



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE  
DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MARGARITA CASTILLO TÉLLEZ

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ, IER-UNAM  
COMITÉ TUTORAL  
DR. RAÚL SUÁREZ PARRA, IER-UNAM  
DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADAREZ, IER-UNAM  
DR. JOSE LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS, II-UNAM  
DR. OCTAVIO CAZAREZ CANDIA, IMP

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON  
CONVECCIÓN FORZADA.

## DEDICATORIA.

---

*A mis hijos, Sergio y Héctor por quienes vale la pena vivir.  
A mis padres, ejemplo de entrega, orgullo en mi vida.*



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### AGRADECIMIENTOS

---

A Dios por hacerme sentir su presencia durante toda mi vida, por darme alegrías en los buenos momentos, y en los malos, hacerme ver que los necesito, de lo contrario, no podría reunir las experiencias necesarias para transmitirselas a mis hijos.

A mis padres, por apoyarme cada minuto de mi vida, por los valores que me han enseñado, por haber luchado contra todas las adversidades para darme una buena educación, por ser el ejemplo a seguir para salir adelante y por todos los consejos que han guiado mi camino y que transmitiré con mucho orgullo a mis hijos. Gracias por estar conmigo durante cada etapa de mi vida.

A mis hermanos: Betty, Ade, Gely y Totó; a mis cuñados: Ody y Danny, por estar conmigo y apoyarme siempre, por ser el ejemplo máximo de la unión de la familia, por tenerme paciencia y continuar todos juntos, pese a las adversidades de la vida.

A mi tutor, el Dr. Aarón Sánchez, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación han logrado la culminación de este trabajo

A mis sinodales, el Dr. Raúl Suárez, el Dr. Octavio García, el Dr. José Luis Fernández y el Dr. Octavio Cazarez, por tomarse el tiempo de enriquecer éste trabajo con su experiencia. Especialmente al Dr. Isaac Pilatowsky, las aportaciones de todos ustedes han sido de gran valor incluso para mi vida profesional y personal.

A mis amigos, gracias por su compañía durante todo este tiempo en el que he vivido momentos felices y tristes, gracias por ser MIS AMIGOS: Erick, Andrés, Viri, Claudia, Leo, Samuel, Onésimo, Gibrán, Iván, Amílcar, Beto, Esteban, nunca los olvidare.

A todos los compañeros del IER que me apoyaron incondicionalmente durante todo el trayecto de mi trabajo en la Plataforma Solar y en Posgrado: al Ing. Jaime, a Don Miguel, a Chuy (estación meteorológica), Sra. Betty, especialmente al Maestro Campos, quien incondicionalmente apoya a todo alumno que se le acerque por ayuda.

A mi escuela, la UNAM, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de estudiar y ser una profesionista.

A CONACYT, ya que sin su apoyo económico, este trabajo doctoral no se hubiera realizado.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON  
CONVECCIÓN FORZADA.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN. ....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES .....</b>	<b>16</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>17</b>
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO PRIMERO. LA DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA .....</b>	<b>20</b>
1.1 <i>INTRODUCCIÓN.</i> .....	20
1.2 <i>VENTAJAS DEL USO DE LA ENERGÍA SOLAR.</i> .....	22
1.3 <i>INICIO DE LA DESTILACIÓN SOLAR EN EL MUNDO Y EN MÉXICO.</i> .....	24
1.4 <i>LA TECNOLOGÍA DE DESTILACIÓN TÉRMICA.</i> .....	29
1.5 <i>DESTILADORES SOLARES DE AGUA: TIPOS CONVENCIONALES.</i> .....	35
1.6 <i>ESTADO DEL ARTE ACTUAL DE LOS DESTILADORES SOLARES.</i> .....	37
1.7 <i>GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN UN DESTILADOR SOLAR DE AGUA.</i> .....	43
1.8 <i>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.</i> .....	46
<b>CAPÍTULO SEGUNDO. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>48</b>
2.1 <i>INTRODUCCIÓN.</i> .....	48
2.2 <i>DESCRIPCIÓN DEL DESTILADOR EXPERIMENTAL.</i> .....	48
2.3 <i>DISEÑO DEL DESTILADOR BAJO ESTUDIO.</i> .....	50
2.4 <i>INSTRUMENTACIÓN Y TOMA DE DATOS.</i> .....	56
2.5 <i>JUSTIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.</i> .....	58
2.6 <i>CALIBRACIÓN DE SENSORES.</i> .....	60
2.7 <i>ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE.</i> .....	61
2.8 <i>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</i> .....	64
2.9 <i>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.</i> .....	65



# ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

<b>CAPÍTULO TERCERO. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA.....</b>	<b>66</b>
3.1 <i>INTRODUCCIÓN.....</i>	66
3.2 <i>PREPARACIÓN DE AGUA SALINA CALIDAD AGUA DE MAR. ....</i>	66
3.3 <i>TEMPERATURAS EN LOS DESTILADORES.....</i>	67
3.4 <i>COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL DESTILADOR CON AGUA DE MAR Y AGUA POTABLE. ...</i>	69
3.5 <i>RENDIMIENTO DE LOS DESTILADORES.....</i>	70
3.6 <i>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</i>	72
<b>CAPÍTULO CUARTO. ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA... </b>	<b>73</b>
4.1 <i>INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO CUARTO.....</i>	73
4.2 <i>IMPLEMENTACIÓN DE LA CONVECCIÓN FORZADA EN UN DESTILADOR SOLAR.....</i>	73
4.2.1    DESTILADOR CON CONVECCIÓN NATURAL. ....	75
4.2.2    DESTILADOR CON CONVECCIÓN NATURAL Y CON CUBIERTA DE ACRÍLICO. ....	77
4.2.3    DESTILADOR CON CONVECCIÓN FORZADA, VENTILADORES EN SERIE Y DOBLE CASETA. ....	79
4.2.4    DESTILADOR CON CONVECCIÓN FORZADA, VENTILADORES EN SERIE Y SIN TÚNEL DE VIENTO. ....	84
4.3 <i>EFICIENCIA EN EL DESTILADOR DE DOBLE CASETA.....</i>	86
4.4 <i>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....</i>	88
<b>CAPÍTULO QUINTO. TRABAJO TEÓRICO.....</b>	<b>90</b>
5.1 <i>INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO.....</i>	90
5.2 <i>MODELO TRANSITORIO.....</i>	90
5.2.1    INTRODUCCIÓN.....	90
5.2.2    MODELO FÍSICO.....	91
5.2.3    ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS PROCESOS TÉRMICOS DENTRO DE UN DESTILADOR SOLAR DE CASETA.....	92
5.2.4    ECUACIONES PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS. ....	93
5.2.5    SOLUCIÓN NUMÉRICA Y MODELO COMPUTACIONAL. ....	99
5.2.6    VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES.....	101
5.3 <i>MODELO EN 3D.....</i>	108
5.3.1    INTRODUCCIÓN.....	108
5.3.2    MODELO FÍSICO.....	108



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON  
CONVECCIÓN FORZADA.

5.3.3	ECUACIONES QUE RESUELVE FLUENT. ....	109
5.3.4	TRABAJO DE SIMULACIÓN .....	109
5.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO. ....	112
<b>CONCLUSIONES FINALES</b> .....		<b>114</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		<b>118</b>
<b>ANEXO I. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS ÓPTICOS Y TÉRMICOS INVOLUCRADOS EN LA DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA.</b> .....		<b>126</b>
<b>ANEXO II. GLOSARIO DE TÉRMINOS.</b> .....		<b>131</b>



# ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Situación del agua en el mundo. IMTA/CONAGUA, 2012. ....	20
Figura 2: Brecha Hídrica actual y al 2030. ....	21
Figura 3: Destilador solar de doble caseta, IER-UNAM .....	25
Figura 4: Dos Desaladoras Multietapas en Arabia Saudí. Estas plantas utilizan agua del mar Arábigo para la desalinización y la producción de agua potable. ....	29
Figura 5: Diagrama de proceso de destilación súbita multietapas .....	31
Figura 6: Diagrama de proceso de multiefecto .....	32
Figura 7: Dos módulos MED de 17,500 m <sup>3</sup> /día .....	32
Figura 8: Planta desalinizadora por compresión de vapor fabricada por los Astilleros de Israel. ....	33
Figura 9: Diagrama de flujo de proceso de compresión de vapor.....	33
Figura 10: Planta de electrodiálisis.....	34
Figura 11: Proceso de la tecnología electrodiálisis .....	34
Figura 12: Destilador solar de doble caseta, caseta sencilla y bóveda. ....	35
Figura 13: Destilador de cascada. ....	36
Figura 14: Destilador solar esférico. ....	37
Figura 15: Representación esquemática de los destiladores solares fabricados:1) Ventiladores; 2) Cubierta de acrílico; 3) Cubierta de vidrio.....	49
Figura 16: Espectro de la transmisión óptica de los materiales analizados.....	52
Figura 17: Espectro de la absorción óptica de los materiales analizados con parados con el espectro de la radiación solar bajo condiciones AM1.5. ....	52
Figura 18: Espuma de poliuretano.....	54
Figura 19: Diferentes espesores de la espuma poliuretano con respecto al flujo de calor a través del cobre y aislante.....	55
Figura 20: Diferentes espesores de la fibra vidrio con respecto al flujo de calor a través del cobre y aislante.....	55
Figura 21: Diferentes espesores de la madera con respecto al flujo de calor a través del cobre y aislante.....	56
Figura 22: Vista del registro de la masa de agua destilada. ....	58
Figura 23: Ubicación de los termopares en el destilador .....	58
Figura 24: Diagrama esquemático de la ubicación de los ventiladores ubicados en el túnel de viento. ....	61



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Figura 25: Vista del detalle de la interconexión en paralelo de los ventiladores .....	62
Figura 26: Vista de ventiladores y túnel de viento ubicados en el destilador con convección forzada.....	62
Figura 27: Curvas características velocidad-voltaje para cada uno de los ventiladores utilizados.....	63
Figura 28: Diferentes puntos en los que se tomaron velocidades en cada una de las caras de la caseta.....	63
Figura 29: Diagrama general del equipo experimental y los sistemas de registro de datos en la estación meteorológica y solarímetro del IER. ....	64
Figura 30: Irradiancia y temperatura ambiente medida por la estación solarimétrica del IER. La irradiación para este día (8 de enero) fue de 4.0 kWh/m <sup>2</sup> ).....	68
Figura 31: Humedad relativa registrada por la estación solarímetro del IER (8 de enero del 2011).....	68
Figura 32: Temperaturas medidas dentro del destilador que contiene agua potable. 69	
Figura 33: Comparativo de las temperaturas registradas.....	70
Figura 34: Producción de agua en función de la energía solar recibida en el captador. ....	72
Figura 35: Destilador solar de agua de doble caída en operación trabajando con convección natural .....	74
Figura 36: Temperaturas medidas dentro y fuera del destilador solar con convección natural. ....	75
Figura 37: Irradiancia y velocidad de viento medidas en la estación solar ubicada en la plataforma del IER para el día 9 de junio. La irradiación fue de 4.98 kWh/m <sup>2</sup> .....	76
Figura 38: Agua destilada obtenida (litros) del destilador con convección natural en función de la energía recibida en el captador (Wh) del 9 al 13 de junio.....	77
Figura 39: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección natural y con cubierta de acrílico, el día 8 de julio.....	78
Figura 40: Irradiancia y velocidad del viento obtenidas en la estación meteorológica el día 8 de julio. ....	78
Figura 41: Obtención de agua destilada (l) del 8 al 12 de julio en función de la energía solar recibida (Wh) en el captador.....	79
Figura 42: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada de aire a una velocidad promedio de 2.5 m/s, el día 24 de julio del 2012.....	80
Figura 43: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada a una velocidad promedio de 3.5 m/s, el día 2 de julio del 2012.....	81



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Figura 44: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada de aire a una velocidad promedio de 5.5 m/s, el día 2 de agosto del 2012. ....	82
Figura 45: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada de aire a una velocidad promedio de 6.9 m/s, el día 13 de septiembre del 2012.....	82
Figura 46: Destilador solar con convección forzada y sin la cubierta de acrílico.....	84
Figura 47: Comportamiento térmico del destilador con convección forzada y sin túnel de viento e irradiancia el día 6 de febrero del 2013. ....	85
Figura 48: Obtención de agua destilada acumulada durante el día 6 de febrero del 2013.....	85
Figura 49: Balances de energía en el destilador. ....	99
Figura 50: Datos obtenidos por el Data logger el día 8 de marzo del 2012, tomando lecturas a partir de las 6 am.....	102
Figura 51: Datos obtenidos por el simulador el día 8 de marzo del 2012, tomando lecturas a partir de las 6 am.....	103
Figura 52: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura de la cubierta de vidrio.....	104
Figura 53: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura del agua a destilar. ....	104
Figura 54: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura del aislante. ....	105
Figura 55: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura del absorbedor. ....	105
Figura 56: Producción de agua destilada acumulada durante el día.....	106
Figura 57: Producción de agua destilada en intervalos de 10 minutos durante el día. ....	106
Figura 58: Producción de agua destilada calculada teóricamente.....	107
Figura 59: Comparación entre el agua destilada e irradiancia (simulación y datos experimentales).....	107
Figura 60: Vista isométrica del diseño del destilador; se muestra el enmallado.....	109
Figura 61: Vectores de velocidad en la doble caseta.....	110
Figura 62: Contornos de temperatura en el interior de la caseta y el absorbedor.....	111
Figura 63: Distribución de la temperatura en la base del absorbedor para diferentes velocidades de viento. ....	112
Figura 64: Haz de luz que llega al destilador solar de doble caseta. Una parte es reflejado, otra parte es absorbido y otra fracción atraviesa el destilador.....	126



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Figura 65: Procesos térmicos y ópticos que se llevan a cabo en un destilador solar de agua. .... 130

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores ópticos de diferentes materiales obtenidos con el espectrofotómetro. ....	51
Tabla 2: Conductividad de diferentes materiales.....	53
Tabla 3: Conductividad de diferentes materiales.....	53
Tabla 4: Porcentaje de exactitud de los instrumentos de medición brindados por los fabricantes. ....	57
Tabla 5: Características y descripción de los instrumentos de medición brindados por los fabricantes. ....	57
Tabla 6: Componentes y cantidades de compuestos de agua preparada en laboratorio. ....	67
Tabla 7: Resultados de producción de agua destilada en campo.....	71
Tabla 8: Concentrado de datos obtenidos en el destilador por convección forzada. ....	83
Tabla 9: Concentrado de datos obtenidos en el destilador por convección forzada. ....	87



## RESUMEN.

---

Uno de los grandes retos del siglo XXI será mejorar nuestra gestión y la utilización de agua, para garantizar que este recurso fundamental soporte una población mundial de nueve mil millones o más en 2050. Una contribución sustantiva para la solución de este reto es el uso eficaz de la ciencia, que mejore el uso de nuestros recursos de agua.

El presente proyecto ofrece un panorama de la destilación solar como una tecnología que puede contribuir al logro de dichos objetivos, y el desarrollo y estudio del comportamiento de un destilador de agua prototipo cuyo diseño geométrico es tipo doble caseta, los efectos de una convección forzada sobre la tasa de evaporación-condensación, así como el desarrollo de un modelo matemático validado, que proporciona una herramienta de análisis teórico.

El trabajo contribuye para el desarrollo de la tecnología de destilación solar en su parte técnica, optimizando el proceso para una obtención mayor de agua producto, haciendo más viable comercialmente la tecnología. Para tal efecto, se construyeron dos destiladores idénticos, que permitan estudiar paralelamente diferencias en los resultados obtenidos de los prototipos desarrollados y analizar que variables las producen.

Ambos destiladores fueron instrumentados con sensores que permiten la adecuada recolección de datos tales como volúmenes obtenidos, tiempos para su obtención, etc. y están ubicados de manera que permitan medir los comportamientos de temperatura en las diferentes zonas. Además se instaló un adquirente de datos para recabar la información de manera oportuna y poderla tener almacenada con seguridad.

Se desarrollaron 4 propuestas para mejorar el resultado de la productividad de los destiladores, con diferentes adaptaciones que permitieran incrementar el resultado de la convección. Una vez ejecutada la parte experimental se realizó la evaluación de dichas alternativas.

Los resultados prácticos obtenidos han sido comparados con el modelo matemático, que permite simular el funcionamiento del destilador, manipulando las variables involucradas en el proceso. El modelo representa la posibilidad de replicar resultados, sin requerir desarrollos prácticos y estar seguros de la validez de los resultados. Finalmente se utilizó un simulador Fluent, para conocer el detalle de las temperaturas en las diferentes zonas del destilador.



## INTRODUCCIÓN.

---

Actualmente, las necesidades de agua y energía crecen rápidamente no sólo en nuestro país, sino en todo el mundo.

Esta carencia de agua ha fomentado e impulsado a la realización de todo tipo de proyectos dirigidos a satisfacer estos requerimientos, en los que, el abastecimiento sustentable de agua un agente preponderante para el crecimiento económico y el desarrollo social de cada región, sobretodo en regiones áridas, costeras o en las zonas conurbadas de las grandes ciudades; al mismo tiempo, es necesario ofrecer proyectos que colaboren y ofrezcan protección para los ecosistemas.

Dada la situación de la escasez de agua por la que se atraviesa en muchas zonas del mundo, un importante número de países han dedicado muchos esfuerzos a obtener agua dulce de fuentes tales como el mar, lagunas o pozos salobres. Un proceso que permite obtener agua dulce de dichas fuentes es la desalinización, que consiste en reducir el contenido mineral del agua de mar o salobre extrayendo la sal para obtener agua dulce.

Este proceso de desalación de agua, no solo representa un reto por los procesos tecnológicos que implica sino además por la necesidad de obtener agua bebible de manera económica; al observar el alto consumo de energía para producir un metro cúbico de agua potable, se ve la importancia que tiene este parámetro y porque resulta fundamental.

Debido entonces al problema de la falta de agua cada día más agudo y la necesidad de obtener ésta de manera económica es cada vez más necesaria la búsqueda de alternativas energéticas que sirvan para alimentar las necesidades y demandas de la sociedad, por lo que con la destilación solar se plantean nuevos objetivos para la actuación, enfocadas a fuentes de energías renovables que no causan alteraciones graves al medio ambiente, que garantizan su preservación y evitan la explotación irracional de las materias primas.

El uso de la energía solar, como forma de obtener energía para la transformación en diferentes procesos y especialmente para la desalación de agua, es cada día más común. Por lo que resulta necesaria la utilización de estas alternativas energéticas, puesto que junto con el ahorro y el aprovechamiento de los recursos son la clave para un futuro limpio, seguro y eficaz.

La destilación solar de agua ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial. Durante los años 1950 y 1960 los costos de los combustibles fósiles eran bajos



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

y la conciencia mundial sobre los daños a los ecosistemas por el uso de estos combustibles, prácticamente no existía; consecuentemente se optó por el uso de estos combustibles para producir agua destilada, ya que resultaban más económicos que la destilación solar. Como resultado de lo anterior la mayoría de los estudios y la construcción de los destiladores solares de gran escala fueron descontinuados alrededor de los años setentas.

En nuestro país en 1970 se puso en operación la planta termoeléctrica Benito Juárez de Rosarito, Baja California, la primera planta desaladora por destilación y una de las más grandes del mundo en su época, con una capacidad de producción de 28 350 m<sup>3</sup>/día (WDR, 1970). En la década de los setenta, el bajo costo del petróleo impulsó la instalación de desaladoras por destilación, pero las siguientes crisis hicieron muy costosa la producción de agua desalada por este proceso. En el período que va de 1970 a 2000 se instalaron pequeñas plantas desaladoras en complejos turísticos y para purificación de agua de red municipal para producción de agua embotellada.

Pese a que cada vez más gobiernos se están preocupando y han logrado identificar y evaluar en gran medida los efectos del desarrollo sobre el medio ambiente, siguen implementándose proyectos que continúan deteriorándolo cada vez más (como las grandes plantas desaladoras, por ejemplo), debido a que desde su formulación, dichos proyectos no tienen contemplado este punto, o bien porque en muchos casos, económicamente toman decisiones que no afecten el crecimiento de las compañías.

La producción de agua desalada en el mundo es producida en más de la mitad de las veces con calor, lo que provoca altos costos económicos y ecológicos. Existen diferentes métodos para desalinizar agua, en el año 2000 el proceso predominante a nivel mundial era la destilación instantánea multietapas (MSF) con el 44 % proceso que requiere mucho calor, lo que le sigue es la ósmosis inversa con un 42 %, estos procesos representaban el 86 % del total de la capacidad mundial instalada (Wagnick, 2004), actualmente el proceso más utilizado es la ósmosis inversa. Hasta el año 2010 el precio del agua desalada se situó alrededor de los 0,35 euros/m<sup>3</sup> en las instalaciones más modernas, estos costos se han reducido a la mitad en los últimos diez años, sin embargo son sistemas que demandan requerimientos energéticos altos.

Existen más de 15 000 plantas desaladoras en el mundo, siendo los países de Arabia Saudita, Emiratos Árabes, Kuwait, España y Estados Unidos las principales naciones que se valen de esta tecnología para obtener agua dulce del mar mismas que producen al día 24 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce, cantidad suficiente para abastecer a más de 120 millones de personas (Technology Review, Inc., en colaboración con el Instituto Español de Comercio Exterior,



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

2009). En general, se utiliza principalmente en las ciudades y la industria, sobre todo en Oriente Medio (50%), en América del Norte (16%), Europa (13%) y Asia (11%).

Existen muchas alternativas para la desalinización de agua, sea ésta de mar o salobre pero debe mencionarse que en función del método que se utilice, los costos de desalinización pueden ser muy elevados tanto económicamente como por el alto consumo de energía y pueden llegar a ser inmensamente agresivos con el medio ambiente.

En la actualidad, la situación de los costos de los combustibles fósiles, la mayor conciencia sobre el calentamiento global y los daños a nuestro ambiente han permitido que el tema de la destilación solar cobre de nuevo relevancia y pueda resultar una tecnología competitiva para la desalación de agua.

En las investigaciones bibliográficas realizadas, desde finales de los años noventa, tomando en un principio la información y los modelos desarrollados por los autores de los años de 1960, se encontraron trabajos documentados en muy diversas partes del mundo como China, Medio Oriente, Egipto, Costa de Marfil y México, en la cual los autores comparten la visión de que dada nuestra nueva realidad mundial, los procesos de destilación solar pueden ser una solución adecuada y económicamente viable para regiones aisladas o donde la calidad del agua es deficiente para consumo humano.

Dichos trabajos de destilación solar han sido en su mayoría desarrollados en países con economías emergentes, los cuales comparten problemáticas similares y necesidades urgentes de proveer agua a la población.

Los procesos de destilación solar imitan el ciclo natural del agua, en la que el agua salada se calienta produciendo vapor de agua que se condensa para obtener agua "dulce". Justamente de lo que se trata es de mejorar el resultado de los procesos de evaporación y destilación, logrando mayor productividad con el mismo recurso.

La purificación de fluidos específicamente la desalinización de agua, utilizando como fuente energética la radiación solar, es una técnica desarrollada con grandes ventajas económicas, sobre todo por el ahorro de electricidad o petróleo, así como la calidad del agua obtenida. Las experiencias acumuladas son contundentes en demostrar que la destilación solar del agua de mar o salobre es una opción tecnológica y económicamente factible.

Un destilador solar es un sistema muy sencillo y eficiente que permite reproducir de manera acelerada los mencionados ciclos naturales de evaporación y



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

condensación del agua, que al utilizarlos de manera controlada, se puede obtener agua pura.

El principio de funcionamiento del destilador solar es muy sencillo, se agrega agua (salobre o residual) en una charola de color negro que funciona como absorbedor de calor, se tapa con una caseta transparente que puede ser de una o dos cubiertas, ésta debe estar sellada herméticamente; en la base de dicha cubierta se encuentran dos canales que guían el agua destilada hacia el recipiente de recolección de la misma.

La radiación solar pasa a través del vidrio y calienta el agua; la cual alcanza temperaturas más grandes que el vidrio, lo que origina que se evapore y posteriormente se condense al tener contacto con la superficie del vidrio.

El agua en forma de gotas, se desliza por ambos planos inclinados y se dirige, debido al desnivel que se le ha dado a la charola recolectora del agua producto, hasta el orificio que contiene la misma y de esta forma, se hace llegar el agua limpia, prácticamente libre de sales o de residuos peligrosos, hasta el recipiente para su almacenamiento.

El efecto "invernadero" es el que logra que se eleve la temperatura del interior del destilador.

Los procesos termo-físicos involucrados en la destilación solar son afectados por los fenómenos de tres tipos: ópticos, geométrico y térmicos. Los procesos ópticos están relacionados con la cantidad de radiación solar absorbida por los elementos del destilador, incrementando su temperatura y esta ganancia de calor es cedida a los alrededores de ellos por convección, conducción y radiación. Ya que la ganancia de calor se da en la envolvente (condensador), en la base colectora (absorbedor), en la masa de agua que es la que absorberá el calor para transformar su fase líquida a vapor, resulta fundamental el diseño del destilador en cuanto a su geometría tipo de materiales que lo forman y orientación del mismo para garantizar una tasa de evaporación-condensación máxima.

Respecto a los fenómenos geométricos se resalta todo aquello que permita que la evaporación y la condensación sean más eficientes, la profundidad del espejo de agua, la altura de la caseta, la inclinación de los vidrios y los materiales óptimos para cada efecto.

Es importante tomar en consideración que la tasa de evaporación-condensación es función de la irradiancia, la cual se mide en unidades de potencia ( $W/m^2$ ), geometría y procesos de absorción solar y por lo tanto, indicadores del concepto de eficiencia del destilador. Así que entre más área de captación tenga la base



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

colectora, la cual contiene agua, mayor será la tasa de evaporación; es decir, la cantidad de agua destilada está en función de la potencia de la radiación solar, y la eficiencia del destilador está determinada por la energía neta utilizada en la evaporización del agua entre la energía incidente en el destilador. Dado que no es posible medir cual es la energía utilizada en la vaporización de agua esta se puede estimar a partir de la cantidad de agua producida (proceso de evaporación-condensación) derivado del calor ganado por las moléculas de agua que se transforman en calor y que se condensan en el interior de la cubierta.

Así que el trabajo de tesis que aquí se plantea se ha realizado para analizar los efectos de una convección forzada sobre la tasa de evaporación-condensación en un destilador de agua prototipo cuyo diseño es doble caseta con los siguientes objetivos:

### OBJETIVO GENERAL

---

Estudiar teórica y experimentalmente la producción de agua destilada en destiladores solares tipo doble caseta en función de los procesos térmicos y físicos que se llevan a cabo cuando las caras de ellos son sometidos a un intercambio de calor con sus alrededores producidos por una convección forzada; y determinar el rendimiento de los mismos.

### OBJETIVOS PARTICULARES

---

- ◆ Construir un destilador solar tipo doble caseta con base en el estado del arte actual.
- ◆ Estudiar los procesos que se llevan en dichos destiladores cuando son sometidos a una convección forzada en las caras exteriores que forman la caseta de los mismos.
- ◆ Establecer y resolver las ecuaciones (modelo matemático) que permitan simular los principales fenómenos termo-hidrodinámicos que se presentan en los destiladores bajo estudio.
- ◆ Usando el simulador FLUENT, proporcionar una idea del comportamiento térmico de dichos destiladores y de las velocidades convectivas que se generan tanto en su exterior como en su interior al aplicar una corriente de aire sobre la caseta exterior y variar la velocidad de esta.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- ◆ Estudiar el rendimiento de los destiladores en términos de los parámetros bajo estudio y determinar las condiciones que maximicen el proceso de destilación.

La hipótesis fundamental de este trabajo es la siguiente:

## HIPÓTESIS

---

La convección forzada aplicada sobre la doble caseta incrementará la tasa de condensación del destilador.

El presente trabajo está dividido en cinco capítulos. En el primer capítulo se describen las ventajas del uso de la destilación solar, como un proceso limpio y ecológicamente amigable; así como la situación del agua en México y en el mundo, se hace también una recapitulación de los diferentes procesos de destilación y se revisa el estado del arte de la destilación, la geometría y los materiales de un destilador solar, para que logre la máxima eficiencia posible.

En el segundo capítulo se describen los detalles del equipo experimental utilizado, la justificación de la forma geométrica empleada y la elección de los materiales ocupados para la construcción del destilador y las características de operación del mismo. Se describe la realización de una instrumentación adecuada y confiable, de tal manera que se puede estar seguros de tener un desarrollo experimental adecuado.

En el tercer capítulo se hace un análisis detallado del comportamiento térmico dentro del destilador, así como de los fenómenos involucrados, observando las causas y efectos de cada uno de los mismos. Este estudio permite determinar que parámetros modificar para obtener mayor productividad.

En el cuarto capítulo se describe el desarrollo y caracterización de cinco escenarios de destiladores solares de tipo caseta de doble caída, discutiendo los beneficios de cada uno de ellos y realizando comparaciones de los resultados en la productividad de agua obtenidos variando la velocidad del viento en cada uno de ellos.

En el último capítulo se explica el desarrollo de un modelo matemático que se valida contra los resultados experimentales con lo cual se está proporcionando una herramienta computacional que puede ayudar a variar algunas características del destilador para determinar cuáles son los parámetros más adecuadas para aumentar la productividad de agua.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Las conclusiones y recomendaciones, contenidas al final del documento, se espera que sean útiles para introducir consideraciones técnicas y ambientales a los investigadores y estudiantes interesados en el tema y contribuyan en futuros estudios para el desarrollo de este tipo de prototipos.

### JUSTIFICACIÓN.

---

El tema del abastecimiento de agua ha resultado de primer orden en la política de desarrollo de muchos países, su carácter estratégico determinará las orientaciones de las actividades de investigación y desarrollo tecnológico con el fin de obtener un proceso óptimo de depuración, desde el punto de vista técnico y susceptible de una pronta implantación con un conveniente margen de rentabilidad.

De acuerdo a las estadísticas presentadas, el recurso hídrico está contenido en cerca de un 98% en las masas oceánicas. El agua dulce disponible, está en forma de hielo permanente, cerca de un 68.9%, y el 30% restante en aguas subterráneas y un bajo porcentaje en ríos, lagos y embalses.

La ya actual escasez del recurso en una población de 300 millones de habitantes, cifra que seguirá creciendo, sobre todo en los países en desarrollo, hace que se tomen medidas urgentes, para abastecer a estas comunidades de agua dulce, no sólo para su bienestar personal sino para el desarrollo económico regional.

Con base en lo anterior, el mar es la fuente de abasto de agua dulce más importante, sin embargo, la tecnologías de desalación deberá ser madura desde el punto tecnológico y atractiva como proyecto de inversión.

Dentro de las tecnologías de separación de sales en el agua de mar, está la destilación solar. Alrededor de la mitad de la producción de agua desalada en el mundo es producida con calor. Los procesos de destilación imitan el ciclo natural del agua, en la que el agua salada se calienta produciendo vapor de agua que se condensa para obtener agua potable.

El objetivo primordial en un proceso de destilación es eliminar los sólidos disueltos en el líquido que de alguna u otra manera lo impurifica para obtener un producto de mayor pureza. Esto significa que la técnica de destilación es una alternativa para producir agua potable para el ser humano independientemente del tipo de calidad de agua que se suministre para tal efecto; es decir, podrían ser aguas salobres, corredizas, subterráneos o agua contaminada.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

En este proyecto, se pretende estudiar teórica y experimentalmente la destilación solar de agua mediante destiladores solares, y muy específicamente el efecto de la velocidad del viento sobre la caseta, para determinar si influye en un proceso de condensación más eficiente.



## CAPÍTULO PRIMERO. LA DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA

### 1.1 INTRODUCCIÓN.

Sin dudar, el agua dulce es un vital líquido sobre el que se sustenta gran parte de la vida vegetal y animal sobre la superficie terrestre.

La energía solar ha sido la fuente principal energética que ha sustentado la producción de agua dulce a partir del agua de mar mediante los ciclos naturales de evaporación y condensación. Sin embargo, este vital líquido no está disponible en todas partes existiendo una gran demanda en zonas desérticas, zonas costeras, zonas marginadas en el ámbito rural y urbano y en las zonas agropecuarias cuando se presenta la carencia de lluvias.

La disponibilidad de agua puede ser considerada como el principal problema ambiental que enfrenta la humanidad hoy en día, debido a que los problemas relacionados con ella afectan la vida de millones de personas. La Figura 1 muestra la disponibilidad del agua a nivel mundial.

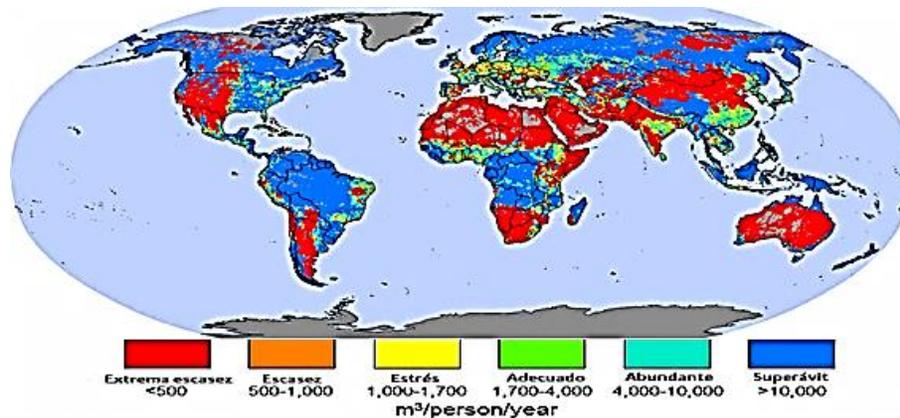


Figura 1: Situación del agua en el mundo. IMTA/CONAGUA, 2012.

En los próximos años, las dificultades relacionadas con la falta de agua preocuparán realmente a todo el mundo y habrá que invertir mucho dinero en la gestión del agua. Aun así, será difícil mejorar las condiciones de un 33% de la población total mundial que no tiene acceso a fuentes seguras de agua, de las cuales el 50% carecen de condiciones sanitarias básicas, (El 80% de las



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

enfermedades en los países en desarrollo se debe al consumo de agua no potable y las malas condiciones sanitarias, 6000 niños mueren diariamente de alguna enfermedad relacionada con el agua no apta para su consumo). El "estrés hídrico" afecta actualmente a 1.700 millones de personas, y se estima que podría afectar a 5.000 millones en el 2025. (IMTA, 2012)

En México, debido al crecimiento de la población, la disponibilidad de agua per cápita se redujo de 17,800 m<sup>3</sup> en 1950 a 4,100 m<sup>3</sup> en 2010. Las regiones del centro y norte, que concentran 77% de la población, poseen sólo 31% de la disponibilidad nacional de agua (ver esquema de disponibilidad en la Figura 2).

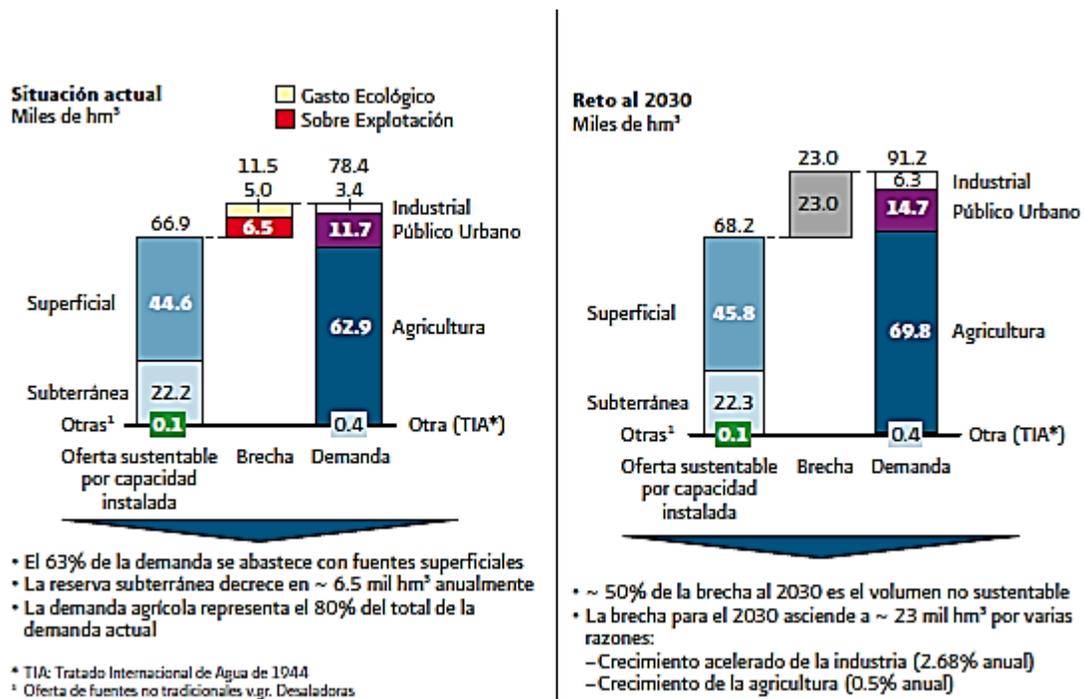


Figura 2: Brecha Hídrica actual y al 2030.

Fuente: IMTA/Conagua, 2012

- La escasez varía entre 1% de los recursos disponibles en la Cuenca Frontera Sur y 100% en la Cuenca del Valle de México.
- Para satisfacer la demanda de agua, se extraen 11.5 millones de m<sup>3</sup> de fuentes no sustentables (alrededor de 15% de la extracción total), incluyendo 6.5 millones de m<sup>3</sup> de los acuíferos sobreexplotados. Se estima que, de continuar con el escenario tendencial, la extracción a partir de fuentes no sustentables se duplicará para el año 2030; al tomar en cuenta las proyecciones respecto a los



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

impactos del cambio climático, ésta aumentará aún más, alcanzando 36.3 millones de m<sup>3</sup> (CONAGUA, 2011).

