	32.14
12	46.37	44.45	45.52
13	53.84	50.43	51.47
14	51.97	46.87	48.08
15	52.24	46.13	46.96
16	44.46	34.75	34.6
17	29.82	24.75	24.51
18	24.73	21.31	21.11
19	23.11	19.65	19.49
20	20.49	18.38	18.31

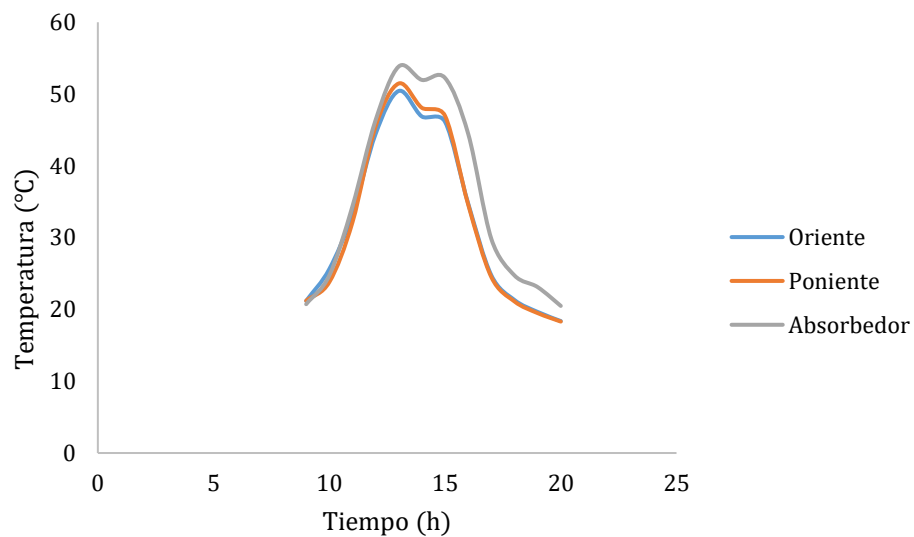


Figura 32. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 24 de febrero del 2018.

Tabla 7. Mediciones de temperatura para el 2 de marzo del 2018.

Tiempo (h)	T Base (°C)	T Cristal Oriente (°C)	T Cristal Poniente (°C)
9	20.32	19.03	17.87
10	31.74	31.08	30.79
11	41.97	39.71	40.37
12	51.02	46.25	47.84
13	53.59	46.96	50.6
14	52.97	49.45	45.13
15	53.24	46.31	44.54
16	48.46	43.09	41.79
17	37.72	31.03	30.54
18	32.08	25.56	24.27
19	26.84	20.61	20.16
20	22.8	17.12	14.42

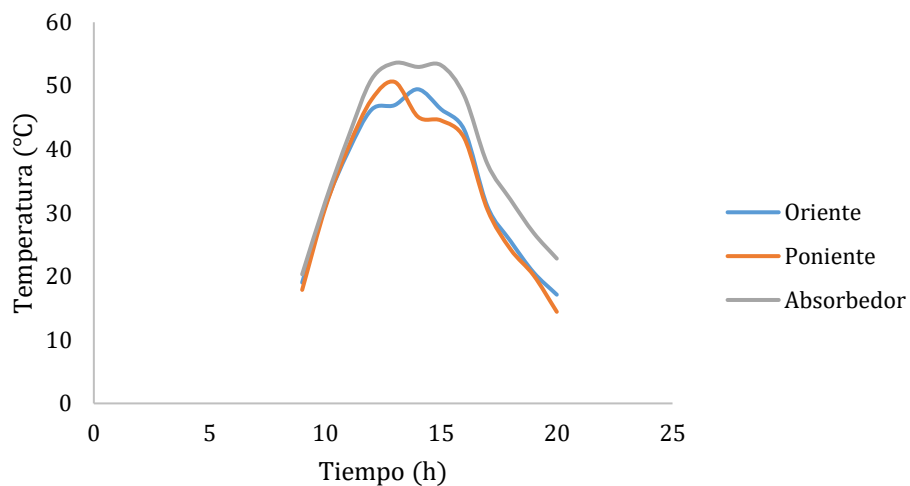


Figura 33. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 2 de marzo del 2018.

Tabla 8. Mediciones de temperatura para el 24 de marzo del 2018.

Tiempo (h)	T Base (°C)	T Cristal Oriente (°C)	T Cristal Poniente (°C)
9	29.13	25.08	23.71
10	37.26	35.24	34.19
11	46.94	43.85	44.72
12	54.8	53.16	52.54
13	56.45	55.81	50.5
14	54.18	54.97	55.73
15	51.64	50.65	49.9
16	48.62	46.8	47.11
17	42.86	38.94	39.11
18	35.61	29.26	28.38
19	27.29	21.13	20.26

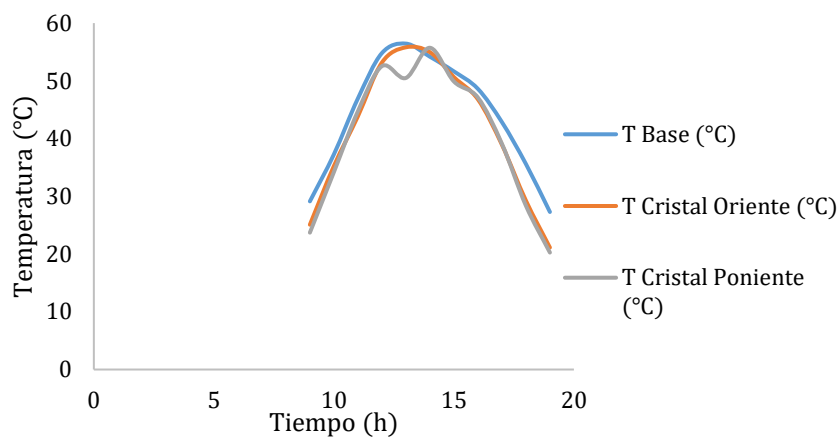


Figura 34. Temperatura del absorbedor y los vidrios condensadores para el 24 de marzo del 2018.

Tabla 9. Volumen destilado e irradiancia para el 11 de noviembre del 2017.

Tiempo (h)	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)	Irradiancia (W/m ²)
9	0	0	259
10	54	54	507
11	70	124	756
12	120	244	869
13	185	249	944
14	195	624	916
15	205	829	821
16	190	1019	650
17	170	1189	368
18	166	1355	0
19	119	1474	0
20	50	1524	0
21	45	1569	0
Destilado nocturno	103	1672	—
Volumen total (ml)	—	1672	—

El periodo donde se presenta mayor volumen de destilado es entre la 1 pm y las 3 pm; el volumen total diario está entre los 1625 ml y los 2798 ml. Hay que recalcar que los datos aquí presentados contemplan el periodo del año con menor insolación diaria recibida, lo que permite evaluar al dispositivo en condiciones de operación reales con la menor radiación solar recibida por día.

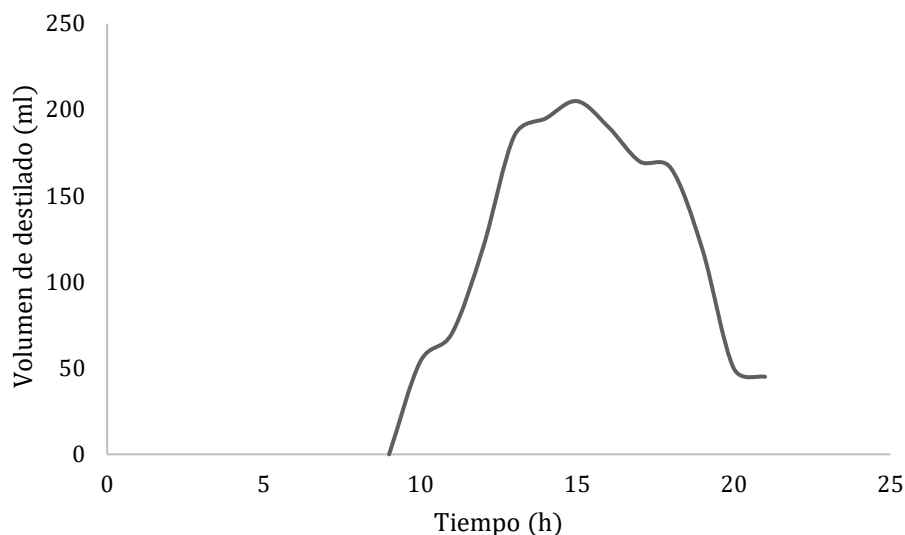


Figura 35. Volumen destilado a diferentes horas para el 11 de noviembre del 2017.

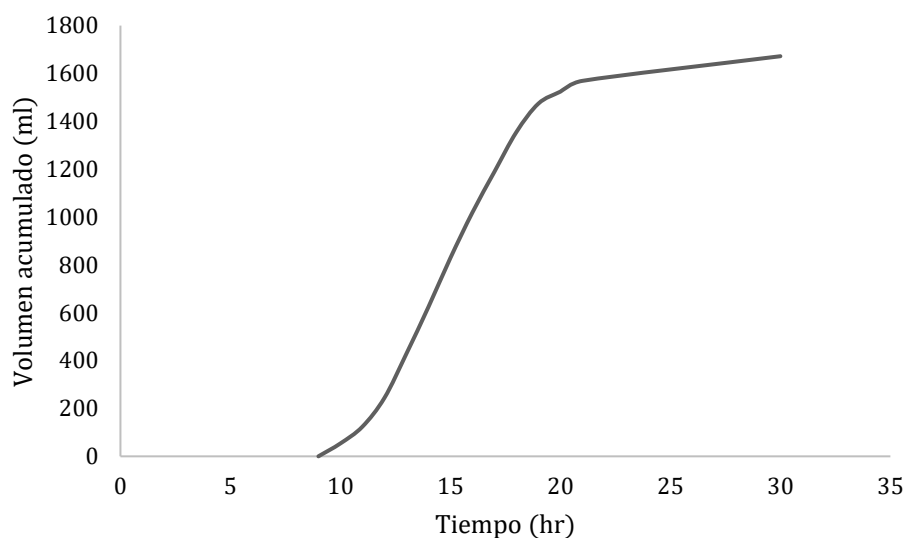


Figura 36. Volumen acumulado para el día 11 de noviembre del 2017.

Tabla 10. Volumen destilado e irradiancia para el 24 de febrero del 2018.

Tiempo (h)	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)	Irradiancia (W/m ²)
9	0	0	176
10	70	70	396
11	100	170	623
12	195	365	814
13	276	641	902
14	395	1036	928
15	295	1331	849
16	133	1464	725
17	100	1564	93
18	32	1596	0
19	11	1607	0
Destilado nocturno	18	1625	—
Volumen total (ml)	—	1625	—

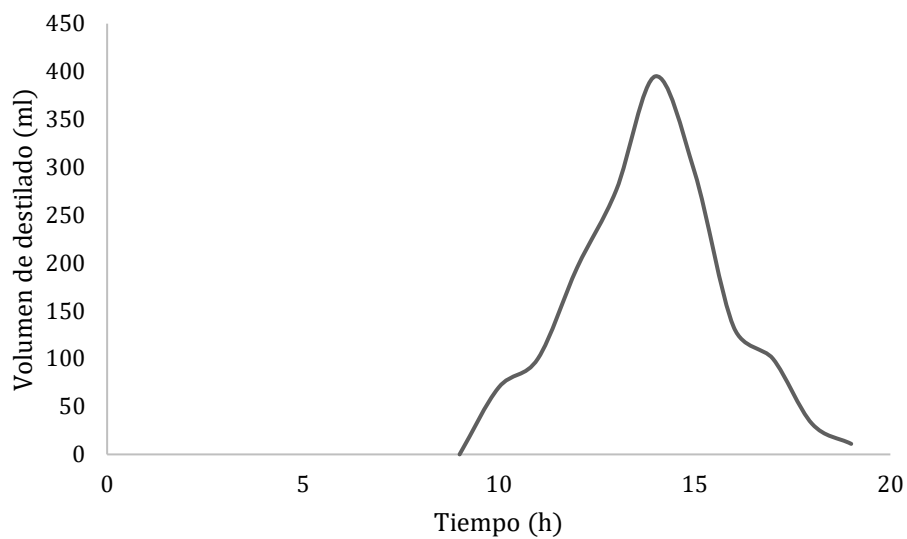


Figura 37. Volumen destilado a diferentes horas para el 24 de febrero del 2018.