La destilación solar presenta una alternativa adecuada para la producción de agua dulce que puede usarse en cualquier sitio, y para el desarrollo de tecnologías de destilación solar es necesario comprender cuales son los fenómenos termo-físico-químicos asociados a este proceso. En este capítulo se presenta una descripción del estado del arte de la tecnología convencional de destilación, los fenómenos termo-físico-químicos involucrados en el proceso de destilación solar y una revisión bibliográfica de lo que se ha realizado en tecnología para la destilación solar.

### *1.2 VENTAJAS DEL USO DE LA ENERGÍA SOLAR.*

El sol, la estrella más cercana a nuestro planeta, emite radiaciones electromagnéticas al espacio derivado de reacciones nucleares a través de las cuales átomos de hidrógeno se transforman a átomos de helio.

La energía solar se genera en el interior del Sol, en donde la temperatura llega a más de 15 millones de grados Celsius, con una presión altísima, que provoca reacciones (en el núcleo), llamadas termonucleares. Un gramo de materia solar libera tanta energía como si quemáramos 2.5 millones de litros de gasolina. Viajando a una velocidad de 300,000 km/s la radiación solar, recorre cerca de 150 millones de kilómetros para llegar a la Tierra y le toma cerca de 8 minutos en hacerlo.

La radiación que recibimos del sol, emite desde su superficie (fotosfera), partículas y radiación, a una temperatura cercana a los 6000 °C, en un espectro continuo compuesto de diferentes longitudes de onda que van desde 0.25 a 2.5 micras, conocido como el espectro electromagnético solar. En la parte exterior de la atmósfera terrestre se reciben la mayor potencia solar por unidad de superficie, cerca de 1367 watts/m<sup>2</sup>, que se conoce con el nombre de la constante solar, aunque realmente no lo es, ya que varía durante la época del año, ya que la órbita de la Tierra no es circular, es elíptica, pero su variación no es muy grande.

Sin embargo la Tierra solo recibe el 50% del total, ya que un 20% es absorbido por las nubes y un 30% es disipado por el espacio, en donde un 6% es debido a la atmosfera, 20% es reflejado por las nubes y 4% por el suelo. Debido a lo anterior resulta que la máxima potencia que podemos recibir sobre la superficie de la Tierra, dependiendo del lugar y la época de año, es de 1000 W/m<sup>2</sup>.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Para que el ser humano pueda utilizar la energía solar, esta debe ser capturada en un captador "solar" el cual puede transformarla en electricidad con la Tecnología Fotovoltaica o bien en calor de proceso como es el caso de la Tecnología Fototérmica.

La Tecnología Fototérmica aprovecha la energía solar y la transfiere a un fluido, calentándolo, sirviendo como transporte para llevar la energía a otro sitio en donde puede transferirse al entorno o producir trabajo. Un ejemplo típico son los calentadores solares planos que sirven para el calentamiento de agua en aplicaciones domésticas. También puede usarse para purificar agua en aplicaciones domésticas. Estos sistemas tienen las siguientes ventajas Ojinaga- (Santana, L. y Foster, R. E., 2001).

- a) La eliminación por completo de impactos negativos al medio ambiente como podría ser el caso de la producción de CO<sub>2</sub> en relación con el consumo energético o bien, la contaminación del medio marino, tanto flora como fauna (vertido de salmuera hacia el mar en el caso de las grandes plantas desaladoras), incluso, contaminación visual.
- b) No requiere de suministro de energía convencional. La Tecnología Fototérmica es de fácil instalación.
- c) Escaso mantenimiento ya que únicamente se debe mantener limpia la cubierta eliminando de la superficie de ésta el polvo que se pudiera acumular durante el día. La salmuera que se forma en la base del absorbedor se elimina al dejar correr agua por las mangueras de desagüe. En caso de tratarse de una instalación doméstica, el sistema se requiere de poca inversión para su mantenimiento.
- d) Con este proceso simple, económico y respetuoso con el medio ambiente, se logra separar del agua cualquier presencia de metales pesados (Pb, As, Hg), minerales (Fe, Mn), nitratos, sales, organismos microbiológicos patógenos para el ser humano (E. Coli y Giardia), la energía solar es una energía renovable, es una energía gratuita, es una energía inagotable.

Por otra parte, en cuanto a las desventajas podemos mencionar principalmente que:

- a) La tasa de producción de agua es baja y se requiere de mucha área de captación para tener grandes volúmenes de agua purificada.
- b) La inversión inicial es alta derivado de que la mayoría de las instalaciones son de carácter experimental no comercial.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 1.3 INICIO DE LA DESTILACIÓN SOLAR EN EL MUNDO Y EN MÉXICO.

Existe numerosa evidencia del uso de la energía solar para producir agua potable a partir de agua de mar desde hace muchos años. Algunos autores hacen referencia a los usos que daban los antiguos griegos al fenómeno de desalación solar desde hace más de 2000 años, se sabe que conocían el efecto de invernadero y el empleo de materiales semitransparentes como una variedad del ónix y diversas resinas petrificadas como el ámbar. Según Delyannis (2003), la aplicación más antigua de la energía solar se encontró en el sur de Francia, relacionada con el secado solar de alimentos, y data de hace unos 10 000 años. Según referencias, se tiene noticia de que la primera planta de destilación solar convencional se construyó en 1872 por el ingeniero sueco Charles Wilson en la comunidad minera de La Salinas en lo que hoy es el norte de Chile. Wilson necesitaba agua para las mulas de una obra minera, surgiendo la primera instalación industrial de destilación solar, utilizando como fuente aguas salobres, (Harding, 1883). Este era un tipo de destilador con gran depósito que se usaba para proporcionar agua fresca utilizando agua salina para una población dedicada a la extracción de nitratos y la planta estuvo en operación hasta 1904. Sin embargo, no hay evidencia científica sólida del conocimiento del fenómeno fundamental.

No fue hasta la segunda guerra mundial, cuando María Telkes (1945) analizó la manera de producir destiladores solares inflables los cuales posiblemente consistieron en una mitad inferior de plástico negro y una superior del mismo material pero semitransparente, los aviadores que amarizaban debían introducir manualmente el agua de mar y esperar algunas horas para recoger agua dulce.

Desde esas épocas y hasta los años setenta se hicieron numerosas pruebas para emplear la energía solar con la finalidad de desalar agua de mar en muchas regiones del mundo, sobre todo en las regiones donde escasea el agua potable y abunda el agua de mar. En estas épocas la revista *Solar Energy* recopiló numerosas citas a esos primeros ensayos. No fue sino hasta la publicación de un trabajo de P. I. Cooper (1973) que la compleja dinámica de los fluidos dentro del destilador solar empieza a revelarse. Cooper reunió investigaciones de sus compatriotas australianos y otros colegas y presentó por primera vez un conjunto sistematizado de ecuaciones que describen los flujos de calor y la forma empírica de sus coeficientes en un modelo integral de parámetros concentrados (Zayas, Chargoy, 2003).

Cooper analiza el complicado proceso de intercambio de calor entre el agua caliente del destilador solar y la superficie interior del cristal condensador y propone que la cantidad de calor que se transmite entre esas dos vitales partes



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

del destilador solar es proporcional de manera no lineal a las presiones parciales de vapor de agua correspondientes a las temperaturas de cada uno de los componentes. Dado que las ecuaciones propuestas se estudian en el contexto del balance térmico integral, es posible plantear un esquema de solución dinámico al conjunto de ecuaciones, que a partir de ciertas condiciones iniciales conocidas y con el conocimiento de las variables de frontera, permita calcular la evolución de las variables de estado. Este mismo proceso todavía es muy empleado por estudiosos del tema y permite determinar por iteración las condiciones iniciales más apropiadas para cada conjunto de condiciones de frontera.

Los destiladores solares pueden ser construidos de muchas formas y con diferentes materiales, así como pueden ser destinados a diferentes usos. Pueden ser fijos o portátiles, perennes o transitorios. Pueden ser construidos masivamente en industrias, o uno por uno en serie e incluso pueden ser de construcción casera. La Figura 3 muestra una fotografía de uno de los destiladores construidos para éste estudio.

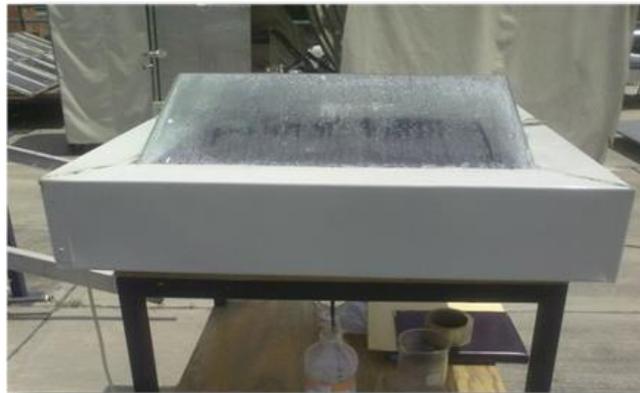


Figura 3: Destilador solar de doble caseta, IER-UNAM

Por sus características geográficas y humanas, nuestro país consta de una gran variedad de climas y de costumbres. En muchas regiones existe una gran abundancia de recursos naturales y en otras se carece de lo más indispensable. El país cuenta con cerca de 11,000 kilómetros de litoral, lo que permite tener un recurso hídrico importante a partir de la potabilización del agua de mar.

En México se encuentra una zona amplia de tipo desértico y semidesértico, con las irradiancias solares consideradas entre las más altas del planeta, con escasas precipitaciones pluviales. Esta región ocupa las dos terceras partes del territorio, en donde se carece de agua dulce.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

El abastecimiento de agua es un gran problema, requiriéndose la perforación de pozos profundos o en el caso de las regiones costeras de la posibilidad de desalar el agua de mar. La posibilidad de dotar de agua a estas regiones, permitirá el desarrollo de la agricultura y la ganadería, facilitando la creación de asentamientos humanos con la posibilidad de generar pequeñas agroindustrias, que favorezcan la creación de polos de desarrollo económico.

En la mayoría de estas regiones, el problema de la escasez de agua va aparejado al problema del abastecimiento de energía, en donde la demanda va aumentando en la medida del crecimiento poblacional y las condiciones de cambio climático.

Claro que no todas las regiones son iguales, el retraso en el abasto de combustible y el precio del mismo, provocan altos costos de operación, como es el caso de la Península de Baja California, en donde además de ser una de las regiones menos pobladas, existe una gran dispersión de localidades, cuya economía está basada en la explotación pesquera de especies de alto valor comercial como la langosta y el abulón y que además carece de infraestructura de refrigeración para la conservación de los productos marinos.

México ha sido sede de varias experiencias de plantas piloto de desalación de agua de mar utilizando energías renovables. En nuestro país se instalaron las primeras plantas desaladoras a nivel mundial, accionadas por energía solar a través de sistemas térmicos y fotovoltaicos. Como resultado de un convenio marco de cooperación científica y tecnológica entre el entonces gobierno de la República Federal de Alemania y el gobierno de México a través de la entonces Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), se diseñó un proyecto en febrero de 1974, el cual se aprobó en octubre de 1977. El proyecto SMSF-DIGAASES-DORNIER se realizó en la ciudad de la Paz, B.C.S., en donde se diseñó, construyó y evaluó una planta desaladora de agua de mar, tipo evaporación instantánea por etapas, con abastecimiento energético de energía solar usando concentradores cilíndrico-parabólicos y colectores planos. La capacidad de producción fue de 10,000 litros/día, con una superficie total de colección solar de 518 m<sup>2</sup> del tipo caloriductos y 160 m<sup>2</sup> de colectores cilíndrico-parabólicos.

Posteriormente en mayo de 1978, se suscribió otro nuevo convenio, en donde surgió un nuevo proyecto denominado SORO, en donde se diseñó, construyó y evaluó una planta para la desalación de agua salobre, por el proceso de membranas planas (osmosis inversa), utilizando como fuente energética sistemas fotovoltaicos. Esta unidad desaladora se instaló en un lugar montañoso y desértico en la población de Concepción del Oro, en el Estado de Zacatecas. Esta planta tenía una capacidad de producción de 1500 litros/día, operó con una



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

área de captación de 30 m<sup>2</sup> de paneles fotovoltaicos, (2.5 kW de potencia pico a 24V) con sistema de almacenamiento eléctrico (160 Ah) y regulación de carga y descarga, con esta energía se operaba la bomba de alta presión y los sistemas de iluminación.

Dentro del mismo marco de colaboración internacional en 1979, se creó el proyecto SONNTLAN, con dos componentes una urbana y otra rural. En el proyecto urbano, conocido con el nombre de "Las Barrancas", se seleccionó una pequeña comunidad rural pesquera, en el Estado de Baja California Sur, en donde habitaban cerca de 60 familias de pescadores dedicados a la captura de camarón, langosta y abulón. Esta población no contaba con energía eléctrica y el agua sólo estaba disponible en pozos localizados en ranchos que se encontraban a una distancia entre 8 y 15 km. El proyecto SONNTLAN fue diseñado para ofrecer los servicios técnicos de conservación de productos pesqueros, suministro de electricidad, sistema de comunicación y suministro de agua potable por medio de la instalación de tres plantas desalinizadoras, una de evaporación instantánea en múltiples etapas con una capacidad de 20 m<sup>3</sup> por día, una de osmosis inversa con una producción de 20 m<sup>3</sup> diarios y una de compresión de vapor de 35 m<sup>3</sup> por día, (Pilatosky et al, 1990).

En cuanto al desarrollo de tecnología nacional, cabe mencionar los trabajos pioneros efectuados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Muñoz, 1976), en donde se analizaron los fenómenos de transporte en destiladores solares, propuestos por Cooper en 1973.

Entre los años de 1982 y 1990 un grupo de investigadores en energía solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM buscaron un sitio adecuado para el desarrollo de investigaciones experimentales, ya que los índices de contaminación y bajos índices de irradiancia solar en verano, en el Valle de México, limitaban los alcances de los proyectos. Como resultado de esta iniciativa se establecieron relaciones de colaboración con varios grupos de educación superior e investigación en el estado de Baja California Sur. En 1982 se estableció el primer contacto formal con un grupo de profesores del Tecnológico de la Paz en BCS, representado por Rafael Camacho Morales. El grupo investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM estaba formado por Rafael Almanza, Felipe Muñoz, Filiberto Gutiérrez, Norberto Chargoy, Arturo Palacios, Armando Rodríguez, Odón de Buen Rodríguez, entre otros.

Los primeros resultados de este grupo de investigadores fueron publicados en 1983. Con apoyo del CONACyT estos investigadores instrumentaron un experimento para dotar de agua destilada al Tecnológico de La Paz mediante un novedoso sistema de captación solar de calor en colectores solares planos de alta temperatura, que requerían un circuito primario de circulación de agua a alta presión, pues ocasionalmente rebasaba los 100°C. La desalación de agua se producía en un destilador de etapas múltiples a presión atmosférica que era



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

calentado en la charola inferior. Dicho calor provenía del campo de colectores solares a través de un cambiador de calor de tubos y coraza. El ciclo secundario estaba integrado por agua de calidad inferior a la que se empleaba en el calentamiento. Este proyecto tuvo una duración de cuatro años, culminando con la instalación de este destilador solar indirecto de múltiples etapas en el año de 1987; Como resultado de estos trabajos experimentales, se propuso un modelo matemático que permitió su simulación. Cabe mencionar que este trabajo fue pionero a nivel mundial (Fernandez, Chargoy, 1990).

A partir de 1990 se contó con la participación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, en La Paz, BCS, dirigido por Miguel Ángel Porta Gándara. En estas instalaciones se impartió el primer curso completo de maestría en Ingeniería de la Energía, el mismo que se impartía la UNAM.

En México, se han llevado a cabo diferentes proyectos rurales, de acuerdo a las necesidades de cada región, especialmente en varias comunidades ubicadas en la zona fronteriza México-Estados Unidos, que no cuentan con el servicio de agua potable. En esta zona se implementaron tres proyectos que consistieron en la instalación de destiladores solares, con gran impacto social y una buena aceptación de los usuarios.

Por otro lado, en el estado de Chihuahua, en la Sierra Tarahumara y en Ciudad Juárez se han realizado varios proyectos, instalando destiladores con el apoyo del programa de energía renovable de Sandía National Laboratories y la Asociación de Energía Solar, en colaboración con la Universidad Estatal de Nuevo México y el Grupo de Trabajo de Energía Renovable de Chihuahua, respectivamente (ANES, 2001).

En Nogueras, en el valle de Colima, se trabajó con destiladores solares de una y doble caseta. En esta localidad, la Universidad de Colima llevó a cabo el proyecto ambiental demostrativo del Ecoparque Nogueras, en donde maestros y estudiantes han diseñado dispositivos para el aprovechamiento de la energía solar, entre los que se encuentra un prototipo de un destilador solar de una sola caseta, (Ecoparques Noguera, 2004).

Los centros urbanos enfrentan el problema de agotamiento de las fuentes locales y su elevada contaminación, los altos costos de captación y conducción del agua y los conflictos generados por los intereses de diferentes usuarios sobre las fuentes. A pesar de que los esfuerzos en la gestión en materia del agua a nivel mundial están ayudando a aliviar el impacto en su abuso, se está llegando a los límites de disponibilidad sustentable, por lo que nuestras inversiones en infraestructura deberán ser mayúsculas, o bien, podemos comenzar a pensar en la posibilidad de soluciones y/o tecnologías alternativas, que reduzcan la brecha que existe entre las actuales condiciones de agua en muchos lugares de nuestro



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

país, más benévolas con nuestros ecosistemas y más viables económicamente, obteniendo agua limpia y de buena calidad proporcionando una solución de manera inmediata, barata y sencilla.

### 1.4 LA TECNOLOGÍA DE DESTILACIÓN TÉRMICA.

Hay varios tipos de tecnologías para la destilación térmica que ha estado desarrollando y usando. Estas son:

- a) Destilación multi-stage Flash (Destilación súbita multietapas),
- b) Destilación multi-effect (múltiple efecto),
- c) Destilación por compresión de vapor,
- d) Electrodiálisis

#### a) *Destilación multietapas Flash*

Este tipo de plantas se utiliza especialmente para la desalinización de agua de mar. La capacidad de las plantas MSF es mucho mayor que otras plantas destiladoras en virtud a la cantidad de etapas conectadas en cascada sin problemas de operación. Sin embargo, las plantas MSF tienen un grave inconveniente. Su consumo específico, definido como la cantidad de energía consumida para producir metro cúbico de agua desalada, es de los más altos. A este consumo contribuyen el consumo térmico proveniente de la planta productora de electricidad, más alto que otros procesos de destilación debido al efecto flash; y el consumo eléctrico debido al gran número de bombas necesarias para la circulación de los flujos de planta. Además de su alto costo de operación, su costo de instalación no es más bajo que otros procesos de desalación.

En la Figura 4 se puede observar una planta desaladora Multietapas Flash.



Figura 4: Dos Desaladoras Multietapas en Arabia Saudí. Estas plantas utilizan agua del mar Árábigo para la desalinización y la producción de agua potable.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

En un proceso de destilación de múltiple efecto el aporte de energía térmica de cada etapa lo realiza el vapor producido en la etapa anterior al condensar. El agua de mar que se pretende desalinizar se hace pasar por el condensador con el fin de condensar el vapor que se ha producido en el último efecto. Tras atravesar el condensador, una parte del agua de alimentación se rechaza, utilizándose sólo una fracción de ella como agua de alimentación para el proceso.

Esta agua de alimentación se hace pasar por una serie de precalentadores con el objeto de aumentar su temperatura hasta aproximarla a la de evaporación existente en la primera etapa. Existe un calentador en cada etapa. Tras pasar por el último precalentador, el agua de alimentación se introduce en la primera etapa, pulverizándose sobre un intercambiador de calor de haz tubular. Por el interior de los tubos de este intercambiador circula el fluido caliente que aporta la energía térmica que requiere el proceso.

Como consecuencia de la pulverización del agua de alimentación sobre el evaporador de la primera etapa, se evapora una fracción de la misma. Este vapor pasa a la zona de la primera celda donde se encuentra el precalentador correspondiente; al entrar en contacto con la superficie externa del precalentador, el vapor condensa parcialmente y pasa a la segunda etapa.

El resto del agua de alimentación que no se evaporó en la primera etapa pasa a la segunda, donde se evaporará una fracción de la misma, gracias al calor que le cede la mezcla de condensado y vapor que proviene de la primera etapa. Esta evaporación se produce a una temperatura algo inferior a la de la primera etapa, ya que la presión existente en las sucesivas celdas es diferente y decreciente desde la primera hasta la última celda.

El vapor producido en la segunda etapa se condensa parcialmente sobre la superficie externa del precalentador correspondiente, pasando la mezcla de vapor y condensado al evaporador de la tercera etapa. Donde acaba de condensar completamente. De este modo se producen una serie de evaporaciones y condensaciones sucesivas que conducen a la producción de una determinada cantidad de destilado, de tal modo, que de la cantidad total de agua de alimentación se obtiene una cierta cantidad de destilado, y el resto se convierte en una salmuera de rechazo con una alta salinidad. En la Figura 5 se muestra un diagrama del proceso MSF.

## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.



Figura 5: Diagrama de proceso de destilación súbita multietapas

### b) Destilación por Múltiple Efecto

Para obtener agua destilada, es necesario producir vapor primero y condensarlo después, Los dos elementos básicos de este proceso son: el evaporador y el condensador. El evaporador es el elemento en el cual se produce el aporte energético al proceso, en forma de energía térmica. Como consecuencia de este aporte térmico una parte del agua que se encuentra en él se evapora y pasa al condensador. Una vez en el condensador, este vapor se condensa gracias al agua de refrigeración que circula en su interior.

En un proceso de destilación de múltiple efecto el aporte de energía térmica de cada etapa lo realiza el vapor producido en la etapa anterior al condensar. El agua de mar que se pretende desalinizar se hace pasar por el condensador con el fin de condensar el vapor que se ha producido en el último efecto. Tras atravesar el condensador, una parte del agua de alimentación se rechaza, utilizándose sólo una fracción de ella como agua de alimentación para el proceso. Esta agua de alimentación se hace pasar por una serie de precalentadores con el objeto de aumentar su temperatura hasta aproximarla a la de evaporación existente en la primera etapa. Existe un calentador en cada etapa.

Tras pasar por el último precalentador, el agua de alimentación se introduce en la primera etapa, pulverizándose sobre un intercambiador de calor de haz tubular. Por el interior de los tubos de este intercambiador circula el fluido caliente que aporta la energía térmica que requiere el proceso. Como consecuencia de la pulverización del agua de alimentación sobre el evaporador de la primera etapa, se evapora una fracción de la misma. Este vapor pasa a la zona de la primera celda donde se encuentra el precalentador correspondiente; al entrar en contacto con la superficie externa del precalentador, el vapor condensa parcialmente y pasa a la segunda etapa. El resto del agua de



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

alimentación que no se evaporó en la primera etapa pasa a la segunda, donde se evaporará una fracción de la misma, gracias al calor que le cede la mezcla de condensado y vapor que proviene de la primera etapa. Esta evaporación se produce a una temperatura algo inferior a la de la primera etapa, ya que la presión existente en las sucesivas celdas es diferente y decreciente desde la primera hasta la última celda.

El vapor producido en la segunda etapa se condensa parcialmente sobre la superficie externa del precalentador correspondiente, pasando la mezcla de vapor y condensado al evaporador de la tercera etapa. Donde acaba de condensar completamente. De este modo se producen una serie de evaporaciones y condensaciones sucesivas que conducen a la producción de una determinada cantidad de destilado, de tal modo, que de la cantidad total de agua de alimentación se obtiene una cierta cantidad de destilado, y el resto se convierte en una salmuera de rechazo con una alta salinidad. En las Figuras 6 y 7, se puede analizar el diagrama de proceso de una instalación MED y una fotografía de una Planta desaladora MED, respectivamente.

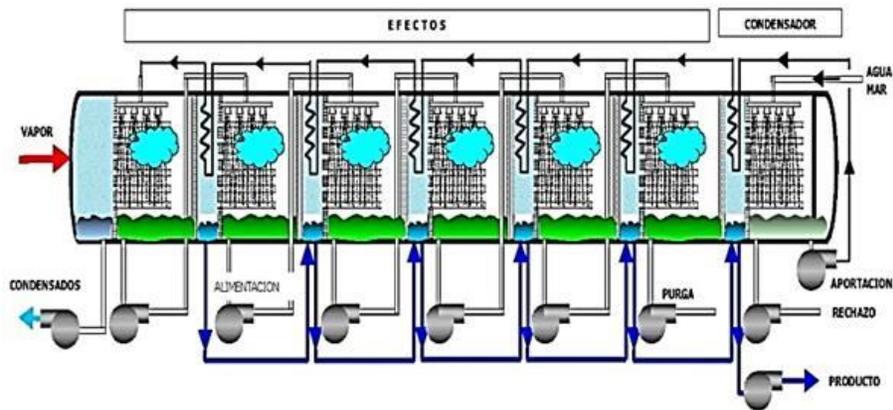


Figura 6: Diagrama de proceso de multiefecto



Figura 7: Dos módulos MED de 17,500 m<sup>3</sup>/día



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### c) *Compresión térmica de vapor*

Es el proceso de destilación en el que la evaporación del agua se obtiene mediante la aplicación del calor suministrado por la condensación de vapor comprimido. Este proceso se puede realizar por dos métodos, el primero se denomina Compresión Térmica o Termocompresión, y consiste en utilizar un eyector de vapor, alimentado por una fuente de vapor externa, que produce la compresión deseada mediante el efecto Ventura originado en el eyector. El segundo método comprime el vapor mediante un dispositivo mecánico, movido eléctricamente en la mayoría de los casos. Este segundo método se denomina Compresión Mecánica. Al ser comprimido, el vapor aumenta su temperatura varios grados centígrados. Tras ser comprimido, el vapor pasa al intercambiador de calor de placas que constituye el vapor/condensador, donde se condensa y libera calor que sirve para evaporar una parte del agua salada que circula del otro lado del evaporador/condensador. Ver Figuras 8 y 9.



Figura 8: Planta desalinizadora por compresión de vapor fabricada por los Astilleros de Israel.

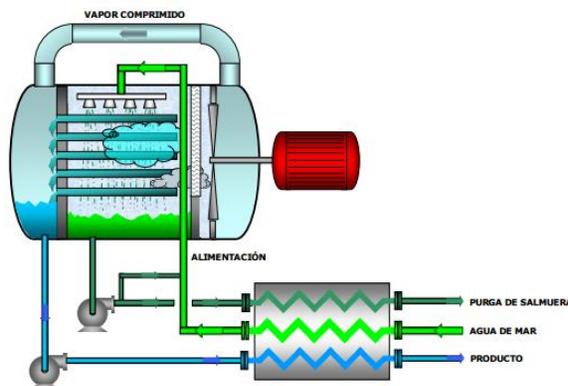


Figura 9: Diagrama de flujo de proceso de compresión de vapor.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### d) *Electrodiálisis.*

Este proceso se basa en el hecho de que si se hace circular por una solución iónica una corriente continua, los iones cargados positivamente se desplazan en dirección al electrodo negativo o cátodo. Del mismo modo, los iones cargados negativamente se desplazan hacia el electrodo positivo o ánodo.

Si entre el ánodo y el cátodo se coloca un par de membranas semipermeables, una de las cuales es permeable a los cationes y la otra a los aniones, se ira paulatinamente formando una zona de baja salinidad entre las dos membranas. Este es el proceso conocido como electrodiálisis. Ver Figura 10 y 11.



Figura 10: Planta de electrodiálisis

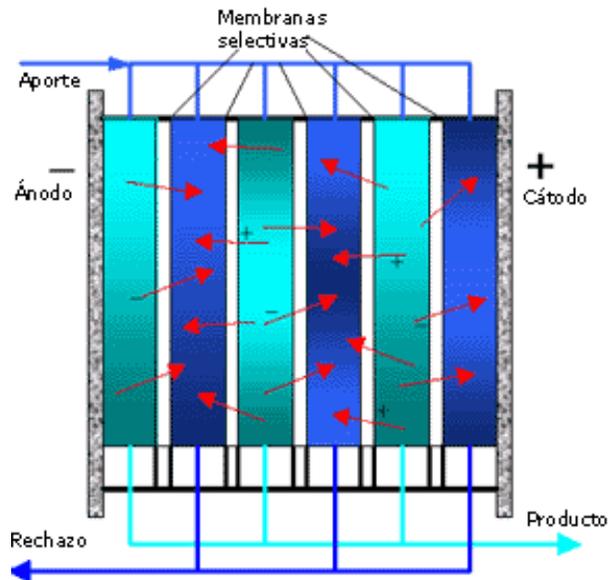


Figura 11: Proceso de la tecnología electrodiálisis



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 1.5 DESTILADORES SOLARES DE AGUA: TIPOS CONVENCIONALES.

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un vidrio transparente, en cuyo fondo tenemos agua a destilar en reposo.

Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera. En ésta sección se presenta las diferentes configuraciones geométricas que se han usado para construir destiladores solares.

#### a) El destilador de caseta sencilla, doble caseta y bóveda.

El destilador solar de caseta es el más conocido y difundido en el mundo y consiste en una caseta de material semitransparente, generalmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja que contiene agua a destilar. Por la forma de la caseta y la forma en que ésta atrapa el calor, proveniente de la energía solar, también se les conoce como destiladores de invernaderos. En la Figura 12 se puede observar la geometría y partes que conforman un destilador solar de doble caseta y de bóveda.

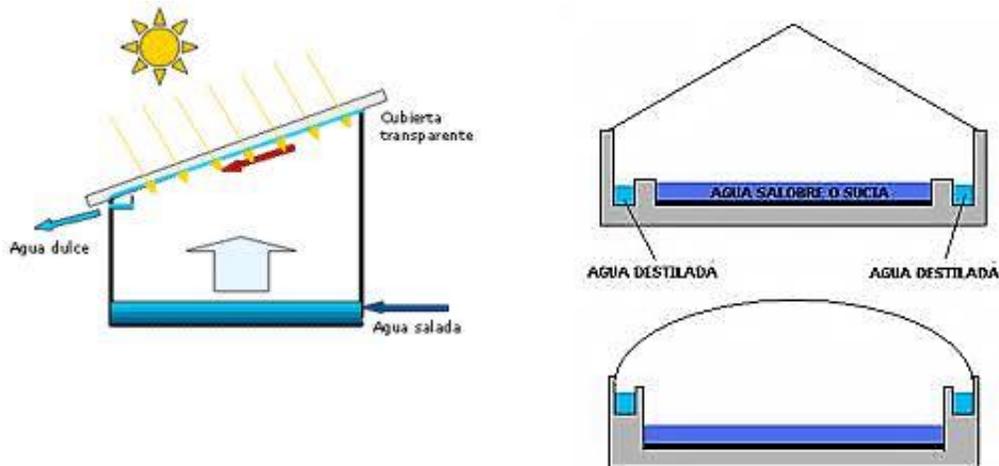


Figura 12: Destilador solar de doble caseta, caseta sencilla y bóveda.

El destilador de caseta es sencillo y de fácil construcción y está formado por una charola hecha generalmente con materiales de la construcción (ladrillos o bloques, piedra de arena), angulares de acero y láminas de vidrios. Su



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

construcción es la más sencilla de todas y debe ser en el sitio a destilar, realizada principalmente por un albañil. Se recomienda su uso en instalaciones relativamente grandes hechas con recursos propios.

### b) *Destilador de cascada*

Este destilador está formado por varias terrazas. En la parte superior de cada una de las terrazas se disponen los estanques con fondo de color negro llenos de agua para destilar. Cuando la radiación solar incide en el destilador comienza la evaporación. El agua en estado gaseoso se condensa en una superficie transparente dispuesta de forma inclinada sobre las terrazas y se desliza hacia el receptáculo situado en la parte baja del destilador. El destilador de cascada toma su nombre porque al llenarse o al limpiarse, el agua corre en forma de cascada, sin embargo, en su funcionamiento normal el agua contenida en el destilador permanece prácticamente estática. En la Figura 13 se puede apreciar la geometría y partes que conforman un destilador de cascada.

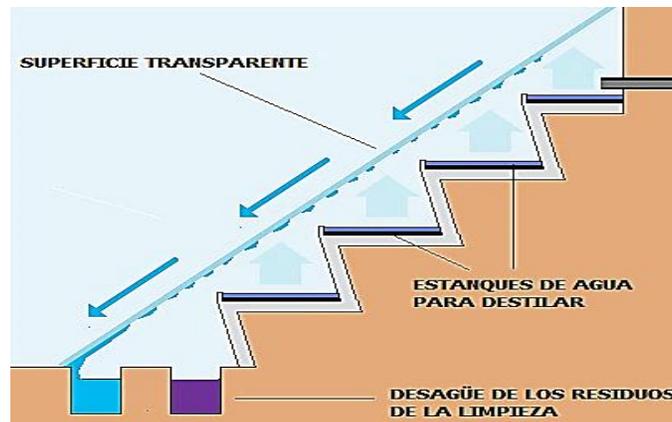


Figura 13: Destilador de cascada.

### c) *Destilador solar esférico de barredera.*

Este destilador se basa en la forma esférica del material transparente así como en la introducción de una barredera que limpia su cara interna y que está accionada por un pequeño motor. En una bandeja con fondo de color oscuro situada en la parte central de la esfera se coloca el agua a destilar. Tiene forma esférica buscándose favorecer la captación solar al evitarse las sombras que alguna parte del destilador pueda provocar en otra, además la forma esférica logra mantener una mayor inercia térmica facilitando un mayor aprovechamiento del calor producido por la energía solar. Por su parte la



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

barredera arrastra las pequeñas gotas que se van formando en el interior de la esfera juntándolas y provocando que se precipiten por gravedad a la parte baja donde se acumulan (ver Figura 14).

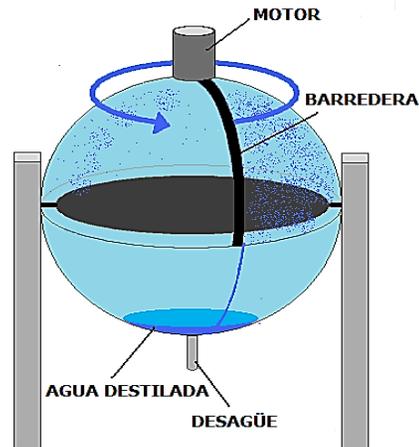


Figura 14: Destilador solar esférico.

### 1.6 ESTADO DEL ARTE ACTUAL DE LOS DESTILADORES SOLARES.

A continuación se muestra el resultado de la investigación bibliográfica del estado del arte de la destilación solar en el mundo, con las aportaciones de los autores más relevantes que analizaron el efecto del viento en la producción de agua de destiladores solares convencionales.

Soliman en 1971 realizó un estudio experimental bajo condiciones controladas sobre el efecto ejercido de diferentes variables, tales como la temperatura del agua, la temperatura ambiente del aire, la velocidad del viento y el ángulo de inclinación de la cubierta en el rendimiento del destilador de doble caseta. Los intervalos sobre los que trabaja son: ángulos de inclinación de 10, 20 y 40 grados y velocidades de 4, 6 y 8 m/s. Los resultados experimentales obtenidos muestran que a mayor temperatura del agua, así como un aumento de la velocidad del viento, resulta un incremento en la productividad del destilador debido a que se ocasiona una mayor diferencia entre la temperatura del agua y la cubierta de vidrio y esto conduce a un aumento en la tasa de evaporación lo cual deriva en una mayor transferencia de calor entre el agua y la cubierta; sin embargo no proporciona información respecto de la energía solar captada ni tampoco da detalles del diseño y ubicación del sistema de enfriamiento, haciéndolo un trabajo que no se puede reproducir experimentalmente.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

En cuanto al enfriamiento de la caseta de vidrio, consideran las siguientes formas de llevarla a cabo: a) Incremento de la velocidad del viento. b) Incremento del área expuesta al aumento de la velocidad del viento colocando las superficies de la cubierta de vidrio paralelas al flujo del viento o bien, incrementando la inclinación del ángulo de la cubierta de vidrio. c) La realización de experimentos a bajas temperaturas del aire ambiente.

A. A. El-Sebaili (2000): Este investigador realiza un estudio teórico en el que a partir de una simulación en un destilador de doble caseta, con espejos para aumentar la radiación solar recibida en el captador, concluye que la velocidad del viento afecta la productividad del destilador. Él ha propuesto que el coeficiente de transferencia de calor debido a la velocidad del viento ( $V$ ), simbolizado por  $h_w$  se calcula mediante la expresión:

$$h_w = 2.8 + 3V \text{ para } v \leq 5 \text{ m/s} \quad 1$$

$$h_w = 6.15V^{0.8} \text{ para } v > 5 \text{ m/s.} \quad 2$$

Para estimar la Productividad horaria,  $P_h$ , usó la relación:

$$P_h = h_{ewg}(T_w - T_g) \times 3600 / L_w \quad 3$$

$$h_{ewg} = 9.15 \times 10^{-7} \left[ \frac{h_{cwg}(P_w - P_g)L_w}{T_w - T_g} \right] \quad 4$$

$$h_{cwg} = 0.884 \left[ T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)T_w}{2016 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad 5$$

Donde  $T_w$  y  $T_g$  son respectivamente la temperatura del agua y la de la cubierta de vidrio de la caseta, y  $L_w$  es el calor latente de vaporización del agua.