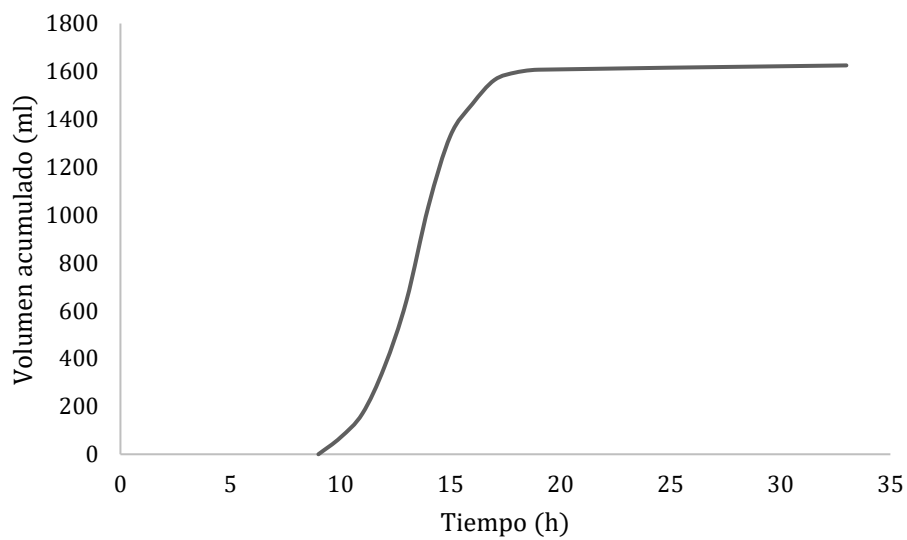


Figura 38. Volumen acumulado para el día 24 de febrero del 2018.

Tabla 11. Volumen destilado e irradiancia para el 2 de marzo del 2018.

Tiempo (h)	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)	Irradiancia (W/m ²)
9	0	0	217
10	105	105	473
11	141	246	702
12	334	580	879
13	406	986	976
14	305	1291	1001
15	235	1526	672
16	214	1740	515
17	105	1845	522
18	64	1909	0
19	25	1934	0
Destilado nocturno	175	2109	—
Volumen total (ml)	—	2109	—

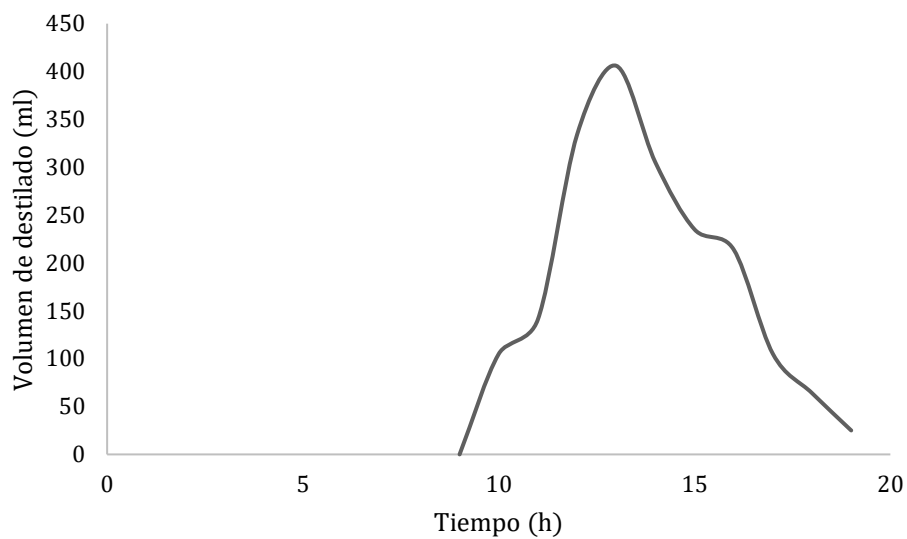


Figura 39. Volumen destilado a diferentes horas para el 2 de marzo del 2018.

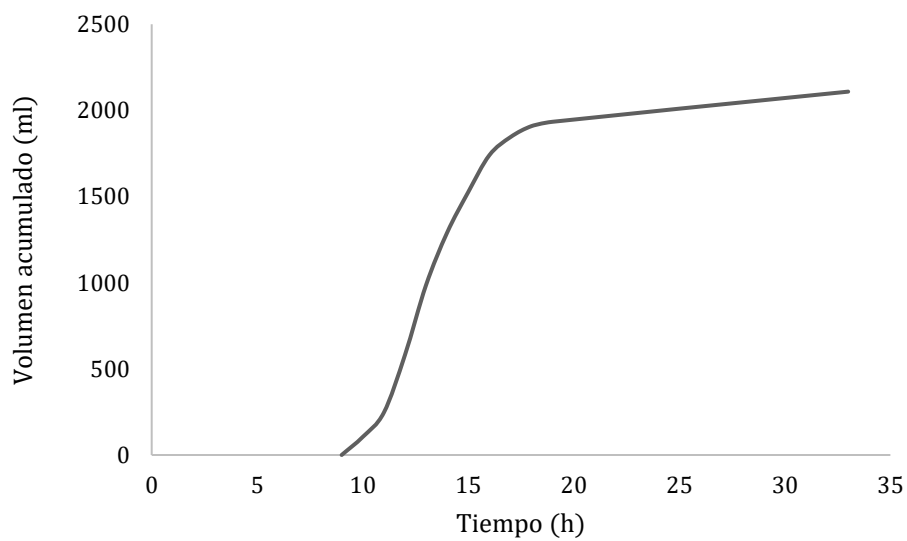


Figura 40. Volumen acumulado para el día 2 de marzo del 2018.

Tabla 12. Volumen destilado e irradiancia para el 24 de marzo del 2018.

Tiempo (h)	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)	Irradiancia (W/m ²)
9	0	0	292
10	180	180	566
11	203	383	784
12	340	723	941
13	485	1208	1037
14	525	1733	1018
15	440	2173	919
16	288	2461	824
17	148	2609	606
18	70	2679	0
19	30	2709	0
Destilado nocturno	89	2798	—
Volumen total (ml)	—	2798	—

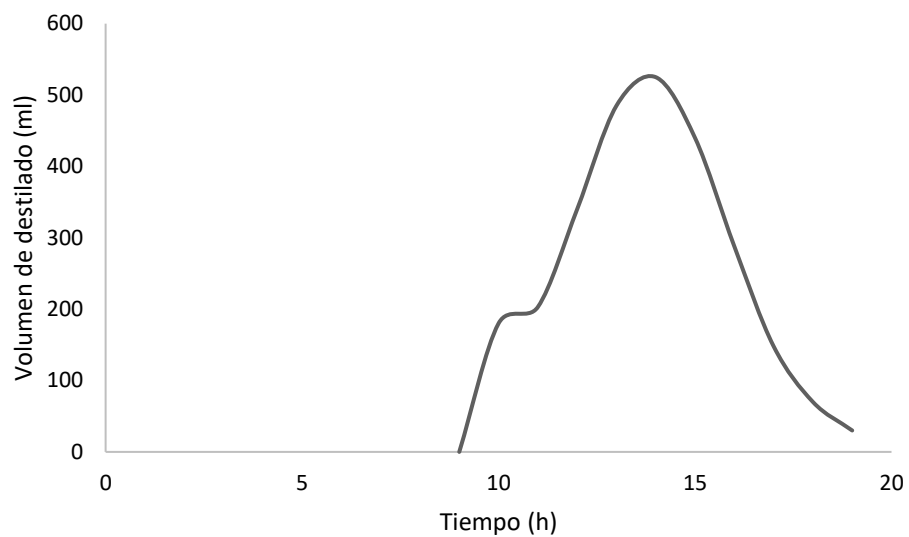


Figura 41. Volumen destilado a diferentes horas para el 24 de marzo del 2018.

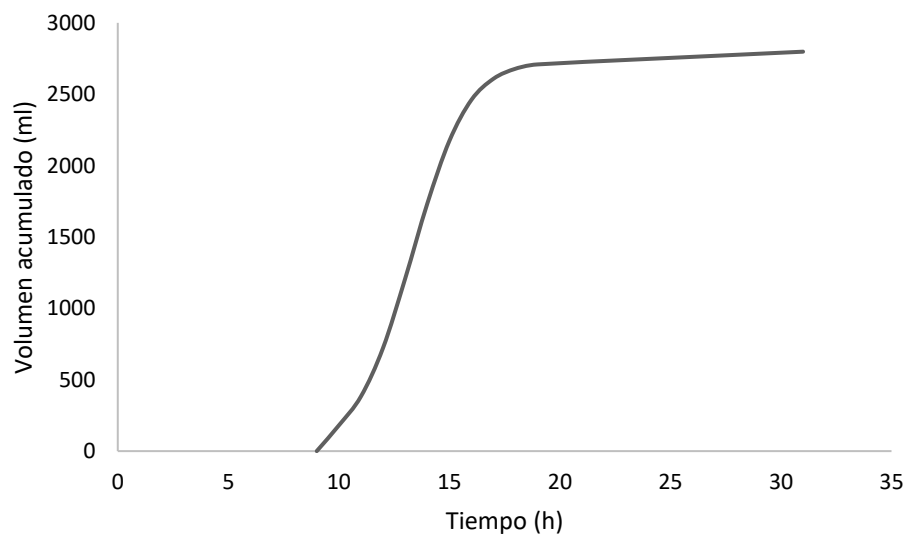


Figura 42. Volumen acumulado para el día 24 de marzo del 2018.

5.2 Eficiencia térmica.

El cálculo de la eficiencia térmica se hace a través de la cuantificación de la producción de agua por hora, el calor latente de evaporación dependiente de la temperatura, así como la irradiación recibida del sol a cada hora del día (Cooper, 1973).

La eficiencia del destilador (Malik et al., 1982), es la relación entre el calor útil $\int_0^t q dt$ a lo largo del día y la insolación H total recibida:

$$\eta = \frac{\int_0^t q dt}{H} \cdot 100 \quad (28)$$

Donde H , la insolación diaria está dada por

$$H = \int_0^t I dt \quad (29)$$

y donde I es la irradiancia observada experimentalmente.

En la ecuación (28), q es el calor de evaporación por unidad de área (o fuente de calor de evaporación, ver sección 2.2.3), y se toma como el producto del calor latente de evaporación h_{fg} dependiente de la temperatura y que se obtiene de tablas de propiedades del agua saturada (Çengel & Boles, 2009), multiplicado por la masa del agua destilada. El valor de h_{fg} es seleccionado a partir de la temperatura promedio del agua a lo largo del día. El calor total útil es la integración de q a lo largo del día (ver sección 5.1.2 y Tabla 13). Para el cálculo de la insolación, basta con hacer la integración de los valores experimentales obtenidos para cada hora, de la irradiación recibida durante el día (ver sección 5.1.2 y Tabla 13).

Considerando lo anterior, se han hecho cálculos para diferentes días. A continuación, se presentan algunos datos tomados desde el mes de noviembre al mes de marzo, en donde se ha integrado la irradiancia para obtener la insolación diaria. De acuerdo con

la ecuación (28), para obtener la eficiencia térmica, basta dividir el calor útil a lo largo del día, entre la insolación total diaria. En la Tabla 13 se presentan los cálculos hechos para obtener la eficiencia térmica.

Tabla 13. Eficiencia térmica para diferentes días de medición.

Fecha	Producción de agua destilada (kg)	Calor útil por $m^2(MJ/m^2)$	Insolación diaria H (MJ/m^2)	Eficiencia térmica η (%)
11/11/17	1.672	4.0	20.6	18.4
24/02/18	1.625	3.9	19.5	19.8
02/03/18	2.109	5.1	19.6	23.8
24/03/18	2.798	6.8	23.0	26.9

De lo anterior se obtuvo un valor para la eficiencia entre 18.4% y 26.9%, con un promedio de 22.2%

5.3 Calidad de agua.

El agua apta para consumo humano corresponde a un tipo de agua libre de sustancias de origen biológico, orgánico, inorgánico y radiactivo (como pueden ser microorganismos patógenos, minerales, sustancias orgánicas, etc.), que puedan producir efectos fisiológicos que repercutan en la salud de la población.

De manera puntual, el agua destilada recolectada del prototipo, debe cumplir con las características físicas, químicas y microbiológicas señaladas en la modificación de la

NOM127-SSA1-1994 hecha en el 2002 y que establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización cuando se trata de uso y consumo humano.

Son 48 los parámetros que considera la NOM-127-SSA1-1994 para determinar la calidad de una muestra de agua, a pesar de ello, debido a la gran cantidad de estudios que deberían de hacerse para determinar la calidad de manera contundente y a los recursos con los que se cuenta en el grupo de investigación, sólo se han seleccionado algunos parámetros a determinar y que son: olor, sabor, pH, dureza, sólidos totales disueltos, salinidad, coliformes totales y coliformes fecales; lo anterior, de acuerdo a lo estipulado en NORMA Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994 que establece la manera de determinar bacterias coliformes por la Técnica del número más probable; en la NMX-AA-042-SCFI-2015 sobre la enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales, y en la NOM-210-SSA1-2014 sobre determinación de microorganismos patógenos.

Las pruebas realizadas para el estudio, consistieron en comparar el agua de entrada al módulo y el agua de salida respecto de los límites permisibles dados por la norma. Se hicieron dos tipos de estudios: el primero consistió en tomar agua del grifo y la correspondiente agua destilada a la salida; el segundo consistió en tomar agua simulada de mar (agua con cloruro de sodio y magnesio al 3.5%) y la concerniente de salida del prototipo.