Se considera que  $h_{cwg}$  y  $h_{ewg}$  son los coeficientes de transferencia de calor convectivos y evaporativos respectivamente entre la superficie del agua y la superficie interior de la cubierta de vidrio.  $P_w$  y  $P_g$  son las presiones parciales de vapor saturado a las temperaturas de agua y la cubierta de vidrio respectivamente.

Con dichas expresiones la simulación dio como resultado que la productividad se incrementa desde aproximadamente  $5 \text{ kg/m}^2$  para una velocidad cero, hasta un valor estabilizado en aproximadamente  $6 \text{ kg/m}^2$  para una velocidad mayor de  $10 \text{ m/s}$ ; es decir, la productividad es invariable para velocidades superiores a  $10 \text{ m/s}$ . Se determinó que el comportamiento de la productividad, es decir, la manera en que cambia con la velocidad de viento, es la misma para las dos masas de agua usadas ( $100$  y  $150 \text{ kgs}$ ) en la simulación. Este resultado es independiente de la forma del destilador y de la capacidad calorífica del



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

absorbedor. Cabe resaltar que dadas las medidas del destilador utilizado, el espesor de agua en el destilador es de 10 y 15 cm respectivamente, lo cual está bastante alejado del consenso general que invita a utilizar cantidades mínimas de agua.

Al Hinai (2002) lleva a cabo un estudio teórico sobre los efectos de la velocidad del viento y la temperatura ambiente respecto a la productividad del destilador, considerando únicamente convección natural. En su manuscrito reporta un modelo matemático que predice la productividad de un destilador solar de doble caseta bajo diferentes parámetros climáticos, de diseño y operacionales en Omán. Analiza el espesor de agua a destilar en un intervalo de 0.02 a 0.3 m. El ángulo de inclinación de la cubierta es de  $23^\circ$  y 0.1 m de espesor de aislamiento. Los parámetros de diseño óptimos produjeron un promedio anual de rendimiento de  $4.15 \text{ Kg/m}^2$  por día. Se realizó un análisis de costos para analizar la posibilidad de utilizar una serie de destiladores solares del tipo de destiladores estudiado para la producción de agua potable en las zonas remotas de Omán y se encontró que el costo unitario de agua destilada obtenida es de 16.3 dólares por metro cúbico.

Este autor concluye que el efecto de la velocidad del viento es más significativo que el cambio en la temperatura ambiente; ya que un incremento en la velocidad de 1 a 3 m/s resulta en una productividad 8% superior; mientras que un incremento de 23 a 33 grados, resulta en un incremento de productividad del 8.2%. Estos resultados se explican dado que un incremento en la velocidad del viento, hace que la temperatura de la cubierta descienda, mejorando con esto la condensación. Los resultados presentados por el autor, sólo consideran hasta 6 m/s. Las ecuaciones que utiliza en su modelo matemático son las mismas que se utilizan en este trabajo.

En la literatura especializada se encuentran trabajos de investigación para mejorar el rendimiento de los destiladores. Por ejemplo, Ho-Ming en Taiwan, en sus trabajos de 1991, 1993 y 1999; mediante un modelo experimental estudia el efecto de colocar un ventilador externo a un destilador multietapas, cuyo flujo pasa por la última etapa del destilador, obteniendo sensibles mejoras en la condensación, aunque sacrificando la temperatura en el absorbedor y consecuentemente la evaporación. Desarrolla además un modelo matemático con el que mediante la solución simultánea de las ecuaciones que resuelve logra predecir la tasa de producción de agua destilada para cada efecto en diversas condiciones de clima, de diseño y de funcionamiento. Las tasas de producción de agua destilada para cada efecto en virtud de diferentes condiciones climáticas, de diseño y de operación pueden ser predecidas resolviendo simultáneamente las ecuaciones que propone.

Analiza la exactitud de los datos experimentales mediante la fórmula siguiente:



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$$E = \sum_{i=1}^N [\eta_i - \eta_j]^2$$

6

Donde  $\eta_i$  son las predicciones matemáticas, mientras que  $\eta_j$  y  $N$  son los valores experimentales.

Muafag (2007) utilizó dos aspersores que coloca sobre las cubiertas de un destilador de doble caída, accionándolos cada 15 minutos, con lo que logra disminuir la temperatura en las cubiertas de 8 a 10°C. Además, analiza el efecto de enfriar la cubierta de vidrio a diferentes espesores de agua a destilar. El efecto de enfriamiento de la cubierta de vidrio muestra un aumento en la productividad del agua de aproximadamente 17-23%, este aumento de la productividad se logra para todas las profundidades ensayadas bajo el efecto de enfriamiento.

Se observó que la profundidad más baja (0.5 cm de espesor) en comparación con las otras profundidades analizadas tiene 14% mayor productividad del destilador que a 2 cm, 16% a 3 cm, y 18% más productividad que el obtenido a partir de la profundidad de 4 cm, para explorar la contribución del método de refrigeración aplicado, se realizó una evaluación comparativa por separado para cada profundidad del agua y los resultados obtenidos antes y después de enfriar la cubierta de vidrio se muestran en una tabla con la que se detalla la contribución final de su estudio y se concluye que el máximo rendimiento del destilador se observó a una profundidad de agua de 0.5 cm en la que se obtuvo una producción de agua de 5.4 l/día antes del enfriamiento y 6.69 l/día después del enfriamiento con lo que se obtuvo un porcentaje de incremento de producción de agua de 23% en estas condiciones con respecto al resto de escenarios estudiados.

La mayoría de los investigadores busca mejorar la productividad del destilador y todos lo logran, sin embargo lo importante a considerar es que estos dispositivos alternos sean autónomos energéticamente, sencillos y de fácil operación.

En cuanto a los trabajos en donde se obtiene un efecto contrario o poca influencia de la velocidad del aire, cabe mencionar a Safwat Nafey et. al., (1999), quien propuso un modelo matemático basado en los estudios de Malik et al., (1973), en donde analiza los diferentes parámetros que afectan el rendimiento de un destilador DSCS de una sola pendiente. El autor concluyó que a medida que se incrementa la velocidad del viento, la producción de agua destilada disminuye gradualmente, por ejemplo: a 9 m/s la productividad disminuye un 13%.

40



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Mohamad Abu-Qudais et al. (1996), realizaron un estudio teórico y experimental de un destilador solar de caseta sencilla (DSCS), utiliza un ventilador en colocado en una de las paredes del destilador mediante el cual se está extrayendo el vapor de agua generado por el sistema mediante un ventilador de velocidad variable de bajo consumo de energía, la energía necesaria para hacer funcionar el ventilador de extracción es proporcionada por un panel solar fotovoltaico, haciendo así todo el sistema puede funcionar con energía solar para aplicaciones en zonas rurales remotas.

La simulación la lleva a cabo mediante la solución del sistema de ecuaciones que resuelve en base al absorbedor, agua a destilar y cubierta de vidrio. El balance de energía para cada región se basa en la temperatura media en esa región. La ecuación que utilizó para medir la fracción de vapor de agua ( $\varrho$ ) dirigida hacia el extractor-condensador es:

$$\varrho = (M_{condensador}) - M_{evaporado} \quad 7$$

Estos autores encontraron que el hecho de implementar un condensador externo aumenta la tasa de transferencia de calor de evaporación del agua ( $q_e$ ) lo cual atribuyen a reducciones en la presión y la humedad, así como a la mejora de la convección forzada en el interior del destilador. Descubrieron estos autores además que la tasa de evaporación del agua ( $q_{eff}$ ) es decir, la tasa de transferencia de calor efectiva varía linealmente con la tasa de extracción y relacionan esto mediante la siguiente fórmula:

$$q_{eff} = q_e(1 + \varphi\varrho) \quad 8$$

El valor de la constante de  $\varphi$  (coeficiente de correlación) se encontró mediante la comparación de los valores para el modelo numérico con resultados experimentales. Determinaron que el valor óptimo de  $\varphi$  es 0.8.

La eficiencia térmica del destilador fue calculada por:

$$\eta = \left(\frac{q_{eff}}{I}\right) \times 100 \quad 9$$

Concluyen, teóricamente, que hay un incremento inicial en la producción de agua con una velocidad del viento en la extracción superior a 1.5 m/s y después tiende a decrecer; y al alcanzar 3 m/s la productividad disminuye, lo que significa que cualquier enfriamiento extra de la caseta reduce la temperatura del agua contenida en el absorbedor, es decir que una ligera brisa es suficiente para mejorar la eficiencia.

Samy M. ElSherbiny & Hassan E. S. Fath (1992), analizaron un modelo matemático de un destilador solar de una sola pendiente (DSCS) en donde concluyen que incrementando la velocidad del viento resulta una disminución relativamente pequeña en la productividad, teniendo poco efecto en la producción total: si se incrementa la velocidad del aire de 0 a 8 m/s disminuye



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

la producción de agua destilada un poco menos del 10%. Estos autores utilizan las siguientes fórmulas para simular la temperatura ambiente máxima y mínima durante un día ( $n$ ), en °C, mismas que fueron propuestas por Wafik Kamal (1981):

$$T_{max} = 24.8 + 5.9\text{sen}\left(2\pi \frac{n+240}{365}\right) \quad 10$$

$$T_{min} = 15.9 + 6.8\text{sen}\left(2\pi \frac{n+239}{365}\right) \quad 11$$

Con ayuda de las dos fórmulas anteriores, logran correlacionar la  $T_a$  mediante datos meteorológicos para 10 años en Alejandría, Egipto:

$$T_a = T_{min} + (T_{max} - T_{min})xf(t) \quad 12$$

Siaka Toure & Pierre Meukam (1996), proponen un modelo matemático validado por un estudio experimental para un DSCS. El diseño experimental que utilizaron tiene una inclinación de  $16^\circ$ , los canales de recolección de agua destilada se encuentran ubicados al final del borde del vidrio con menor inclinación, utilizaron un aislamiento de poliestireno y este a su vez tiene un recubrimiento de un marco de madera.

Este estudio se llevó a cabo bajo las condiciones climáticas de Abidjan, Costa de Marfil.

El propósito del trabajo al que hacemos referencia es presentar un modelo matemático de la destilación solar de agua con la finalidad del encontrar los efectos de cada uno de los parámetros de diseño de la operación global de la unidad. Para resolver las ecuaciones diferenciales simultáneas de los balances de energía en la cubierta de vidrio, el agua contenida en el absorbedor y la base del absorbedor estos autores utilizaron los valores experimentales de la radiación solar y la temperatura ambiente. Estos autores encontraron que la producción total diaria varía desde  $1.15$  hasta  $4.32$   $\text{l/m}^2$  para los valores totales de radiación de entre  $9$  y  $19.9$   $\text{MJ/m}^2$ . Los valores experimentales obtenidos se utilizaron para validar el modelo matemático. Al comparar sus resultados teóricos con los experimentales encontraron una diferencia del  $5\%$  en cuanto a las temperaturas y  $15\%$  en cuanto a la producción de agua destilada.

Las predicciones que lograron obtener demostraron que la variación de la velocidad del viento tiene poco efecto sobre la productividad del destilador: cuando la velocidad del viento aumenta de  $0$  a  $9$   $\text{m/s}$ , el aumento de la producción total es menos de  $10\%$ .

Los autores Safwat Nafeya, Adeldkadib, Abdelmotalipb, y Mabrouka, utilizaron cuatro prototipos de destiladores solares de manera simultánea, todos de caseta sencilla. En este trabajo se presenta el desarrollo de una ecuación matemática



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

para predecir la productividad del destilador, basado en el trabajo de Malik. Para el cálculo del ángulo de inclinación se utilizó el modelo de Ghoraba M.M. (1987).

Las conclusiones que se reportan son las siguientes:

1. La productividad aumenta cuando aumenta la radiación solar incidente.
2. La productividad baja cuando aumenta la velocidad del viento.
3. La productividad aumenta ligeramente cuando aumenta la temperatura ambiente (cálculo teórico: aumenta el 3% con un incremento de 5°C).
4. La productividad disminuye si la profundidad del agua contenida en el absorbedor (agua a destilar) aumenta, hay una variante del 14% con variar la profundidad de 2 a 7 cm.
5. Se experimenta con 4 ángulos 15, 20, 25 y 30 y se encuentra que el ángulo óptimo es de 23.45°.
6. La fórmula obtenida para la productividad (Pd) es:

$$Pd = -1.39 + 0.894Hd + 0.033Ta - 0.017V - 0.008\theta - 1.2 (\delta/l), \text{ con un error de } \pm 5\% \quad 13$$

Donde:

Hd = radiación solar incidente (W/m<sup>2</sup>)

Ta = temperatura del aire (°C)

V = velocidad del viento (m/s)

$\theta$  = ángulo del vidrio (grados)

$\delta/l$  = radio de profundidad en la pared (m)

### 1.7 GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN UN DESTILADOR SOLAR DE AGUA.

Entre los diferentes aspectos a considerar en el análisis del estado del arte referente a la destilación solar, se encuentran 1) los parámetros geométricos, 2) propiedades térmicas, ópticas y corrosivas de los materiales, 3) modelos matemáticos propuestos (se analizan en el capítulo quinto). A continuación se presenta una descripción referente a los dos primeros aspectos mencionados.

#### **Geometría.**

En cuanto a los aspectos geométricos del destilador, hay varios parámetros que se deben estudiar: 1) de una o doble caseta, 2) los materiales utilizados, 3) el ángulo de la cubierta con respecto al absorbedor, 4) la profundidad del espejo de agua en el absorbedor, 5) el tipo de aislante, y 6) el espesor del vidrio y del aislante.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### ***Caseta doble o sencilla.***

Respecto al tema de utilizar una o doble caseta, pocos autores mencionan por qué eligió una o dos caída, probablemente por simplicidad sea más fácil tomar el de caseta sencilla, sin embargo no se menciona un aspecto importante, que no se aprovecha en su totalidad la incidencia de la luz solar; ya que al tener una caseta sencilla se debe orientar al norte o al sur, para aprovechar el recorrido del sol durante el día, pero siempre hay una pequeña sombra.

En el caso de destiladores de doble caseta, las caras se colocan en dirección oriente-occidente, con lo cual se aprovecha la luz solar durante todo el día, aunque como lo menciona Rubio-Cerda et al (2001) no se tienen resultados concluyentes respecto a que la orientación Este-Oeste pueda ser más productiva que la Norte-Sur. En cualquier caso lo que se busca es optimizar el aprovechamiento de la incidencia de la luz y como lo mencionan Safwet (1999) y Muafag (2007), la productividad aumenta cuando aumenta la radiación solar incidente.

### ***Materiales utilizados.***

Es curioso que únicamente un autor (Al-Hinai, 2001) hace mención a algún estudio sobre el uso de los materiales utilizados, gran cantidad de autores son específicos al describir los materiales con que está construido su modelo experimental, incluso algunos de ellos resaltan el hecho de que el absorbedor sea de color negro (Muafag 2007), pero ninguno especifica el porqué de su elección. Puede ser que lo consideren obvio, en el sentido de que se requiere un buen conductor además de tener una alta capacidad de absorción de la radiación transmitida en el absorbedor, un material traslúcido en la cubierta y preferentemente algún tipo de aislamiento en la parte exterior del absorbedor, para evitar fugas de calor por conducción. Al Hinai (2001) menciona que para el absorbedor es conveniente el uso de asfalto, en función a la productividad obtenida analizando diversos materiales, pero en el caso del aislante no indica que material utilizó.

### ***Ángulo de inclinación.***

En el desarrollo de los diferentes modelos experimentales hay gran variedad de ángulos utilizados para las cubiertas del destilador, la más extrema es la propuesta de Porta et al. (1997) que trabajan con destiladores cuya cubierta apenas tiene 4° respecto a la horizontal. Algunos otros ángulos utilizados son: 15° (Kumar y Tiwari, 1996), 16° (Toure y Meukam, 1996), 10° (El-Sebaili, 2003), y 40° (Muafag, 2007). Cabe mencionar que El-Sebaili (2003) adiciona el uso de espejos reflejantes, por lo que el ángulo sugerido puede estar en función también de esta variable.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Por otro lado, se encontraron dos autores que sí proporcionan un análisis respecto a la obtención de un ángulo ideal, por ejemplo, Al-Hinai et al. (2001) concluyó que el ángulo óptimo es de  $23^\circ$ , argumentando que es el ángulo que permite una productividad más uniforme durante el año, ya que en invierno a mayor ángulo, mayor rendimiento y en verano a mayor ángulo, menor rendimiento. Por su parte Safwat et al. (1999) concluyó que el ángulo ideal sería de  $23^\circ$ .

### ***Espesores***

Muafag (2007) menciona el uso de aluminio de 3 mm en el absorbedor, argumentando que este es un material buen conductor, pero no menciona ningún análisis sobre espesores alternativos. Al-Hinai (2001), menciona que el espesor óptimo para el aislamiento debe ser entre 0.09 y 0.13 m, sin indicar cuál fue el material que se utilizó, basado únicamente en la productividad de agua destilada obtenida. Por otro lado, la única referencia encontrada respecto al espesor de la cubierta, es el trabajo de Toure y Meukan (1996), quienes concluyeron a través de sus modelos matemático y experimental que "el espesor de la cubierta de vidrio no tiene ningún efecto significativo sobre la productividad del destilador".

### ***Profundidad en el espejo de agua.***

Este es un tema en donde hay coincidencia entre prácticamente todos los autores, todos coinciden en que a menor profundidad del espejo de agua, mayor productividad del destilador, en donde hay discrepancia es entre la profundidad máxima que debe medir el espejo de agua, o bien, cuál es la repercusión real del aumento o disminución de la profundidad.

Por ejemplo, Safwat et al (1999) menciona que la productividad disminuye hasta en un 14% si la profundidad aumenta de 2 a 7 cm. Al-Hinai et al (2001) obtiene que, mayor profundidad es igual a menor productividad, encontrando que el rango óptimo se encuentra entre 0.02 y 0.06 m. Toure y Meukan (1996), encontró que si la profundidad disminuye de 60 mm a 5 mm, la productividad mejora en un 19%. Muafag (2007) realiza estudios experimentales con profundidades de 0.5, 2, 3 y 4 cm, concluyendo que la menor profundidad mejora sustancialmente la productividad, sin embargo no da una medida exacta o un rango recomendado. Tripathi y Tiwari (2004) realizan experimentaciones en un destilador activo (con dispositivos para precalentar el agua) con diferentes profundidades (0.05, 0.10 y 0.15 m), encontrando que hay una importante variación del coeficiente de transferencia de calor convectivo debido a la profundidad del agua.

### ***Otros dispositivos complementarios.***



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

En este tema hay una gran cantidad de aportaciones de diferentes autores, en donde se busca mejorar el desempeño de los diferentes procesos que ocurren en el destilador; a continuación se mencionan algunos resultados importantes de varios investigadores:

- Romero et al (1997) en la Universidad de Quintana Roo, experimentó con el uso de espejos en un destilador de caída sencilla, colocándolos en la parte frontal y posterior del destilador, obteniendo una mejora en la productividad del 45.45% con una radiación promedio de 505.8 W/m<sup>2</sup>-día.
- Ho-Ming en Taiwan ROC, en sus trabajos de 1991, 1993 y 1999; estudia el efecto de colocar un ventilador externo a un destilador multietapas, cuyo flujo pasa por la última etapa del destilador, obteniendo sensibles mejoras en la condensación, aunque sacrificando la temperatura en el absorbedor y consecuentemente la evaporación.
- Porta et al. (1997) sugieren la recirculación de agua sobre la parte exterior de la cubierta para disminuir la temperatura y mejorar la condensación.
- Tiwari y Sinla (1992), sugieren todo un sistema de alimentación de agua precalentada, con el uso de un "calentador externo", así como la circulación de agua sobre la cubierta para mejorar la condensación, la cual bautizan con el nombre de "destilación activa".
- Khalifa et al. (1999) confirman parte de lo anterior, afirmando que el uso de precalentadores del agua, condensadores internos y externos, así como variando la alimentación del agua se mejora la productividad en destiladores de una y dos caídas.
- Muafag (2007), utilizó dos aspersores que coloca sobre las cubiertas de un destilador de doble caída, accionándolos cada 15 minutos, con lo que logra disminuir la temperatura en las cubiertas de 8 a 10°C.

La mayoría de los investigadores busca mejorar la productividad del destilador y todos lo logran, sin embargo lo importante de considerar es que estos dispositivos alternos sean autónomos energéticamente, sencillos y de fácil operación, porque de lo contrario irían contra las reglas de funcionamiento que buscamos para nuestro destilador.

### *1.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.*

En esta sección se ha dado un panorama general de los métodos convencionales para la desalación de agua y los fenómenos térmicos que están involucrados en la destilación solar de agua.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Por una parte la destilación solar convencional está basada en proporcionar energía térmica mediante el consumo de combustibles fósiles, los que se sabe de antemano que tienen necesidades energéticas grandes y en consecuencia se pueden tener desaladoras de alta capacidad en espacios relativamente pequeños.

La destilación solar y las tecnologías que se han discutido aquí son un proceso de baja densidad energética requiriéndose áreas de captación muy grandes para la obtención de bajos volúmenes de agua; no obstante, al no utilizar combustibles fósiles ni tampoco electricidad se vuelven sistemas atractivos para su aplicación en las zonas rurales, representando una tecnología que se puede usar ampliamente en zonas de alta densidad de energía solar.

Los criterios para seleccionar el uso del destilador de caseta para este proyecto son dos; el primero, que técnicamente es el más sencillo de construir y más barato; el segundo, es que fundamentado en bibliografía encontrada, el destilador de doble caseta es hasta un 20% más eficiente que el de caseta sencilla (Solís Correa et. al, 1997). Dado que entre los objetivos primarios de esta Tesis está el desarrollo de un equipo que requiera poca capacitación en su diseño de operación, estos fundamentos justifican la elección.



## CAPÍTULO SEGUNDO. ESTUDIO EXPERIMENTAL

---

### 2.1 *INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se presentan las características físicas del dispositivo experimental usado para el estudio de la evaporación-condensación de agua a partir del diseño geométrico del destilador, así como de las partes y componentes que forman el mismo y la instrumentación que se utilizó para el análisis de la productividad.

### 2.2 *DESCRIPCIÓN DEL DESTILADOR EXPERIMENTAL.*

Para la experimentación se diseñaron y fabricaron dos destiladores solares de doble caseta, DSDC, con un colector solar tipo charola cuyo fondo es de forma cuadrada de 0.5 m de largo proporcionando un área de captación de 0.25 m<sup>2</sup>. La charola se construyó usando lámina de cobre calibre 16 (1.61 mm de espesor) cuyo fondo se recubrió con pintura de color negro mate resistente a altas temperaturas para incrementar la absorción de la radiación solar. La envolvente del destilador está formada por vidrio de 3 mm de espesor colocado a dos aguas a una inclinación de 23° respecto de la horizontal.

Las paredes laterales y el fondo de la charola se aislaron térmicamente con espuma de poliuretano con un espesor de 0.10 m, el cual se cubrió con una protección exterior metálica, para garantizar el aislamiento térmico del sistema y disminuir la transferencia de calor hacia el ambiente. Las dos cubiertas de vidrio se sellaron con silicón para eliminar fugas de vapor de agua y disminuir las pérdidas de agua destilada.

En la parte en la que se recargan las dos cubiertas de vidrio (caseta) en la charola se ubicaron dos canales de aluminio a los que se les maquinó una ligera pendiente y un orificio de ¼ de pulgada los cuales son el medio captador y de transporte de condensado.

En la parte central de los DSDC se encuentra un recipiente que distribuye el agua a los destiladores, manteniendo en ambos un nivel constante de agua salobre a tratar. Cada destilador cuenta con un colector independiente de condensados, en donde se registra de manera continua la cantidad de agua destilada.

El destilador se diseñó con un orificio a uno de sus costados para alimentar a la charola con una manguera de ¼ de pulgada con el agua a destilar. En la base



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

del mismo y en una esquina se ubicó otro orificio de  $\frac{1}{2}$  pulgada el cual se destinó para eliminar la salmuera.

Para analizar la influencia de la velocidad del aire sobre el proceso de evaporación-condensación de agua, se diseñó un túnel de viento cerrado construido en material plástico, el cual, se colocó sobre la cubierta de uno de los destiladores con la finalidad de controlar y estabilizar el flujo de aire a diferentes velocidades. La velocidad del aire se produce al interior del túnel utilizando tres ventiladores alimentados eléctricamente con una fuente de voltaje variable, cuyo encendido y apagado se realiza de forma automática mediante un timer que los enciende y apaga a las 8:00 y 20:00, respectivamente. En todas las corridas experimentales se utilizó agua destilada para homologar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura. En ninguno de los trabajos analizados y que se reportan en el presente proyecto se menciona la influencia de la concentración sobre el rendimiento ni la salinidad resultante.

La Figura 15 muestra el diagrama general del equipo experimental.

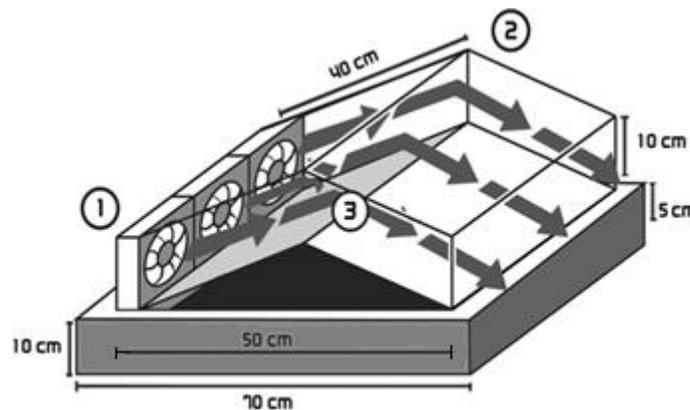


Figura 15: Representación esquemática de los destiladores solares fabricados: 1) Ventiladores; 2) Cubierta de acrílico; 3) Cubierta de vidrio.

Se identificaron los parámetros ambientales que pueden afectar la productividad del destilador tales como temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y radiación solar. La productividad se evaluó a partir del volumen de agua obtenido diariamente, el cual fue medido por la metodología que se describe posteriormente. La productividad en cada uno de los destiladores fue estudiado a partir de los parámetros ambientales y datos experimentales que se estuvieron midiendo. El proceso de medición se realizó diariamente mediante un Data Logger marca Campbell. El beneficio de utilizar este sistema de adquisición de datos es que se obtuvieron datos precisos y confiables al medir diariamente el comportamiento térmico de cada destilador (parámetros de temperatura en la caseta, absorbedor, agua a destilar, espacio entre caseta y superficie del agua y aislante).



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 2.3 *DISEÑO DEL DESTILADOR BAJO ESTUDIO.*

Hasta la fecha han sido desarrollados y estudiados diferentes prototipos de destiladores solares de agua, cada uno con diferentes características, sin embargo, todos ellos tienden a tener las mismas componentes, dentro de las cuales destacan: la charola que va a contener el agua a destilar y cuyo fondo es la superficie absorbidora que, generalmente, es de metal recubierto con un material que garantice la mayor absorción de la radiación solar; la cubierta que prácticamente es la envolvente principal del destilador, la cual, además de actuar como condensador, debe permitir la transmisión de la luz solar hacia el fondo de la charola.

De acuerdo a los diferentes análisis que se llevaron a cabo para la elección de materiales, se definió el diseño final del destilador que servirá como apoyo para lograr optimizar variables y materiales que den como resultado una mayor productividad de agua destilada en las condiciones ambientales que presenta la ciudad de Temixco, Morelos, la cual se encuentra a una latitud de 18°54' Norte y 99°13' de longitud oeste, a 1.230 metros sobre el nivel del mar con una radiación solar media diaria de 750 W/m<sup>2</sup>.

#### **a) *Cubierta o condensador.***

La cubierta tiene una función básica dentro del desempeño general del destilador, la cual consiste en permitir la mayor transmisión de radiación solar al sistema y la menor absorción. Para seleccionar cual debe ser la cubierta óptima, se realizó un estudio sobre las características ópticas de materiales transparentes disponibles en el mercado tales como vidrio, acrílico y policarbonato. Éstas fueron medidas mediante dos técnicas: un fotodiodo para medir los efectos de atenuación en la transmisión de la luz solar, cuando incide normalmente a la superficie de las cubiertas consideradas; y un espectrofotómetro de doble haz con un intervalo desde 290 a 2500 nm de la marca Shimadzu modelo PC201 para conocer el espectro de la transmisión, reflexión y absorción en función de la longitud de onda de la radiación solar.

Los resultados obtenidos para la transmitancia, absortancia y reflectancia se presentan en la Tabla 1, en donde los valores de transmitancia de los diferentes materiales analizados son mayores al 80%, siendo el acrílico de 1.5 mm el que presenta el valor máximo. Se infiere de esta tabla que del 100% de la luz solar que incide sobre cada cubierta, por ejemplo, el vidrio de 3.0 mm de espesor solo deja pasar el 81.4%, es decir se tiene una atenuación del 18.6%; mientras que la cubierta de acrílico de 3.0 mm de espesor la atenúa en un 19.3%.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Tabla 1: Valores ópticos de diferentes materiales obtenidos con el espectrofotómetro.

<b>Muestra</b>	<b>Transmitancia (%)</b>	<b>Reflectancia (%)</b>	<b>Absortancia (%)</b>
Acrílico 1.5 mm	86.	8.3	5.2
Acrílico 3 mm	80.7	7.6	11.7
Acrílico 6 mm	80.6	7.9	11.5
Acrílico 2 mm	86.0	9.1	4.9
Policarbonato 2 mm	85.5	9.1	5.4
Vidrio 3 mm	81.4	8.0	10.6
Vidrio 6 mm	81.7	8.3	9.8

En la Figura 16 se muestra el comportamiento de la transmisión óptica con respecto a la longitud de onda. Se observa que en los acrílicos se presentan picos de absorción en la zona del infrarrojo mientras que el vidrio carece de este comportamiento. Por otra parte, en la región del visible (desde 400 nm hasta 750 nm), se observa que en el caso de los vidrios de 3.0 mm y 6.0 mm, éste último tiene mayor transmitancia que el primero, lo cual fue corroborado con el fotodiodo en donde se obtuvo una transmisión de 81.7% para el vidrio de 6.0 mm comparado con una transmisión de 81.4% para el vidrio de 3.0 mm, fenómeno que aparentemente es contradictorio; sin embargo, se puede explicar argumentando de que, aunque ambos son "vidrios", pueden estar constituidos con diferentes elementos: quizá el contenido de níquel, fierro, sodio, calcio, silicio y oxígeno, siendo los dos primeros los que afectan la transmisión óptica en el visible, sea lo que proporciona la diferencia. Sin embargo para la zona del cercano infrarrojo (longitudes de onda mayores de 800 nm), el vidrio de 3.0 mm tiene mayor transmitancia.

En la Figura 17 se muestra la absortancia de los diferentes materiales analizados y se adiciona el espectro de la radiación solar con fines comparativos para poder realizar la selección del material para la cubierta. Desde el punto de vista de acoplamiento con respecto de la radiación solar es claro que el acrílico de 1.5 mm es el que presenta la mayor transmisión en la región del visible, sin embargo, estos materiales se tornan amarillentos y se vuelven quebradizos debido a la absorción de radiaciones ultravioletas, y en consecuencia las características de transmisión óptica se ven reducidas conforme pasa el tiempo. Por esta razón y considerando la estabilidad que tiene el vidrio se seleccionó a dicho material, con un espesor de 3.0 mm, como el adecuado para usarlo como la envolvente principal del destilador (William F. Smith, 2006).



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

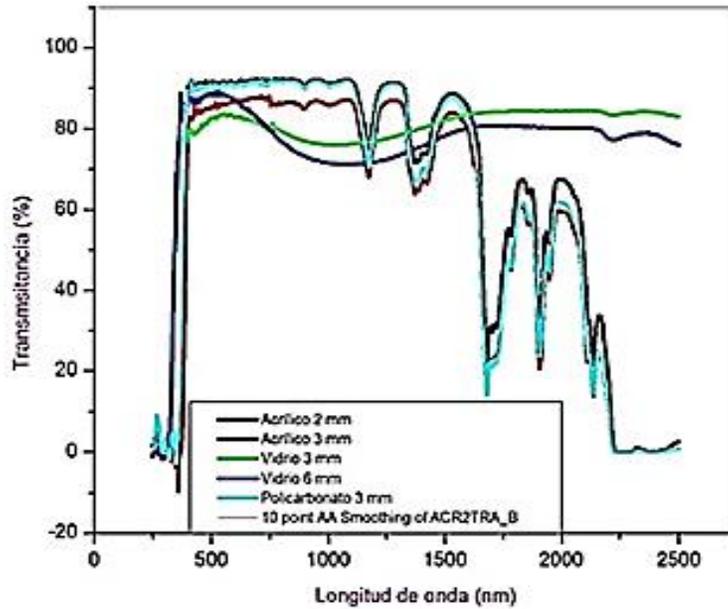


Figura 16: Espectro de la transmisión óptica de los materiales analizados.

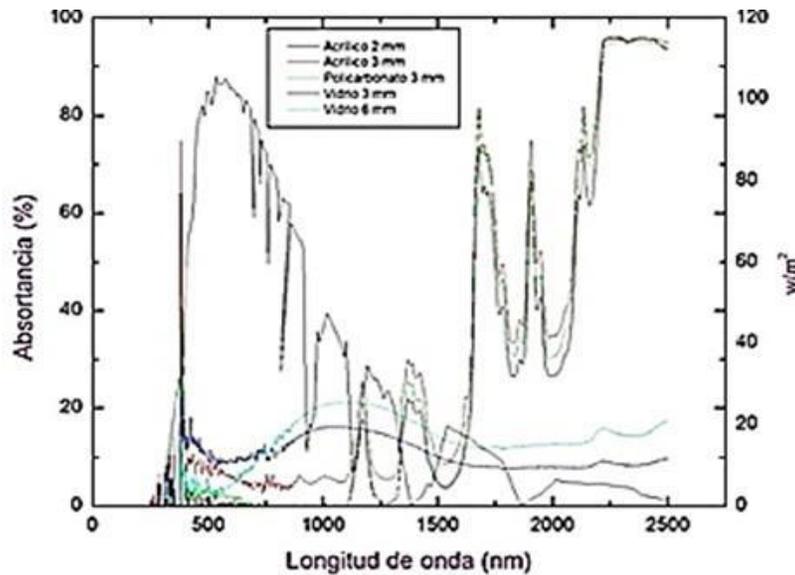


Figura 17: Espectro de la absorción óptica de los materiales analizados con parados con el espectro de la radiación solar bajo condiciones AM1.5.

La función del absorbedor dentro del desarrollo del destilador requiere que sus características básicas presenten un alto valor de conductividad térmica para poder transmitir a la masa de agua el calor y una excelente capacidad anticorrosiva. Con el fin de elegir el material más adecuado, se analizó primero



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

la conductividad térmica de diferentes metales, la cual, se muestra en la tabla 2, pudiéndose observar que la conductividad térmica más alta la tiene el cobre, después de la plata. El cobre es el elemento con mayor conductividad eléctrica y térmica; por otra parte, tiene propiedades anticorrosivas, lo cual es muy importante para este proyecto. Es de fácil manipulación mecánica y tiene propiedades bactericidas. En consecuencia el material seleccionado fue lámina de cobre de calibre 16 (1.61 mm de espesor).

Tabla 2: Conductividad de diferentes materiales.

<b>Materiales</b>	<b>K (W/mK)</b>
Aluminio puro	206
Cobre	379
Oro	315
Hierro puro	67
Acero 1.0	43
Plata	415
Acero 0.5	52
Acero inoxidable 316	16.3d
Latón (70Cu-30Zn)	31

Transferencia de Calor. J.P. Holma; Octava edición.

### ***b) Aislante térmico.***

La función que tiene el aislante térmico en un destilador solar es evitar que el calor ganado por el absorbedor se pierda mediante la conductividad al exterior por cada uno de los lados y base del mismo. En la tabla 3 se muestra la conductividad térmica de diferentes materiales que pudieran ser candidatos aceptables para utilizarse para la función que se requiere en el destilador.

Tabla 3: Conductividad de diferentes materiales.

<b>Materiales</b>	<b>K (w/m*K)</b>
Fibra de vidrio	0.038
Virutas de madera	0.059
Fieltro, pelo	0.052
Corcho aglomerado	0.045
Cartón corrugado	0.064
Espuma de poliestireno	0.013
Espuma de poliuretano	0.04
Glasliner	0.23



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Transferencia de Calor. J.P. Holma; octava edición.

Tanto el poliestireno como el poliuretano y la fibra de vidrio son los materiales aislantes con el valor de conductividad más bajo a temperatura ambiente, sin embargo se eligió el poliuretano por tener el valor más bajo en el mercado además de ser el material que se encuentra con más facilidad a la venta. La capacidad de aislamiento del poliuretano es muy robusta frente a los efectos de envejecimiento a los que están expuestos habitualmente los aislamientos térmicos.

Con el poliuretano es muy fácil el tratamiento de puentes térmicos, es resistente a efectos negativos por el paso del tiempo como el deterioro y deformidades que sufren otros aislantes. El poliuretano alcanza el máximo nivel de aislamiento con el mínimo espesor necesario. Una vez analizadas las conductividades térmicas de diferentes materiales se llegó a la conclusión de elegir como material para el aislante del destilador solar la espuma de poliuretano.

En la Figura 18 se muestra un corte transversal de espuma de poliuretano, tal como se utilizará como aislante térmico en el destilador solar.



Figura 18: Espuma de poliuretano.

Para lograr encontrar el espesor adecuado se llevaron a cabo una serie de cálculos en los que se involucró la ecuación que modela la conductividad térmica (ecuación de Fourier). Se consideraron las temperaturas de ambos materiales, para la base interna del absorbedor. Se tomó como referencia una temperatura de 60°C (M. Castillo, 2008), y para la cara exterior del aislamiento se consideró la temperatura ambiente y se sumó a ésta incrementos de 5°C hasta llegar a 50°C. Los cálculos se realizaron para el cobre y poliuretano.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

El flujo de calor a través de la pared compuesta por el cobre y la espuma de poliuretano se muestra en la gráfica de la Figura 19.