Para medir el pH del agua de entrada y salida se utilizó un Medidor Portátil de pH Webat de alta precisión; la dureza se determinó utilizando un Kit de análisis de dureza del agua marca HACH 5-B hardness Test Kit; los sólidos totales disueltos a través de un medidor de sólidos disueltos totales El HI98302 de Hanna Instruments con un intervalo alto que puede medir hasta 10.00 g/L; la salinidad un refractómetro Atago ATC-S/Mill-E.

Para la presencia de coliformes se hizo la inoculación de muestras de agua, en distintas diluciones (Figura 43), en una serie de tubos de ensayo con campana de Durham (ver Figura 44); dichos tubos contenían lactosa como medio de cultivo. Los tubos se examinaron a las 24 y 48 horas de incubación a 37°C. Cada uno de los que presentaron turbidez con producción de gas se resembraron en un medio confirmativo más selectivo. Para el caso de coliformes totales, se hizo el estudio confirmativo en tubos con caldo lactosa bilis verde brillante, resembrados por 48 horas a 37°C. Para coliformes fecales el estudio se hizo en tubos con caldo EC a 44.5 °C por 24 horas. Mediante tablas estadísticas, se llevó a cabo el cálculo del número más probable (NMP) de coliformes totales y fecales en 100 cm³ de muestra, a partir de los números de los tubos que dan resultados confirmativos positivos (NOM-112-SSA1-1994).

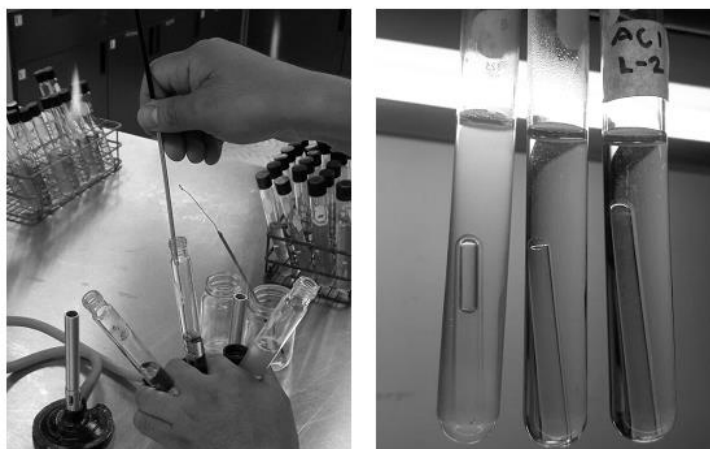


Figura 43. a) Preparación de las muestras. b) Comparación entre el agua simulada de mar de entrada y las dos diluciones del agua de salida del destilador.



Figura 44. Muestras preparadas en lactosa, del agua de entrada y salida para el agua de grifo y agua simulada de mar después de 24 horas.

En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos en el estudio de calidad de agua para muestras de entrada de agua de grifo y agua simulada de mar y comparadas con el agua destilada de salida para cada una de ellas, así como los valores máximos aceptados por la NOM 127 SSA.

Tabla 14. Datos de parámetros medidos para determinar la calidad de agua destilada.

Parámetro	Agua de grifo (entrada)	Agua de grifo (salida)	Agua salobre (entrada)	Agua salobre (salida)	Límite permisible por la NOM 127 SSA
Sabor	_____	Agradable	_____	Agradable	Agradable (no objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Salinidad (g/L)	20	3	35	3	_____
Olor	_____	Agradable	_____	Agradable	Agradable (no objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Coliformes Totales (NMP/100ml)	23	No detectables	180	No detectables	Ausencia o no detectables
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	No detectables	No detectables	27	No detectables	Ausencia o no detectables
pH	8.6	7.8	7.9	7.3	6.5-8.5
TDS (mg/L)	861	13	9370	11	1000
Dureza (mg/L)	450	20	550	20	500

Como se presenta en la Tabla 14, cada uno de los parámetros está dentro de norma. De manera preliminar y por lo que respecta a estos estudios, el agua es apropiada para el consumo humano, puesto que no sólo no se rebasan los límites impuestos, sino que además cada parámetro está muy por debajo de lo permisible; sin embargo, hay que recalcar que para tener una caracterización contundente se necesita evaluar cada parámetro de la actualización de la NOM 127-1994.

Capítulo 6. Desarrollo de la simulación numérica.

En este capítulo se muestran las simulaciones para la descripción tridimensional del destilador solar. Dicha simulación ofrece muchas ventajas, pues considera la posición geográfica, la orientación del dispositivo, la variación de la radiación solar a lo largo del día y para cada día del año en que se hace la descripción; también se incluye la variación de la temperatura ambiente a lo largo del día. Se considera la inclinación de las cubiertas condensadoras, los materiales usados para cada parte del destilador con sus respectivos parámetros físicos, el grosor de cada material, etc. Todo lo anterior comprueba la utilidad de la simulación obtenida para proporcionar información sobre el sistema y ofreciendo la posibilidad de realizar nuevos cálculos considerando otros materiales, otras características geométricas y nuevas condiciones meteorológicas. Cabe resaltar que, aunque existen algunas simulaciones de destiladores solares, la mayor parte de ellas, no incluyen muchas de las consideraciones que se han mencionado (Cooper, PI 1969a; Ghoneyem & Ileri 1997; Palacio & Fernández 1993; Porta & Fernández, 1996; Shukla & Sorayan, 2005; Panchal & Patel, 2018), aunque existen algunas otras que hacen cálculos más detallados (Porta, Chargoy, & Fernández, 1997).

Los balances obtenidos constituyen un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales parciales altamente acopladas, que fueron resueltas por medio de métodos numéricos usando el software COMSOL Multiphysics 5.3a. COMSOL Multiphysics es un software utilizado para modelar procesos en ingeniería e investigación científica a través del método de los elementos finitos. Varios módulos fueron seleccionados con el propósito de construir de modelo completo en el software. Se hizo uso de los módulos de transporte de humedad (que comprende a la transferencia de calor y el transporte de vapor en aire seco) para describir la migración de vapor de agua y la temperatura, así como de flujo no isotérmico (y que abarca el transporte de calor y el flujo de fluidos) para describir el flujo no isotérmico de la columna de agua y de aire para un periodo de un día completo.

Para ambos módulos se definieron algunas funciones de particular importancia. Para comenzar, la temperatura ambiente dependiente del tiempo t , está descrita por la expresión

$$T_{\infty} = 293 + 10 \cos\left(\frac{2\pi(t - 14)}{24}\right) \quad (30)$$

Esta función, representada en la Figura 45, es una adaptación de las funciones presentadas por el programa COMSOL para algunas simulaciones, en donde se toma en cuenta la variación de la temperatura ambiente. Es importante resaltar que la expresión sólo representa una aproximación a la variación de la temperatura a lo largo del día; en este caso se considera que la temperatura varía en un intervalo que va de los 283 K (10°C) a los 303 K (30°C) durante 24 horas.

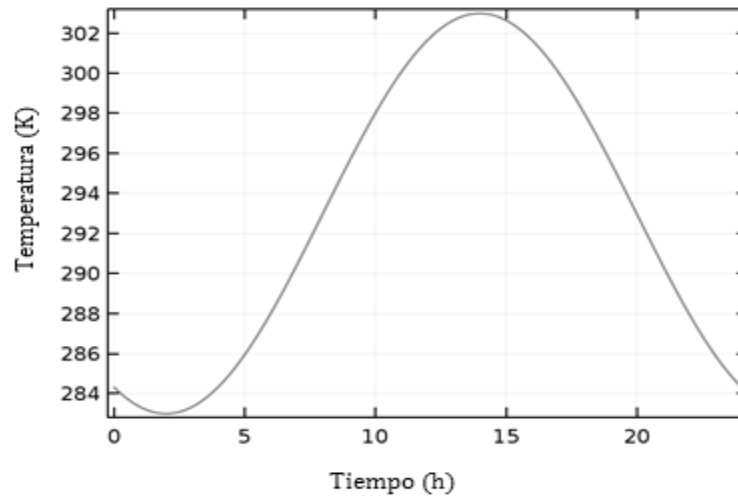


Figura 45. Temperatura ambiente como función del tiempo.

También es necesario contar con los datos de la irradiación que incide en la superficie absorbedora, considerando el día del año y su variación a lo largo del día. En este caso, tomando valores recabados para la irradiación en diferentes horas para el día 1 de julio de 2017, se obtuvo una curva representada en la Figura 46 y cuya expresión corresponde a una función definida por partes.

Para la construcción de la expresión para la irradiancia, se consideran las horas del día en donde no hay radiación solar incidente y el periodo en donde si la hay. Para el periodo de tiempo en donde si hay radiación, la irradiancia se ha modelado por una expresión cuadrática del tiempo obtenida haciendo una regresión polinomial sobre los datos recabados. La irradiancia como función del tiempo, a lo largo del día, se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15. Expresión de la Irradiancia solar como función del tiempo.

Intervalo (h)	Irradiancia solar como función del tiempo
[0, 6]	0
[6, 19]	$-24.68t^2 + 617t - 2813.5$
[19,24]	0

Dicha función para la irradiancia se utiliza para definir una fuente de calor superficial sobre la película absorbedora, puesto que el programa presenta muchas dificultades al momento de considerar los datos meteorológicos dados por la base de datos de COMSOL para la irradiancia transmitiéndose hasta el interior del destilador solar, en donde se encuentra la superficie absorbedora.

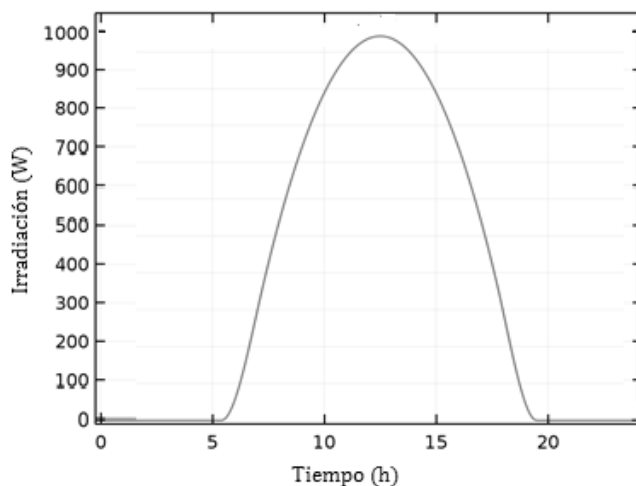


Figura 46. Irradiación como función del tiempo.

Para el caso de la radiación solar incidente sobre los vidrios exteriores, se utilizan los datos meteorológicos dados por la base de datos de COMSOL, y éstos toman en cuenta la posición geográfica, el día del año y la variación de la misma a lo largo del día.

6.1 Preprocesamiento.

A continuación, se presentan brevemente en la Tabla 16 las dimensiones características del destilador a simular y que comprenden tamaño y grosor de los materiales usados, así como la inclinación de los vidrios condensadores. La Figura 47 muestra el esquema del destilador usado para la simulación numérica.

Tabla 16. Dimensiones características del destilador para el modelo en COMSOL.

Base cuadrada, m ²	1
Grosor de la base y paredes, mm	5
Grosor de cubiertas condensadoras, mm	4
Inclinación de vidrios, °	16.6
Grosor del absorbedor, mm	5
Altura de la columna de agua, cm	5

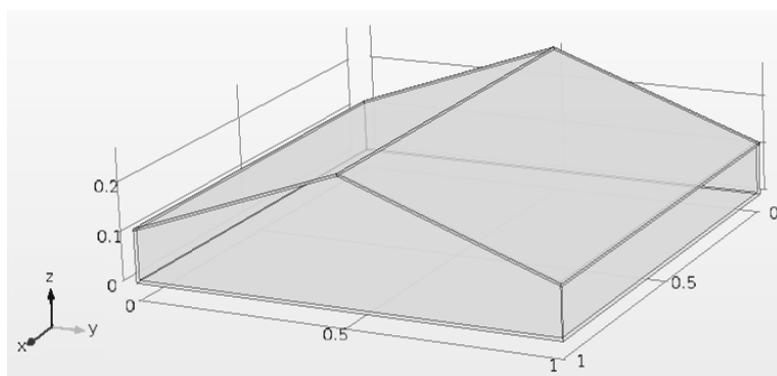


Figura 47. Esquema del destilador.

Respecto de los materiales usados para la simulación, se han considerado los previamente cargados en la biblioteca de materiales de COMSOL, puesto que incluyen información detallada de cada uno de ellos. La descripción de cada material comprende una gama de parámetros entre los que se encuentran el calor específico, densidad, viscosidad dinámica, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, módulo de compresibilidad y el coeficiente de dilatación adiabática.

La asignación de los materiales para cada región del destilador solar se presenta en la Tabla 17:

Tabla 17. Materiales usados para la simulación en COMSOL.