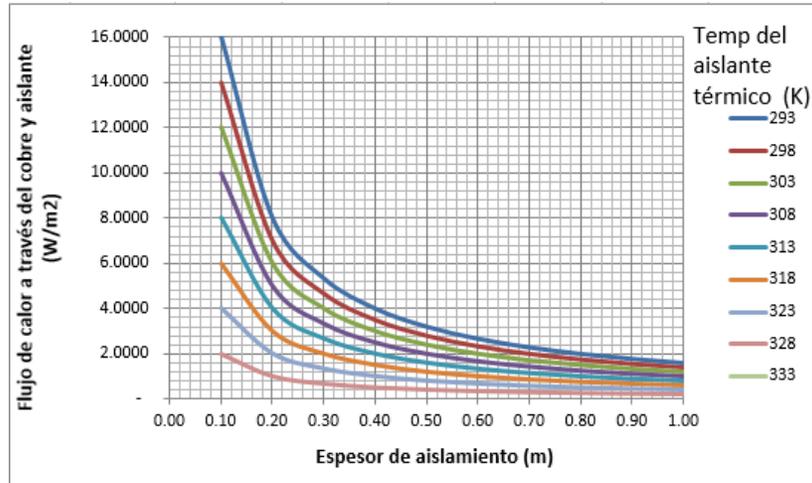


Figura 19: Diferentes espesores de la espuma poliuretano con respecto al flujo de calor a través del cobre y aislante.

En las Figuras 20 y 21 se muestran los resultados para la madera y fibra de vidrio, respectivamente:

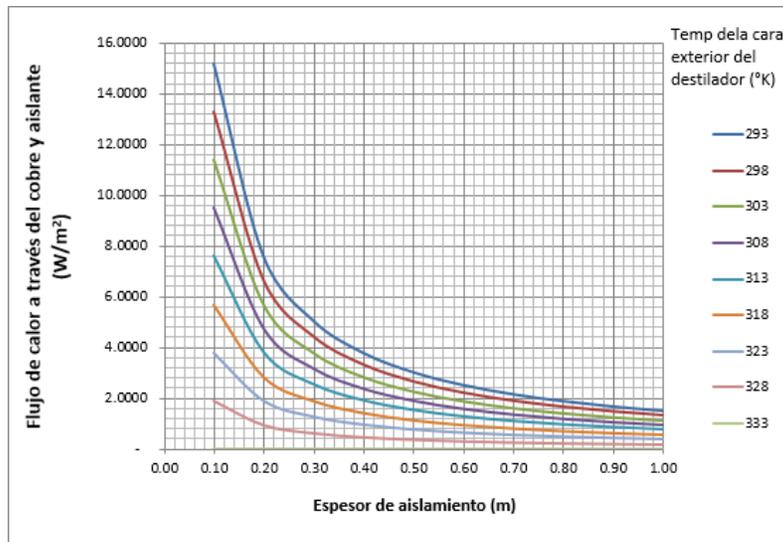


Figura 20: Diferentes espesores de la fibra vidrio con respecto al flujo de calor a través del cobre y aislante.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

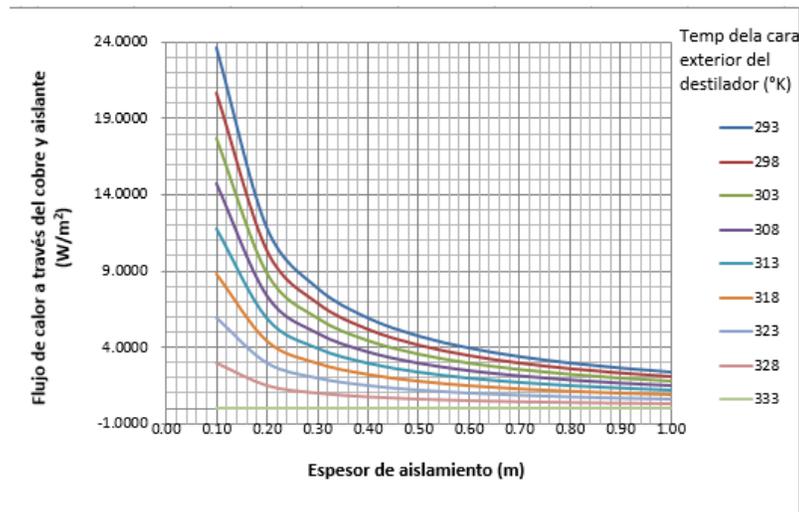


Figura 21: Diferentes espesores de la madera con respecto al flujo de calor a través del cobre y aislante.

Al analizar las Figuras 19, 20 y 21, se puede observar que en todos los casos el espesor a partir del cual el flujo de calor no se ve afectado significativamente es de 40 cm; pero debido a que es muy poco manejable y práctico operativamente trabajar con esta dimensión, se llega a la conclusión que se puede trabajar con un espesor de entre 10 y 20 cm debido a que con este valor el flujo de calor se disminuye sensiblemente. Con base en que debemos buscar que el destilador sea práctico y operativo, se concluye que se trabajará con un espesor para el aislante de 10 cm.

### 2.4 INSTRUMENTACIÓN Y TOMA DE DATOS.

Para medir la temperatura ambos destiladores se encuentran instrumentados con termopares tipo K, colocados estratégicamente dentro y fuera del dispositivo; mediante estos termopares y un sistema de adquisición de datos marca Campbell modelo CR10, se midió diariamente dichas temperaturas; se cuenta además con un software para programar y extraer datos a través de la interface serial que se conecta a una computadora. Este programa tiene considerado el lapso de tiempo en el que envía las lecturas durante el día, en este caso, cada diez minutos; asimismo, considera una temperatura de referencia y se especifica el uso de un multiplexor modelo AM416.

Además se adquirió información meteorológica diaria: irradiancia solar, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y humedad relativa, las cuales se registran de manera continua en el Instituto de Energías Renovables (IER) en Temixco, Morelos. En la tabla 4 y 5, se presentan los valores de



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

exactitud y descripción dados por los fabricantes de los diferentes sensores utilizados en esta estación solarimétrica.

Tabla 4: Porcentaje de exactitud de los instrumentos de medición brindados por los fabricantes.

Sensor	Error máximo
Radiación solar	$\pm 0.5 \text{ W/m}^2$
Temperatura ambiente	$\pm 0.4^\circ\text{C}$
Humedad relativa	$\pm 3\%$
Velocidad del viento	$\pm 0.3 \text{ m/s}$
Dirección del viento	$\pm 3^\circ$

Tabla 5: Características y descripción de los instrumentos de medición brindados por los fabricantes.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	MODELO	CALIBRACIÓN
<i>Radiación global</i>	Piranómetro marca Eppley	PSP	Anual (IGF-UNAM) (K=7.68 Sensor Campbell)
<i>Temperatura ambiente y humedad relativa</i>	Sensor Campbell, CS500	1000 $\Omega$ PRT, DIN 43760B	Bianual (fabricante)
<i>Velocidad y dirección del viento</i>	Wind Sentry mod 03002-5 R.M. Young Company	03002-5	Bianual (fabricante)

Para medir la masa de agua destilada, se utilizó una báscula electrónica marca Tor-Rey, serie L-EQ 5/10 con una precisión de 0.001 kg. Se realizó un programa en Visual Basic mediante el cual se estableció comunicación con la báscula, la cual estuvo permanentemente conectada a una computadora que capturó la información en períodos cortos de 10 minutos. Mediante el registro continuo del peso del destilado contenido en los recipientes, se logró determinar la masa de agua destilada diaria. La Figura 22 muestra una vista del sistema de colección de destilados y el sistema automático de registro de peso. Al final del día, el volumen producido se midió también en una probeta con una capacidad de 1000 ml graduada con una precisión del 1% y una incertidumbre en la lectura de 5 ml.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.



Figura 22: Vista del registro de la masa de agua destilada.

### 2.5 JUSTIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.

Como se mencionó anteriormente para el registro de la temperatura se usaron sensores del tipo termopar tipo K. La Figura 23, representa gráficamente la ubicación de cada uno de ellos. Los datos se adquirieron con un adquirente de datos marca Campbell.

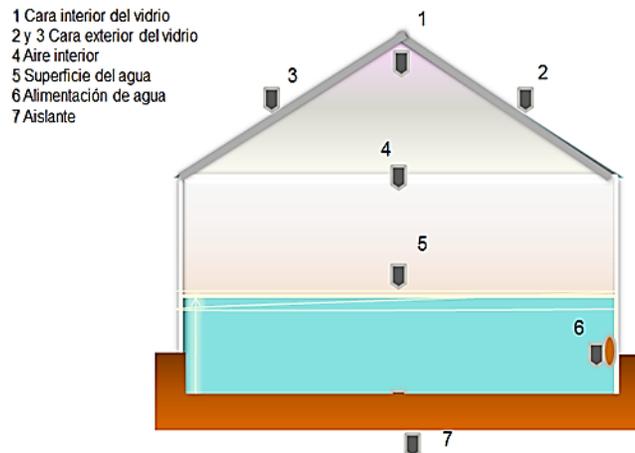


Figura 23: Ubicación de los termopares en el destilador

Los intervalos de temperaturas que miden los termopares tipo K es de cero a 1250°C y presenta mediciones confiables hasta 1200°C, proporciona alta resistencia a la corrosión y a la oxidación gracias a que los materiales con los que están fabricados son cromel y alumed.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

El calibre seleccionado es número 20 con un revestimiento de PVC/PVC (plástico) que ayuda a evitar la corrosión. Proporciona un error de  $\pm 2\%$  sobre la lectura arrojada, en un intervalo de temperatura de  $-110$  a  $285^{\circ}\text{C}$ . La ubicación de cada termopar se definió en función de las ecuaciones que se manejan en el modelo matemático para la cubierta de vidrio, absorbedor y aislante, mismas que se comentan a continuación:

- ◆ Para la cubierta de vidrio:

El calor transferido por evaporación entre la superficie del agua en la charola y la cubierta (q<sub>ev</sub>) está basado en las presiones de vapor del agua que a su vez está directamente relacionado con la temperatura, por lo tanto, se necesita sensores tanto sumergidos en el agua como en el área de la cubierta cerca de la cúspide. Para tener mayor confiabilidad, dentro del destilador se colocó una pequeña red de alambre de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro sobre la que descansan nueve sensores repartidos a todo lo largo del centro de la caseta y uno más en la cúspide interna del mismo.

En lo referente a la temperatura del agua, es suficiente con colocar un sensor en el centro de la charola, flotando en el agua ya que la película de agua es tan delgada (1.5 cm) que se considera que no hay estratificación.

Para el calor transferido por radiación del agua hacia la cubierta de vidrio se necesita conocer las temperaturas del agua y la caseta, para lo que se tienen considerados dos sensores respectivamente.

El calor transferido por convección entre el absorbedor y la cubierta, así como el calor perdido por la cubierta hacia la atmósfera por radiación, están en función de la temperatura del agua y la caseta, por lo que los sensores descritos anteriormente nos darán la información requerida.

Sobre una de las paredes rectangulares de la caseta se ubicaron dos sensores más que proporcionan las temperaturas externa e interna del vidrio.

Un sensor adicional fue ubicado colgando de la parte superior interna de la caseta, con el fin de proporcionar mediciones más confiables en el área de condensación.

La transferencia de calor por convección entre la caseta y el cielo está considerada con la temperatura medida por un piranómetro externo.

- ◆ Para la ecuación del balance de energía para el absorbedor se requieren los siguientes sensores:



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

En el caso de la transferencia de calor por convección entre el agua y el absorbedor se necesita un sensor ubicado en la base interna media del absorbedor. De igual forma se necesita un sensor para proporcionar la temperatura del agua, misma que ya está considerado en los puntos anteriores.

La pérdida de calor del absorbedor hacia el aislante por conducción, están dados por:

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \quad 14$$

Por lo tanto, se necesitan dos sensores más para la temperatura del aislante ( $T_{\text{aisl}}$ ), mismos que estarán ubicados en una pared lateral externa del aislante y en la base externa de éste.

Un sensor adicional fue colocado en la superficie del agua, sin llegar a tocarla, esto con el fin de monitorear la temperatura de la superficie del agua a destilar.

En el caso de la ecuación que calcula el calor por conducción ganado por el aislante del absorbedor, estas mediciones se obtienen de los sensores ubicados en las caras externas del aislante, por lo tanto, ya están contemplados.

Para la pérdida de calor por el aislante no se requieren sensores adicionales, ya que la medición de la temperatura del aislante ya está considerada en los sensores anteriores y la temperatura del aire, es proporcionada por la Estación Meteorológica del IER.

En el caso del coeficiente de transferencia de calor total, este tampoco requiere sensores adicionales, ya que es calculado considerando el coeficiente de transferencia de calor total mediante la ecuación de conducción de Fourier:

$$U_{\text{aisl}} = (L_{\text{aisl}}/K_{\text{aisl}} + 1/h_{\text{aisl}})^{-1} \quad 15$$

### 2.6 CALIBRACIÓN DE SENSORES.

Los sensores que se utilizaron son termopares tipo K los cuales, tienen una curva de calibración proporcionada por el fabricante y no requieren de una calibración adicional, y al estar acoplados al data logger seleccionado, este realiza la correlación correspondiente entre tensión y temperatura a través de un programa que integra el fabricante al sistema de adquisición de datos.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 2.7 ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE.

Para la distribución y control de la velocidad del aire se colocó arriba de la cubierta transparente de uno de los destiladores una placa de acrílico transparente de 3 mm de espesor siguiendo el contorno exterior del destilador para que se formara un túnel por donde se inyecta el viento para producir la convección forzada, el efecto de colocar esta doble cubierta se consideró en el análisis de eficiencia de dicho destilador. Para alcanzar las velocidades requeridas se utilizaron tres ventiladores de dimensiones 119 x 119 x 38 mm y un peso de 390 g, con una alimentación de 0.94 A y un voltaje variable desde 0 a 60 V DC. En la Figura 24 se muestra un diagrama esquemático de la ubicación de dichos ventiladores colocados en el túnel de viento.

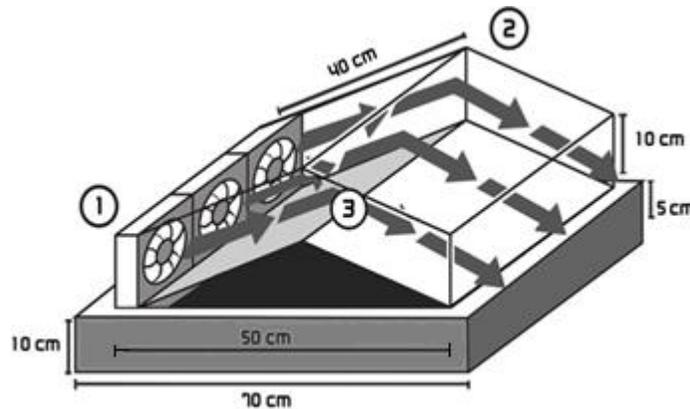


Figura 24: Diagrama esquemático de la ubicación de los ventiladores ubicados en el túnel de viento.

Para la alimentación eléctrica de los ventiladores se utilizó una fuente regulada de DC de 2 x 30 V, triple salida marca Matrix, modelo MPS-3005L-3. La exactitud de tensión es de  $\pm 0.25V$ , error de rastreo  $< 0.5\% + 10 \text{ mA}$ , regulación de línea:  $< 0.01\% + 3$ , regulación de carga:  $< 0.01\% + 3$ . En las pantallas digitales se registra el voltaje y el amperaje consumido por los ventiladores. La Figura 25, presenta el detalle de la interconexión en paralelo.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

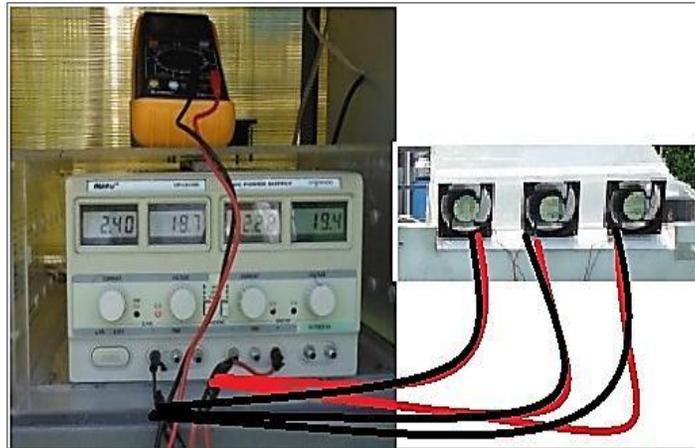


Figura 25: Vista del detalle de la interconexión en paralelo de los ventiladores

Para el registro de las velocidades del aire, se utilizaron dos sensores uno integrado en una estación meteorológica portátil marca Skywatch Owners Modelo Geos 11, con una precisión de  $\pm 4\%$  y un termo-anemómetro marca Cole Palmer, modelo EW-10323-11 con una resolución de 0.1 m/s. El primero debido a sus dimensiones se utilizó para medir las velocidades más cercanas a la superficie de la cubierta (vidrio) y el segundo para medir la distribución de velocidades en el túnel de viento. Una fotografía del destilador con el túnel de viento se muestra en la Figura 26 en donde además se observa la bureta de nivel encargada de mantener siempre la misma columna de agua en ambos destiladores.



Figura 26: Vista de ventiladores y túnel de viento ubicados en el destilador con convección forzada.

La Figura 27 muestra las curvas de velocidad de viento para cada ventilador medida a 10 cm de éste en función de la tensión eléctrica aplicada al ventilador.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Como se puede observar la velocidad se incrementa gradualmente conforme se incrementa la tensión hasta llegar a un valor de saturación que debe de corresponder a la tensión nominal de trabajo del ventilador que en este caso es de 45 V proporcionando una corriente de aire de hasta 10.5 m/s.

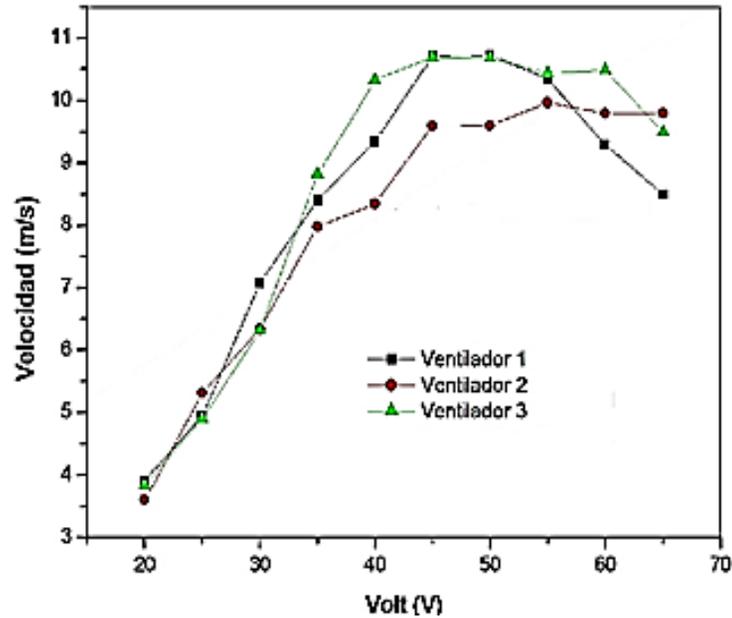


Figura 27: Curvas características velocidad-voltaje para cada uno de los ventiladores utilizados.

Para conocer el comportamiento de la velocidad del viento proporcionada por los ventiladores dentro del túnel en el destilador se seleccionaron puntos de medición de dicha variable, los que se muestran en la Figura 28. Se determinó un promedio de velocidades dentro del túnel para cuatro diferentes tensiones aplicadas seleccionándose las velocidades de 2.5, 3.5, 5.5 y 6.9 m/s como aquellas con las cuales se realiza el estudio.

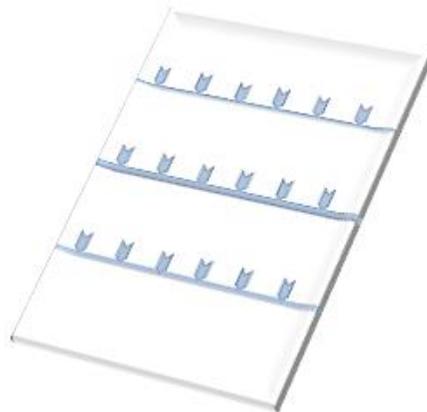


Figura 28: Diferentes puntos en los que se tomaron velocidades en cada una de las caras de la caseta.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 2.8 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El recipiente de distribución de agua salobre se abastece durante la noche para asegurar el suministro de agua a cada destilador para su operación durante el día, manteniendo constante el nivel en cada uno de ellos a 2 cm mediante la bureta de nivel constante. El DSDC se expone a la radiación solar y se registran las variaciones de las temperaturas en el interior y exterior del destilador, del agua salobre, del ambiente y la radiación solar y la velocidad seleccionada al interior del túnel de viento. La cantidad de agua destilada se mide mediante el registro del peso de ésta en la balanza de precisión antes mencionada. Los ciclos de medición son tomados a las 20:00 horas de cada día, al inicio, se fija la velocidad promedio del aire y las variaciones de los diferentes parámetros se registran por medio de un sistema automático de adquisición de datos. Se da una limpieza previa a las cubiertas para evitar que algunas partículas del ambiente se depositen y reduzcan su transmitancia.

En la Figura 29, se presenta un diagrama general del equipo experimental, en donde se muestran los DSDC, así como los sistemas de registro de las temperaturas, masa de agua destilada y de la temperatura ambiente, velocidad del aire, humedad relativa, etc., así como irradiancia, registrados por la estación meteorológica del IER.

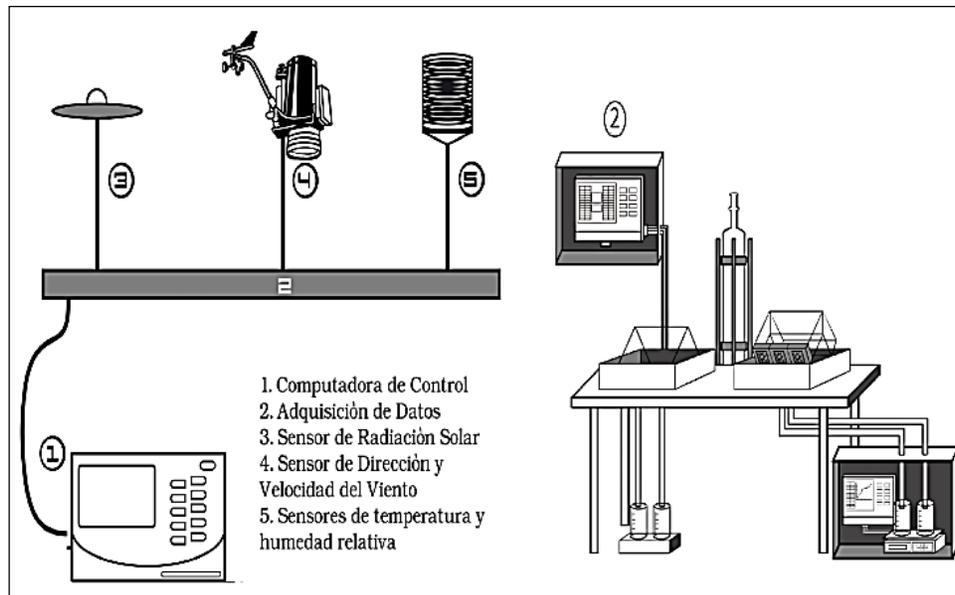


Figura 29: Diagrama general del equipo experimental y los sistemas de registro de datos en la estación meteorológica y solarímetro del IER.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 2.9 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

Debido a que se puede afirmar que el análisis del estado del arte contribuyó a determinar las características geométricas del destilador, determinando los componentes básicos, las dimensiones, los ángulos, etc., resultó muy importante corroborar dichas características de diseño mediante un análisis de todos estos componentes con la finalidad de llegar al diseño óptimo del destilador solar:

- ◆ Se analizó la reflectancia, transmitancia y absortancia de diversos materiales con la finalidad de seleccionar el material óptimo para la construcción de la envolvente del destilador solar.
- ◆ Se definió el modelo geométrico y materiales para la construcción de un destilador solar que sirva como patrón de estudio y comparación de la innovación sugerida en la hipótesis.
- ◆ Se analizaron diferentes materiales que pudieran ser candidatos para utilizar como aislantes térmicos determinándose utilizar espuma de poliuretano y se determinó el espesor ideal en función al aislamiento deseado.
- ◆ Se estudiaron diferentes materiales a emplear como absorbedor y se determinó utilizar lámina de cobre.
- ◆ Se determinaron los parámetros termo-hidrodinámicos involucrados en el funcionamiento del destilador y por consiguiente, involucrados en el modelo matemático.
- ◆ Se concluyó la instrumentación del destilador.
- ◆ Se definió el equipo e instrumentos de medición a utilizar para llevar a cabo la experimentación.
- ◆ Se definieron las características de los ventiladores a utilizar y la posición de éstos en el destilador solar.
- ◆ Se determinó el procedimiento experimental que se llevaría a cabo durante el período que abarcaría el doctorado.



## CAPÍTULO TERCERO. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Es conocido que los parámetros ambientales tales como temperatura, velocidad de aire, radiación solar e inclusive, la humedad relativa, pueden ser factores determinantes en el desempeño térmico de un destilador. Asimismo, también es importante identificar si la calidad del agua en términos de concentración de sales puede ser un factor determinante en la capacidad de producción. En este capítulo se presenta un estudio comparativo sobre la capacidad de producción de agua destilada en los dos destiladores, sin convección forzada, uno usando agua potable y el otro usando agua de mar, con el propósito de analizar si la salinidad del agua es un factor determinante en la capacidad de producción de agua destilada en los destiladores de doble caseta sujetos a estudio.

### 3.2 PREPARACIÓN DE AGUA SALINA CALIDAD AGUA DE MAR.

Es conocido que el agua de mar está compuesta por un conjunto de sales cuya concentración ha sido analizada por diferentes investigadores y laboratorios. Las concentraciones aceptadas para los compuestos tales como cloruro de sodio, cloruro de magnesio, cloruro de calcio y cloruro de potasio así como el sulfato neutro de sodio se muestran en la tabla 6 (Castañeda Julián, 2000). Tomando en consideración dicha información se preparó en el laboratorio una solución acuosa salina, disolviendo en un litro de agua destilada, la cantidad en gramos de los compuestos considerados en la tabla 6. A esta solución acuosa salina, con las concentraciones anteriores, se le llamó "agua de mar". Dicha agua salina se usó para llevar a cabo el análisis comparativo de producción de agua destilada en los destiladores.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Tabla 6: Componentes y cantidades de compuestos de agua preparada en laboratorio.

### **Cantidades de compuestos para la preparación de agua de mar en laboratorio**

<b>Compuesto (gr)</b>	<b>Cantidad para 1 l de agua de mar</b>
Cloruro de sodio	24
Cloruro de magnesio	5
Sulfato neutro de sodio	4
Cloruro de calcio	0.10
Cloruro de potasio	0.70

### *3.3 TEMPERATURAS EN LOS DESTILADORES.*

Cada destilador fue instrumentado de la manera descrita en el capítulo 2, y en la charola correspondiente, se vertió agua potable para uno de los destiladores, y el "agua de mar" para el otro destilador. La columna de agua en la charola de los destiladores fue de 0.02 m, la cual se mantuvo invariable durante todo el experimento mediante el uso de una bureta de nivel constante que contenía el agua correspondiente para cada destilador. Con este dispositivo experimental se realizó el estudio del comportamiento térmico dentro del destilador bajo condiciones ambientales de la localidad que fueron medidas usando los instrumentos descritos en el capítulo anterior.

Las Figuras 30 y 31 muestran el comportamiento de las condiciones climatológicas correspondientes al día 8 de enero del 2011 como un ejemplo típico de lo que se puede esperar en la localidad en donde se hizo el estudio. Se observa una temperatura ambiente máxima de 27°C, la cual se alcanzó a las 15:00 horas, mientras que el valor mínimo fue alcanzado a las 7:00 am. El comportamiento de la irradiancia con respecto al tiempo de medición muestra un pico a las 13:00 horas con una magnitud de 700 W/m<sup>2</sup> con una irradiación de 4005 Wh/m<sup>2</sup>. En cuanto a la humedad relativa que se muestra en la Figura 31 se puede observar que el valor máximo es del 60% dato medido a las 06:00 horas, mientras que durante las horas sol, el promedio fue del 30%.



# ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

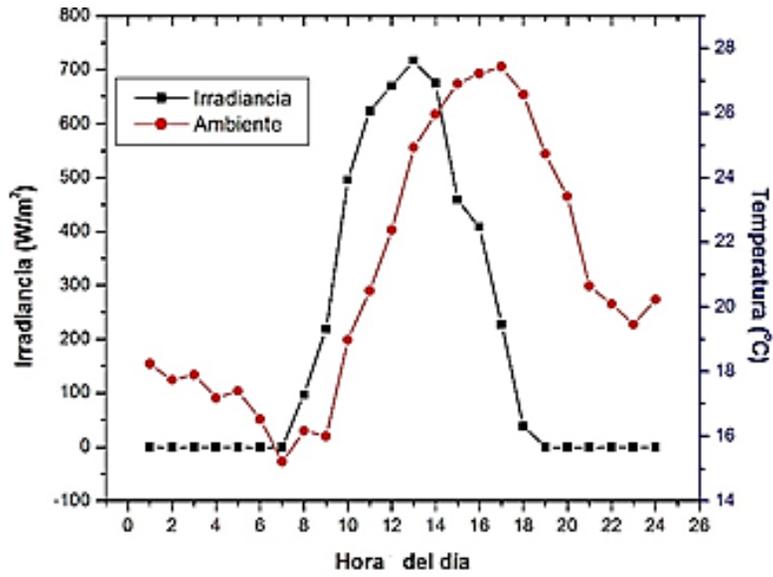


Figura 30: Irradiancia y temperatura ambiente medida por la estación solarimétrica del IER. La irradiación para este día (8 de enero) fue de 4.0 kWh/m<sup>2</sup>

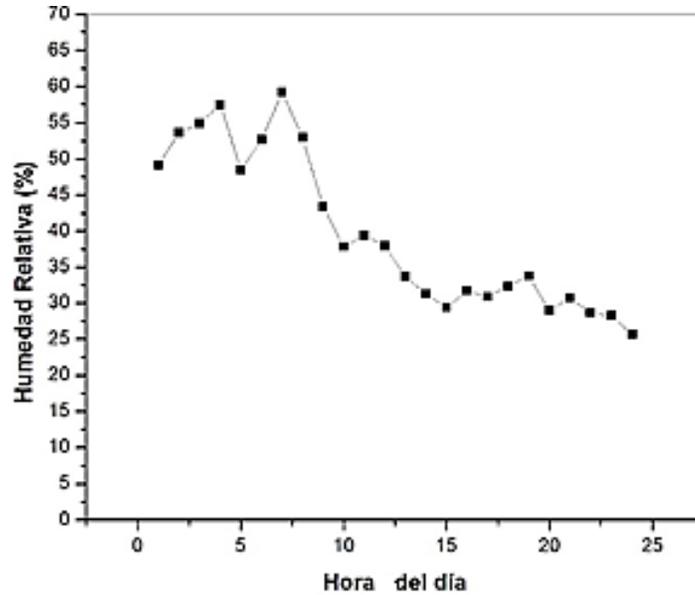


Figura 31: Humedad relativa registrada por la estación solarímetro del IER (8 de enero del 2011).



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 3.4 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL DESTILADOR CON AGUA DE MAR Y AGUA POTABLE.

En la Figura 32 se muestra el comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos de medición en el destilador para el caso en que la charola tiene agua potable. Las temperaturas máximas se obtienen alrededor de las 13:00. La temperatura máxima que se alcanza en el absorbedor es de 63°C, mientras que en la superficie del agua es de 59°C. Dentro de la caseta la temperatura que se alcanza es de 55°C, mientras que en el aislante es de 30°C.

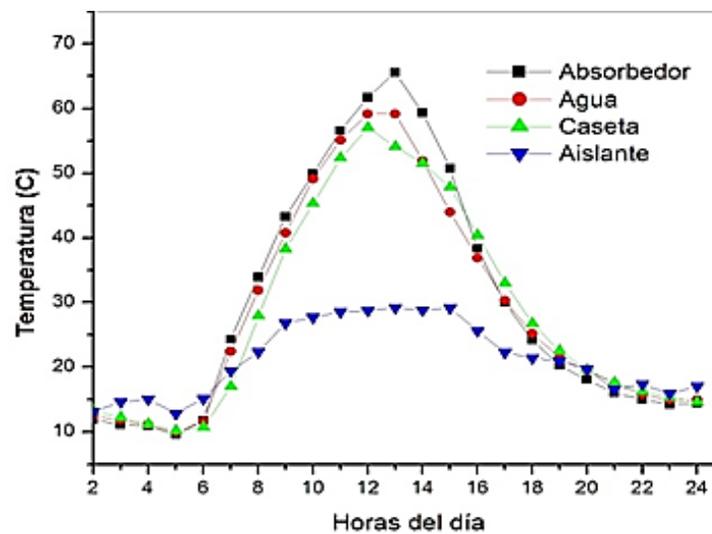


Figura 32: Temperaturas medidas dentro del destilador que contiene agua potable.

Se observó que a medida que las temperaturas en cada región dentro del destilador van en aumento, se incrementa la tasa de evaporación-condensación. Si no se estuviera manteniendo el nivel constante del agua dentro del destilador este hecho se vería todavía más marcado puesto que a medida que se destile más agua, bajaría su nivel dentro del absorbedor y por ende, con menor masa de agua por calentar y mayor irradiancia recibida, la tasa de destilación sería más rápida, secándose el destilador en un período de tiempo corto, fenómeno que es muy conocido en cualquier depósito de agua bajo condiciones naturales.

En la Figura 33 se muestra el comportamiento de la temperatura en los diferentes puntos de medición del destilador conteniendo "agua de mar". Los valores máximos de temperatura se obtienen alrededor de las 13:00 igual que en el caso anterior. La temperatura máxima en el absorbedor es de 62°C mientras que en la superficie del agua es de 57°C. Dentro de la caseta se alcanzan los 56°C, mientras que en el aislante la temperatura máxima es de



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

33°C, dentro del destilador que contiene agua preparada en laboratorio (8 de enero del 2011).

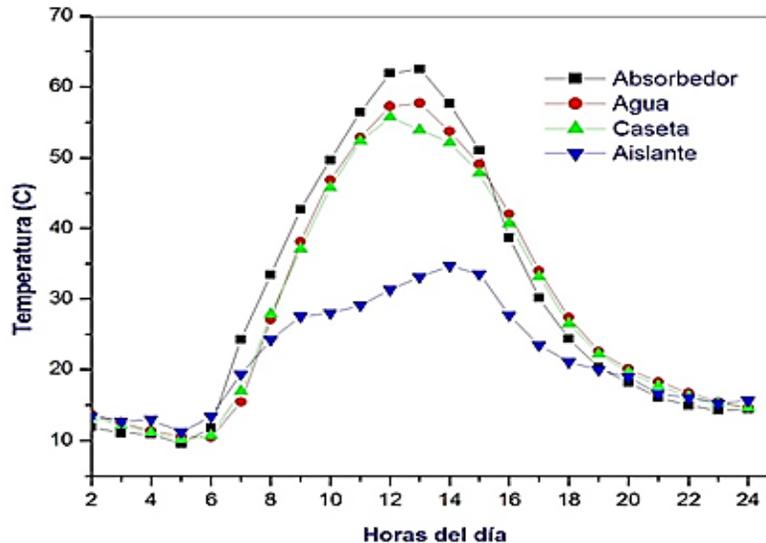


Figura 33: Comparativo de las temperaturas registradas

Se determinó que en ambos destiladores las temperaturas son prácticamente idénticas y en consecuencia el rendimiento en la producción de agua podría ser equivalente. Para determinar la aseveración anterior se analizó la producción de agua destilada para diferentes días, análisis que se presenta en la siguiente sección.

### 3.5 RENDIMIENTO DE LOS DESTILADORES.

Para cada uno de los destiladores se cuantificó el volumen de agua destilada por día. Dado que este proceso depende de la energía solar recibida en el captador entonces, para cada día de trabajo, se midió la irradiancia directa y la difusa de la localidad, se calculó la componente perpendicular al plano del absorbedor y se calculó la energía solar recibida en el sitio de medición para un captador horizontal. Con el dato anterior y tomando en consideración que cada destilador tiene un área de  $0.25 \text{ m}^2$ , se determinó la energía solar recibida en el absorbedor en cada destilador.

En la tabla 9 se observa la producción de agua destilada tanto de agua de mar como de agua potable así como la relación de ambas con respecto a la irradiación recibida en el sitio y la energía recibida en el absorbedor. La energía recibida en el captador se ha calculado con el valor de la irradiación corregido por un factor



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

0.814 debido a la atenuación que, en el caso de la cubierta de vidrio, es de 0.186.

Tabla 7: Resultados de producción de agua destilada en campo.