Base y paredes	Fibra de vidrio (sólido)
Membrana absorbedora	Silicón(sólido)
Región líquida	Agua (fluido)
Región gaseosa	Aire (fluido)
Condensadores	Vidrio común(sólido)

Las ecuaciones utilizadas por COMSOL MULTIPHYSICS son las presentadas en la sección 2.2 junto con las respectivas condiciones de frontera para el destilador solar. Para comenzar, la temperatura inicial se toma como la temperatura ambiente, dada por la expresión (30), con una presión inicial de una atmósfera (101.325 kPa) y con el agua y el aire dentro del destilador, en reposo.

Se ha tomado en cuenta que el dispositivo no está aislado en ninguna de sus partes por lo que existe transferencia de calor por convección entre el destilador y el ambiente. Se consideró que existe un flujo de calor a través de los condensadores, paredes y base del destilador. También, dentro del destilador se consideró transferencia por conducción y convección entre las paredes, la base y condensadores, el agua, el aire y la película absorbedora considerando que los parámetros que intervienen en cada fenómeno son los proporcionados por el software mediante su biblioteca de materiales.

Para el caso del absorbedor, se colocó una fuente de calor superficial que sigue el comportamiento de la Tabla 15 (y de la Figura 47) multiplicada por la transmitancia de los condensadores y del agua, así como de la absorptancia de la película absorbedora. Sin embargo, para la radiación incidente sobre los condensadores se consideraron los datos meteorológicos dados por la base de datos de COMSOL, sobre todo porque toman en cuenta la variación de la radiación a lo largo del día los factores de vista. Para la posición geográfica se decidió considerar la ciudad de México con latitud 19.4284706 y longitud -99.1276627 en el hemisferio norte, y para el día 1 de julio, puesto que los datos sobre radiación solar (Figura 47) se tomaron para este día.

En la frontera agua-aire se colocó una fuente de calor superficial asociada al calor latente de evaporación del agua. Se sabe que la energía requerida para mantener la evaporación se extrae de la energía interna del agua líquida y como resultado se enfría a menos que haya una fuente de calor que suministre energía al cuerpo de agua como es el caso de la superficie absorbadora.

Además de los parámetros que el programa proporciona es necesario definir algunos otros que no se contemplan dentro de la información para cada material, éstos se presentan en la Tabla 18:

Tabla 18. Valores de los parámetros utilizados en la simulación numérica.

Parámetro	Símbolo	Valor
Absortancia del absorbedor	α	0.9
Transmitancia del vidrio	τ_g	0.9
Transmitancia del agua	τ_w	0.95
Coeficiente de transferencia de calor por convección	h_{g2}	$5 \text{ W/m}^2\text{K}$
Emitancia del agua	ε_w	0.9
Emitancia del vidrio	ε_g	0.9
Tasa de evaporación	K	100 m/s

6.2 Procesamiento.

El tipo de estudios realizados para la descripción de los fenómenos presentes son necesariamente dependientes del tiempo y el resolutor utilizado es el PARDISO (Partial Differential Solver por sus siglas en inglés), debido a que resulta ser apropiado cuando se trata de utilizar diferentes físicas acopladas.

La simulación numérica se ha realizado en dos etapas. La primera incluye de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de balance térmico en todo el sistema, lo anterior generó un campo de velocidades para la convección en el agua salobre y en el aire dentro del destilador. La segunda etapa del cálculo consiste en utilizar el campo de velocidades de la etapa inicial para poder describir la migración del vapor que parte del espejo de agua y que llega hasta los vidrios condensadores. En esta segunda etapa se obtiene el perfil de temperaturas en cada parte del destilador incluyendo los procesos de transferencia de calor en el espejo de agua y los vidrios condensadores.

Se han realizado dos estudios dependientes del tiempo considerando un día completo, es decir, 24 horas, con un paso de 0.1 horas.

6.3 Resultados.

Los resultados obtenidos mediante la simulación numérica, incluyen los perfiles de temperatura para el absorbedor y los vidrios condensadores a lo largo del día, también es posible determinar la rapidez con la que se desplaza tanto el aire como el agua debido a la convección en cada punto de las regiones del agua y el aire, así como la visualización del campo de velocidades y la humedad relativa para intervalos de tiempo dados.

A continuación, se presenta el comportamiento de la temperatura en la base y en los vidrios condensadores a lo largo del día. Una comparación cualitativa muestra un comportamiento semejante respecto de las curvas obtenidas experimentalmente para diferentes días del año que se muestran en la sección 5.1.2.

De la Figura 48 se puede observar que la temperatura del absorbedor (línea en verde), es mayor que la de los vidrios condensadores, para las horas del día en donde incide la radiación solar sobre el dispositivo. También se puede apreciar que el modelo predice una mayor temperatura para el condensador poniente al inicio del día, y una

temperatura mayor para el vidrio poniente, para las ultimas horas del día en que el destilador capta la radiación proveniente del sol.

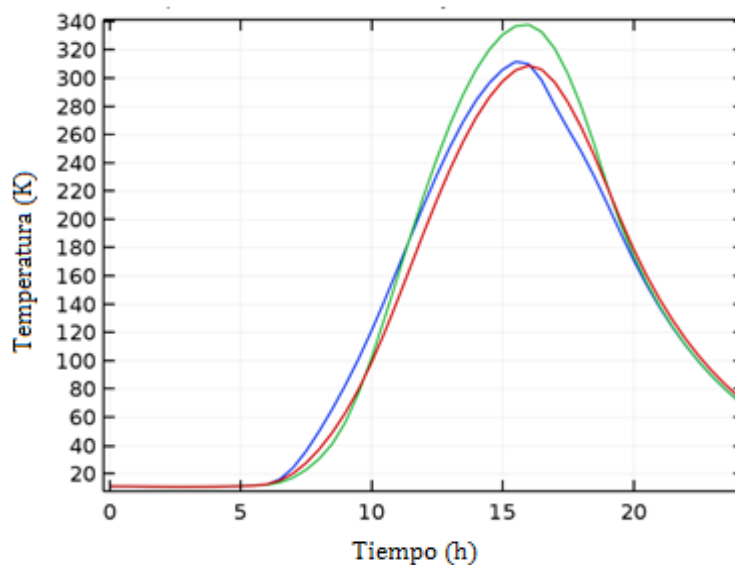


Figura 48. Temperaturas teóricas del absorbente y condensadores

La línea verde representa la temperatura del absorbente. Las líneas azul y roja representan la temperatura de los condensadores orientados al este y al oeste respectivamente.

Se presentan algunas imágenes de la temperatura en el destilador, para algunas horas particulares del día a manera de ejemplo (de la Figura 49 a la 54). La temperatura está representada por una gama de colores que van desde el rojo, pasando por el naranja y el amarillo, hasta el blanco. El color rojo representa temperaturas menores que el naranja y el amarillo; así mismo, el blanco representa las temperaturas más elevadas y que corresponden a las temperaturas alcanzadas por el absorbente.

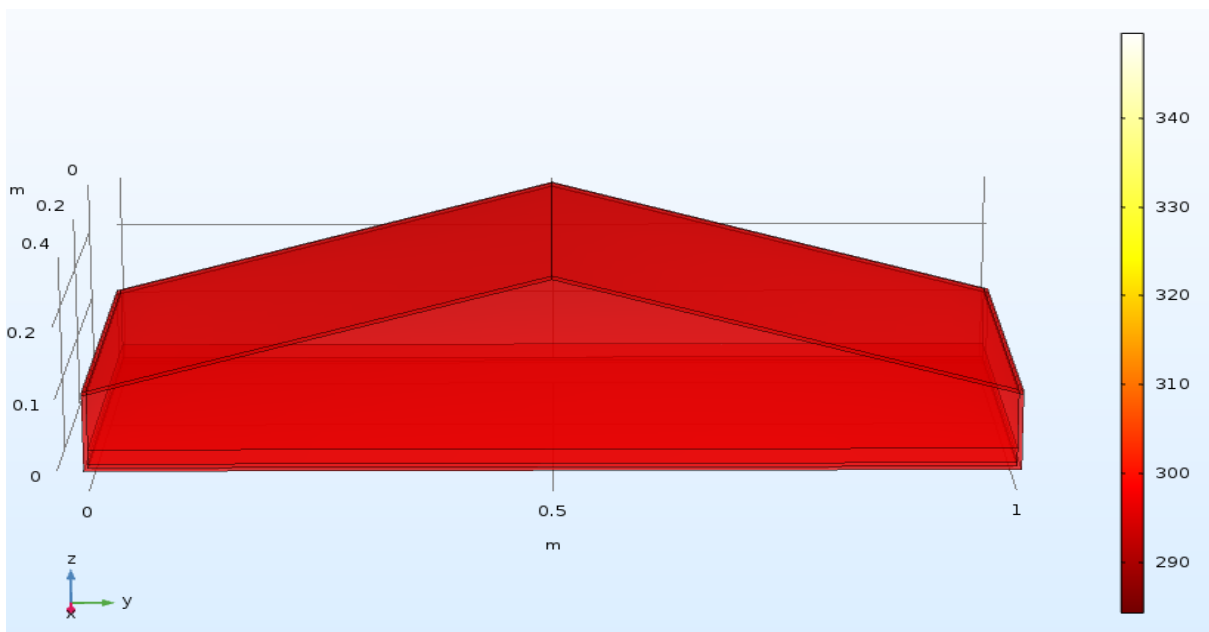


Figura 49. Temperatura del destilador en K para las 7:30 am.

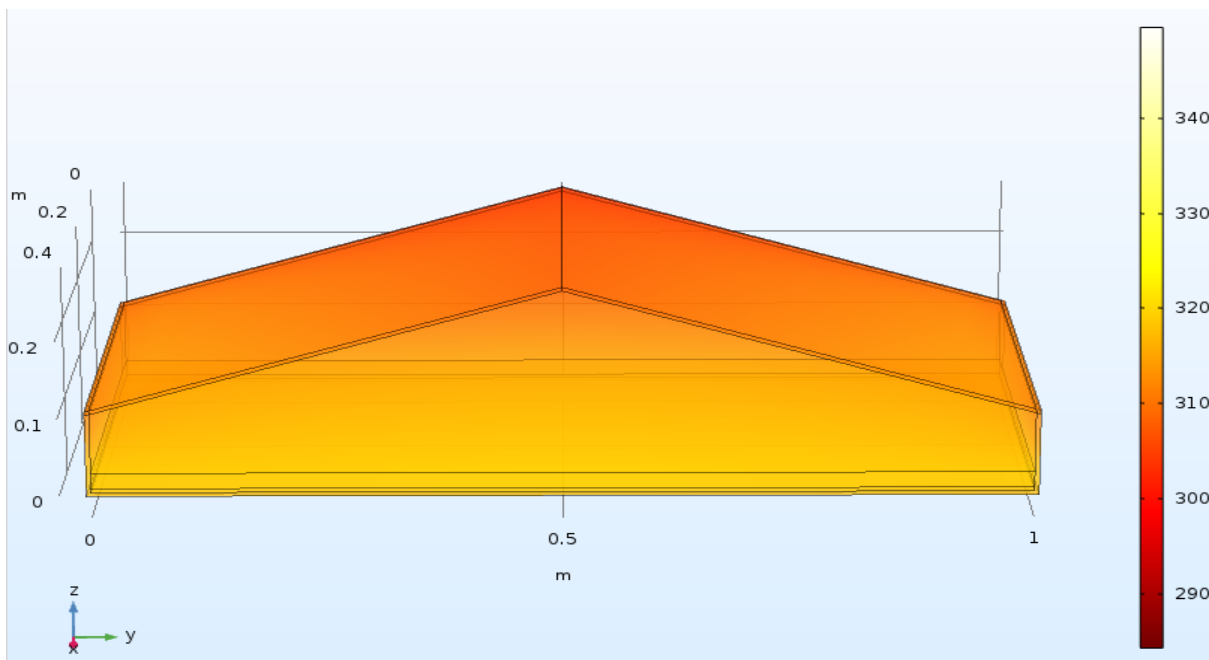


Figura 50. Temperatura del destilador en K para las 10:00 am.

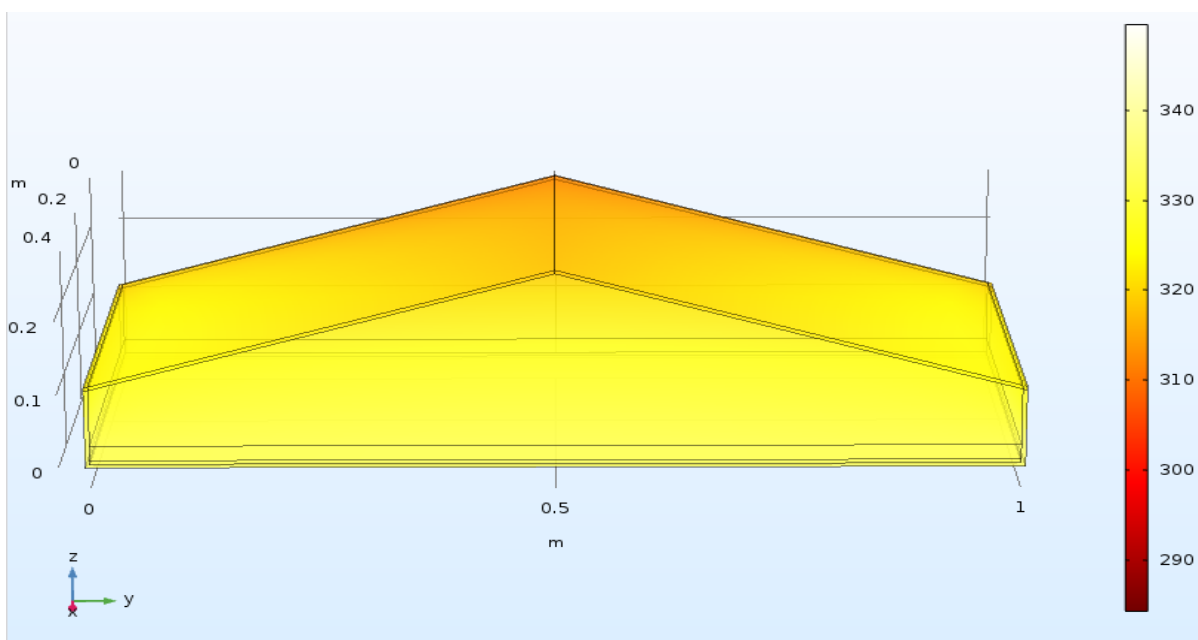


Figura 51. Temperatura del destilador en K para las 11:30 am.

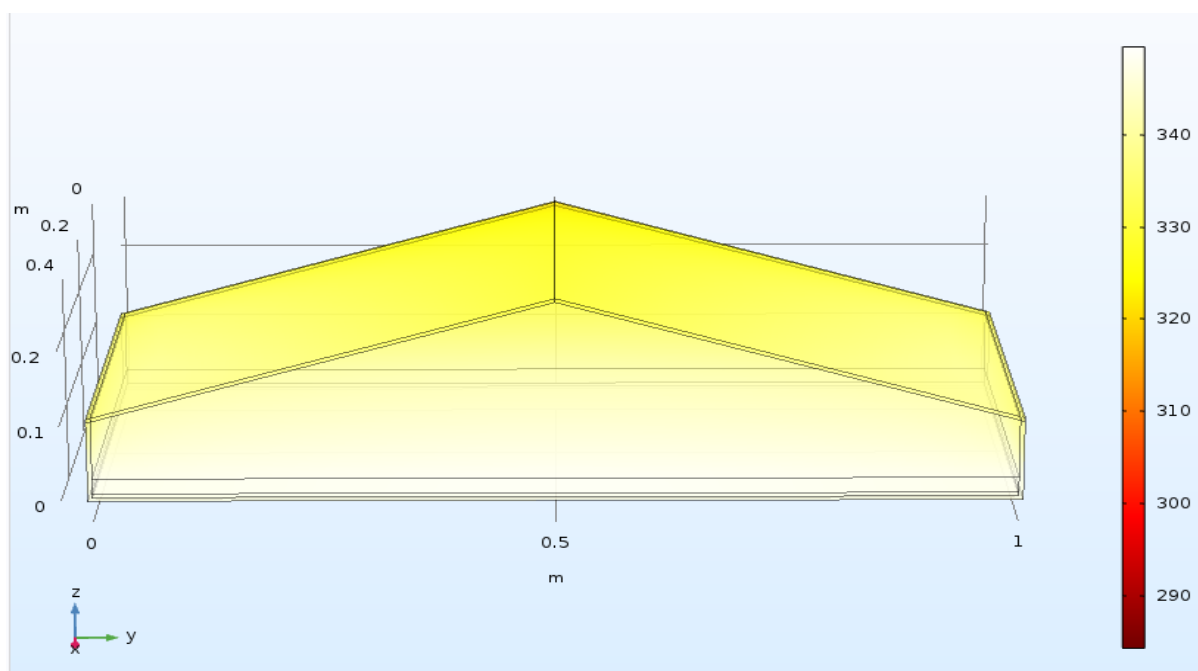


Figura 52. Temperatura del destilador en K para las 3:30 pm.

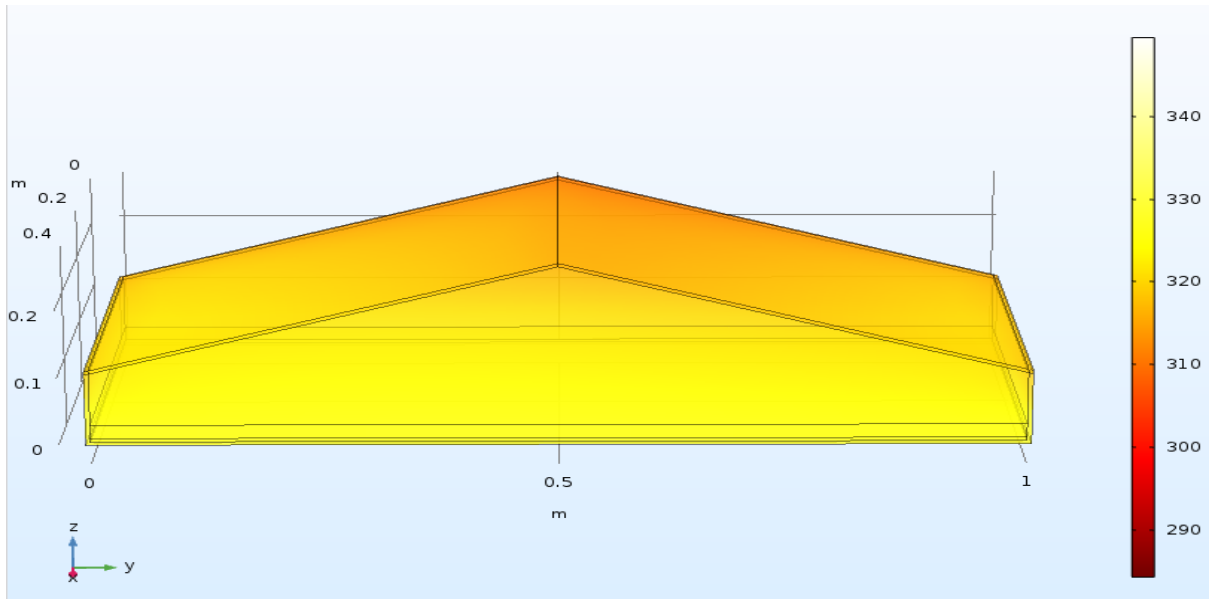


Figura 53. Temperatura del destilador en K para las 7:00 pm.

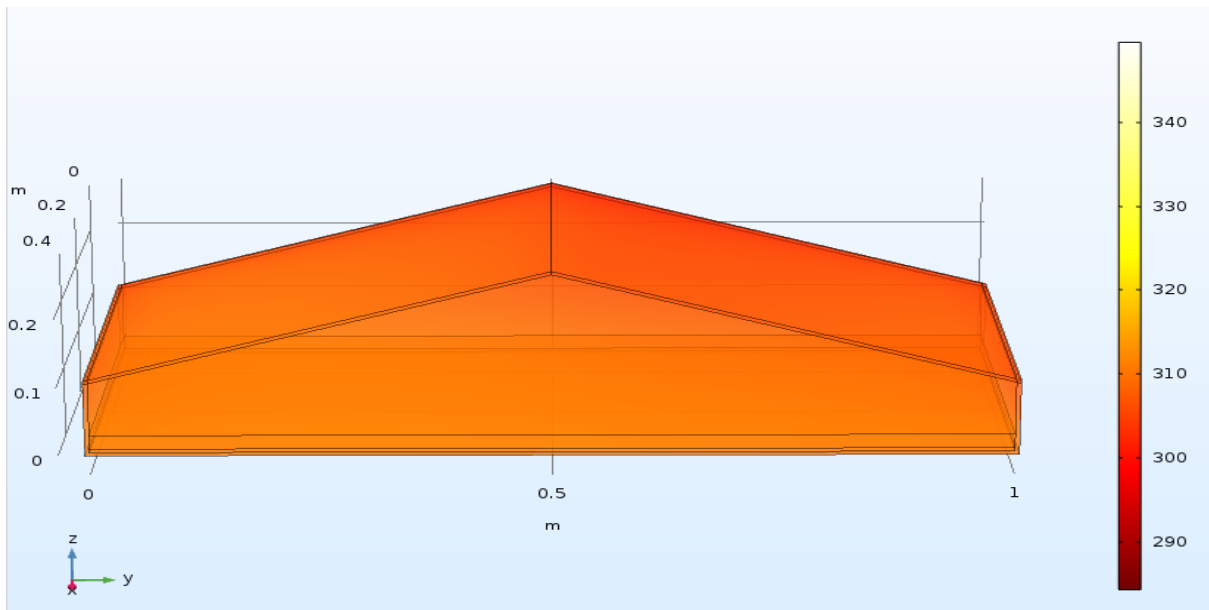


Figura 54. Temperatura del destilador en K para las 9:00 pm.

Respecto de la velocidad de los fluidos se tomaron dos puntos, a manera de ejemplo, dentro del destilador para obtener la magnitud de la velocidad del agua y el aire en estas posiciones. Dichos puntos son el $(0.5, 0.5, 0.002)$ que se encuentra en el agua, y el $(0.5, 0.5, 0.02)$ que se encuentra en la región del aire. Para estos puntos se obtuvieron gráficas de la rapidez respecto del tiempo (Figura 55).

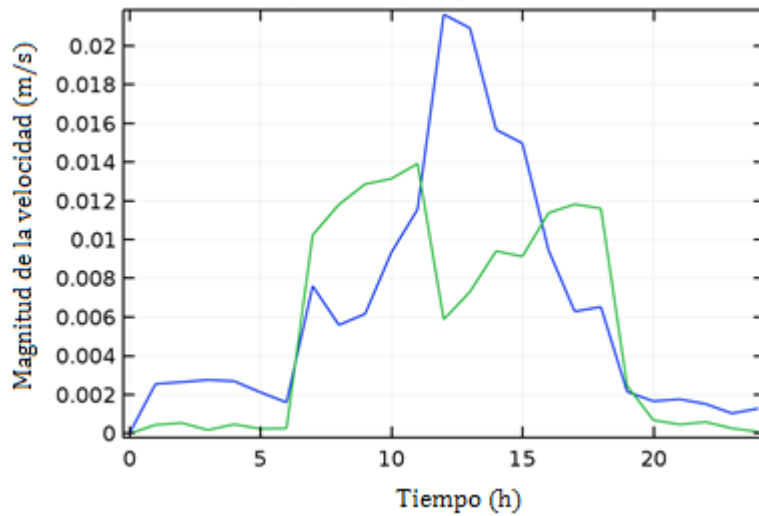


Figura 55. Magnitud de la velocidad para dos puntos dentro del destilador. La línea verde corresponde a la velocidad del punto que se encuentra dentro del agua y la azul corresponde al punto en la región del aire.

Desde la Figura 56 a la 60 se presentan algunas imágenes instantáneas de la velocidad para algunas horas particulares del día a manera de ejemplo. La magnitud de la velocidad de flujo del agua y aire dentro del destilador, se encuentra en el orden de 10^{-3} m y 10^{-2} m. La velocidad está representada por vectores en color rojo, de diversos tamaños (haciendo referencia a la magnitud de la velocidad) y diferentes direcciones. La rapidez está representada, por una gama de colores que van desde el azul, pasando por el verde y el amarillo, hasta el rojo. El color azul representa una rapidez menor que el verde y el amarillo. El rojo representa magnitudes de la velocidad más elevadas.