<b>Producción vs Energía recibida en el captador</b>				
<b>Fecha</b>	Irradiación (kWh/m <sup>2</sup> )	Energía recibida en el captador (kWh)	Producción de agua*	
			Agua de mar (l)	Agua potable (l) (±0.001 Kg)
<b>30-dic</b>	4.19	0.853	0.55	0.57
<b>31-dic</b>	3.74	0.761	0.44	0.47
<b>01-ene</b>	3.62	0.737	0.43	0.47
<b>02-ene</b>	4.20	0.854	0.56	0.56
<b>03-ene</b>	4.20	0.856	0.55	0.59
<b>04-ene</b>	4.19	0.852	0.55	0.57
<b>05-ene</b>	4.20	0.854	0.56	0.58
<b>06-ene</b>	4.00	0.818	0.53	0.53
<b>07-ene</b>	4.19	0.852	0.5	0.52
<b>08-ene</b>	4.00	0.815	0.55	0.56
<b>09-ene</b>	4.05	0.823	0.52	0.57

\* Error del fabricante (±0.001 Kg)

Dado que el período de medición considerado fue de 11 días consecutivos y la irradiación no es una constante ya que depende de condiciones climatológicas, se decidió agrupar días con irradiaciones similares y se determinó una marca de clase, y para ésta, el valor promedio de agua destilada obtenida. La Figura 34 muestra la producción de agua obtenida en cada destilador en función de la energía solar recibida en el absorbedor, observándose un incremento gradual en la producción conforme la irradiación aumenta. La gráfica muestra que independientemente de la energía solar recibida, la producción de agua destilada no depende drásticamente de la concentración salina del agua a destilar. En consecuencia, esto nos permite decir que bajo las condiciones en las cuales se hizo el experimento la salinidad del agua no es un factor determinante en la producción de la misma.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

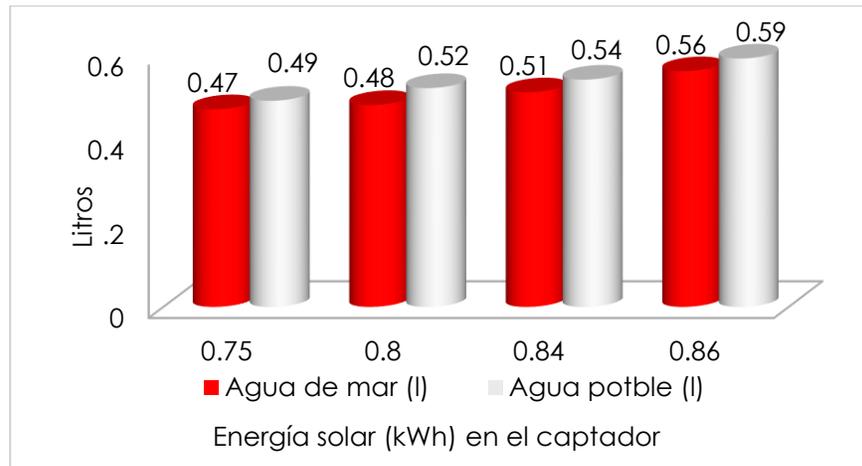


Figura 34: Producción de agua en función de la energía solar recibida en el captador.

Es importante notar que con estos destiladores, para un día típico en invierno, con un recurso solar de  $4.2 \text{ kWh/m}^2$ , la producción de agua tiende a tener un valor promedio de  $0.58 \text{ l}$ , mientras que para un recurso solar de  $3.6 \text{ kWh/m}^2$  es de  $0.47 \text{ l}$ . Estos valores están dentro de los intervalos reportados en la literatura (VI, XXXII, CI).

### 3.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

En este capítulo se presentaron tanto el comportamiento térmico como resultados experimentales de dos destiladores solares tipo caseta, uno conteniendo agua potable y otro conteniendo "agua de mar". Se analizó el comportamiento térmico de ambos destiladores durante el mes de enero (temporada invernal, con una temperatura ambiente promedio de  $25^\circ\text{C}$  durante las horas de mayor irradiancia) y se determinó que las temperaturas en los diferentes sitios de medición, en ambos destiladores, son similares. Se encontró que bajo las condiciones en las cuales se hizo el experimento la salinidad del agua no es un factor determinante en la producción de la misma. El resultado es que no hay diferencias significativas, por lo que se puede asumir que la operación no se ve influenciada por el tipo de agua a destilar.

Con un recurso solar típico de  $4.2 \text{ kWh/m}^2$  el destilador de caseta analizado es capaz de producir  $0.58 \text{ l/día}$  en el invierno.



## CAPÍTULO CUARTO. ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA

---

### *4.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO CUARTO.*

En esta sección se presentan las diferentes modificaciones que se llevaron a cabo en un destilador solar de doble caseta al incrementar la convección forzada con la finalidad de analizar la influencia del viento sobre la cubierta de vidrio en la obtención de agua del mismo.

Asimismo, se muestra el comportamiento térmico y obtención de agua en función de la irradiancia en cada caso estudiado. Al final del capítulo se presentan las conclusiones y discusión de los resultados encontrados.

### *4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA CONVECCIÓN FORZADA EN UN DESTILADOR SOLAR.*

La destilación del agua de mar es el resultado del acoplamiento de dos procesos simultáneos de evaporación-condensación. En un destilador tipo caseta, ambos procesos se realizan bajo condiciones de operación variable, debido al cambio en la cantidad de irradiancia solar incidente, temperatura, velocidad y dirección del viento; aunque también existen condiciones de operación controlables, como el diseño del destilador y la selección de materiales utilizados en su construcción. En esta investigación se puso especial cuidado en alcanzar la optimización de los procesos involucrados, específicamente, la condensación.

Se ha logrado definir un diseño del destilador que resulta eficiente y adecuado para los fines de operación, además de que se han seleccionado los materiales, que con base en sus características ópticas y térmicas, permiten lograr los objetivos deseados. La Figura 35 muestra una fotografía de los destiladores contruidos para los fines de éste trabajo.

El proceso de condensación en este tipo de destiladores es muy complejo, ya que el vapor producido interacciona con una superficie fría (cubierta transparente), con un determinado espesor, y con una temperatura que es función del intercambio de calor sensible entre el vapor producido y el aire ambiente. Esta temperatura interna de la cubierta deberá ser menor que el punto de rocío del vapor para que este condense, además la superficie interna de la cubierta deberá estar a una inclinación tal que permita su escurrimiento y



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

no retenga mucho líquido, de lo contrario este funcionara como una pantalla a la radiación solar.

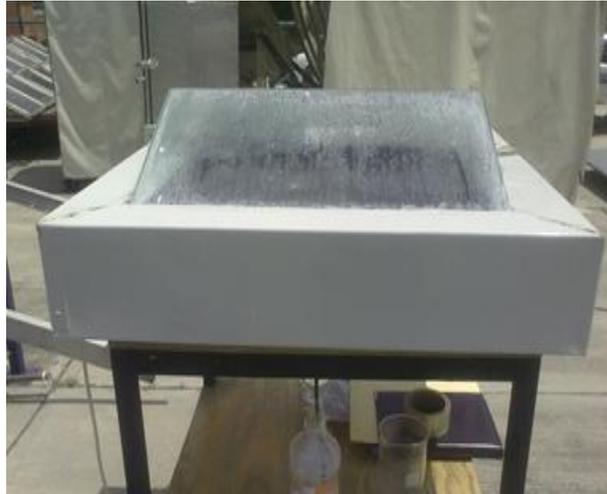


Figura 35: Destilador solar de agua de doble caída en operación trabajando con convección natural

En los destiladores de caseta, la cantidad de agua condensada depende de la velocidad y la temperatura del aire, las cuales varían a lo largo de su operación. Lo anterior dificulta cuantificar el peso específico o la influencia de cada uno de los parámetros de operación y relacionarlo con la capacidad de condensación, al final la eficiencia del destilador. Para mejorar la velocidad de condensación, el único parámetro controlable es la temperatura del condensador mismo que se puede "regular" con la velocidad del viento, velocidad del viento, sin embargo en un sistema abierto, esto presenta muchas dificultades.

Se plantearon cinco escenarios, que permiten encontrar una relación entre la velocidad del viento y el incremento o decremento de la productividad. Estos escenarios son: el destilador normal sin ningún aditamento (convección natural), el destilador funcionando con convección forzada con tres ventiladores fijos (son los ventiladores necesarios para cubrir la longitud total del frente del destilador) ubicados en paralelo y siguiendo el ángulo de inclinación de la caseta de vidrio y asegurando que proporcionen una velocidad de aire constante y homogénea canalizado por una cubierta de acrílico que permitan guiar el flujo de aire, y finalmente, el destilador únicamente con las cubiertas transparentes. Un escenario adicional consistió en la eliminación de la caseta de acrílico pero manteniendo los ventiladores y finalmente se hizo una experimentación más extrayendo aire de la caseta de vidrio. La comparación de la productividad de estos cinco escenarios permitió correlacionar la influencia de la velocidad y temperatura del aire.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Todos los experimentos fueron realizados al inicio del verano con una temperatura ambiente promedio de 31°C durante las horas de mayor irradiación.

### 4.2.1 DESTILADOR CON CONVECCIÓN NATURAL.

Para determinar el efecto de la convección forzada fue necesario determinar el desempeño térmico del destilador sin el dispositivo de la convección. La Figura 36 muestra las temperaturas obtenidas en el destilador con convección natural. Para efectos de este estudio experimental en cuanto a eficiencia y obtención de agua destilada se muestran los resultados obtenidos del 9 al 13 de junio; asimismo, para el análisis del comportamiento térmico del destilador se presenta un día soleado representativo como ejemplo (9 de junio).

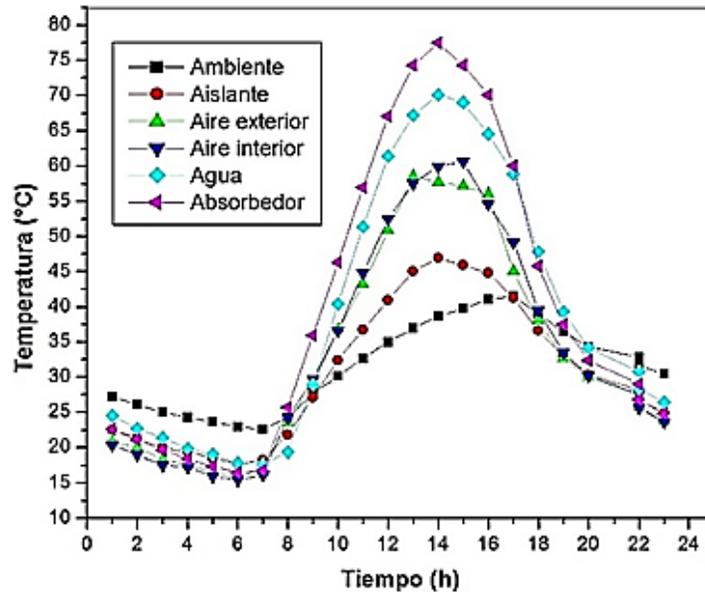


Figura 36: Temperaturas medidas dentro y fuera del destilador solar con convección natural.

Se observa que la temperatura entre el vidrio interior y exterior son prácticamente iguales, alcanzando un máximo de 58°C. La temperatura del absorbedor alcanza un máximo de 77°C, mientras que la temperatura de la superficie del agua llega hasta 69°C. Es importante observar que si se compara estos valores con los de la Figura 32, experimento realizado en invierno, se observa que en este caso las temperaturas en los puntos de medición (sensores) son más altas. Esto se puede explicar debido a una mayor radiación solar recibida en el captador derivado de una mejor orientación entre la superficie de la cubierta y la radiación directa; es decir es menor el ángulo cenital (entre la



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

superficie del vidrio y la superficie del absorbedor con el rayo directo) en verano que en invierno, en consecuencia hay menos reflexión y mayor radiación recibida en el captador.

La Figura 37 muestra el comportamiento típico de la irradiancia durante las horas del día y la velocidad del viento medidas por la estación solarimétrica. El valor máximo de la irradiancia fue de  $955 \text{ W/m}^2$ , mientras que la velocidad del aire osciló entre 0 y 1.0 m/s. Durante las horas sol la velocidad del viento tuvo un valor promedio de 0.5 m/s.

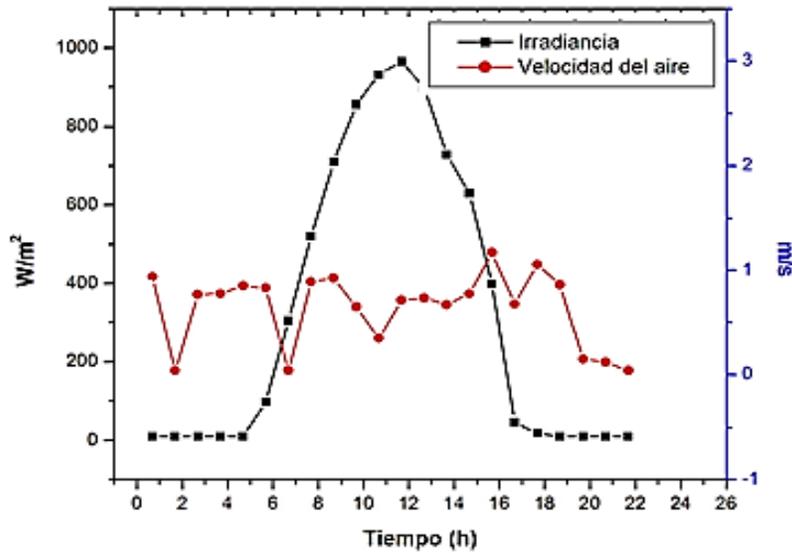


Figura 37: Irradiancia y velocidad de viento medidas en la estación solar ubicada en la plataforma del IER para el día 9 de junio. La irradiación fue de  $4.98 \text{ kWh/m}^2$ .

La Figura 38 muestra el agua destilada obtenida durante los 5 días consecutivos que se tomaron como referencia con respecto a la energía recibida en el captador (irradiación por área del captador por el factor 0.814 derivado de la atenuación de la cubierta de vidrio), con la finalidad de analizar el comportamiento del destilador con convección natural y tener un comparativo con otras propuestas presentadas en este trabajo.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

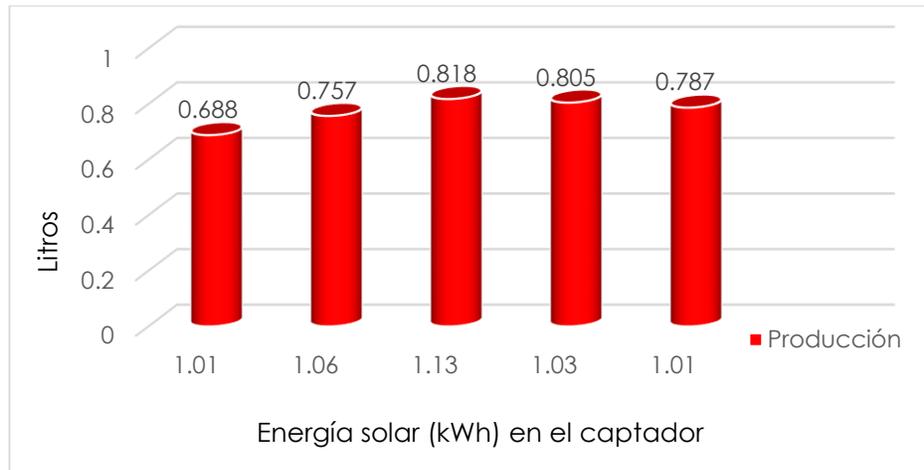


Figura 38: Agua destilada obtenida (litros) del destilador con convección natural en función de la energía recibida en el captador (Wh) del 9 al 13 de junio.

De esta gráfica se infiere que para una irradiación promedio de  $4.97 \text{ kWh/m}^2$ , el destilador presenta una producción promedio de  $0.74 \text{ l}$  y que el mayor volumen de agua destilada obtenido fue de  $0.82 \text{ litros}$  para una irradiación de  $5.5 \text{ kWh/m}^2$ . La intención de la gráfica anterior es apreciar en una sola imagen la relación que existe entre la energía solar recibida (irradiación por área de captación por el factor  $0.814$  debido a la atenuación de la cubierta de vidrio) y la obtención de agua destilada en litros. Obviamente la productividad o rendimiento del destilador también está en función de las características del destilador como son la geometría y propiedades de los materiales; de tal manera que el concepto de eficiencia de los procesos evaporación-condensación se vuelve una relación válida para comparar los diferentes escenarios analizados en este trabajo.

En la gráfica anterior cada segmento corresponde a cada día de mediciones del 9 al 13 de junio respectivamente.

### 4.2.2 DESTILADOR CON CONVECCIÓN NATURAL Y CON CUBIERTA DE ACRÍLICO.

Es importante revisar cual es el impacto de colocar una cubierta de acrílico en cuanto a la pérdida de irradiancia y energía recibida por el destilador con la finalidad de asegurar la magnitud que se tiene con la obstrucción de la luz solar incidente. En la Figura 39 se observa el perfil de temperaturas para el día 8 de julio con el objeto de analizar el efecto de la cubierta de acrílico en el destilador con convección natural.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

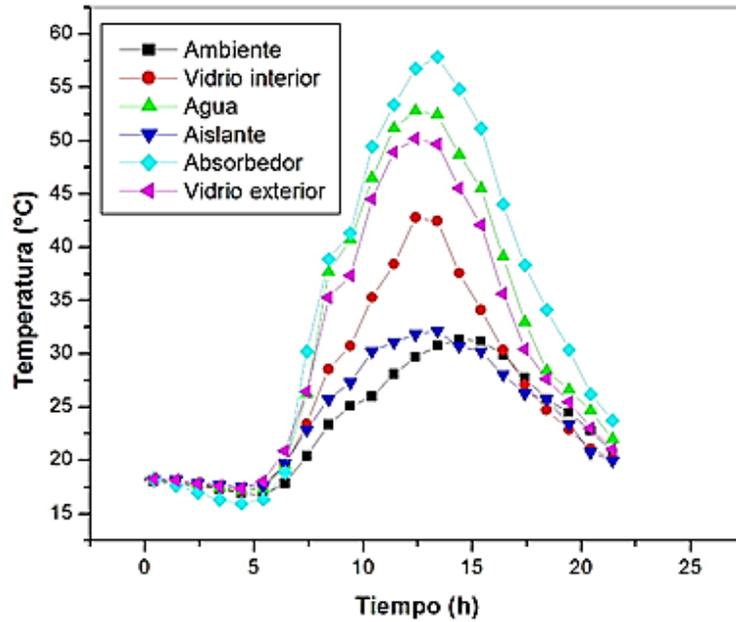


Figura 39: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección natural y con cubierta de acrílico, el día 8 de julio.

Para el caso de las temperaturas se puede observar que se llega a una temperatura máxima en el absorbedor aproximadamente de 60°C, con una irradiación de 4.5 kWh/m<sup>2</sup>, valor obtenido por integración de la gráfica de la irradiación mostrada en la Figura 40.

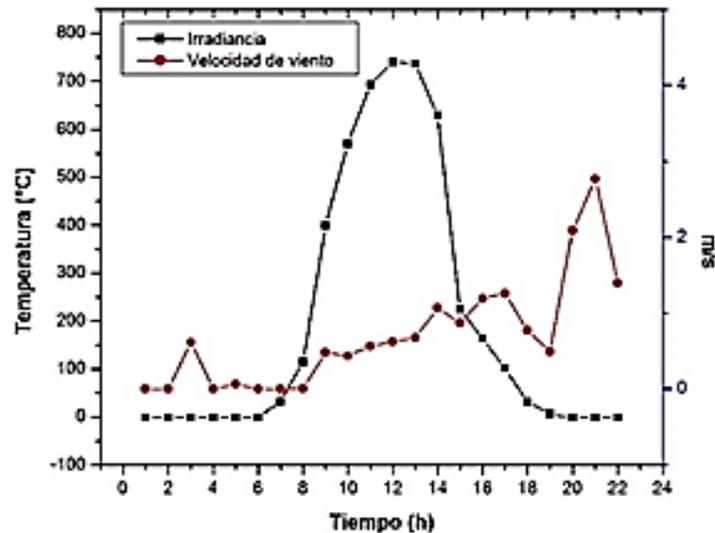


Figura 40: Irradiancia y velocidad del viento obtenidas en la estación meteorológica el día 8 de julio.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

La Figura 41 muestra la obtención de agua destilada de los días comprendidos desde el 8 al 12 de julio. Se observa que la obtención de agua destilada baja considerablemente debido a que el porcentaje de irradiancia que llega al absorbedor y calienta el agua es menor por la obstrucción de este haz de luz debido a la doble cubierta: acrílico más vidrio, ambos con un espesor de 3 mm. El factor de corrección debido a la atenuación de la cubierta de vidrio más la cubierta de acrílico es de 0.66. Se concluye que la afectación de tener una doble cubierta baja el rendimiento del destilador en aproximadamente un 34%.

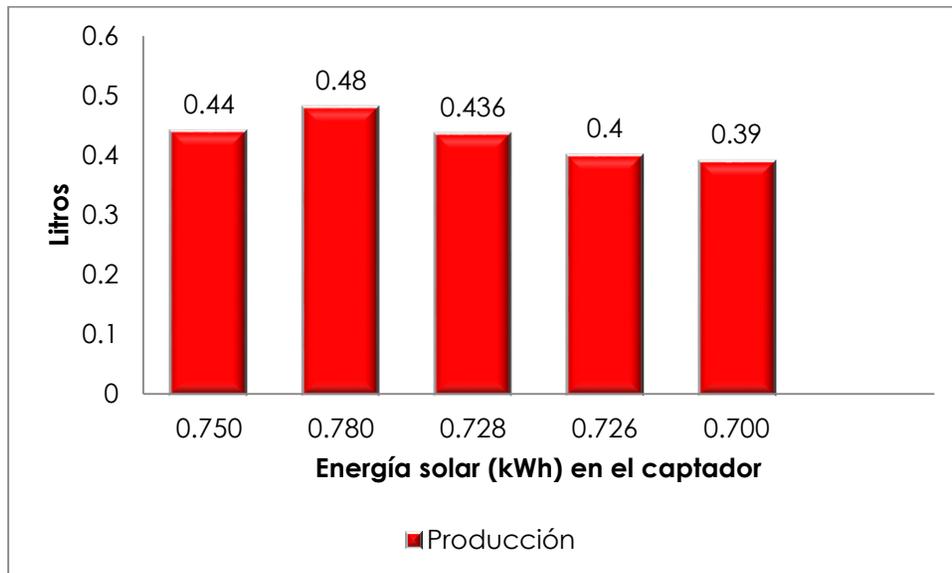


Figura 41: Obtención de agua destilada (l) del 8 al 12 de julio en función de la energía solar recibida (Wh) en el captador.

El mayor volumen de agua destilada obtenido fue de 0.48 litros para una energía solar recibida en el captador de 0.78 kWh que corresponde a un recurso solar de 4.7 kWh/m<sup>2</sup>.

### 4.2.3 DESTILADOR CON CONVECCIÓN FORZADA, VENTILADORES EN SERIE Y DOBLE CASETA.

Para incrementar el fenómeno de convección sobre las cubiertas de vidrio del destilador de doble caseta (DSDC) se colocó, sobre dichas cubiertas, una hoja de acrílico de 3.0 mm de espesor con una transmisión óptica en el visible del 80.7% para crear un "túnel de viento". Se colocaron tres ventiladores en serie de tal manera que se tuvo la suficiente precaución de que la velocidad del aire inyectado por los ventiladores fuera uniforme en toda la superficie de la cubierta.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Al enviar una corriente de aire artificial sobre una cubierta caliente, se incrementa el fenómeno de convección de calor; y bajo estas condiciones, se establece el fenómeno al que llamare "convección forzada".

El estudio bajo estas condiciones se realizó durante el periodo del 2 de julio al 16 de septiembre del 2012, bajo las condiciones climáticas del lugar, en un intervalo de temperaturas promedio diarias ambientes entre 33°C y 37°C y con un promedio de irradiación solar promedio diaria de 5.1 kWh/m<sup>2</sup>. El dominio de velocidades en el túnel de viento se estableció entre 2.5 y 10 m/s.

Las Figuras 42, 43, 44 y 45 presentan las evoluciones de las temperaturas en las diferentes zonas del destilador, a diferentes velocidades promedio de viento (2.5, 3.5, 5.5 y 6.9 m/s respectivamente), en los diferentes días de prueba. En estas gráficas se puede observar el comportamiento de la temperatura de la cubierta y la temperatura al interior del destilador al aumentar la velocidad del aire.

Para una velocidad promedio de 2.5 m/s (figura 42), y las horas del día de mayor irradiancia (de las 9:00 a las 15:00 hrs), la temperatura del absorbedor alcanzó 69°C, mientras que el agua y el aire interior presentaron temperaturas de 65°C y 63°C respectivamente; se observa que la temperatura del vidrio exterior alcanza un máximo de 51°C mientras que la temperatura ambiente, alcanza valores máximos de 35°C.

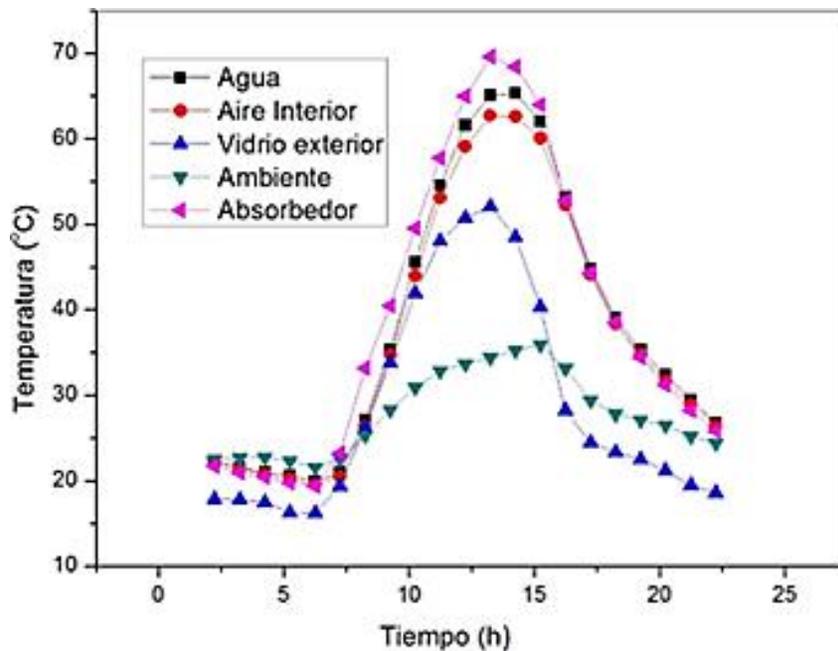


Figura 42: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada de aire a una velocidad promedio de 2.5 m/s, el día 24 de julio del 2012.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Para velocidades promedio de 3.5 y 5.5 m/s (figuras 43 y 44, respectivamente), para el mismo intervalo de tiempo que en el caso anterior, la temperatura del vidrio exterior se mantiene por encima de la temperatura del aire ambiente; es decir el vidrio exterior está más caliente que el ambiente. Las temperaturas más altas correspondientes al absorbedor y al agua, alcanzaron valores entre 55 y 52°C, respectivamente. Sin embargo, al aumentar la velocidad hasta 6.9 m/s, se encontró que la temperatura ambiente es mayor que la del vidrio exterior (ver Figura 45); es decir, el vidrio se enfría, infiriendo que en estas condiciones se tendrá menor condensación y en consecuencia una disminución en la producción de agua.

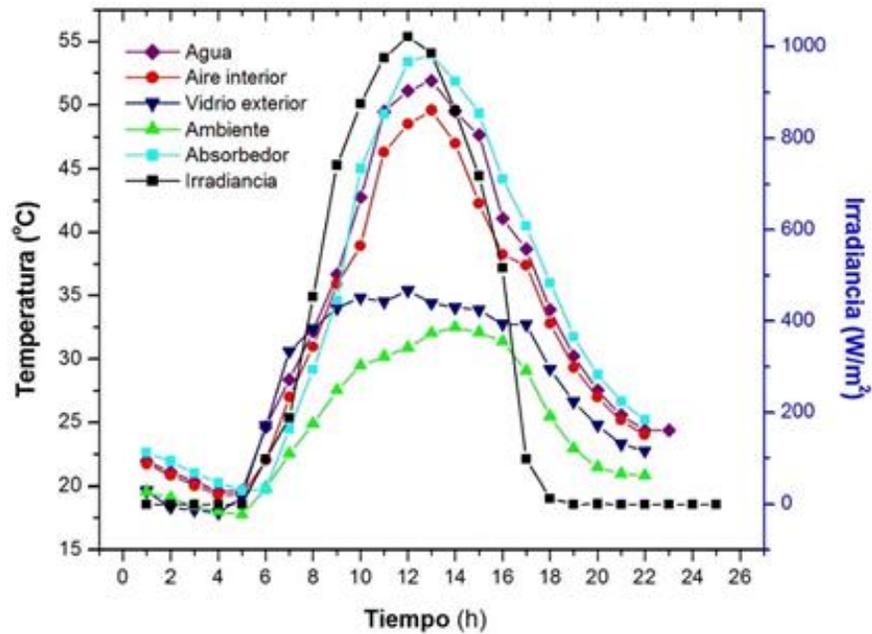


Figura 43: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada a una velocidad promedio de 3.5 m/s, el día 2 de julio del 2012.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

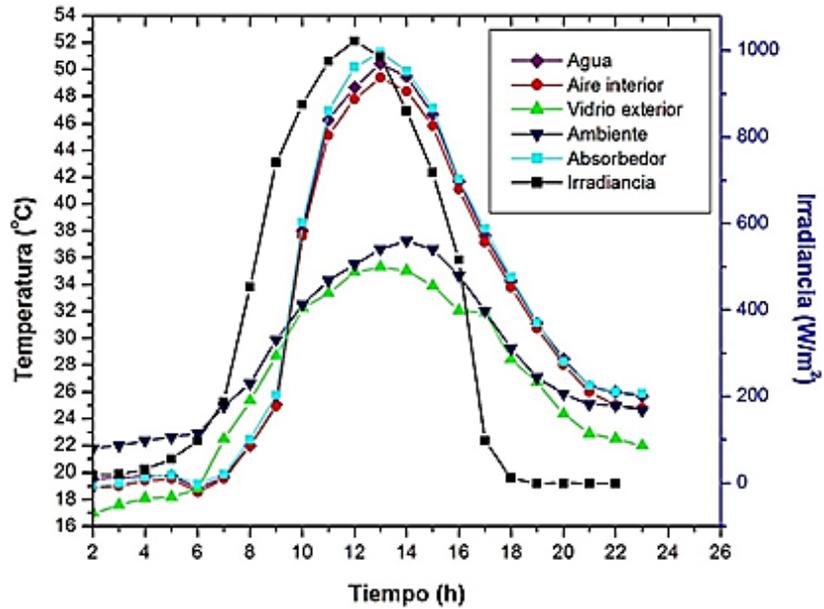


Figura 44: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada de aire a una velocidad promedio de 5.5 m/s, el día 2 de agosto del 2012.

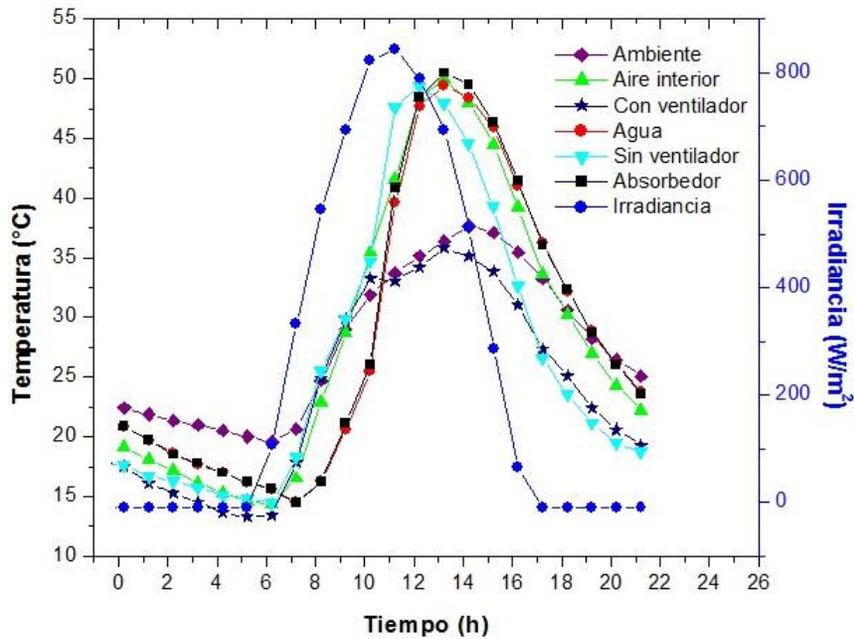


Figura 45: Evolución de las temperaturas en el destilador con convección forzada de aire a una velocidad promedio de 6.9 m/s, el día 13 de septiembre del 2012.

Los resultados de la obtención de agua destilada con las condiciones anteriores se muestran en la tabla 8. En este experimento, la irradiancia que recibe el



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

absorbedor es atenuada por la cubierta de acrílico y la cubierta de vidrio, teniéndose una transmisión global de 0.66.

Tabla 8: Concentrado de datos obtenidos en el destilador por convección forzada.

<i>Día De medición</i>	Velocidad promedio (m/s)	Irradiación promedio recibida (kWh/m <sup>2</sup> )	Energía solar recibida en el captador (kWh)	Obtención de agua destilada (l/día)*
<b>24 de julio</b>	2.5	5.22	0.860	0.61
<b>2 de julio</b>	3.5	5.18	0.854	0.75
<b>2 de agosto</b>	5.5	4.91	0.810	0.76
<b>13 de septiembre</b>	6.9	5.10	0.842	0.62

\* Error especificado por el fabricante (Básculas Tor-rey):  $\pm 0.05$  Kg

Dado que durante los días en los que se realizaron los experimentos el recurso solar medido en la estación meteorológica fue de 5.1 kWh/m<sup>2</sup>, la variación en la obtención de agua destilada solamente será asignado a la convección forzada producida por el incremento en la velocidad de aire. Bajo estas condiciones se obtuvo que la temperatura del absorbedor, del agua y del aire interior disminuyen desde 69°C, 65°C y 63°C, hasta 50°C, 49°C y 49°C, respectivamente. En general se determinó que a medida que se incrementa la velocidad del aire sobre la cubierta exterior, se incrementa el fenómeno de convección disminuyendo la temperatura de la cubierta de vidrio desde 51°C ( $v=2.5$  m/s) hasta llegar a un valor igual a la temperatura ambiente ( $v=5.5$  m/s). En este intervalo se incrementa el agua destilada obtenida derivado de un aumento en la tasa de condensación. Esto trae como consecuencia que la obtención de agua destilada se incrementa hasta llegar a un valor máximo, el cual, se obtiene cuando la temperatura de la cubierta exterior es casi igual a la del ambiente, y a partir de ahí, la producción disminuye derivado de que la cubierta de vidrio está más fría que el ambiente.

Como un resultado importante a considerar y que se infiere de comparar los datos del día 2 de agosto con los del 24 de julio mostrados en la tabla 8, es que la convección forzada usando una velocidad de aire de 5.5 m/s maximiza la producción de agua aunque para ese día, la energía solar recibida en el captador fue menor que para el día 24 de julio. Por otra parte, si se compara con los datos mostrados en la figura 34 que indican que para una energía solar recibida en el captador de 0.80 kWh se produjo 0.52 l, la convección forzada si beneficia la producción de agua en los destiladores analizados.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 4.2.4 DESTILADOR CON CONVECCIÓN FORZADA, VENTILADORES EN SERIE Y SIN TÚNEL DE VIENTO.



Figura 46: Destilador solar con convección forzada y sin la cubierta de acrílico.

Se llevaron a cabo mediciones con la implementación de la convección forzada pero sin el túnel de viento, con la intención de comparar la acción real del viento sobre el destilador solar; la velocidad a la que trabajaron los ventiladores en estas condiciones fue de 5.5 m/s debido a que a esta velocidad se obtuvo la mayor producción de agua destilada en los escenarios anteriores.

En la Figura 47 se presenta el comportamiento térmico del destilador solar sin túnel de viento y con convección forzada, mismo que operó del 30 de enero al 15 de febrero del 2013. Como ejemplo se presenta el día 6 de febrero en donde se muestra además la curva de irradiancia que se dio este mismo día, datos obtenidos de la estación meteorológica del IER.

En este experimento como se mencionó anteriormente, se está tratando de simular el comportamiento y los efectos de la velocidad del aire ambiental sobre el destilador, ya que el aire siempre llegará sobre una cara del vidrio o la otra en diferentes momentos durante un día. Como se puede ver en la gráfica de la figura 47, el vidrio sobre el cual incide la corriente de aire proveniente de los ventiladores está prácticamente a la misma temperatura del ambiente durante las horas de mayor irradiancia. Sin embargo, la otra cara de la cubierta del vidrio de la caseta, a la que no le llega el flujo de aire de los ventiladores, se encuentra a mayor temperatura que la otra cara con una temperatura casi igual el agua, el absorbedor y el aire interior, los cuales presentan una temperatura aproximada a 50°C.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

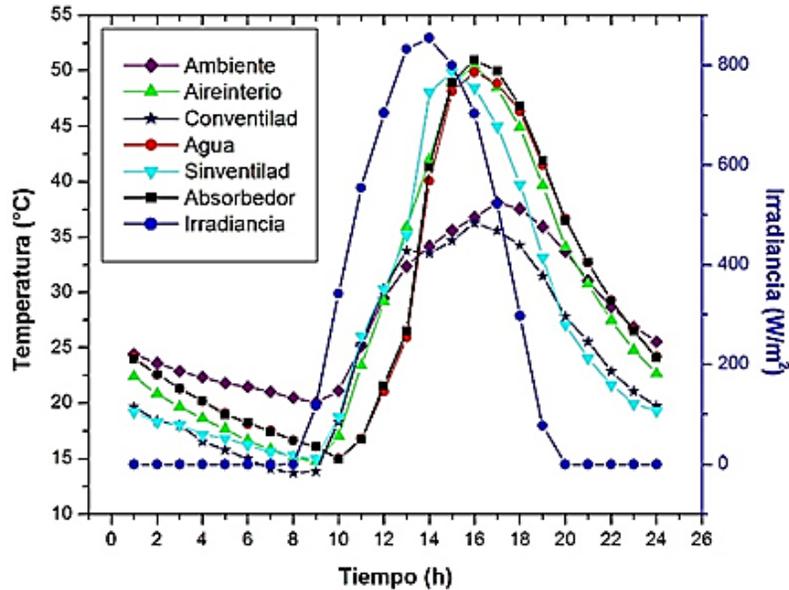


Figura 47: Comportamiento térmico del destilador con convección forzada y sin túnel de viento e irradiancia el día 6 de febrero del 2013.