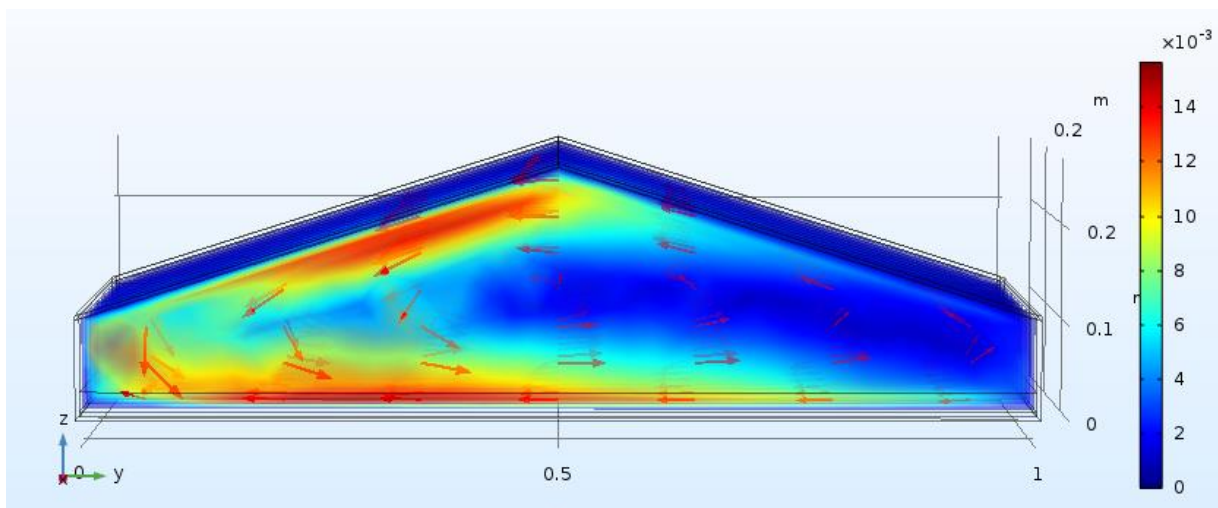


Figura 56. Campo de velocidades en el destilador para las 9:00 am

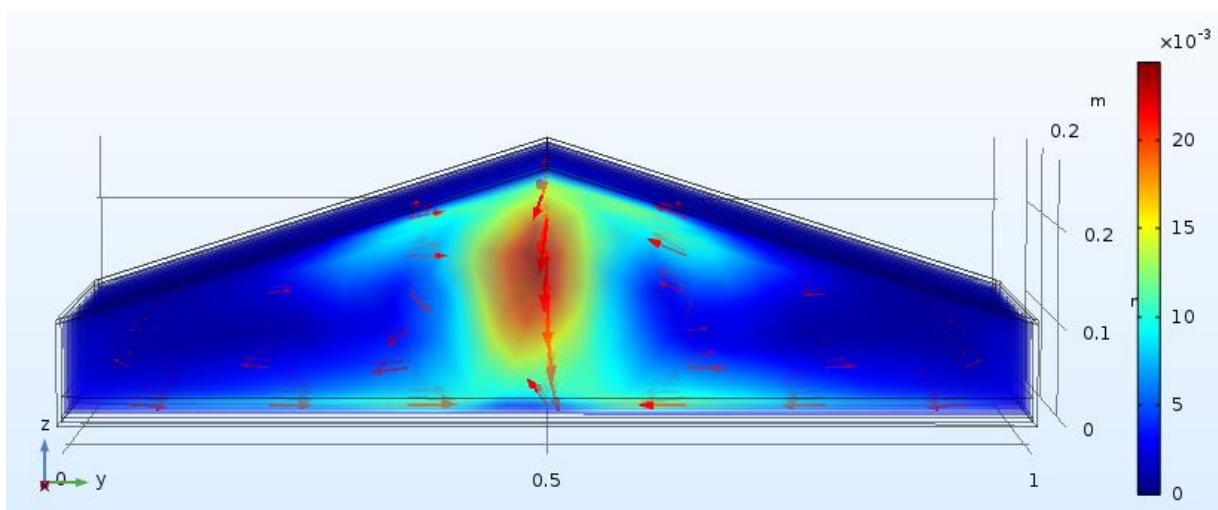


Figura 57. Campo de velocidades en el destilador para las 12:00 pm

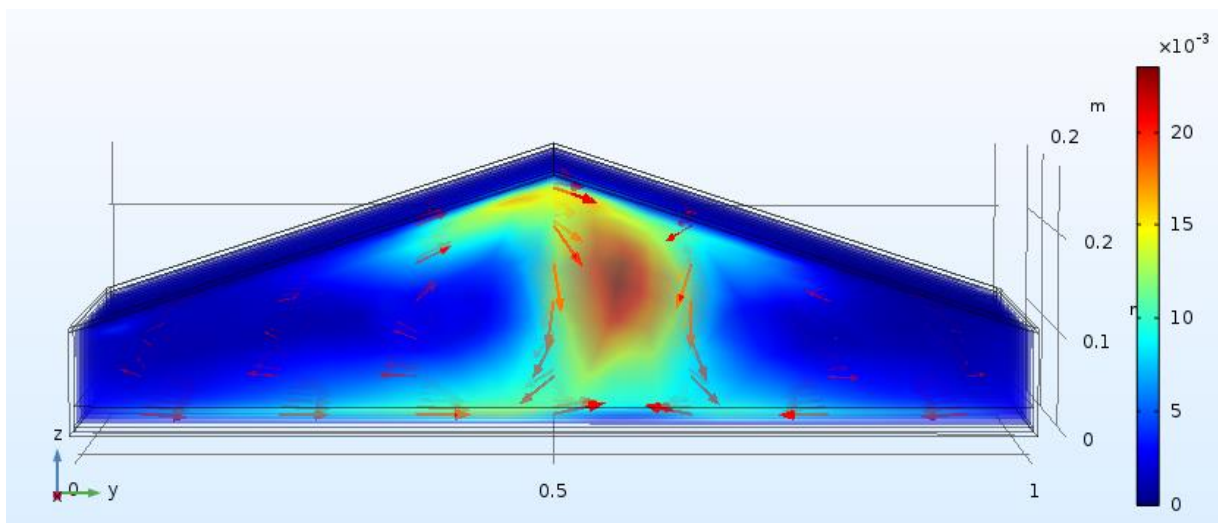


Figura 58. Campo de velocidades en el destilador para las 3:00 pm

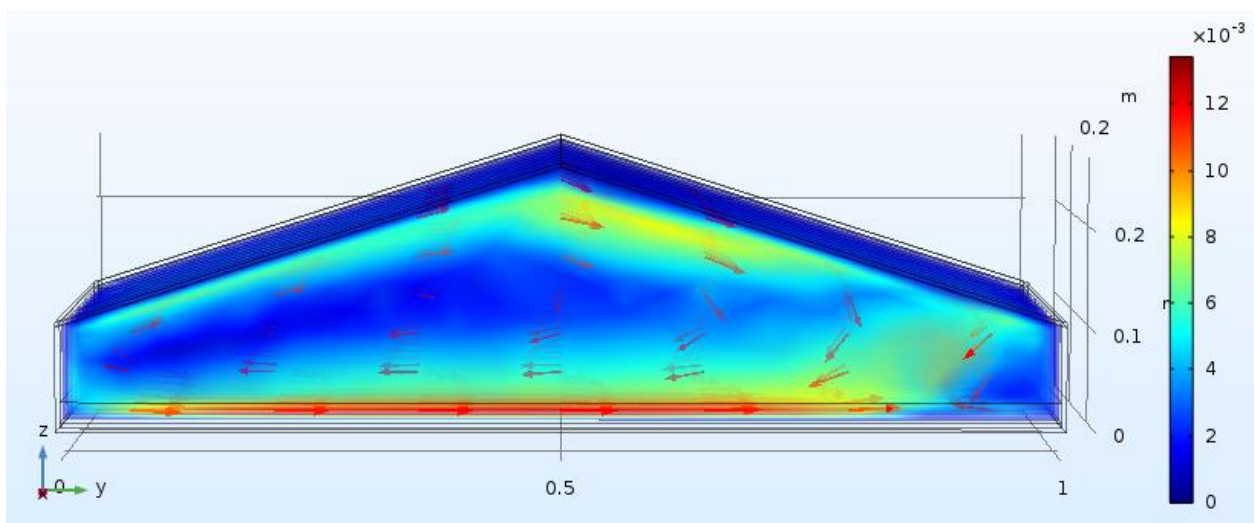


Figura 59. Campo de velocidades en el destilador para las 6:00 pm

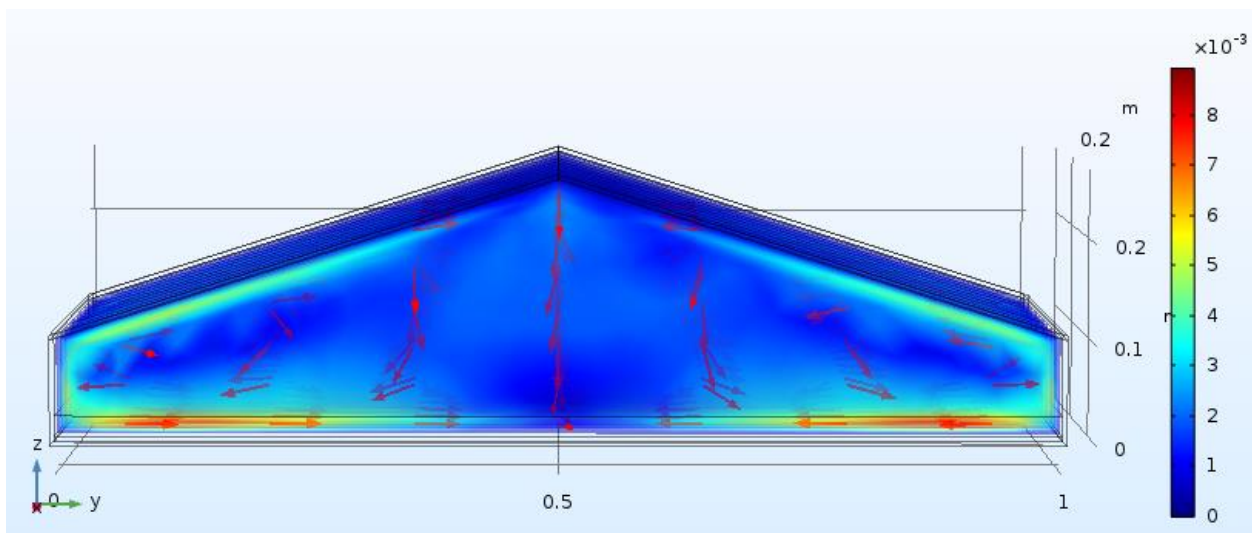


Figura 60. Campo de velocidades en el destilador para las 9:00 pm

El contenido de vapor se muestra en la Figura 61, para algunos puntos en la columna de aire: Dichos puntos son los (0.5,0.5,0.05g) (0.5,0.5,0.1) (0.5,0.5,0.15). El valor del contenido de vapor se estabiliza en 0.01 kg/m^3 para tiempos mayores de 0.6 h.

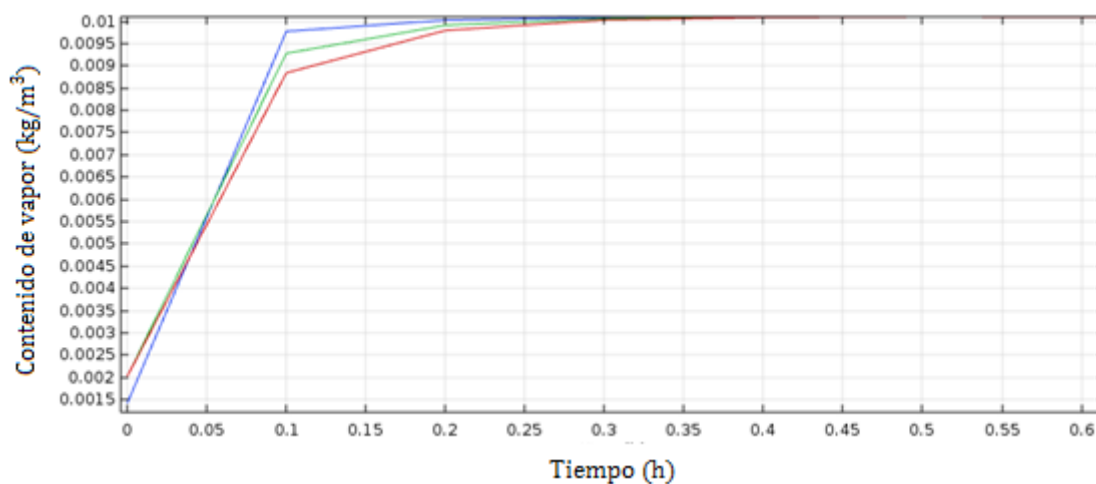


Figura 61. Contenido de vapor.

De igual forma, a manera de ejemplo, desde la Figura 62 a la 66 se muestra la humedad relativa para diferentes tiempos en la columna de aire en el destilador. Los colores cercanos al azul representan una humedad relativa baja; los colores cercanos al rojo representan una humedad relativa alta.

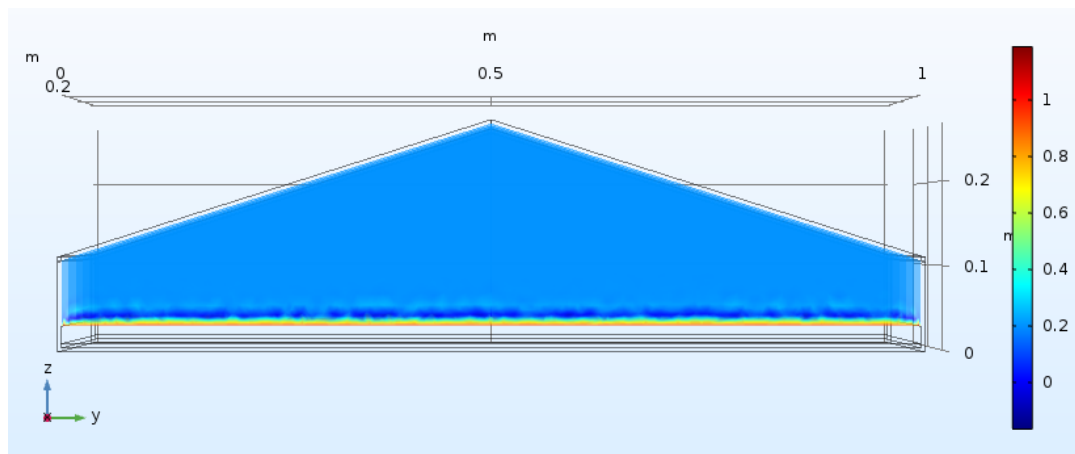


Figura 62. Humedad relativa en el destilador a 0 h.

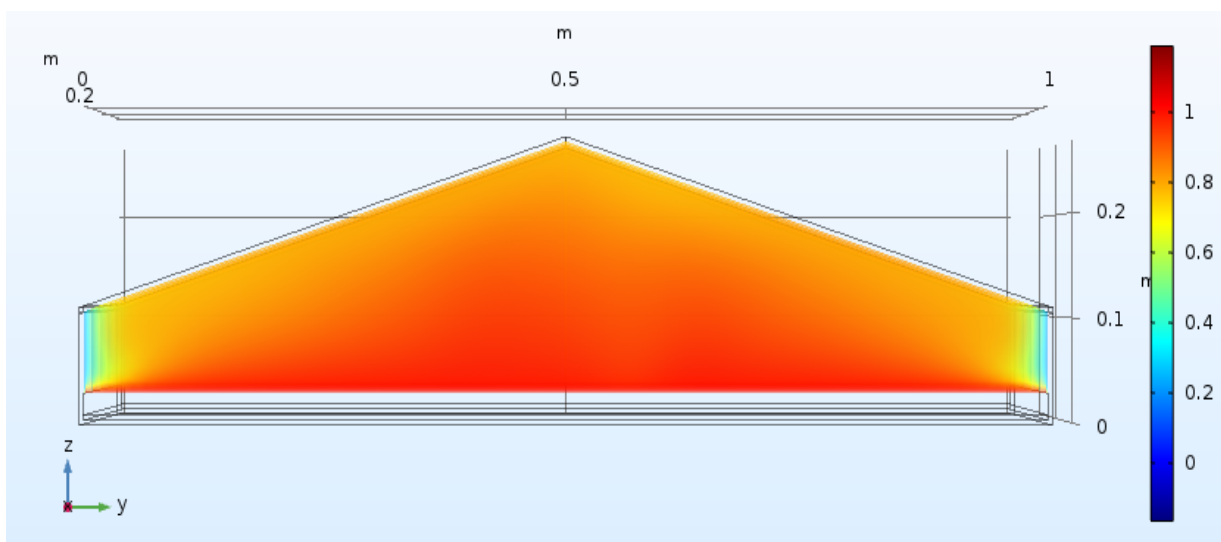


Figura 63. Humedad relativa en el destilador a 0.1 h.

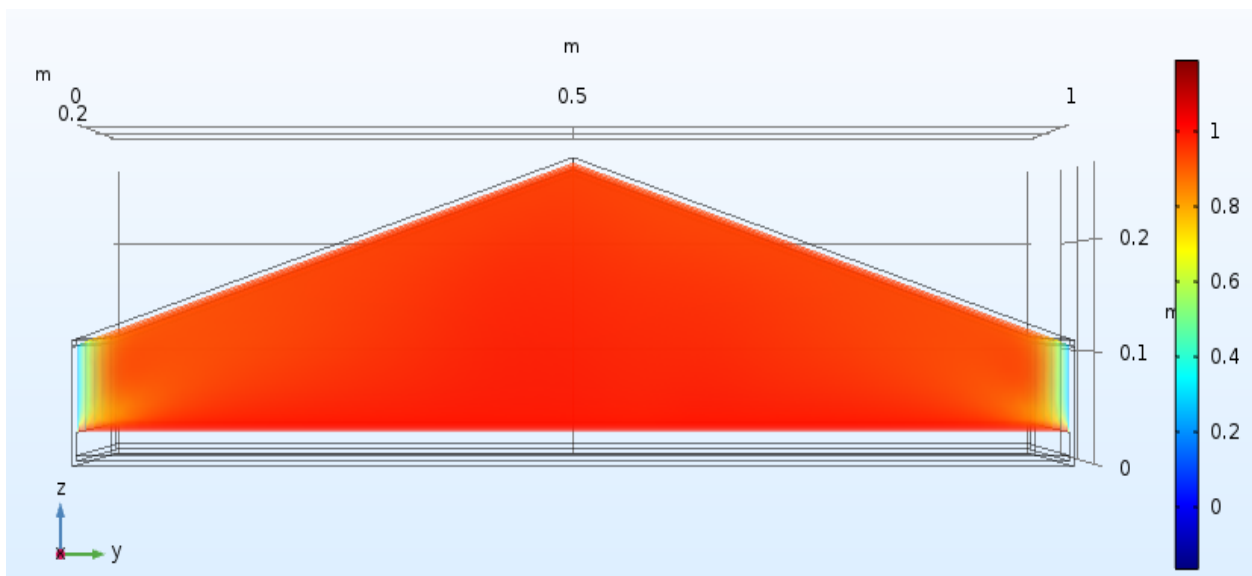


Figura 64. Humedad relativa en el destilador a 0.2 h.

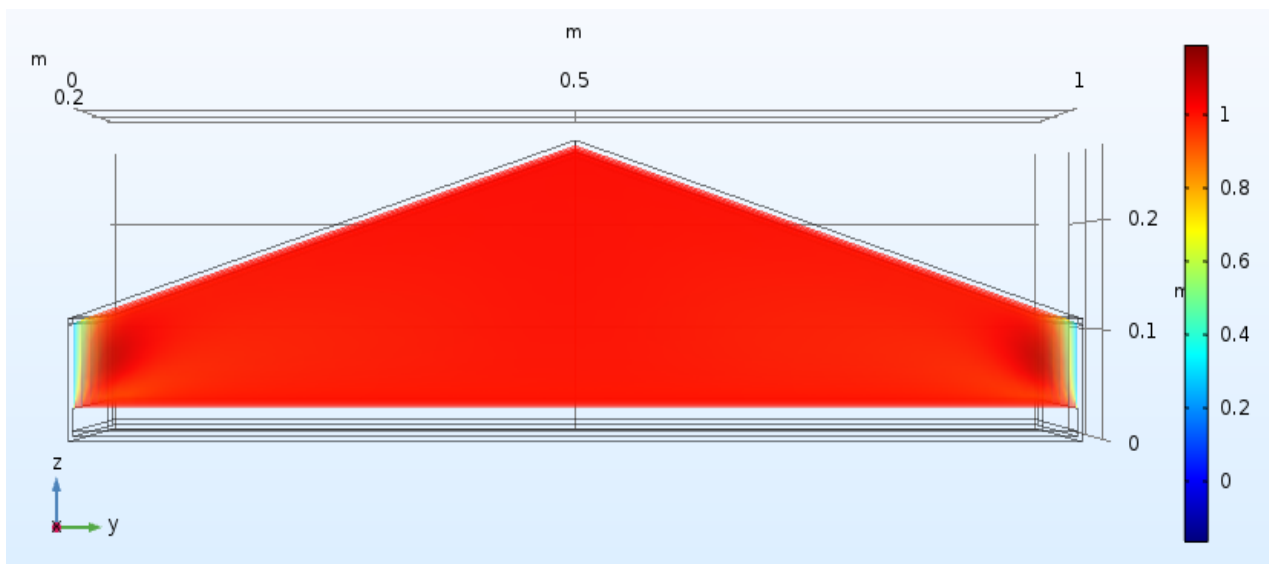


Figura 65. Humedad relativa en el destilador a 0.5 h.

f

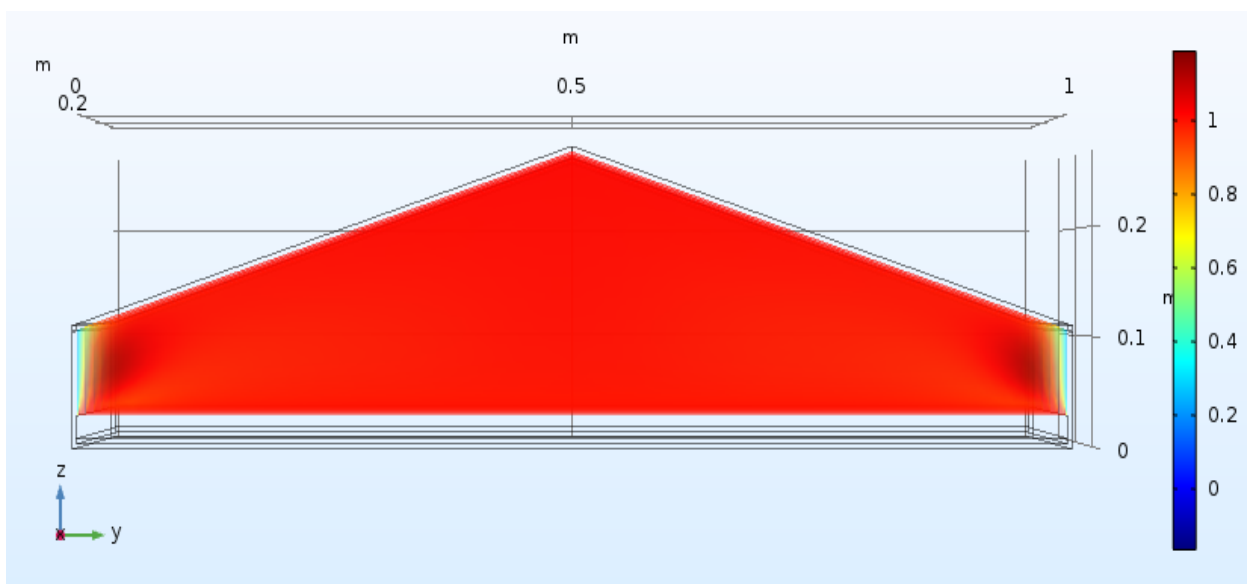


Figura 66. Humedad relativa en el destilador a 0.6 h.

Conclusiones y recomendaciones.

La presente investigación ha permitido obtener un prototipo de bajo costo, fácil mantenimiento y con una eficiencia térmica del 22.2%. Respecto de la obtención de agua diaria, el dispositivo produce en promedio 2 litros de agua. En este punto es necesario resaltar el hecho de que la caracterización del dispositivo se realizó durante la temporada del año con menor irradiación diaria y que comprende las estaciones del otoño e invierno. Por lo que la producción de agua y eficiencia será mayor durante la primavera y verano. Los valores obtenidos de los parámetros de calidad de agua estudiados, están por debajo de los límites permitidos por las normas mexicanas vigentes para su uso y consumo.

El estudio experimental que radicó en estudiar experimentalmente las características de los materiales que constituyen al módulo, particularmente los condensadores y la superficie selectiva absorbadora, permitió proponer mejores materiales y características geométricas de construcción. Respecto de las superficies absorbadoras, se concluye que el mejor material para los condensadores es el vidrio extra claro y delgado, puesto que tiene una transmitancia elevada (ver Figura 19) y favoreciendo la pérdida de calor hacia el ambiente, consiguiendo una mayor condensación del vapor que llega a esta parte del módulo. De acuerdo con la información recabada los mejores

ángulos de inclinación son los cercanos a 15°. Respecto de la película absorbedora, los materiales con la mayor absorción fueron el silicón con pigmentos comerciales y el hollín (93% y 92%, respectivamente) siendo buenos sustitutos del hypalon; sin embargo, los óxidos mixtos de hierro-manganeso presentan una alta resistencia al intemperismo por lo que constituyen una buena opción para ser utilizados como superficie absorbedora. También cabe recalcar que el hollín y el silicón con pigmentos comerciales resultan ser muy económicos comparados con el hypalon. La fibra de vidrio es una excelente opción para la construcción de la tina, puesto que es económica y se puede fabricar en una sola pieza evitando fugas; este material es muy resistente al intemperismo y es un buen aislante térmico impidiendo pérdidas de calor del absorbedor y de la columna de agua al ambiente.

Al analizar los resultados de la caracterización del dispositivo se concluye que la eficiencia del módulo de destilación se encuentra entre el 18.4 % y el 26.9 % con un valor promedio de 22.2 %.

Respecto de la calidad de agua destilada, para las dos muestras de agua estudiadas que corresponden al agua de grifo y agua simulada de mar, los parámetros medidos están por debajo de los valores que exige la norma mexicana NOM 127-1994. Para el pH los datos obtenidos para las dos muestras de salida del destilado fueron: para el destilado de agua de mar 7.3 y para el destilado de agua de grifo 7.8. La cantidad de sólidos totales disueltos tuvo los valores de 11 mg/L para el agua de mar y 13 mg/L para el agua de grifo. Para ambas muestras, la conductividad eléctrica tuvo un valor de 0.005 S/m, un valor para la salinidad de 3 g/L, la dureza para ambas muestras fue de 20 mg/L, sin color, ni sabor e inodoras. Respecto de los estudios bacteriológicos no se detectaron coliformes totales ni coliformes fecales tanto para el agua destilada a partir del agua de grifo, como para el agua destilada a partir del agua simulada de mar.