Para este día típico que presentó una irradiación de  $4.01 \text{ kWh/m}^2$  (valor medido en la estación meteorológica), la obtención de agua destilada acumulada durante las 24 h del día se muestra en la figura 48. Los valores presentados presentan una incertidumbre de  $0.05\%$ , dato proporcionado por el fabricante de los equipos de medición (báscula y probeta graduada).



Figura 48: Obtención de agua destilada acumulada durante el día 6 de febrero del 2013.

En éste caso, el agua destilada obtenida fue de  $0.66 \text{ l}$  con una irradiación de  $4.01 \text{ kWh/m}^2$  (valor medido en la estación meteorológica), mientras que la



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

energía solar recibida en el captador fue de 0.816 Wh. Por comparación con los valores de la tabla 8, para una convección forzada con la misma velocidad de aire (5.5 m/s) y energía solar recibida en el captador con valores similares (0.816 Wh en éste caso y 0.81 en la tabla 8), la producción de agua es 13% menor a la que se obtiene cuando se confina el aire en la doble cubierta; sin embargo dicha producción (0.66 l) es 21% mayor que cuando no se tiene convección forzada (producción de 0.52 l para una energía solar recibida en el captador de 0.82 Wh, datos de la figura 34).

En resumen, cuando una cara del vidrio disminuye su temperatura considerablemente debido a la acción de la convección forzada, se presenta una reducción del volumen del destilado comparado con un destilador en donde se confina el aire en una doble cubierta.

### 4.3 EFICIENCIA EN EL DESTILADOR DE DOBLE CASETA.

En el análisis de la eficiencia de un destilador solar, intervienen parámetros geométricos y los relacionados con las propiedades de los materiales utilizados. En el caso de destiladores de doble cubierta, se han analizado teórica y experimental la influencia de estos parámetros sobre la eficiencia y sobre la productividad. La eficiencia del destilador ( $\eta$ ), se calcula mediante la expresión siguiente (Cooper P. I. 1972; Hermosillo V. Juan J, 1990):

$$\eta = \frac{(V * hfg)}{(P_{prom}) * H * 3600} \quad (3)$$

En la expresión anterior,  $V$  es el volumen de destilado (medido en litros, tomando en consideración que un litro de agua tiene una masa de 1 kg),  $hfg$  es el calor latente de vaporización con unidades de J/kg, este valor se obtuvo tomando en cuenta la temperatura máxima obtenida en el agua a destilar,  $P$  es la potencia de la radiación solar que incide sobre la superficie del absorbedor (dada por el producto de la irradiancia promedio del día medida en  $W/m^2$  con la superficie del captador medida en  $m^2$ ),  $H$  el tiempo total de exposición medido en horas (horas de sol). El producto  $P_x H_x 3600$  no es otra cosa que la Energía solar captada por el absorbedor expresada en Joule.

La Tabla 9 muestra la eficiencia del destilador de doble caseta con convección natural y con convección forzada para las situaciones típicas estudiadas.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Tabla 9: Concentrado de datos obtenidos en el destilador por convección forzada.

DIA	Velocidad (m/s)	Es (kWh)	V (litros)	hfg (MJ/kg)	$\eta$ (%)	Caso de estudio
02-ene	0.00	0.854	0.56	2.366	43.1	Convección natural, sin doble cubierta
09-ene	0.00	0.823	0.57	2.366	45.5	Convección natural, sin doble cubierta
09-jun	0.00	1.01	0.688	2.366	44.8	Convección natural, sin doble cubierta
09-jul	0.00	0.78	0.48	2.342	40.0	Convección natural, con doble cubierta
24-jul	2.50	0.86	0.61	2.354	46.4	Convección forzada, con doble cubierta
02-jul	3.50	0.854	0.75	2.378	58.0	Convección forzada, con doble cubierta
02-ago	5.50	0.81	0.76	2.39	62.3	Convección forzada, con doble cubierta
13-sep	6.90	0.842	0.62	2.39	48.9	Convección forzada, con doble cubierta
06-feb	5.50	0.816	0.66	2.39	53.7	Convección forzada, sin doble cubierta

De la Tabla 9 se puede inferir que los destiladores bajo estudio, tal y como fueron construidos, con sus caras orientadas en el eje Norte-Sur, sin convección forzada o con convección forzada, obtienen agua destilada con eficiencias mayores al 40%.

Para el caso de estudio en donde los destiladores no fueron sometidos a una convección forzada, es decir bajo un estado de convección natural, sin la cubierta adicional de acrílico, el cálculo de la eficiencia arroja un valor promedio de 44.3% para invierno (mes de enero), mientras que para verano (mes de junio) se presenta una eficiencia de 44.8%. Estos valores son prácticamente similares, y en consecuencia podemos decir que el destilador fabricado produce agua destilada con una eficiencia promedio del 44.5%. Este valor está dentro del intervalo de eficiencias reportadas para destiladores de caseta simple, los cuales, se ha estimado que presentan eficiencias teóricas máximas del 60%; mientras que, para dispositivos experimentales, raramente excede el 50% de eficiencia (Cooper P. I.).

Al colocar una cubierta de acrílico arriba de la cubierta de vidrio (doble cubierta) para favorecer el confinamiento de una corriente de aire y producir la convección forzada de ésta última, la eficiencia tal y como fue establecida por la relación (1), se reduce en 4 puntos porcentuales con respecto aquella obtenida para el destilador sin la cubierta de acrílico, obteniéndose un valor de 40% (renglón 4 de la Tabla 9). Este fenómeno es debido a que con la cubierta adicional de acrílico, se tienen una atenuación del 34% en la transmisión de la luz solar, lo que ocasiona menor energía solar captada en el absorbedor lo que ocasiona que el absorbedor y el agua tengan una temperatura menor a aquella que adquieren cuando no se tiene dicha cubierta. Esto trae como consecuencia que el calor latente del agua sea mayor, se tenga menor condensación y por ende menor volumen de agua destilada, y el efecto de ambos, reduce casi en un 10% la eficiencia de la destilación.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Cuando se induce una corriente de aire entre la cubierta de acrílico y la cubierta del vidrio para producir una convección forzada, se presenta lo siguiente:

- a) Al comparar la producción de agua para el caso en que la energía solar captada en el absorbedor sea la misma, convección natural y convección forzada (renglones 1 y 6), se tiene que la producción de agua se incrementa, es decir, la convección forzada beneficia la producción de agua destilada incrementando su volumen en un 33.9% (el exceso de volumen del renglón 6 respecto del volumen del renglón 1). Esto trae como consecuencia que la eficiencia del destilador se incrementa hasta el 58% para una velocidad de viento de 3.5 m/s. Esto confirma la hipótesis de partida de este trabajo experimental.
- b) Al incrementar la velocidad de aire desde 0 m/s hasta 6.9 m/s se obtiene que el volumen de agua destilada se incrementa hasta un valor máximo que se alcanza cuando la cubierta de vidrio tiene la misma temperatura que el ambiente, fenómeno que se da para una velocidad de aire de 5.5 m/s. Para velocidades mayores a éste valor, se obtuvo que la temperatura del vidrio fue menor que la temperatura del ambiente, disminuyendo el volumen de agua destilada.
- c) La máxima eficiencia se obtuvo al enfriar la cubierta de vidrio con un flujo de aire a una velocidad de 5.5 m/s. El volumen de agua obtenido fue de 0.76 l con una irradiación de 4.9 kWh/m<sup>2</sup>. La eficiencia obtenida para dichos valores es de 62.3% que es mayor que el estimado por Cooper P. I. para destiladores de caseta simple sin influencia de enfriamiento de la cubierta.
- d) Cuando no se confina el viento (caso del DSDC sin la cubierta de acrílico, renglón 9, de la Tabla 9), se observa un incremento en el volumen de agua de hasta un 15.8% comparado con aquel obtenido bajo convección natural (caso mostrado en el renglón 1, de la Tabla 9). Esta comparación demuestra que en el intervalo de velocidades estudiadas, que producen la convección forzada, el enfriamiento de la cubierta de vidrio incrementa la cantidad de agua destilada obtenida haciendo más eficiente el DSDC.

### 4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

En este capítulo se presentan los resultados del análisis del efecto convectivo de la velocidad del aire sobre la obtención de agua destilada en un sistema de destilación solar de doble caseta. El dominio de velocidad de aire se estableció desde 0 m/s hasta 6.9 m/s, observándose que un flujo de aire que incrementa el fenómeno de convección sobre la cubierta de vidrio, incrementa la eficiencia del destilador. Los resultados obtenidos demuestran que existe una correlación



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

entre la velocidad del viento sobre la cubierta de vidrio y la obtención de agua destilada. Se encontró que bajo condiciones de misma energía solar absorbida por el captador, la convección forzada producida en el intervalo de velocidades desde 2.5 m/s hasta 5.5 m/s favorece la cantidad de agua destilada obtenida e incrementa la eficiencia del destilador, obteniéndose un valor máximo del 62.3%.

En todos los casos estudiados y en el intervalo de velocidades hasta 5.5 m/s, el enfriamiento forzado de la cubierta exterior en el DSDC incrementa la obtención de agua destilada y la eficiencia del destilador.

Bajo condiciones de irradiación promedio diaria de 5.1 kWh/m<sup>2</sup>, el DSDC con un área de absorbedor de 0.25 m<sup>2</sup>, enfriado con una velocidad de viento de 5.5 m/s, es capaz de producir 0.76 l en el caso de confinamiento, ó 0.66 l en el caso de no confinamiento.

Los resultados obtenidos demuestran que la hipótesis de partida fue correcta.



## CAPÍTULO QUINTO. TRABAJO TEÓRICO

---

### 5.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO.

En esta sección se presenta una descripción de los fenómenos termohidrodinámicos que se presentan en un destilador solar de agua así como las ecuaciones y balances de energía que gobiernan el comportamiento de dicha fenomenología. Se analiza además, el método de solución empleado en el modelo transitorio y su validación con los resultados experimentales. Posteriormente se presenta un estudio de que se llevó a cabo en un modelo en 3D con la finalidad de observar el comportamiento térmico y vectores de velocidad que se presentan tanto en el exterior como en el interior del destilador durante su funcionamiento.

Finalmente se presentan conclusiones y discusión de los resultados obtenidos en este capítulo.

### 5.2 MODELO TRANSITORIO.

#### 5.2.1 INTRODUCCIÓN.

Un modelo matemático es la aplicación del conocimiento de una o varias áreas especializadas de la ciencia para resolver problemas prácticos y estas áreas prácticas son vitales para el desarrollo de la tecnología. Un modelo matemático emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o operaciones, para estudiar los comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Para desarrollar e implementar un modelo es necesario además, plantear el problema de manera que lo que se quiere representar esté suficientemente plasmado en la idealización, aunque también se debe buscar que sea lo bastante sencillo como para poder ser manipulado y estudiado.

En lo referente a la destilación solar, dentro de los aspectos que más interesan a los investigadores, es el desarrollo de modelos matemáticos que planteen ecuaciones que representen los fenómenos termodinámicos que se desarrollan en el proceso de destilación, especialmente con el fin de poder predecir cuál será el volumen de agua a destilar. La mayoría de estos modelos son comparados contra resultados experimentales llevados a cabo bajo ciertas condiciones constantes, de ubicación geográfica, época del año, etc. Aunque hay algunos



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

otros que intentan desarrollar perfeccionamientos a las ecuaciones actuales para poder tener mejores elementos de análisis.

En el presente trabajo doctoral se desarrollaron las ecuaciones de un modelo matemático que simulara el comportamiento térmico de un destilador solar de agua.

### 5.2.2 MODELO FÍSICO.

Como se mencionó anteriormente, en cuanto a la geometría de los destiladores, ambos constan de  $0.25 \text{ m}^2$  de área de captación, con dimensiones internas efectivas de  $0.5 \text{ m}$  por  $0.5 \text{ m}$ . Se utilizó una charola o vasija de cobre como absorbedor y se pintó en el fondo con pintura de color negro mate resistente a altas temperaturas con el propósito de proporcionarle alta absorción de radiación solar. La inclinación de la cubierta es de  $23^\circ$  y el material usado para la caseta (cubierta) es vidrio común de  $3 \text{ mm}$  de espesor.

Con la intención de evitar que el calor ganado por el absorbedor se pierda mediante los fenómenos de conducción y convección cada uno de los lados y base de ambos destiladores se recubrieron con espuma de poliuretano con un espesor de  $10 \text{ cm}$ .

El cobre tiene un alto valor de conductividad por lo que se utilizó esta propiedad para lograr transmitir a la masa de agua a destilar el calor necesario para calentarla y así lograr la evaporación de esta, además de que posee una excelente capacidad anticorrosiva. La conductividad de este material es de  $379 \text{ W/mK}$  a temperatura ambiente.

El vidrio tiene la propiedad de permitir la mayor transmitancia de radiación solar posible al interior del destilador, en este caso, el vidrio elegido posee una transmisión óptica en el visible de un  $81.4 \%$ .

En cuanto a las propiedades de espuma de poliuretano se puede mencionar que es el material aislante con el valor de conductividad más bajo:  $0.04 \text{ W/mK}$  comparado con otros materiales comparados para este fin, considerando además la competitividad de precio en el mercado y la facilidad de encontrarse a la venta, esta propiedad está en función de la densidad de este material. La capacidad de aislamiento del poliuretano es muy robusta frente a los efectos de envejecimiento a los que están expuestos habitualmente los aislamientos térmicos. Con el poliuretano es muy fácil el tratamiento de puentes térmicos, es resistente a efectos negativos por el paso del tiempo como el deterioro y deformidades que sufren otros aislantes. El poliuretano alcanza el máximo nivel de aislamiento con el mínimo espesor necesario.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Las suposiciones que se consideraron para el desarrollo del modelo matemático y las simulaciones son principalmente las siguientes: No existe un gradiente de temperaturas en el plano horizontal en el interior del destilador; el interior del destilador se encuentra herméticamente sellado por lo que no existen fugas de agua a destilar, vapor de agua y condensado; la temperatura de las superficies interior y exterior del vidrio (cubierta), en el caso de las simulaciones con convección natural son iguales debido al espesor del vidrio que es mínimo, mientras que en el caso de utilizar convección forzada, se va incrementando esta diferencia a medida que se incrementa la velocidad del aire a las diferentes velocidades analizadas, estas diferencias de temperatura se pueden observar en el modelo 3D; se considera que la película de condensado que permanentemente se encuentra adherida a la cara del vidrio interior es mínima; finalmente, es importante considerar que la distancia existente entre la estación solarimétrica del IER y la ubicación del equipo experimental, tanto en el plano horizontal como vertical, influye negativamente en los resultados finales arrojados por el modelo matemático.

### 5.2.3 ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS PROCESOS TÉRMICOS DENTRO DE UN DESTILADOR SOLAR DE CASETA.

Al incidir la irradiancia solar  $G$  sobre la cubierta o caseta del destilador, pasando a través de esta cubierta transparente la cual tiene una transmitancia ( $\tau$ ) que depende del material y espesor de la misma ( $\tau gG$ ), una porción de esta radiación es absorbida ( $\alpha gG$ ) o reflejada ( $\rho gG$ ). La porción de  $G$  que llega a la superficie del agua ( $\tau gG$ ) nuevamente sufre una descomposición debido a las características ópticas del agua. Una parte es reflejada ( $\rho_w \tau gG$ ), otra es absorbida ( $\alpha_w \tau gG$ ) y otra es transmitida ( $\tau_w \tau gG$ ). La porción de la radiación que se transmite hacia la base de la charola es absorbida ( $\alpha_b \tau_w \tau gG$ ) en su mayor parte y una pequeña porción es reflejada ( $\rho_b \tau_w \tau gG$ ), ya que el color negro pintado en la base de la charola, posee una alta absorción y baja reflectancia.

La absorción de energía en la base de la charola, constituye fundamentalmente la ganancia de energía necesaria para calentar el agua de la charola o absorbedor. Una parte es cedida al ambiente por conducción en la parte baja del destilador y también por los lados ( $Q_k$ ). Además, otra parte es cedida al agua por convección ( $Q_{cw}$ ), este calor ganando por el agua, sufre tres fenómenos de transferencia de calor desde su superficie hacia la cubierta de vidrio: el primero forma parte de la transferencia de calor debido a la convección interna del aire ( $Q_c$ ). El segundo constituye el transporte de calor latente de las moléculas de vapor que se condensan en la parte interna de la cubierta de vidrio ( $Q_u$ ), que representa precisamente la cantidad de calor necesario para evaporar el agua colocada en la charola. Por esta razón, se le denomina proceso de evaporación-



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

condensación y como se puede observar, para efectos de determinar la eficiencia del sistema,  $Q_u$  es el calor útil. El tercer fenómeno es el calor radiativo ( $Q_r$ ) entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio ya que a las temperaturas en que están estas superficies, la radiación que emiten producen el efecto invernadero.

El calor cedido a la cubierta de vidrio por convección, evaporación-condensación y radiación desde la superficie del agua, se transfiere hacia la atmósfera debido a la convección del aire sobre la parte externa de la cubierta ( $Q_{ca}$ ).

Para poder diferenciar si un sistema es adecuado para su utilización en ciertas condiciones, es necesario determinar su productividad y su eficiencia. Se define la productividad instantánea de un destilador solar, como la cantidad de líquido destilado por unidad de área por unidad de tiempo. El calor útil está relacionado con la productividad:

$$Pro = \frac{Q_u}{hfg} \quad 4$$

En donde  $Pro$  es la productividad instantánea ( $Kg/m^2s$ ),  $Q_u$  es el calor efectivo instantáneo ( $J/m^2s$ ) y  $hfg$  es el calor latente de vaporización del agua a la temperatura promedio del sistema ( $J/Kg$ ). La productividad total consiste en la suma de las productividades instantáneas a lo largo del día, se consideran las 24 horas debido a que se ha encontrado que incluso a lo largo de la noche se sigue obteniendo agua destilada aunque en muy poca cantidad, esto es:

$$Pro_t = \int_0^{24*60*60} \frac{Q_u}{hfg} dt \quad 16$$

Para calcular la eficiencia del destilador ( $\eta$ ), se divide el volumen de destilado ( $V$ ) multiplicado por el  $hfg$  (calor latente de vaporización) entre la irradiación promedio del día multiplicada por la superficie  $S$  del captador por el total de horas consideradas (horas de sol) y ambos por 3600, (Hermosillo V. Juan J, 1990):

$$\eta = \frac{(V * hfg)}{(I_{prom}) * S * H * 3600} \quad 17$$

### 5.2.4 ECUACIONES PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS.

El balance de energía para el destilador requiere que toda la radiación solar absorbida debe ser igual a la energía transferida de la cubierta al aire, las pérdidas del fondo y las paredes del dispositivo y la cantidad de energía almacenada en el sistema, (El-Sebaili A. A., 2004).



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Las ecuaciones que rigen cada segmento del destilador son las siguientes:

- La ecuación diferencial para la caseta está dada por la ecuación 18:

$$m_{cst} C_{cst} \frac{dT_{cst}}{dt} = (\alpha_{cst} I_{abs} + \alpha_{cst} I_d) + (q_{ev} + q_{r,agua-cst} + q_{c,agua-cst}) - q_{r,cst-aire} + q_{c,cst-aire} \quad 18$$

El lado izquierdo de la ecuación anterior se conoce como término de acumulación de energía; del lado derecho, el primer término representa la ganancia de energía solar; el segundo término representa el calor transferido por evaporación, el tercero constituye el calor transferido por radiación del agua hacia la cubierta de vidrio, el cuarto término constituye el calor transferido por convección entre el absorbedor y la caseta; los términos que forman parte de la pérdida de calor en el sistema son el penúltimo término que representa el calor perdido por la caseta por radiación y el calor perdido por convección hacia la atmósfera respectivamente.

El calor transferido por evaporación entre el agua y la cubierta ( $q_{ev}$ ) está basado en: (Dunkle, R. V., 1961)

$$q_{ev} = 16.28 h_c (p_{agua} - p_{cst}) \quad 19$$

Donde  $p_{agua}$  y  $p_{cst}$  son la presión de vapor del agua y la presión en la cara interna de la cubierta de vidrio y sus unidades son Pascales, respectivamente;  $h_c$  representa el coeficiente de transferencia de calor por convección y se calcula mediante la siguiente ecuación, sus unidades son  $W/m^2K$ :

$$h_c = 0.884(T_{agua} - T_{cst}) + \left[ \frac{(P_{agua} - P_{cst})T_{agua}}{(268900 - P_{agua})} \right]$$

$p_{agua}$  y  $p_{cst}$  se pueden calcular con las ecuaciones siguientes:

$$P_{agua} = e^{(25.317-5144)/T_{agua}} \quad 20$$

$$P_{cst} = e^{(25.317-5144)/T_{cst}} \quad 21$$

$T_{agua}$  y  $T_{cst}$  representan la temperatura del agua y la temperatura de la caseta, respectivamente, en grados centígrados.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

El calor transferido por radiación del agua hacia la cubierta de vidrio está dado por Dunkle . Ecuación 22:

$$q_{r,agua-cst} = 0.9\sigma(T_{agua}^4 - T_{cst}^4) \quad 22$$

Este calor se origina debido al intercambio radiante entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio.

El calor transferido por convección entre el absorbedor y la cubierta, consiste en la convección del aire encerrado entre la superficie evaporadora y condensadora y se le llama convección interna. La cantidad de calor trasferida mediante este fenómeno se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$q_{c,agua-cas} = h_c(T_{agua} - T_{cst}) \quad 23$$

El calor perdido por la cubierta hacia la atmosfera por radiación, se calcula con la siguiente expresión, considerando que la emitancia de la cubierta es 0.9:

$$q_{r,cst-aire} = 0.9\sigma(T_{cst}^4 - T_{ciel}^4) \quad 24$$

El calor ganado durante los procesos de convección interna por la caseta se pierde hacia la atmósfera por esta emisión radiativa. En la ecuación 25,  $T_{ciel}^4$  representa la temperatura del cielo, mientras que  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman.

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} \quad 25$$

La temperatura del cielo es mucho muy dependiente de la cantidad de vapor de agua y polvo en la atmósfera, lo que se verá manifestado en un incremento en la reflectancia de calor del suelo. (Yellot, 1982) y (Clark and Berhal, 1980) proponen la siguiente relación para la temperatura del cielo:

$$T_{ciel} = T_{aire} [0.74 + (0.006T_{dp})]^{0.25} \quad 26$$

Donde  $T_{dp}$  es la temperatura de punto de rocío del aire del ambiente y puede ser calculado por:



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$$T_{dp} = \frac{[237.3] \left( \ln \phi + \frac{17.27 T_{amb}}{T_{aire} + 237.3} \right)}{17.27 - \ln \phi + \frac{17.27 T_{amb}}{T_{amb} + 237.3}} \quad 27$$

En la ecuación anterior  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente  $\phi$  es la humedad relativa.

La transferencia de calor por convección entre la caseta y el aire está dado por:

$$q_{c,cst-aire} = h_{cst} (T_{cst} - T_{aire}) \quad 28$$

La convección externa es uno de los modos principales de enfriamiento de las paredes y cubierta del destilador: al estar en contacto el aire exterior con las superficies calientes del destilador asciende de forma natural, extrayendo calor de las paredes. El coeficiente de transferencia de calor por convección entre la caseta y el aire está calculado por las siguientes relaciones:

$$h_{cst} = (Nu_L + Nu_f)^{\frac{1}{3}} K / L_{cst} \quad 29$$

En la ecuación (29)  $K$  representa la conductividad ( $W/m^2K$ ) y depende del material con el que esté fabricada la caseta del destilador;  $L_{cst}$  es la longitud característica de la caseta, dada en metros.

$$Nu_L = 0.288 Re^{0.731} Pr^{1/3} \quad 30$$

$$Nu_{th} = 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad 31$$

$$Nu_f = Nu \cos^2 \theta + (1 - \cos^2 \theta) Nu_{th} \quad 32$$

El número de Nusselt da una idea de que tan grande es la convección con respecto a la conducción. La letra  $L$  en la expresión  $Nu_L$  significa que se está evaluando usando la longitud total de la placa. Los subíndices en los otros  $Nu$  no tienen significado, son solo para diferenciarlos.

El número de Reynolds sirve para caracterizar el tipo de flujo, laminar o turbulento. El tipo de flujo está caracterizado por el valor del cociente entre las fuerzas de inercia debidas al movimiento del fluido y las fuerzas disipativas viscosas que se oponen al movimiento:



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad 33$$

En la ecuación (33):  $\rho$ =densidad,  $v$  = velocidad y  $\mu$ =viscosidad cinemática.

El número de Prandtl, expresa la relación entre la difusión del momento, efecto mecánico de la fricción del fluido sobre la superficie, y la difusión del calor debido a este proceso:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad 33$$

En donde  $C_p$  es el calor específico K, la conductividad térmica.

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_p - T_\infty)L^3 \quad 34$$

El número de Rayleigh (ecuación 34) en un fluido es la relación entre la conducción y convección en su interior:  $g$  es la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión, y  $\alpha$  la difusividad térmica.

- La ecuación del balance de energía para el absorbedor por unidad de área está calculado por:

$$m_{abs} C_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = q_{r,abs} + q_{c,agua-abs} - (q_k + q_x) \quad 35$$

Donde  $q_{r,abs}$ ,  $q_{c,agua-abs}$  y  $(q_k + q_x)$ , son el calor por radiación absorbido por el absorbedor, la transferencia de calor por convección entre el agua y el absorbedor y la pérdida de calor del absorbedor hacia el aislante por conducción, respectivamente, y están dados por:

$$q_{r,abs} = \alpha_{abs} (I_{abs} \tau_{agua-abs} + I_d \tau_{agua-d}) \quad 36$$

En cuanto al coeficiente de transferencia de calor para la ecuación de que modela dicha convección se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_{c,agua-abs} = h_{abs} (T_{agua} - T_{abs}) \quad 37$$



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$T_{abs}$  es la temperatura del absorbedor.

El coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el absorbedor es calculada mediante la siguiente fórmula (Incropera, Frank P, 1999):

$$h_{abs} = Nu_i \frac{K_{agua}}{L_{abs}} \quad 38$$

$Nu_i$  representa el número de Nusselt (adimensional),  $K_{agua}$  es la conductividad del agua y  $L_{abs}$  la longitud característica de la placa de cobre, evaluándose tanto la base como la altura del absorbedor.

$$(q_k + q_x) = k_{abs}/L_{abs}(T_{abs} - T_{amb}) \quad 39$$

♦ La ecuación de balance de energía para el aislante por unidad de área del absorbedor, es:

$$m_{aisl} C_{aisl} \frac{dT_{aisl}}{dt} = (q_k + q_x) - q_{perdido} \quad 40$$

Donde  $(q_k + q_x)$  es el calor por conducción ganado por el aislante del forro del absorbedor.

La pérdida de calor por el aislante puede ser escrita:

$$q_{perdido} = U_{aisl}(T_{aisl} - T_{aire}) \quad 41$$

$T_{aisl}$  es la temperatura del aislante.

El coeficiente de transferencia de calor total está calculado por:

$$U_{aisl} = (L_{aisl}/K_{aisl} + 1/h_{aisl})^{-1} \quad 42$$

De igual forma que en las dos ecuaciones anteriores el coeficiente de convección ( $h_{aisl}$ ) se calcula por la referencia: Dunkle, R. V., 1963.

$$h_{aisl} = Nu_i \frac{K_{aire}}{L_{aisl}} \quad 43$$

$K_{aire}$  representa la conductividad del aire y  $L_{aisl}$  la longitud característica del aislante.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- La ecuación del balance de energía para el agua por unidad de área está calculado por:

$$m_{agua} C_{agua} \frac{dT_{agua}}{dt} = \frac{[(\alpha_{agua} \tau_{cst} I) + q_{cagua-abs}] - (q_{ragua-cst} + q_{cagua_{cst}} + q_{ev})}{\rho_w c_w \gamma} \quad 44$$

El hecho de conocer los valores medidos de las variables que componen el proceso de destilación permitirá predecir los resultados del rendimiento del destilador solar y así poder comparar su precisión con respecto a los resultados prácticos obtenidos dando como consecuencia el poder optimizar el modelo en cuestión.

### 5.2.5 SOLUCIÓN NUMÉRICA Y MODELO COMPUTACIONAL.

Las ecuaciones que representan el sistema de ganancia y pérdida de energía en el destilador solar y que ha sido resuelto son dependientes de la irradiancia solar, de las temperaturas del agua, de la temperatura de la caseta de vidrio, de la temperatura del absorbedor y de la temperatura del aislante, además de la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del aire, las que a su vez dependen directamente del tiempo a lo largo del día como se muestra en la Figura 49.

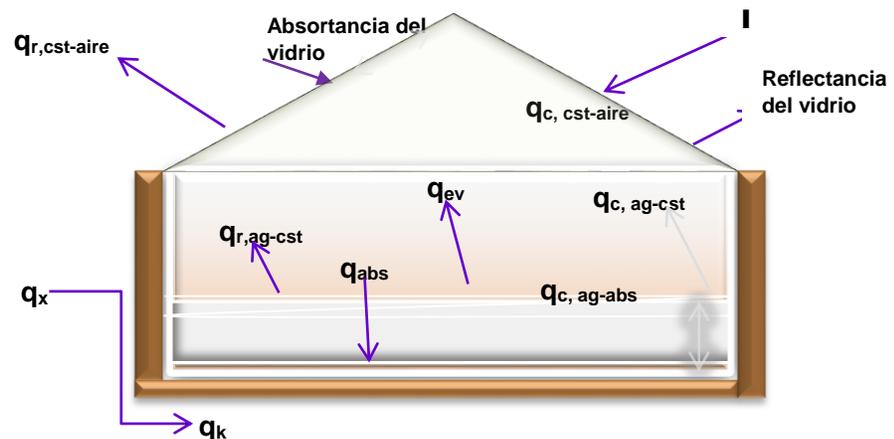


Figura 49: Balances de energía en el destilador.

El proceso comienza con un valor inicial propuesto que debe ser supuesto de cada una de las temperaturas de la caseta, absorbedor y aislante  $T_{CST,t}$ ,  $T_{abs,t}$  y



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$T_{aisl,t}$ , respectivamente, de igual forma, se debe suponer un valor inicial para la temperatura del agua  $T_{agua,t}$ .

Para poder evaluar cada una de estas ecuaciones se deben determinar los valores de los calores, mismos que dependen de las temperaturas antes mencionadas, en este punto se tomó como punto de partida el valor de la temperatura ambiente en todas las correlaciones que la consideren en sus respectivas ecuaciones.

Debido a que tanto la dirección como la magnitud de la radiación solar que llega al destilador están continuamente cambiando, como también sucede con las demás condiciones ambientales es necesario estimar la operación del destilador solar como un sistema dinámico en el tiempo por lo que resulta de suma importancia observar los efectos que algunas de estas variables producen sobre el proceso de destilación.

El método que se utilizó para la solución de ecuaciones es el de diferencias finitas. Se discretizaron las ecuaciones 1, 17 y 22; una vez discretizadas se utilizó como herramienta computacional para implementar la solución el programa Visual Basic, cada simulación que hace el programa y se lleva a cabo una simulación mediante un delta de tiempo (cada hora).

Se introduce además en el programa una tabla con datos de un día completo de temperaturas reales obtenidas para la caseta, absorbedor, aislante y agua. El programa "jala" para cada uno de estos componentes del destilador sus temperaturas iniciales y con estas temperaturas se comienzan a resolver las fórmulas de cada calor (radiación, convección, evaporativo), mismas que el programa utiliza para cada simulación. Estos resultados de cada calor son los que se van utilizando en cada nueva ecuación discretizada.

- La ecuación de balance de energía discretizada para la caseta es:

$$T_{cst,t+\Delta t} = \frac{\Delta t \left[ (\alpha_{cst} I_{abs} \alpha_{cstd} I_d)_t + (q_{ev,t} + q_{rad_{agua_{cst,t}}} + q_{cagua_{cst,t}}) - q_{rcst-am,t} - q_{ccst_{amb,t}} \right]}{m_{cst} + cp_{cst}} + T_{cst,t} \quad 45$$

- La ecuación de balance de energía discretizada para el absorbedor es:

$$T_{abs,t+\Delta t} = \frac{\Delta t \left[ (q_{abs,t}) + (q_{cagua-abs,t}) - (q_k + q_{x'})_t \right]}{m_{abs} + cp_{abs}} + T_{abs,t} \quad 46$$

- La ecuación de balance de energía discretizada para el aislante es:



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$$T_{aisl,t+\Delta t} = \frac{\Delta t [(q_k + q_{x'})_t - q_{perdido_t}]}{m_{aisl} + c_{aisl}} + T_{aisl_t} \quad 47$$

La ecuación de balance de energía discretizada para el agua es:

$$T_{agua_{t+\Delta t}} = \frac{\Delta t [(\alpha_{agua} \tau_{cst} I_d)_t + q_{cagua-abs,t}] - (q_{ragua-cst,t} + q_{cagua_{cst,t}} + q_{ev,t})}{\rho_{agua} c p_{agua} \gamma} \quad 48$$

Se debe calcular la productividad instantánea para el tiempo t con la ecuación:

$$Pro = \frac{q_{ev}}{h_{fg}} \quad 49$$

La productividad instantánea está dada en Kg/m<sup>2</sup>s; el dividendo  $q_{ev}$  es el calor de evaporación y el divisor  $h_{fg}$  es el calor latente de vaporización.

La productividad diaria es la integral de la fórmula anterior. Finalmente la eficiencia del destilador está dada por:

$$\eta = \frac{\int_0^{24*60*60} q_{ev}}{H} \quad 50$$

Donde H es la irradiancia total recibida a lo largo del día.

### 5.2.6 VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES.

Para llevar a cabo la validación del modelo matemático y asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos por el programa de simulación se realizó una comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos por la simulación del sistema.

Para los propósitos de comparación entre los resultados teóricos y experimentales en la corrida del programa se está considerando un 40% de la velocidad del viento medida en la estación debido a que los valores de esta variable en el punto de medición es significativamente mayor que en el sitio donde se está realizando la experimentación. La diferencia de altura entre ambos lugares es alrededor de 20 metros y además varios edificios obstruyen el flujo de aire en el dispositivo experimental. A este respecto, se está en el proceso de



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

adquirir un anemómetro de copas para medir este parámetro justo en el sitio donde se encuentran trabajando ambos destiladores.

La comparación que se presenta en el presente reporte consiste en analizar los resultados correspondientes a un día en particular; se eligió el 8 de marzo del 2012 por ser éste el día más soleado y despejado de los días en los que se logró obtener la información bien integrada. Se tomó como caso de estudio el destilador que se encuentra operando con agua potable. La destilación total de agua destilada medida en este día fue de 0.560 litros en dicho destilador.

En la gráfica que se muestra en la Figura 50, se observa la información proporcionada por el adquisidor de datos; en la gráfica de la Figura 51 se muestra el comportamiento que sigue la simulación de estas temperaturas, ambas el 8 de marzo del 2012.

Como se puede observar, las mediciones obtenidas por el adquisidor de datos representan exactamente la relación que debe guardar cada componente del destilador en cuanto a temperaturas de cada uno de éstos: Temperatura del absorbedor > Temperatura del agua > Temperatura de la caseta > Temperatura del aislante.

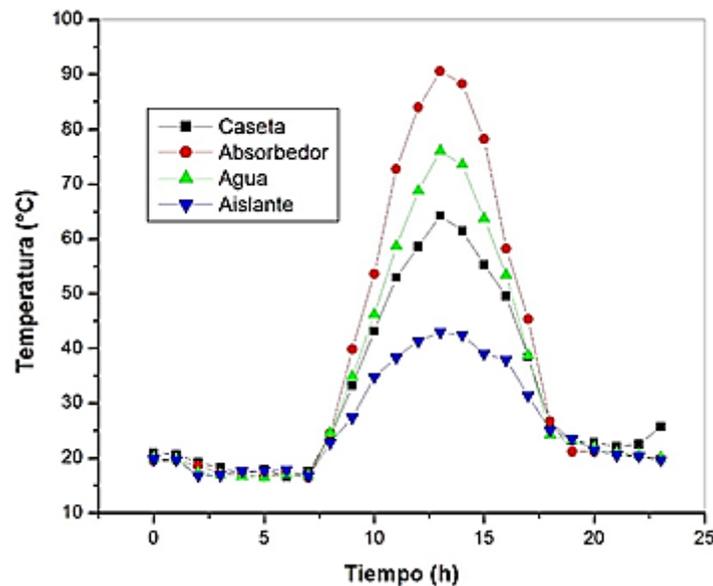


Figura 50: Datos obtenidos por el Data logger el día 8 de marzo del 2012, tomando lecturas a partir de las 6 am.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

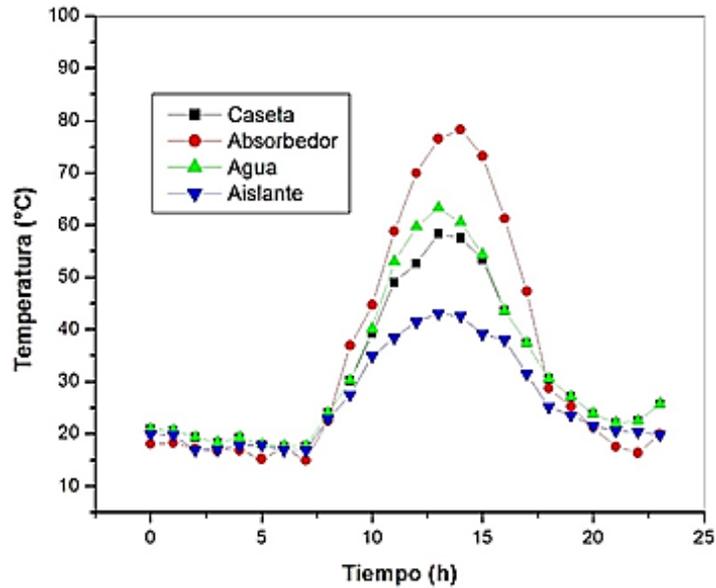


Figura 51: Datos obtenidos por el simulador el día 8 de marzo del 2012, tomando lecturas a partir de las 6 am.