De la simulación numérica se obtuvieron perfiles de temperatura que describen el comportamiento de la base y las superficies absorbedoras a lo largo del día, se obtuvo

una descripción del flujo del agua y del aire dentro del módulo, además del comportamiento de la humedad con el tiempo. Se concluye que los cálculos realizados arrojan resultados satisfactorios sobre el comportamiento de la temperatura, el flujo y el transporte de humedad. Es necesario resaltar que la simulación tiene muchas virtudes pues permite definir condiciones sobre la posición geográfica, la orientación del dispositivo, la variación de la radiación solar y la variación de la temperatura ambiente a lo largo del día, la inclinación de las cubiertas condensadoras, los materiales usados para cada parte del destilador, el grosor de cada material, etc., ofreciendo la posibilidad de realizar nuevos cálculos considerando otros materiales, otras características geométricas y nuevas condiciones meteorológicas.

Recomendaciones.

En este punto es necesario recalcar que aún falta realizar mucha investigación para el mejoramiento de los destiladores solares y que en este trabajo sólo se han explorado algunas aristas, siendo posible profundizar mucho más en cada una de ellas. A continuación, se hacen algunas recomendaciones para posibles trabajos futuros, por lo que de forma puntual se recomienda:

1. Proponer y estudiar otros materiales que funcionen como absorbedores de la radiación solar caracterizándolos ópticamente.
2. Construir diferentes módulos de dos vertientes con distintas inclinaciones de las cubiertas condensadoras y diferentes alturas para evaluar su producción y determinar de manera concluyente cual es el mejor ángulo de inclinación y que altura debe tener el destilador del destilador.
3. Realizar comparaciones técnico-económicas para diferentes materiales que pueden usarse en la fabricación de los destiladores.

4. Utilizar el destilador solar con agua de mar real y agua salobre de diferentes regiones y analizar el agua de salida de él, que incluya todos los parámetros que aparecen dentro de la actualización de la NOM-112-SSA1-1994 para conseguir información completa sobre la composición del líquido destilado.
5. En el caso de la simulación numérica, hacer cálculos que incluyan distintos días del año, varios días de operación, variar materiales y geometría en el modelo para recabar información sobre posibles mejoras y optimización del equipo, así como proceder a la validación del modelo respecto de los resultados experimentales obtenidos.
6. Caracterizar al dispositivo por un periodo de tiempo más largo (por lo menos un año completo) para obtener datos de la eficiencia del mismo, así como perfiles de temperatura y variación de la producción para diferentes épocas del año.

Finamente, de este estudio desarrollado se vislumbra, que el agua obtenida con esta simple técnica podría aportar grandes beneficios respecto de las necesidades de la CDMX; este prototipo con 1 a 3 metros cuadrados por vivienda, podría aportar el agua potable suficiente para sus pobladores, sin que ya tengan que comprar el agua purificada comercial, sin embargo, aún se debe realizar trabajo de investigación para hacer esto realidad.

Referencias.

- Aayush K. (2010). Solar stills: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 446–453.
- Alemán-Nava G. S., Casiano-Flores V.H., Cárdenas-Chávez D.L., Díaz-Chavez R., Scarlat N., Mahlknecht J., et al. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: a review. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 32 (0), 140-153.
- Ali. F., Muftah, M. & Alghoul, A. (2014). Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 430–447.
- Almanza R. (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.
- Bejan, A. (1995). *Convection heat transfer*. Nueva York: Wiley.
- Benet, A. (1967) Informe del segundo symposium europeo “agua dulce a partir de agua de mar”. *Revista de obras publica vol1*, Valencia p 1039.
- Bermudez-Contreras, A., Thomson M., & Infield, D.G. (2008), Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico, *Desalination*, 220, 431-440.

- Çengel, Y.A. & Boles, M.A. (2009). *Termodinámica*. Sexta Edición, D.F., México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Cengel Y. A. (2007), *Transferencia de calor y masa*, Tercera edición. México, McGraw Hill.
- Chargoy del Valle N. (2010). Destilación solar de agua de mar en México, 1983 a 2003, *Serie Investigación y desarrollo, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Chiroque Luján, R. F. (2018). Comparación de destiladores solares para la obtención de agua dulce en pozos de agua salobre en la CC San Juan Bautista de Catacaos–Piura–2018
- Christoph, R., Hernández, Á., Muñoz, R., Ventura, J., & Büscher, W. (2018). Estudio de materiales de bajo coste para la mejora de la desalinización solar de agua de mar. *Realidad y Reflexión*, 2018, Año. 18, núm. 47, p. 58-73.
- Conagua (2014). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/PNH2014-2018.pdf>.
- Cooper, P.I. (1969). Solar distillation, Solar energy progress in Australia and New Zealand. *In: Publication of the Australian and New Zealand Section of Solar Energy*, vol. 8, p. 45.
- Cooper, P.I. (1969a). Digital simulation of transient solar still processes. *Int J of Solar Energy*, 12, 313-331.
- Cooper, P.I. (1969b). The absorption of radiation in solar stills. *Int J of Solar Energy*, 12, 333-346
- Cooper, P.I. (1972). Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills. *Int J of Solar Energy*, 13, 373-381.

- Cooper, P.I. (1973). The maximum efficiency of single-effect solar stills. *Int J of Solar Energy*, 15 (3), 205-214.
- Delyannis, E. (2003). Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*, 75, 357–366.
- Dévora-Isiordia, G. E., González-Enríquez, R., & Ruiz-Cruz, S. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Water Technology and Sciences* 4(3), 27-46.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes*, Fourth Edition, Nueva York: Wiley.
- Muñoz, G. F., Barrera, C. E., Chargoy del Valle, N., Ruiz, G. A., Juárez, S. C., & Sánchez, C. E. (2016) Estudio teórico experimental de varios destiladores solares de agua salada, Instituto de Ingeniería, UNAM; convocatoria 2016 de proyectos internos.
- Fernández, J.L., & Chargoy, N. (1990). Multi stage, indirectly heated solar still. *Journal of Solar Energy*, 44(4), 215-223.
- Fonseca, Susana; Abdala Rodríguez, Jorge L.; Griñán Villafañe, Pedro; Sánchez Hechavarría, & Jorge L. (2005). Prototipo de destilador solar de fibra de vidrio. *Tecnología Química*, vol. XXV, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 57-64.
- Xiao, G., Wang, X., Ni, M., Wang, F., Zhu, W., Luo, Z., & Cen, K. (2013). A review on solar stills for brine desalination. *Applied Energy*, 103, 642–652.
- Ghoneym, A., & Ileri, A. (1997). Software to analyze solar stills and an experimental study on the effects of the cover. *Desalination*, 114(1), 37–44.doi:10.1016/S0011-9164(97)00152-5.
- Howe, E. D., & Tleimat B. W. (1977). Fundamentals of water desalination, *Solar Energy*

Engineering, AAM Sayigh ed., Academic Press, Nueva York 4, 3 1-464.

Mahdi, J. T., Smith, B. E., & Sharif, A. O. (2011). An experimental wick-type solar still system: Design and construction. *Desalination*, 267(2-3), 233-238. doi: 10.1016/j.desal.2010.09.032.

Malik, M.A.S., Tiwari, G.N., Kumar, A., & Sodha, M.S. (1982). *Solar distillation: a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction, and performance*, New York, EUA: Pergamon Press.

McCracken, H (1965). Solar still pans— The search for inexpensive and reliable materials. *Solar Energy*, 9(4), 201-207

McCracken, H (1990). *Distillate production of a simple direct solar still*. Sunworld, 14(3), 83-87.

Meinel A (1982). *Aplicaciones de la Energía Solar*, España: Reverte.

Modificación a la NORMA Oficial Mexicana NOM -127-ssa1-1994. *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*.

Nayi, K. H., & Modi, K. V. (2018). Pyramid solar still: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 136-148.

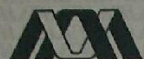
NORMA Oficial Mexicana NOM -112-SSA1-1994 (1994). *Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable*.

NORMA Oficial Mexicana NOM -127-SSA1-1994 (1994). *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*.

- NORMA Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014 (2014). *Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos.*
- NORMA MEXICANA NMX-AA-042-SCFI-2015 Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli- Método del Número Más Probable en tubos múltiples (CANCELA A LA NMX-AA-42-1987).
- Palacio, A., & Fernandez, J.L. (1993). Numerical analysis of greenhouse-type solar stills with high inclination. *Solar Energy*, 50(6), 469-476.
- Panchal, H. N., & Patel, N. (2018). ANSYS CFD and experimental comparison of various parameters of a solar still. *International Journal of Ambient Energy*, 39(6), 551-557.
- Pérez, O., & Tanner, W. (1985). Sonntlán: proyecto solar experimental. *La Revista Solar, publicación de la Asociación Nacional de Energía Solar, No 10*, 3-8
- Pocaterra L., & Javier E. (2002). Diseño de planta experimental de desalinización solar para abastecer de agua potable a zonas rurales de la guajira venezolana (tesis de ingeniería). Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Porta, M.A., & Fernández, J.L. (1996). Discusión del artículo “Mathematical Modeling of Solar Stills in Iran”, de D Mowla y G Karimi, aparecido en *Solar Energy*, 55(5), 389-393 (1995). *Solar Energy*, 56(6), 635-636.
- Porta, M.A., Chargoy, N., & Fernández, J.L. (1997). Extreme operating conditions in shallow solar stills. *Journal of Solar Energy*, 61(4), 279-286.
- Porta, M.A., Rubio, E., & Fernández J.L. (1998). Visualization of natural convection inside shallow solar stills, *Journal Experiments in Fluids*, 25, 369-370.

- Porta, M.A., Rubio, E., & Fernández, J.L. (1998). Experimental measurement of the water-cover heat transfer coefficient inside shallow solar stills. *Applied Thermal Engineering*, 18(1-2), 69-72.
- Rincón, E.A. (1999). Estado del arte de la investigación en energía solar en México, Cuadernos Fundación ICA, *edición especial, ICA*, México, 32-36.
- Rubio, E. (2002), Convección natural en destiladores solares de caseta de gran sección, tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 87 pp.
- Rubio, E., Fernández, J.L., & Porta, M.A. (2004). Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills. *Renewable Energy*, 29, 895-906.
- Rubio, E., Porta, M.A., & Fernández, J.L. (2000). Cavity geometry influence on mass flow rate for single and double slope solar stills. *Applied Thermal Engineering*, 20, 1105-1111
- Rubio, E., Porta, M.A., & Fernández, J.L. (2002). Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still. *Renewable Energy*, 27(2), 301-308.
- Sarkar, M.N.I., Sifat, A.S., Reza, S.M.S., & Sadique, M.S. (2017). A review of optimum parameter values of a passive solar still and a design for southern Bangladesh. *Renewables* 4:1.
- Sathyamurthy, R., & Arunkumar, T. (2018). Different parameter and technique affecting the rate of evaporation on active solar still-a review. *Heat and Mass Transfer*, 54(3), 593-630.
- Singh, H. N., & Tiwari, G. N. (2004). Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions. *Desalination*, 168, 145–150. doi: 10.1016/j.desal.2004.06.180.

- Shukla, S.K., & Sorayan, V.P.S (2005). Thermal modeling of solar stills: an experimental validation
Renewable Energy, 30 (5), 683-699.
- Tiara, G.N. (2003). *Solar energy: fundamentals, design, modeling and application*. New York/New Delhi: CRC Press/Narosa Publishing House.
- Tiris, C., Tiris, M., & Ture, I.E. (1996). Improvement of basin type solar still performance use of various absorber materials and solar collector integration. *J Renew Energy*, 9 (1/4), 758-761.
- Velmurugan, V., & Srithar, K. (2011). Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1294–1304.
- Wilson, B.W. (1957). Solar distillation research and its application in Australia. *In: Proceedings of Symposium on Saline Water Conversion, Washington, DC, Public. No. 568*, pp. 123–130.
- Yadav, Y.P., & Prasad, Y.N. (1991). Parametric investigations on a basin type solar still. *Energy Convers and Mgmt*, 31(1), 7-16.
- Zhang, Y., Sivakumar, M., Yang, S., Enever, K., & Ramezaniapour, M. (2018). Application of solar energy in water treatment processes: A review. *Desalination*, 428, 116-145.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00054

Matrícula: 2161501405

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE UN
DESTILADOR SOLAR PASIVO.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:00 horas del día 11 del mes de junio del año 2019 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. RAUL LUGO LEYTE
M.EN I. NORBERTO CHARGOY DEL VALLE
DR. FEDERICO GONZALEZ GARCIA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: CARLOS ELADIO JUAREZ SALINAS

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

REVISÓ

MTRA ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JESUS ALBERTO OCHOA TAPIA

PRESIDENTE

DR. RAUL LUGO LEYTE

VOCAL

M. EN I. NORBERTO CHARGOY DEL VALLE

SECRETARIO

DR. FEDERICO GONZALEZ GARCIA