Los resultados del modelo teórico se acercan más a las mediciones obtenidas en campo cuando los efectos de la irradiancia son menores, esto sucede durante la noche y la madrugada. Cuando el comportamiento del destilador está siendo influido por los efectos de la irradiancia teniendo como consecuencia un incremento en las temperaturas, los resultados obtenidos con el modelo teórico son ligeramente más alejados de las mediciones reales.

En las Figuras 52, 53, 54 y 55 se observan gráficas comparativas entre las temperaturas obtenidas experimentalmente y las obtenidas mediante el modelo teórico.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

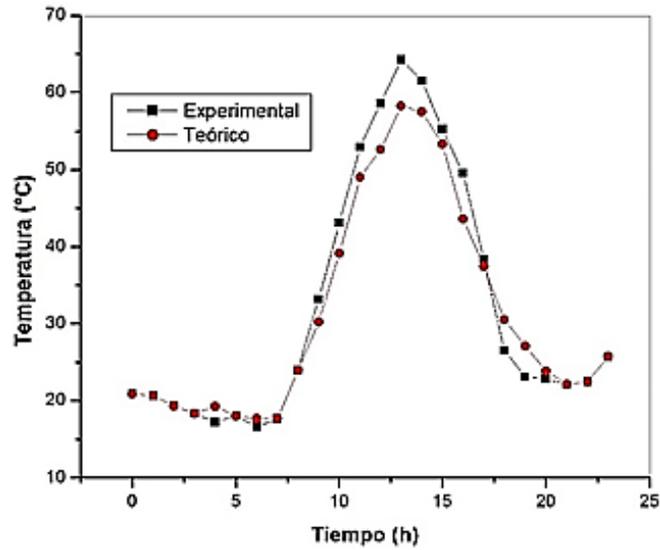


Figura 52: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura de la cubierta de vidrio.

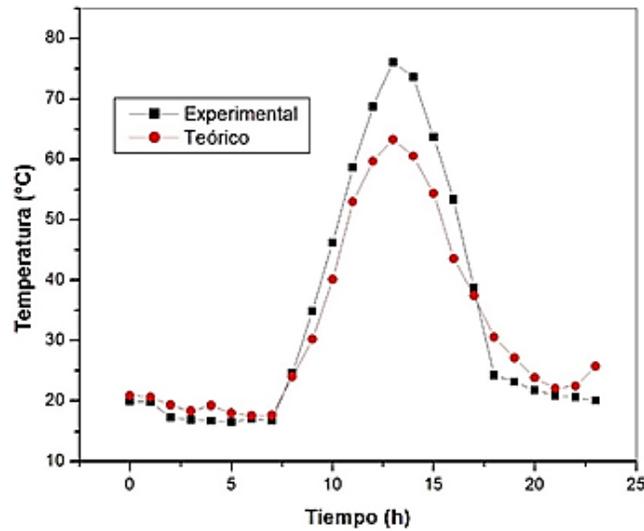


Figura 53: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura del agua a destilar.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

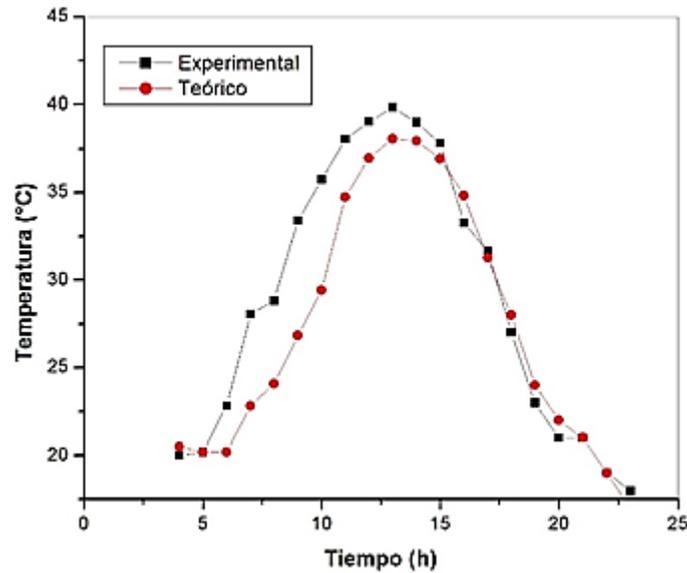


Figura 54: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura del aislante.

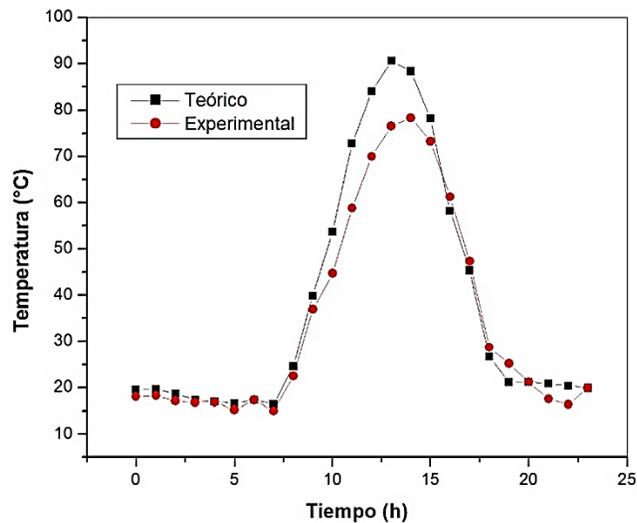


Figura 55: Comparación de los datos obtenidos experimentalmente y la simulación generada por el programa en VB para la temperatura del absorbedor.

En la Figura 56 se tiene la producción acumulada durante el día en donde se aprecia que los incrementos más sustanciales en la producción de agua destilada se dan entre la 1 pm y las 5 pm obteniendo un total de agua producida de 0.554 lt, lo cual concuerda con la recolección obtenida en ese mismo período. Se puede observar además la línea de tendencia y el error proporcionado por el fabricante (0.05%).



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Por otro lado en la gráfica de la figura 57 se observa la destilación de agua llevada a cabo de manera puntual (en intervalos de 10 minutos) de acuerdo a las lecturas proporcionadas por la báscula; se llegan a destilar hasta 0.55 ml lo cual coincide con la tendencia de la producción calculada teóricamente a partir de las lecturas de temperaturas e irradiancias en campo.

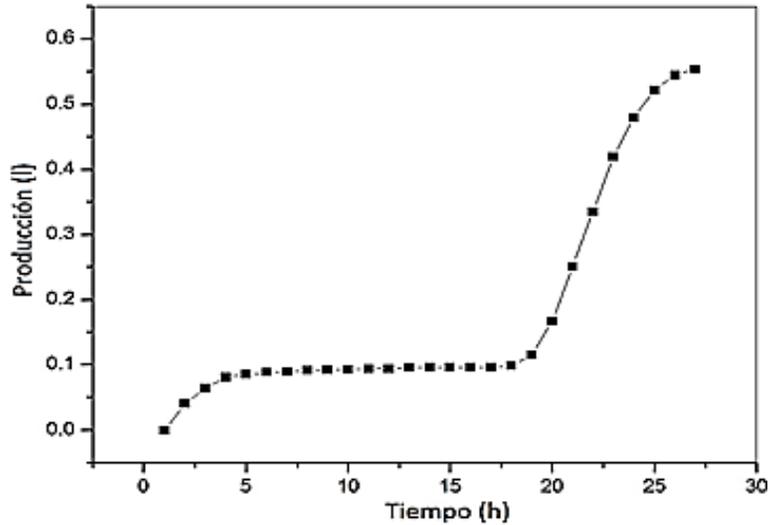


Figura 56: Producción de agua destilada acumulada durante el día.

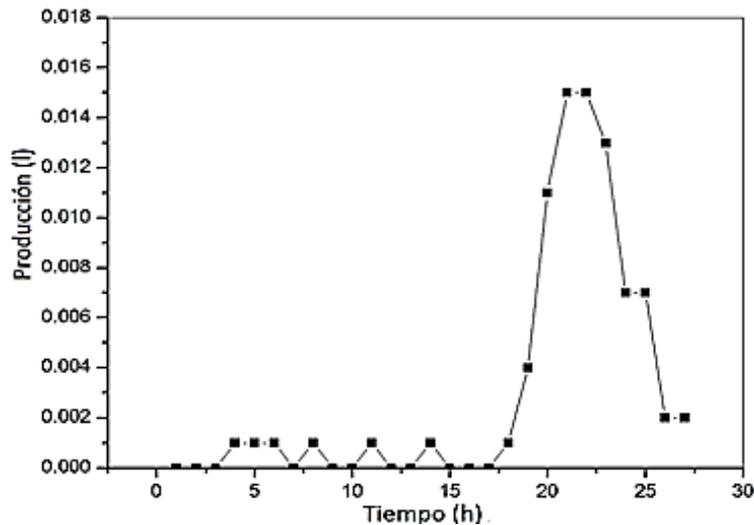


Figura 57: Producción de agua destilada en intervalos de 10 minutos durante el día.

En la Figura 58 se observa la producción de agua destilada obtenida mediante el programa de simulación; se puede apreciar que tanto esta curva como la de la gráfica que muestra la producción de agua en intervalos de 10 minutos tienen el mismo comportamiento.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

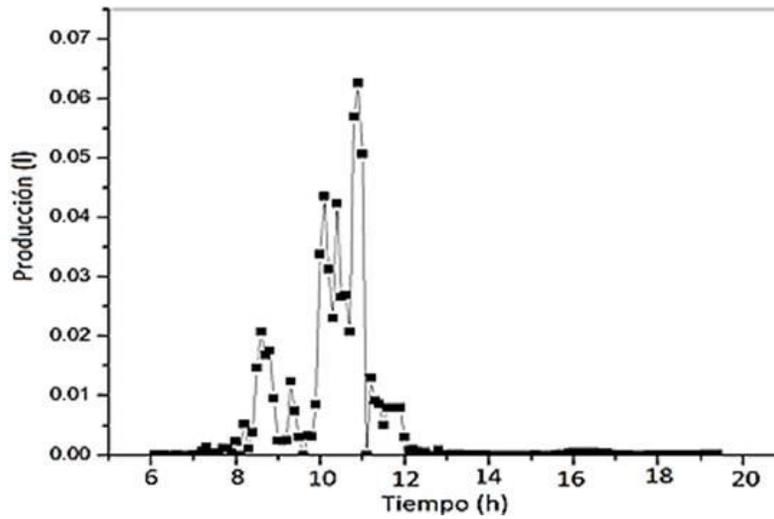


Figura 58: Producción de agua destilada calculada teóricamente.

En la Figura 61 se observa una comparación entre la irradiancia (obtenida en campo) y la producción de agua obtenida mediante el programa de simulación; se puede apreciar que ambas curvas son muy parecidas, pero desfasadas, es decir, la productividad es casi una réplica de la irradiancia pero que se presenta en un momento posterior.

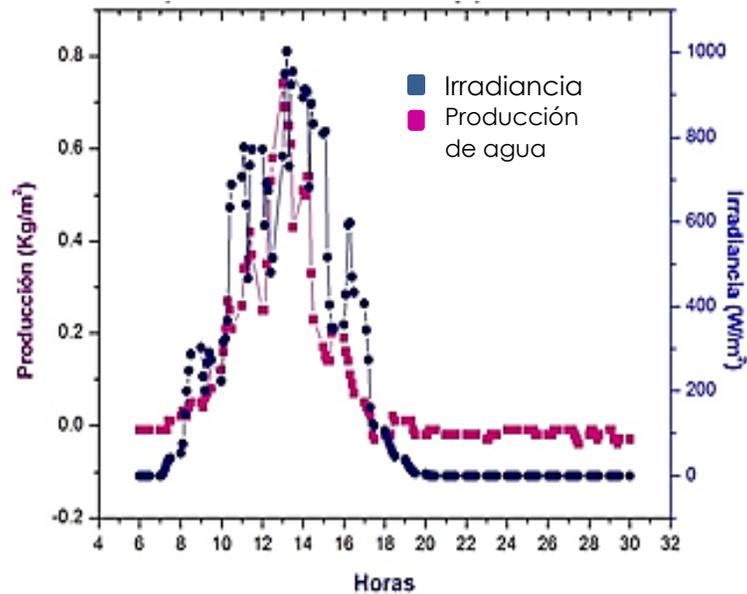


Figura 59: Comparación entre el agua destilada e irradiancia (simulación y datos experimentales).



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

### 5.3 *MODELO EN 3D.*

#### 5.3.1 INTRODUCCIÓN.

Para complementar los resultados obtenidos de manera experimental, se realizaron algunas simulaciones mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizando un programa de cómputo comercial de propósito general Fluent de la compañía ANSYS [[www.ansys.com](http://www.ansys.com)]. Este simulador incluye herramientas de diseño en tres dimensiones (3d), la solución de las ecuaciones matemáticas que representan los fenómenos estudiados, como la transferencia de calor y masa, etc., se obtiene mediante el método de volumen finito (FVM), mediante un proceso de discretización al encontrar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales (Hongtany Tianhong, 2003). La simulación consta básicamente de cuatro etapas: i) diseño y definición de propiedades de los materiales, ii) enmallado o sub-división del espacio 3D, iii) solución de las ecuaciones mediante el método FVM, y iv) presentación de resultados y análisis. La idea de la simulación es conocer los campos de velocidad y temperatura dentro de un destilador solar de agua.

#### 5.3.2 MODELO FÍSICO.

El diseño se realizó en función de las dimensiones físicas del destilador experimental fabricado. Para el enmallado de todo el destilador se utilizaron 405,970 volúmenes de tipo tetraedro (Figura 60), la calidad de los elementos de la malla se evaluó mediante el parámetro de "sesgo del ángulo" y del "sesgo del tamaño de las caras de los volúmenes" (Equiangle skew y Equisize skew). Estos dos parámetros son inferiores a 0.5 para el 92 % de los elementos y menor a 0.25 para el 51% de los elementos; un valor de uno representa un alto sesgo de los elementos y esto puede provocar resultados erróneos.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

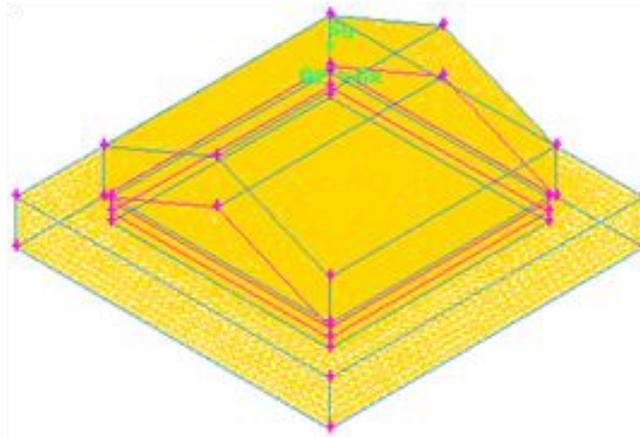


Figura 60: Vista isométrica del diseño del destilador; se muestra el enmallado

### 5.3.3 ECUACIONES QUE RESUELVE FLUENT.

Para todos los flujos, Fluent resuelve ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento. Para los flujos relacionados con la transferencia de calor se resuelve una ecuación adicional para la conservación de la energía. Asimismo, se resuelven ecuaciones de transporte adicionales cuando el flujo es turbulento.

La Transferencia de calor puede ocurrir por tres métodos principales: conducción, convección, y radiación. Los modelos físicos que implican conducción y/o la convección son los más sencillos, mientras los de flujo conducido o convección natural, y los modelos de radiación son los más complejos. Dependiendo del problema, FLUENT soluciona una variación de la ecuación de energía que tienen en cuenta los métodos de transferencia del calor especificado. FLUENT es también capaz de pronosticar transferencia de calor en periódicamente repitiendo geometrías.

### 5.3.4 TRABAJO DE SIMULACIÓN

Para la simulación del comportamiento del destilador es necesario considerar las propiedades de los materiales utilizados en los experimentos, como la densidad de masa, el calor específico, la conductividad térmica, entre otras, con el objetivo de no subestimar o sobre estimar los resultados obtenidos. Dada la naturaleza iterativa del método de solución, es necesario alcanzar el número de iteraciones hasta que la solución a las ecuaciones converja a un valor impuesto, generalmente 0.001 para las ecuaciones de conservación de continuidad y de cantidad de movimiento, y  $1 \times 10^{-6}$  para la ecuación de energía, una vez alcanzado este valor, es posible recuperar la información de las variables y propiedades de



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

interés. Se obtuvo la distribución de los vectores de velocidad en el interior de la doble caseta, en la Figura 61 se presenta un corte transversal de las velocidades en el destilador de doble caseta para las cuatro velocidades estudiadas: a) 2 m/s, b) 3.5 m/s, c) 5 m/s, y d) 8 m/s. Se obtuvieron también los contornos de distribución de la temperatura en el interior de la caseta. En la Figura 62 se muestra el perfil de temperaturas en un corte transversal que abarca el absorbedor y el agua a destilar, así como del interior de la caseta para las cuatro velocidades mencionadas.

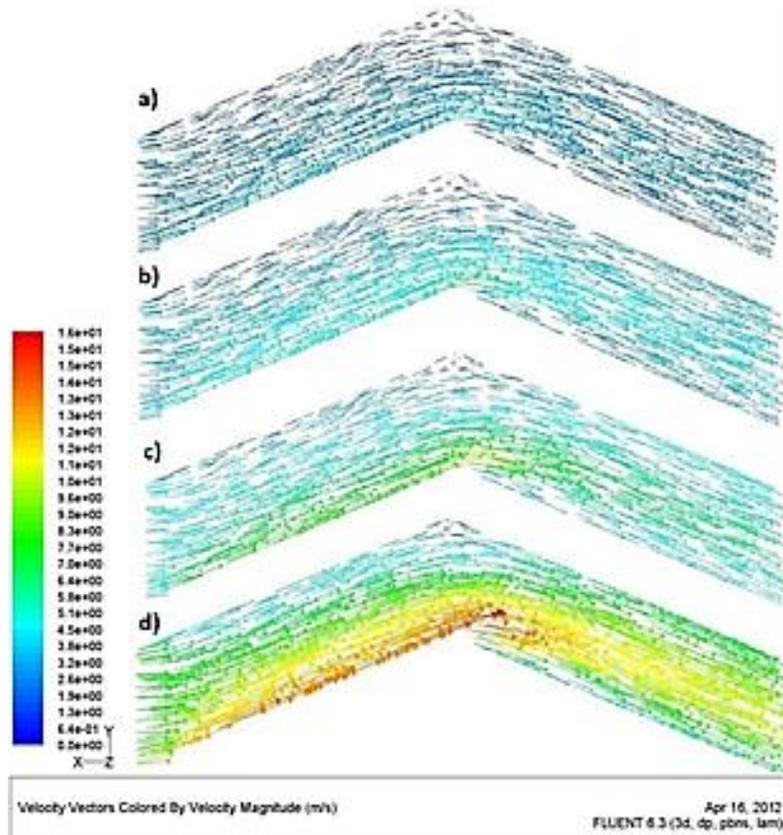


Figura 61: Vectores de velocidad en la doble caseta.

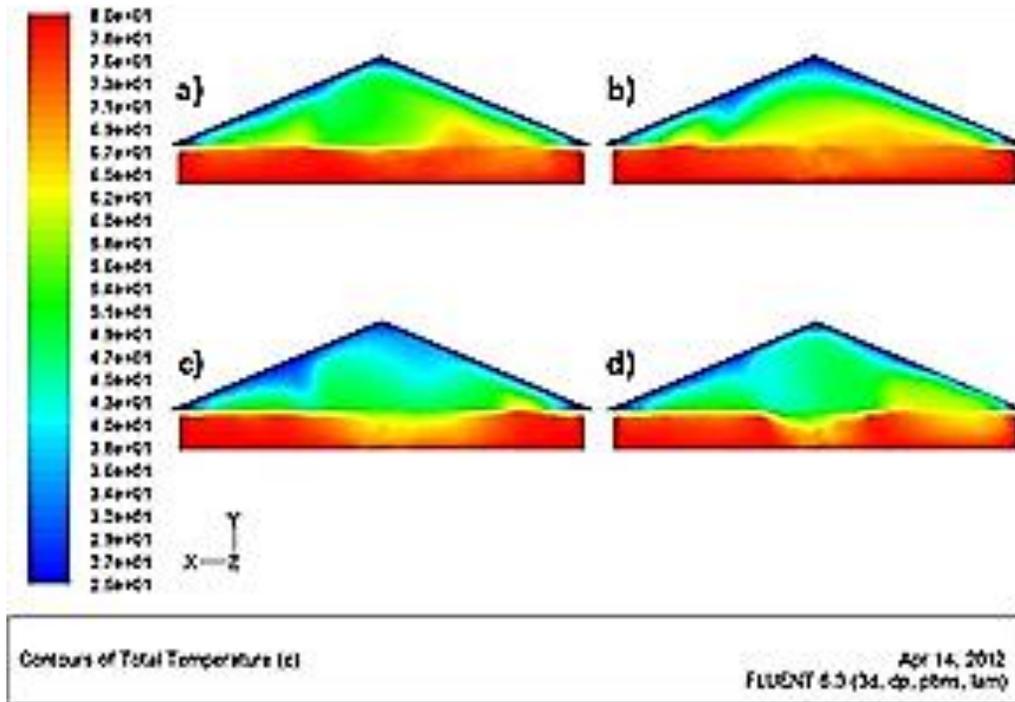


Figura 62: Contornos de temperatura en el interior de la caseta y el absorbedor.

Es posible observar la evolución de la distribución de la temperatura, principalmente en la zona del absorbedor, existe un flujo convectivo originado por el gradiente de temperatura. El enfriamiento de la parte superior por el efecto del aire que simula la presencia de los ventiladores origina un desplazamiento del aire en el interior de la caseta, y una transferencia de calor acelerada del absorbedor hacia la parte superior.

Se analizó también el efecto de la velocidad del viento sobre la distribución de la temperatura en la superficie del absorbedor. La temperatura inicial del absorbedor es de 80 °C. Resulta evidente que a mayor velocidad disminuye la temperatura sobre la superficie del absorbedor, estos resultados se muestran en la Figura 63.

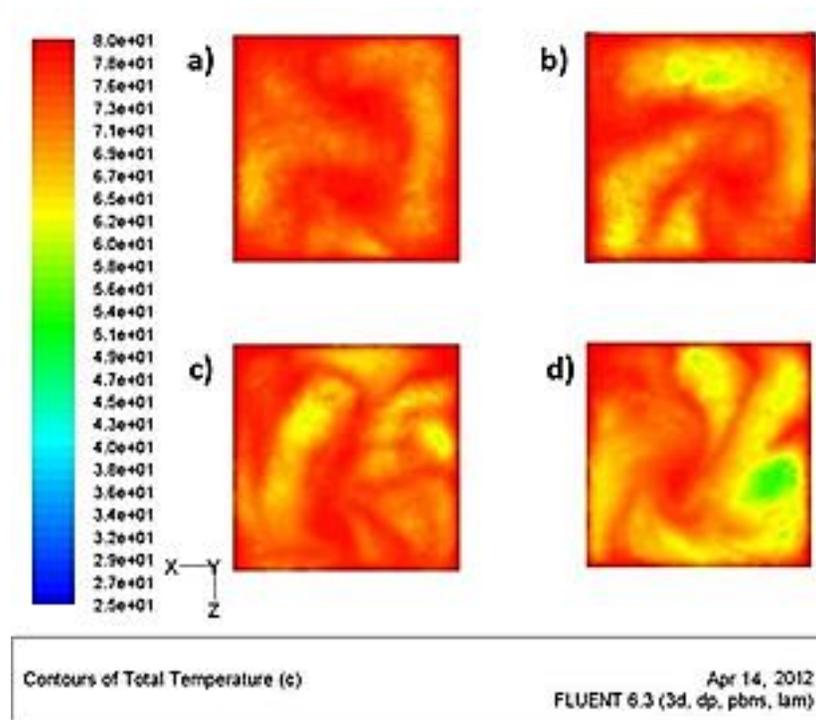


Figura 63: Distribución de la temperatura en la base del absorbedor para diferentes velocidades de viento.

La distribución de temperatura sobre la superficie del absorbedor está influenciada por el efecto de la velocidad del viento generado por los ventiladores. El enfriamiento producido por el efecto de la velocidad del viento, parece perjudicial en el desempeño del destilador, sin embargo, la zona que interesa enfriar permitiría una mayor tasa de condensación del vapor de agua, esto se reflejaría directamente en un aumento en la eficiencia de destilación de agua. En las figuras presentadas en el modelo 3D se puede observar que los resultados reportados son resultados cualitativos, por lo que únicamente nos dan una idea del comportamiento interior del destilador a medida que se aumenta o disminuye la velocidad del aire en el exterior de la cubierta de vidrio.

#### 5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

En este capítulo se presentaron las simulaciones resultantes de analizar tanto el modelo teórico como el modelo en 3D. Se observa que la temperatura disminuye para una mayor cantidad de aire, provocando flujos convectivos. Las zonas de aire frío tienden a descender y las calientes a ascender. Entonces las corrientes de aire frío comienzan a enfriar la zona del absorbedor. Lo anterior significa que



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

el efecto de hacer fluir aire con una velocidad cada vez mayor tiende a enfriar la caseta a niveles que provocarían una disminución en la producción de agua destilada, se pretende comprobar cuál es la velocidad exacta a la que deja de aumentar la destilación y comienza a bajar dicho destilado, lo anterior debido a que el ritmo de condensación sea mucho mayor que el ritmo de evaporación.

El modelo matemático desarrollado no permite predecir el comportamiento del destilador ya que parte de datos experimentales para poder calcular un resultado por lo que sólo permite simular el funcionamiento del destilador, manipulando las variables involucradas en el proceso. El modelo representa la posibilidad de replicar resultados, sin requerir desarrollos prácticos y estar seguros de la validez de los resultados.



## CONCLUSIONES FINALES

---

En el presente trabajo se ha dado un panorama general de los métodos convencionales para la desalación y los fenómenos que están involucrados en la destilación. Se especificó que en el caso de la desalación convencional, se requiere de altos consumos de combustibles fósiles debido a las grandes necesidades energéticas necesarias para realizar el proceso; sin embargo, presentan la ventaja de ser dispositivos de alto rendimiento, es decir, se pueden tener desaladoras de alta capacidad en espacios relativamente pequeños.

La destilación solar como un método de desalación que se han discutido aquí, son un proceso de baja densidad energética requiriéndose áreas de captación muy grandes para la obtención de bajos volúmenes de agua; no obstante, al no utilizar combustibles fósiles ni tampoco electricidad se vuelven sistemas atractivos para su aplicación en las zonas rurales, representando una tecnología que se puede usar ampliamente en zonas de alta densidad de energía solar.

En este trabajo se decidió estudiar el fenómeno de destilación solar para desalar agua mediante un destilador de doble caseta diseñado a partir de las experiencias previas del sustentante y de trabajos experimentales reportados a nivel internacional. Para la construcción de los destiladores de doble caseta que se usaron durante el estudio aquí presentado, se determinó que:

- a) El mejor ángulo para la doble caseta es de 23°C
- b) A partir de estudios realizados en este trabajo sobre el comportamiento óptico de varias cubiertas, la cubierta elegida fue vidrio de 3.0 mm de espesor por ser la más barata, accesible, fácil de conseguir, con alta transmisión en el visible e infrarrojo y con mejor estabilidad química al intemperismo. La cubierta de vidrio usada tiene una transmisión del 81.4% en la región del visible.
- c) El fondo para el material absorbedor fue lámina de cobre de 1.61 mm pintada con un recubrimiento para alta temperatura color negro.
- d) El mejor material aislante disponible comercialmente y fácil de aplicar fue la espuma de poliuretano, la cual se aplicó con un espesor de 100.0 mm.
- e) Para propiciar el enfriamiento de la cubierta de vidrio y garantizar un incremento en el fenómeno de la convección térmica se usaron 3 ventiladores axiales con velocidad variable, con un diámetro de 100.0 mm colocados estratégicamente. A dicho enfriamiento artificial se le llamó *convección forzada*.
- f) Para confinar la corriente de aire producida por los ventiladores y garantizar un enfriamiento uniforme, se usó una cubierta adicional de acrílico de 3.0 mm de espesor, con una transmitancia en el visible del 80.7%, colocada arriba de la cubierta de vidrio, con un espaciamiento de 100.0 mm, para crear un "túnel de viento".



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- g) Se determinaron los parámetros termo-hidrodinámicos involucrados en el funcionamiento del destilador y por consiguiente, involucrados en el modelo matemático.

Para establecer un criterio de comparación, se construyeron dos destiladores idénticos y se instrumentaron para medir, de manera automática, las temperaturas del absorbedor y del agua a destilar contenida en el mismo, la temperatura interna del destilador, la temperatura interna de la cubierta de vidrio, la temperatura externa, la temperatura ambiente, y la productividad de agua durante el día. Así mismo se recabó los datos de la irradiancia directa y difusa provistos por la estación del IER-UNAM. Con las variables y parámetros medidos se estudió el desempeño de los destiladores y se determinó la productividad de agua para varios casos de estudio.

A): El primer caso estudió fue determinar si bajo condiciones de operación natural (convección solamente propiciada por corrientes de aire natural), existe alguna diferencia medible en la productividad de agua destilada cuando se trata de destilar agua de mar ó agua potable. El estudio fue realizado durante el mes de enero (temporada invernal, con una temperatura ambiente promedio de 25°C durante las horas de mayor irradiancia). Se encontró que las temperaturas en los diferentes sitios de medición, en ambos destiladores, son similares. Se determinó que el volumen de agua destilada obtenido diariamente se incrementa conforme aumenta la energía solar catada en el absorbedor. El valor mínimo obtenido fue de 470±5 ml para agua de mar y de 490±5 ml para agua potable con una energía solar captada de 750 Wh; mientras que el valor máximo fue de 560±5 ml y 590±5 ml para agua de mar y agua potable, respectivamente, con una energía solar captada de 860 Wh. Dado que las diferencias encontradas en la productividad de agua destilada proveniente de agua de mar y agua potable, bajo las condiciones en las cuales se hizo el experimento, no son grandes (del orden del 4.2%), se puede establecer que la salinidad del agua no es un factor determinante en la producción de la misma. El resultado es que no hay diferencias significativas, por lo que se puede asumir que el proceso de destilación no se ve influenciada por la salinidad del agua a destilar.

Con un recurso solar típico de 4.2 kWh/m<sup>2</sup> el destilador de caseta analizado es capaz de producir 0.58 l/día en el invierno.

B) El segundo caso de estudio fue analizar la productividad de agua destilada en los destiladores colocando una segunda cubierta para crear un "túnel" por donde se realizó la confinación de aire. El experimento se realizó durante el verano con temperatura ambiente promedio de 30°C durante las horas del día de mayor irradiancia y velocidades de viento promedio durante las horas sol de 1.0 m/s. Se determinó que esta segunda cubierta reduce drásticamente la energía solar que llega al captador, y en consecuencia, se produce menos agua destilada. Se



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

determinó que el destilador produce  $480 \pm 5$  ml con una energía solar en el captador de 780 Wh que corresponde a una irradiación promedio diaria de 4.7 kWh/m<sup>2</sup> durante el periodo de medición.

C) El tercer caso consistió en analizar el efecto de la velocidad de viento inyectada en el "túnel" con tres ventiladores con velocidad variable controlada sobre la producción de agua en uno de los destiladores solares de doble caseta. El dominio de velocidad de aire se estableció desde 0 m/s hasta 6.9 m/s, observándose que un flujo de aire que incrementa el fenómeno de convección sobre la cubierta de vidrio, incrementa la productividad. Los resultados obtenidos demuestran que existe una correlación entre la velocidad del viento sobre la cubierta de vidrio y la producción de agua. Se encontró que bajo condiciones de misma energía solar absorbida por el captador, la convección forzada producida en el rango de velocidades desde 2.5 m/s hasta 5.5 m/s favorece la productividad de agua, esta se incrementa desde  $610 \pm 5$  ml para una velocidad de aire de 2.5 m/s hasta  $760 \pm 5$  ml para una velocidad de aire de 5.5 m/s. Así mismo, se observa un incremento en la eficiencia del destilador, obteniéndose un valor máximo del 62.3% para una velocidad de aire de 5.5 m/s.

D) El cuarto caso consistió en analizar el efecto de la corriente de aire con una velocidad de 5.5 m/s sin el uso de la doble cubierta, es decir, sin confinamiento. El experimento se realizó en el mes de febrero, con una temperatura ambiente de 32°C y velocidad de aire del orden de 1.0 m/s. Se determinó que el enfriamiento de la cubierta de vidrio, con una velocidad de aire de 5.5 m/s, incrementa la productividad del destilador comparado con aquel que no tiene el enfriamiento forzado. La productividad para el destilador enfriado fue de  $660 \pm 5$  ml con una energía solar recibida en el captador de 816 Wh, mientras que para el destilador no enfriado fue de  $570 \pm 5$  ml.

En todos los casos estudiados y en el rango de velocidades hasta 5.5 m/s, el enfriamiento forzado de la cubierta exterior en el DSDC incrementa la productividad de agua y la eficiencia de producción.

Bajo condiciones de irradiación promedio diaria de 5.1 kWh/m<sup>2</sup>, el DSDC con un área de absorbedor de 0.25 m<sup>2</sup>, enfriado con una velocidad de viento de 5.5 m/s, es capaz de producir  $760 \pm 5$  ml en el caso de confinamiento de aire en el "túnel", ó  $660 \pm 5$  ml en el caso de no confinamiento.

Los resultados obtenidos demuestran que la hipótesis de partida fue correcta; es decir, el enfriamiento forzado en la cubierta exterior del destilador incrementa la productividad de agua destilada.

Las simulaciones resultantes de analizar tanto el modelo teórico como el modelo en 3D. Se observa que la temperatura disminuye para una mayor cantidad de aire, provocando flujos convectivos. Las zonas de aire frío tienden a descender



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

y las calientes a ascender. Entonces las corrientes de aire frío comienzan a enfriar la zona del absorbedor. Lo anterior significa que el efecto de hacer fluir aire con una velocidad cada vez mayor tiende a enfriar la caseta a niveles que provocarían una disminución en la producción de agua destilada, se pretende comprobar cuál es la velocidad exacta a la que deja de aumentar la destilación y comienza a bajar dicho destilado, lo anterior debido a que el ritmo de condensación sea mucho mayor que el ritmo de evaporación.

En las simulaciones con el modelo 3D se observa que la temperatura disminuye para una mayor cantidad de aire, provocando flujos convectivos. Las zonas de aire frío tienden a descender y las calientes a ascender. Entonces las corrientes de aire frío comienzan a enfriar la zona del absorbedor. Lo anterior significa que el efecto de hacer fluir aire con una velocidad cada vez mayor tiende a enfriar la caseta a niveles que provocarían una disminución en la producción de agua destilada, se pretende comprobar cuál es la velocidad exacta a la que deja de aumentar la destilación y comienza a bajar dicho destilado, lo anterior debido a que el ritmo de condensación sea mucho mayor que el ritmo de evaporación.

Tanto el modelo numérico como el modelo en 3D, no arrojan un resultado idéntico a los resultados experimentales, lo cual se atribuye a las lecturas tomadas de la estación solarimétrica del IER. La cual se encuentra ubicada a una distancia de aproximadamente 30 m de altura con respecto a la ubicación de los destiladores y a unos 200 m en la horizontal, por lo que no hay manera de tener datos precisos en cuanto a velocidad del viento, humedad relativa, temperatura ambiente, etc. Estos son datos fundamentales con los que se alimenta al modelo matemático y FLUENT, se recomienda ampliamente para futuros estudios adquirir una estación propia y ubicarla a la menor distancia posible entre el área de estudio y ésta, con la finalidad de contar lecturas reales y confiables.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- I. Wagnick, K. 2004. IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report No. 18, junio.
- II. Ojinaga-Santana, L. y Foster, R. E. "Experiencias en el uso de destiladores solares en San Luis Potosí y Chihuahua". XXV Semana Nacional de Energía Solar – ANES. San Luis Potosí, México; 2001.
- III. Pérez O y Tanner W, (1985), "Sonntlan: proyecto solar experimental". La Revista Solar, publicación de la Asociación Nacional de Energía
- IV. Water Desalination Report, vol. VI, núm. 11, 12 de marzo de 1970.
- V. Technology Review, Inc., en colaboración con el Instituto Español de Comercio Exterior, 2009. "La desalinización en España".
- VI. Cooper. P. I. (1973). The maximum efficiency of single-effect solar still", Solar energy, vol. 15 pp. 205-217. Pergamon Press,
- VII. Eduardo Rubio Cerda, Miguel A. Porta Gándara y José L. Fernández Zayas. (1999). "Efectos de borde en la producción de destiladores solares tipo caseta". Memorias de la XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 275.
- VIII. Harding, 1883, primera planta desaladora
- IX. Pilatowsky I., Tanner, W. Haberdas F., Obermair, F., Kleinemeier P. 1990. Proyecto Sonntlan: Investigación aplicada y desarrollo tecnológico para la utilización de la energía solar. Parte I Proyecto rural "Las barrancas": datos técnicos, resultados y experiencias. Memorias de la 1ª. Reunión de Ingeniería en Energía y Recursos Energéticos, Universidad de San Luis Potosí, México, marzo.
- X. Fernández Zayas, José Luis, Chargoy del Valle, Norberto ( 2010). "Destilación solar de agua de mar en México". Instituto de Ingeniería, UNAM. Edición , 1983-2003.
- XI. José Luis Fernández Zayas y Norberto Chargoy. "Destilación solar de agua en Baja California Sur". Instituto de Ingeniería, UNAM. La Revista Solar, ANES, No. 37, primavera de 1998. Pag. 21-23.
- XII. Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar. (1980). "El Sol es Energía. Primeras Plantas Desaladoras a Nivel Mundial, Accionadas por Energía Solar a Través de Sistemas Térmicos y Fotovoltaicos". SAHOP, México.
- XIII. Muñoz Gutiérrez Felipe y Robles Velázquez Norma, (1998), Diseño preliminar de una planta de destilación solar de 10 m de capacidad.
- XIV. Muñoz Gutiérrez Felipe y Robles Velázquez Norma, (1998), Utilización de un estanque solar en procesos desaladores.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- XV. Cabanillas López Rafael E. (1998). "Planta desaladora solar de Puerto Lobos, Sonora". Grupo de Energía, Universidad de Sonora. ANES, No. 37. Pag. 17-20
- XVI. Fernández Zayas José Luis and Chargoy Norberto. (1990). "Multi-stage, indirectly heated solar still". Solar Energy, Volume 44, Issue 4. Pages 215-223.
- XVII. Fernández Zayas Jose Luis y Chargoy Norberto. (1990). "Experiencias finales con un destilador solar indirecto de agua de mar". XIV Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 162.
- XVIII. Porta MA, Chargoy N y Fernández JL (1998), "La experiencia mexicana en el diseño y operación de destiladores solares", Información Tecnológica, ISSN: 0716-8756, Centro de Información Tecnológica, La Serena, Chile, Vol. 9, No. 4.
- XIX. Cárdenas Munguía Francisco Javier. "Un proyecto demostrativo de sustentabilidad regional en México". Centro Universitario de Gestión Ambiental (CEGEA). Ecoparque Nogueras.
- XX. Porta, Fernández y Chargoy. (1994). "Influencia de la distancia vidrio-agua en destiladores solares de caseta". XVIII Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 105.
- XXI. Porta M. A., J. L. Fernández, N. Chargoy, (1995), Factores geométricos en la operación de destiladores solares someros.
- XXII. Porta M.A. (1997) "Destiladores solares someros", Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 120 pp,
- XXIII. El-Sebaï A.A. (2004). Effect of wind speed on active and passive solar stills, Energy Conversion and Management, Vol 45 p. 1187-1204.
- XXIV. El-Sebaï A.A. (2000). Effect of wind speed on some designs of solar stills, Energy Conversion & Management Vol 41 p. 523-538.
- XXV. El-Sebaï A.A. (1998). Parametric study of a vertical solar still, Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 13, p. 1303-1315.
- XXVI. S. H. Soliman. (1972). "Effect of wind on solar distillation". Solar Energy, Volume 13, Issue Pages 403-415
- XXVII. Hinai-Al, MS. Nassri-Al, Jubran B.A. (2002). Parametric investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still, Desalination, Vol p. 150 75-83.
- XXVIII. Hinai-Al H., Nassri-Al MS, Jubran B. A. (2002) Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. Energy Convers Mgmt. Vol 1639 p. 43-50.
- XXIX. Safwat Nafeya A., Abdelkaderb M., Abdelmotalipb A., Haydee Salmun A. A. (1995). Convection patterns in a triangular domain. Pergamon, Vol 38, No. 2, p. 351-362.
- XXX. Ghoraba M. M. "Theoretical and experimental studies of heat and mass transfer inside singled-sloped solar still". PhD Tesis Cairo University 1987.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- XXXI. Malik M. A. S. and Tran Van Vi. (1973). A simplified mathematical model for predicting the nocturnal output of a solar still. *Solar Energy*, Vol. 14, p. 371-385.
- XXXII. Mohamad Abu-Qudais, Bassam A/K Abu-Hijleh and Othman N. (1996). "Experimental study and numerical simulation of a solar still using an external condenser". *Energy*, 21 851-855.
- XXXIII. Samy M. El-Sherbiny and Hassan E. S. Fath. "Solar distillation under climatic condition in Egypt". (1993). *Renewable Energy*, 3, 63-65.
- XXXIV. Siaka Toure, Pierre Meukam. (1997). A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Cote D'Ivoire), *Renewable Energy*, 11, 319-330.
- XXXV. Soliman S. H. (1972). "Effect of wind on solar distillation". *Solar Energy*, Vol. 13, p. 403-415.
- XXXVI. Muafag Suleiman, K. Tarawneh. (2007). "Effect of water depth on the performance evaluation of solar still". *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1, 23 - 29.
- XXXVII. Kumar Sanjay, Tiwari G. N. (1996). "Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems". *Solar Energy*, Volume 57, 459-464.
- XXXVIII. Romero Dzib, Hernández Rodríguez y Reyes Coronado. (1997). "Análisis experimental de un destilador solar de 2 efectos tipo caseta de una pendiente". XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 194.
- XXXIX. Tanaka Hiroshi, Nakatake Yasuhito. (2007). "Effect of inclination of external flat plate reflector of basin type still in winter". *Solar Energy*, Volume 81, Issue Pages 1035-1040.
- XL. Tiwari G. N., Singh H. N., Tripathi Rajesh. (2003). "Present status of solar distillation". *Solar Energy*, Volume 75, Pages 367-373.
- XLI. Porta MA y Fernández JL (1996), "Discusión del artículo: "Mathematical – Modeling of Solar Stilis in Iran", by D. Mowla y G. Karimi, *Solar Energy* 5), 389-393 (1995). *Solar Energy*, Vol. 56, No.6, pp 635-636.
- XLII. Porta MA, Chargo y N y Fernández JL. (1997), "Extreme operating conditions in shallow solar stills", *Journal of Solar Energy*, Vol. 61, No.4, pp 279-286.
- XLIII. Porta MA, Rubio E y Fernández JL (1998), "Experimental measurement of wáter-to-cover heat transter coefticient inside shállow sólar stills, *Applíed Thermal Enginnering*, Vol. 18, Nos. 1-2, Pag 69-72.
- XLIV. Porta MA, Rubio E y Fernández JL (1998), "Visualization of natural convection inside shallow solar stills", *Journal Experiments in Fluids*, Vol. 25, pag 369-370.
- XLV. Porta MA, Rubio E y Fernández JL (2002), "Sistema de desalación solar de agua de mar para riego eficiente en un módulo de cultivo", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVII, No. 2, pp 55-64.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- XLVI. "Patrones de temperatura en un destilador de laboratorio". España Estrada, Poujol Galván, Fernández Zayas. (1999). XXX Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 271
- XLVII. Fernández Zayas y Chargoy. (1990). "Experiencias finales con un destilador solar indirecto de agua de mar". XIV Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 162.
- XLVIII. Rubio Cerda, Porta Gándara y Aldana García. (2001). "Desarrollo de un sistema automático para estudios de campo de la destilación solar". XXV Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 353
- XLIX. Solís Correa, Infante Bribiesca, Rodríguez González y Gordon Sánchez. (1997). "Análisis de un destilador solar tipo caseta con superficie condensadora aumentada". XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 189.
- L. Pérez Galindo, Martín Domínguez. (1997). "Diseño conceptual de un destilador solar utilizando tubos de calor". XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 200.
- LI. Porta, Aldana y Rubio. (1999). "Control electrónico de recarga de salmuera para optimizar la producción y automatizar la operación de un destilador solar somero". XXII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 363.
- LII. Gordon Sánchez, Solís Correa, Ortega Jiménez, Acosta Hernández". (1999). "Estudio del efecto de la relación (área de condensación/área de evaporación) en destiladores solares estacionarios tipo caseta". XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 261.
- LIII. Hermosillo Villalobos Juan Jorge. (1999). Notas del curso de actualización "destilación solar de agua", Volumen S/N, México, paginas S/N; publicado sin arbitraje.
- LIV. William F. Smith. 2006. "Fundamento de la ciencia e ingeniería de materiales". Ing. 3a. Edición. McGraw-Hill.
- LV. Cervantes de Gortari Jaime (1999). "Fundamentos de transferencia de calor". UNAM. Fondo de Cultura Económica. México.
- LVI. Reynolds William C., Perkins C. Henry. (1980) "Ingeniería termodinámica". McGraw-Hill.
- LVII. Incropera Frank P., De Witt David P. (1999). "Fundamentos de transferencia de calor". Prentice Hall, cuarta edición.
- LVIII. Dunkle R.V., (1961). Solar water distillation, the roof type still and multiple effect diffusion still, Fifth International, Conference of Development in Heat Transfer, U. Colorado, 206.
- LIX. Zúñiga Santana Juan Francisco. "La desalinización: una opción a tener en cuenta". Investigador Agregado de CUBAENERGIA. e-mail: jfz@cubaenergia.cu



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- LX. Correa Díaz Felipe. El impacto social y económico de la desalación de agua de mar. Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. [www.juridicas.unam.mx](http://www.juridicas.unam.mx)
- LXI. Fuentes Díaz Manuel. (2002). "Desalación del agua, una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- LXII. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. 2007. Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture. London, UK: Earthscan; and Colombo, Sri Lanka; IWMI.
- LXIII. Copin-Montégut Gérard. 2009. Propiedades físicas del agua de mar.
- LXIV. El Agua en México, lo que todas y todos debemos saber. FEA Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. México, D.F./CEMDA Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C. México, D.F. 2006.. Primera edición.
- LXV. Fuentes Díaz Manuel, González Ramírez Antonio (2003). "Desalación de agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- LXVI. "La Ciencia en la UNAM, a través del Subsistema de Investigación Científica" Instituto de Ingeniería-UNAM. 2007.. Proyecto Impulsa IV.
- LXVII. Ramírez González Antonio, Fuentes Díaz Manuel. (2006). Santacruz Carolina, Garrido Sofía, Calderón Molgora, Montellano Leticia. Análisis del costo de tratamiento en tres tipos de fuente para entregar agua potable a las ciudades de Guaymas y Ensenada, México". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- LXVIII. Fuentes Díaz Manuel, Ramírez González Antonio (2003). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. "Desalación de agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana"
- LXIX. Solís Correa Hugo E. "Destiladores solares de agua". (1991). ANES, No. 19. Pag. 13-18.
- LXX. Finck Pastrana Adolfo G. (1998). "Destilación solar de agua salina. Panorama general". Departamento de Ingeniería, Universidad Iberoamericana, Plantel Santa Fe. ANES, No. 37. Pag. 10-16.
- LXXI. Muñoz Felipe, Barrera Enrique, Gallegos Élfego . (2010). "Experiencias en la destilación solar". Instituto de Ingeniería, UNAM. ANES, Vol. 1, No. 7. Pag. 21-29.
- LXXII. Fernández Zayas J. L. "Perspectivas de la destilación solar activa". Instituto de Ingeniería, UNAM, Revista de Energía Renovables, ANES,. Vol. 1, No. 7, Septiembre del 2010. Pag. 30-34.
- LXXIII. Rubio E. (2002), "Convección natural en destiladores solares de caseta de gran sección", Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 87 pp.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- LXXIV. Fernández JL y Chargoy N (1990), "Multi-stage, indirectly heated solar still", *Journal of Solar Energy*, Pergamon Press, Vol. 44, No. 4, pp 215-223.
- LXXV. Palacio A y Fernández JL (1993), "Numerical analysis of greenhouse type solar stills with high inclination", *Solar Energy*, Vol. 50, No. 6, pp 469-476.
- LXXVI. Rubio E, Porta MA y Fernández JL (2000), "Cavity Geometry influence on mass flow rate for single and double slope solar stills", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, pp 1105-1111.
- LXXVII. Rubio E, Porta MA y Fernández JL (2002), "Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still", *Renewable Energy*, Vol. 27, No. 2, pp 301-308.
- LXXVIII. Rubio E, Fernández JL y Porta MA (2004), "Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills", *Renewable Energy*, Vol. 29, pp 895-906.
- LXXIX. Ramírez P, González L. y Ibarra X, (1980), "El Sol es Energía", *Primeras Plantas Desaladoras, a Nivel Mundial, accionadas por Energía Solar a través de Sistemas Térmicos y Fotovoltaicos*, DIGAASES, SAHOP, México-República Federal Alemana.
- LXXX. Rincón EA, (1999), *Estado del Arte de la Investigación en Energía Solar en México*, Cuadernos Fundación ICA, edición especial, ISBN 968-7508 55-8, ISBN 1405-387X, pp 32 - 36, México.
- LXXXI. Almanza R y López S, *Utilización de las superficies selectivas en la energía solar*, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No. 378, 1976
- LXXXII. Organización de las Naciones Unidas 2002. "Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura". Roma.
- LXXXIII. Toledo Alejandro. Instituto Nacional de Ecología. 2002. "El agua en México y en el mundo". *Gaceta Ecológica*, julio-septiembre, núm. 64. Distrito Federal, México. Pag. 10-11.
- LXXXIV. Fernández A. (2001). "Conservación del agua: única alternativa para el futuro". *Tlaloc*, No. 21, p.2. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- LXXXV. Naciones Unidas. (2006). "Agua para el consumo humano". Informe sobre desarrollo humano.
- LXXXVI. Cumbre de Johannesburgo 2002. "El problema del agua". Departamento de Información Pública de las Naciones Unidas DPI/2253/Rev.2 - mayo de 2002.
- LXXXVII. Bermúdez Torres Juan, Bergues Ricardo, Zenón Cobián Francisco. (2002). "La destilación solar en Cuba". *CUBAENERGÍA*
- LXXXVIII. XVIII Semana nacional de energía solar. "Destilación solar de agua: Destiladores solares con convección natural". Diciembre de 1994. Hermosillo, Sonora. Pag. 60-64.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- LXXXIX. España Estrada, Poujol Galván, Fernández Zayas. (1999). "Patrones de temperatura en un destilador de laboratorio". XXX Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 271.
- XC. Fernández Zayas y Chargoy. (1990). "Experiencias finales con un destilador solar indirecto de agua de mar". XIV Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 162.
- XCI. Eduardo Rubio Cerda, Miguel A. Porta Gándara y José L. Fernández Zayas. (1999). "Efectos de borde en la producción de destiladores solares tipo caseta". Memorias de la XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 275.
- XCII. Rubio Cerda, Porta Gándara y Aldana García. (2001). "Desarrollo de un sistema automático para estudios de campo de la destilación solar". XXV Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 353
- XCIII. Solís Correa, Infante Bribiesca, Rodríguez González y Gordon Sánchez. (1997). "Análisis de un destilador solar tipo caseta con superficie condensadora aumentada". XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 189
- XCIV. Romero Dzib, Hernández Rodríguez y Reyes Coronado. (1997). "Análisis experimental de un destilador solar de 2 efectos tipo caseta de una pendiente". XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 194.
- XCV. Porta, Aldana y Rubio. (1999). "Control electrónico de recarga de salmuera para optimizar la producción y automatizar la operación de un destilador solar somero". XXII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 363.
- XCVI. Porta, Fernández y Chargoy. (1994). "Influencia de la distancia vidrio-agua en destiladores solares de caseta". XVIII Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 105.
- XCVII. Gordon Sánchez, Solís Correa, Ortega Jiménez, Acosta Hernández". (1999). "Estudio del efecto de la relación (área de condensación/área de evaporación) en destiladores solares estacionarios tipo caseta". XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 261.
- XCVIII. Muñoz, Barrera y Vázquez (1992). "Modelo matemático de un destilador solar con flujo forzado". XVI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 146.
- XCIX. Torijano, Vázquez, Torres, Romero-Paredes, Ambríz. (1998). "Resultados numéricos contra resultados experimentales usando un destilador solar de triple efecto". XXII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 178
- C. Mink G., Horváth L., Evseev E. G., Kudish A. I. (1998). "Design parameters, performance testing and analysis of a double-glazed, air-blown solar still with thermal energy recycle". Solar Energy, Volume 64, Issues 4-6, Pages 265-277.



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

- CI. Zaki G. M., Abdulhaiy M. Radhwan, A., Balbeid O. (1993). "Analysis of assisted coupled solar stills". *Solar Energy*, Volume 51, Issue Pages 277-288.
- CII. Castillo Téllez Margarita. (2008). "Desarrollo y análisis energético de destiladores solares de agua con convección natural y convección forzada". Tesis Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- CIII. Yellott JI. *Passive and hybrid cooling research. Advances in solar energy*, vol. 1. NewYork: Plenum Press; 1982. p. 241-63.
- CIV. Clark E, Berhal P. *Radiative cooling: resources and applications. Proceedings of the Passive-Cooling Workshop, Amherst, MA; 1980. p. 177-212*
- CV. Hongtan L., Tianhong Z., (2003), "CFD Based PEM Fuel Cell Models and Applications, *Nanotech*" (3) p. 463-466.
- CVI. Mahdi J. T., Smith B. E., Sharif A. O. (2011). "An experimental wick-type solar still system: Design and construction". *Desalination*, Vol 267 p. 233-238.
- CVII. Kamal W. A. (1998). "A theoretical and experimental study of the basin-type solar still under the Arabian Gulf climatic conditions". *Solar & Wind Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 147-157.
- CVIII. Kudish A. I. (1991). "Solar energy in agriculture". *Energy in world agriculture*, Elsevier. Vol 4, p. 255-294.
- CIX. Mabrouka. (2000). "Parameters affecting solar still productivity", *Energy Conversion & Management* Vol 41 p. 1797-1809.
- CX. Morse R. N., Read W. R. W. (1968). "A rational basis for the engineering development of a solar still". *Solar energy*, Vol 12, p. 5-17.
- CXI. Norton Tomás, Sun Da-Wen, Grant Jim, Fallon Richard, Dodd Vincent. (2007). "Applications of computational dynamics (CFD) in the modeling and desing of ventilation system in the agricultural industry: A review". *Bioresource technology*, Vol 98 p. 2316-2414.
- CXII. Salmun Haydee. (1995). "Convection patterns in a triangular domain". Vol 38, No. 2, pp. 351-362
- CXIII. Tmartnhad IIham, El Alami Mustapha, Najam Mostafa, Oubarra Abdelaziz. (2009). "Numerical investigation on mixed convection flow in a trapezoidal cavity heated from below". *Energy Conversion & Management* Vol 49 p. 3205-3210.
- CXIV. Völker S., Burton T., and Vanka S. P. (1996). "Finite-volume multigrid calculation of natural-convection flows on unstructured grids". *Numerical heat transfer, part B*, Vol 30, p. 1-22.



## ANEXO I. Análisis de los procesos ópticos y térmicos involucrados en la destilación solar de agua.

Hasta la fecha han sido desarrollados y estudiados diferentes prototipos de destiladores solares de agua, cada uno con diferentes características, sin embargo, todos estos modelos constan de las mismas zonas que son importantes para su buen funcionamiento, es decir, para lograr su análisis energético se consideran los siguientes componentes: el colector solar, que es una superficie opaca absorbidora utilizada o diseñada para obtener la mayor captación solar para el sistema; el evaporador, que es la región a partir de la cual se lleva a cabo la evaporación a partir del agua salobre, es decir, es el cuerpo de agua que al calentarse se evaporará; y, el condensador (cubierta de vidrio, regularmente), que es utilizada como superficie en la cual se lleva a cabo la condensación del vapor. De tal manera que los procesos involucrados en la destilación solar son de dos tipos: ópticos y térmicos.

Los procesos ópticos afectan la cantidad de radiación solar absorbida tanto por el fondo, el espesor de agua a destilar y la masa de aire contenida en el destilador. Todos los diseños experimentales buscan maximizar la energía absorbida con la finalidad de que se incremente la temperatura interior con lo que se verá favorecida la evaporación, y así se incrementará la condensación lo que estará garantizando un mejor rendimiento en dicho proceso. El proceso óptico comienza con la llegada de la radiación solar, hecho que da como resultado un incremento de la temperatura en el interior del destilador. La intensidad de esta radiación (irradiancia) se mide en  $\text{Watt}/\text{m}^2$ , de la cual, una fracción atraviesa la cubierta transparente (condensador), otra fracción de esta energía es absorbida y finalmente, otra fracción es transmitida al interior del destilador, son los fenómenos conocidos como reflexión, absorción y transmisión. (Figura 67).

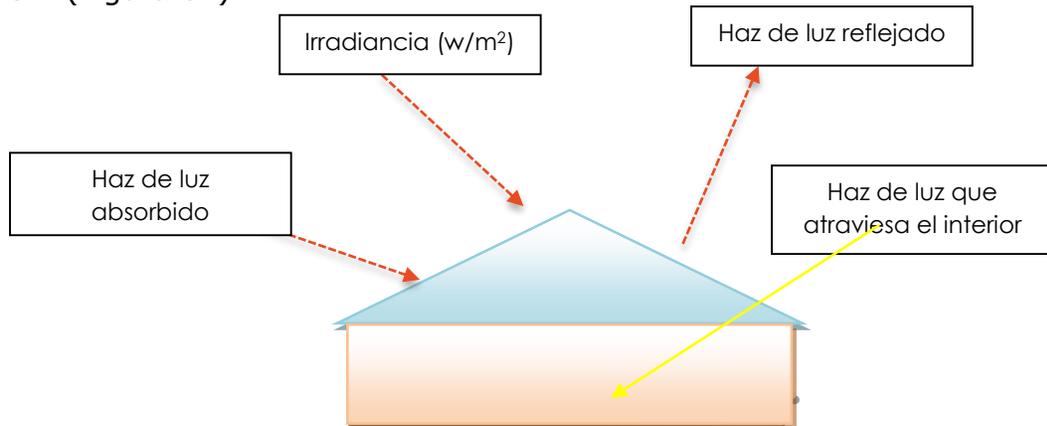


Figura 64: Haz de luz que llega al destilador solar de doble caseta. Una parte es reflejado, otra parte es absorbido y otra fracción atraviesa el destilador.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Una vez que el haz de luz es transmitido, este incide sobre la superficie absorbidora y se transforma en calor. Una parte del calor que se produce de esta forma es absorbido por el agua al evaporarse y otra parte se dirige hacia el fondo del colector. El vapor asciende hacia la cubierta de vidrio, de esta forma se da el proceso de condensación, con esta acción, se pierde el calor que se había ganado con la evaporación y se produce así el destilado.

En la cubierta se dan los siguientes procesos: calentamiento por el calor generado durante la condensación, también, se calienta debido a la convección natural que se genera dentro, y por la fracción de energía que se filtra por el haz de luz. Por otro lado, se enfría por las corrientes de aire externas.

Cuando la radiación solar incide sobre la caseta del destilador ocurren los fenómenos de reflexión, absorción y transmisión, a continuación se definen estos conceptos:

Reflectancia ( $\rho$ ): Es la fracción de la potencia incidente que es reflejada y depende tanto del material del que esté fabricada dicha cubierta así como del ángulo de incidencia de la radiación. En la medida que aumenta el ángulo de incidencia ( $i$ ), aumenta también la fracción reflejada hasta llegar a ser 1, al que se le llama ángulo de reflexión total. Para el caso del aire y agua la reflectancia es del 4%.

La importancia que tiene la reflectancia en el diseño de destiladores consiste en que por lo general, las superficies transparentes se construyen con un ángulo fijo que normalmente varía entre la latitud local y este valor más diez grados; estas inclinaciones optimizan en el ángulo de incidencia de la radiación.

En las cubiertas transparentes de los destiladores la radiación cambia de medio en dos ocasiones: aire-vidrio y vidrio-aire, por lo que habrá dos reflexiones. Para el propósito del presente trabajo, las cubiertas deberán ser lo suficientemente delgadas para que las dos radiaciones reflejadas sean consideradas como una sola.

La absorptancia ( $\alpha$ ), es la fracción de la energía recibida por la cubierta que es absorbida. Está en función de la naturaleza del material del medio transmisor, del grosor y de la longitud de onda de la radiación.

La transmitancia ( $\tau$ ), es la fracción de la potencia recibida que puede ser atravesada por la radiación electromagnética, depende de la naturaleza del material transmisor, del grosor del medio y de la longitud de onda de la radiación.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

Los fenómenos térmicos que se llevan a cabo en la destilación solar son:

### **a) Convección.**

Es la transmisión de calor por un cuerpo con desplazamiento de las moléculas. El calor fluye del emisor calentando el aire ambiente y, a medida que prosigue este calentamiento, disminuye el peso específico del mismo, haciéndose más ligero y ascendiendo. El natural empuje ascendente del aire origina un movimiento lento del mismo, calentando el local de manera uniforme.

Este movimiento puede ser realizado mediante métodos mecánicos externos (bombas, ventiladores, etc.) o bien como resultado de la diferencia de densidades que se produce en el fluido como consecuencia del aporte calorífico al cual está sometido. En el primer caso se habla de una convección forzada mientras que en el segundo caso, cuando no existe una ayuda para aumentar el movimiento del fluido, se hablara de convección libre.

En el caso específico de un destilador solar de agua se debe procurar maximizar esta propiedad, debido a que nos aumenta la cantidad de agua purificada obtenida diariamente.

La transferencia de calor por convección se modela con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf})$$

Donde  $h$  es el coeficiente de convección,  $A_s$  es el área del cuerpo en contacto con el fluido,  $T_s$  es la temperatura en la superficie del cuerpo y  $T_{inf}$  es la temperatura del fluido lejos del cuerpo. Si la temperatura  $T$  del cuerpo es mayor que la temperatura del medio ambiente ( $T_{a,r}$ ) el cuerpo pierde una cantidad de calor  $dQ$  en el intervalo de tiempo comprendido entre  $t$  y  $t+dt$ , disminuyendo su temperatura  $T$  en  $dT$ .

$$\frac{dQ}{dT} = mC$$

donde  $m = \rho V$  = la masa del cuerpo ( $\rho$  es la densidad y  $V$  es el volumen),  $C$  el calor específico.



### **b) Conducción.**

Es la transmisión de calor por un cuerpo sin desplazamiento de sus moléculas. Si un átomo vibra más intensamente que su átomo vecino como consecuencia de los impactos moleculares, cederá parte de ese movimiento al adyacente, intentando de esta forma que ambos se muevan al unísono. Esta transferencia de movimiento lleva implícito una transferencia de calor sin que en ningún momento haya habido transferencia de masa. La energía calorífica va transmitiéndose por contacto de molécula a molécula desde el extremo caliente al frío. Debe evitarse en todo lo posible que se presente la convección en un destilador solar de agua puesto que se perdería el calor ganado al transmitirse éste de un material a otro.

La fórmula que se usa para calcular la cantidad de calor por conducción es la ley de Fourier:

$$\frac{Q}{t} = \frac{(KA)}{\left[\frac{(T_1 - T_2)}{\Delta X}\right]}$$

$Q/t$  es la cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo o flujo de calor. Sus unidades son J/s. 1 J/s es igual a 1 W, por lo tanto, el flujo de calor es la potencia transmitida.

Para el caso de un destilador de agua, A es el área de la charola que contiene el agua a destilar (absorbedor). Las unidades del área en la fórmula son m<sup>2</sup>.

$T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas en °C.  $\Delta X$  es la longitud o el espesor, su unidad es el metro. K es la conductibilidad del material. Es un coeficiente que indica con qué rapidez se transmite el calor en cada material, por lo tanto es distinto para cada sustancia. Si K es grande, se trata de un objeto que es buen conductor del calor, por ejemplo, los metales.

Las unidades del coeficiente de conductibilidad térmica son W/m<sup>2</sup>C

### **c) Radiación.**

La radiación térmica es la radiación electromagnética que se produce en la superficie de los cuerpos como consecuencia de la excitación térmica a la que son sometidos. Cualquier cuerpo que esté caliente emite radiación. Mientras más caliente está, más radiación emite. La fórmula que modela el calor emitido por radiación está basada en la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$\frac{Q}{A_t} = \epsilon\sigma T^4$$



ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

$Q/(A t)$  es la cantidad de calor emitida por unidad de tiempo y por unidad de área. Se mide en  $W/m^2$ .

$$Q/t = J/s = W \qquad Q = W \qquad A = m^2$$

Por lo tanto, se tiene: potencia emitida/área. Epsilon ( $\epsilon$ ) es el coeficiente de emisividad. Su valor se puede encontrar entre cero y uno, nos permite darnos una idea de que tan buen emisor es el cuerpo, mientras más grande es  $\epsilon$ , mejor emite. Es decir, si el material es buen emisor, entonces,  $\epsilon$  tiende a uno; mientras que si es mal emisor,  $\epsilon$  tiende a cero.

- El valor de  $\sigma$  es  $5.67 \times 10^{-8} W/[(m^2)(K^4)]$
- $T_4$  es la temperatura en grados kelvin elevada a la cuarta potencia

En la Figura 68 se presentan los fenómenos hidro-termodinámicos que se llevan a cabo en la producción de agua destilada por medio de un destilador solar.

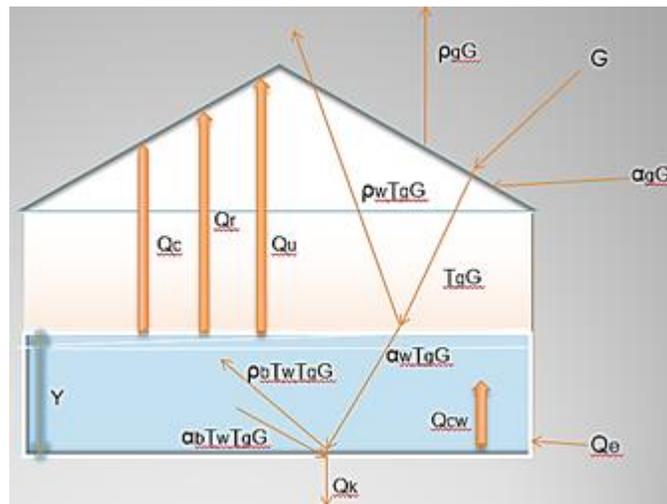


Figura 65: Procesos térmicos y ópticos que se llevan a cabo en un destilador solar de agua.



## ANEXO II. Glosario de términos.

---

**Altura Solar:** Es el ángulo que forman los rayos solares sobre la superficie horizontal.

**Azimutal ángulo:** Es el ángulo de giro del sol medio sobre el plano horizontal mediante la proyección del rayo sobre dicho plano y tomando como origen el sur.

**Ángulo de incidencia:** el ángulo de la radiación directa sobre la superficie y la normal a la superficie

**Ángulo horario:** el desplazamiento angular del sol hacia el este o el oeste del meridiano local, debido al movimiento de rotación de la tierra alrededor del eje

**Conducción:** Es la forma que transmite el calor en cuerpos sólidos, se calienta un cuerpo, las moléculas que reciben directamente el calor aumenta su vibración y chocan con las que rodean; estas a su vez hacen lo mismo con sus vecinas hasta que todas las moléculas del cuerpo se agitan

**Constante solar (Gsc):** Es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera.

**Convección:** Es el flujo de calor mediante corrientes dentro de un fluido (líquido o gaseoso). La convección es el desplazamiento de masas de algún líquido o gas.

**Declinación:** al ángulo que forma el astro con el ecuador celeste (proyección del ecuador terrestre en el espacio).

**Destilador Solar:** Un destilador solar es un dispositivo, que usa la energía del sol para purificar el agua.  
Eliminando microorganismos, sales, bacterias, e impurezas del agua, etc.

**Emitancia** es la densidad de flujo radiante emitido por una superficie

**Energía solar Fotovoltaica:** Es la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

**Energía solar térmica:** la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio.

**Humedad relativa:** Relación entre el vapor de agua que contiene el aire y la cantidad máxima que puede tener el aire saturado a la misma temperatura.

**Irradiancia difusa:** componente del flujo radiactivo solar que incide sobre una superficie unidad, cuya dirección de propagación ha sido modificada por dispersión en la atmósfera.

**Irradiancia directa:** componente del flujo radiactivo solar que incide sobre una superficie unidad y que no ha sido dispersada por la atmósfera.

**Latitud** es la distancia que hay desde un punto de la superficie terrestre al ecuador, contada por los grados de su meridiano.

**Piranómetro:**(también llamado solarímetro y actinómetro) es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (vatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados.

**Radiación:** Es la transferencia de calor por medio de ondas electromagnéticas. No se requiere de un medio para su propagación.

**Radiación Solar:** Cantidad de energía procedente del sol que se recibe en una superficie y tiempo determinados.

**Transmitancia:** es una magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo (potencia).

**Temperatura de Rocío:** Temperatura a la cual el vapor de agua comienza a condensarse en el ambiente. También llamada punto de rocío.

**Sol:** fuente de vida y calor, es además un excelente proveedor de energía y está en la base de todas las energías renovables, ya que el calor que genera es el responsable de las diferencias de presión que originan los vientos y el desencadenante del ciclo del agua por evaporación, al mismo tiempo que su luz es el factor principal del proceso de fotosíntesis originando los procesos de generación de biomasa.

**Balance energético:** Contabilidad de cantidades de energía intercambiadas por un sistema o en un proceso.

**Combustibles renovables y residuos.** Comprende la biomasa (madera, residuos vegetales, etanol, metanol), residuos municipales (producidos en los sectores residencial y de servicios, normalmente recogidos por servicios municipales) que pueden ser usados para la generación de calor y/o electricidad, previa su



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

selección y transformación en biogás; y residuos industriales, en particular los de procedencia agrícola y ganadera. No todos deben ser considerados renovables.

**Eficiencia:** En general, se entiende por eficiencia un concepto relacionado con la mejora del funcionamiento de un dispositivo, sistema o proceso. Una concreción del concepto se puede relacionar con el cociente entre el consumo de una variable relacionada con el objetivo que se pretende si este funcionara en las mejores condiciones (consumo teórico) y el realmente consumido en las circunstancias que se trata de analizar.

**Energía:** Propiedad de los cuerpos y sistemas que se manifiesta por su capacidad de realizar un cambio (de posición o de cualquier otro tipo).

**Entalpía:** Forma de energía asociada a la masa que tiene importancia en un fluido que circula por una tubería, un canal o cualquier otro dispositivo similar. Incluye la energía interna y la energía de flujo consecuencia del empuje que el fluido inmediatamente anterior al que estamos considerando ejerce para que siga en movimiento.

**Espectro solar:** Distribución espectral (función de la longitud de onda) de la radiación solar.

**Fuente de energía:** En sentido general, sistema o sustancia de donde se obtiene energía.

**Fuentes renovables de energía:** Formas de energía que se reproducen temporalmente con periodos fijos o variables. Se incluyen la solar, hidráulica, biomasa, eólica, de las mareas, de las olas, geotérmica, térmica y salina de los mares y océanos.

**Grado Celsius (°C).** Valor de la temperatura en la escala de temperatura del mismo nombre, con origen en el punto de fusión del agua (0°C) y con el valor 100 °C en el punto de evaporación también del agua. Al ser una escala centígrada (100 grados entre los puntos fijos principales) a veces se confunde grados Celsius con grados centígrados.

**Irradiación:** cantidad de radiación solar por unidad de superficie que llega a un plano. Se expresa en J/m<sup>2</sup> (julios dividido por metro cuadrado) o en kWh/m<sup>2</sup>.



## ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE DOBLE CASETA CON CONVECCIÓN FORZADA.

**Irradiancia:** Cantidad de radiación solar por unidad de superficie y de tiempo que llega a un plano. Se expresa en  $W/m^2$  (vatios divididos por metro cuadrado). Puede ser directa, difusa o reflejada.

**Plantas de energías renovables:** Instalaciones que emplean como energía de entrada cualquier forma de energía renovable.

**Radiación:** Forma de transmisión de energía sin intervención de materia. Esta forma de energía la producen y absorben todos los cuerpos. Se puede entender como campos electromagnéticos que se desplazan a la velocidad de la luz.

**Radiación solar:** Radiación producida por el sol con una temperatura equivalente a 5777 K y que llega al exterior de la Tierra con una intensidad de  $1367 W/m^2$ .

**Radiación solar sobre una superficie.** Radiación solar global que incide en una determinada superficie situada en la Tierra, sea fija o en movimiento, en un determinado periodo de tiempo. Su intensidad (irradiancia) máxima es del orden de  $1000 W/m^2$ .

**Radiación solar directa sobre una superficie.** Componente de la radiación solar global que incide directamente desde el sol (no es reflejada ni difundida por ningún componente atmosférico) en una determinada superficie situada en la Tierra, sea fija o en movimiento. Su intensidad (irradiancia directa) máxima es del orden de  $1000 W/m^2$ . Las otras componentes de la radiación solar global son la difusa (que es la difundida por los componentes atmosféricos) y la de albedo (la reflejada por una superficie terrestre, como el suelo o pared) y que llega a la superficie objeto.

**Rendimiento:** Cociente entre lo que se extrae de un dispositivo, sistema o proceso y lo que se aporta. Normalmente es menor que 1 pero, en el ámbito energético puede ser mayor que 1 cuando la energía que se aporta tiene mayor calidad energética que la que se obtiene.

**Termodinámica:** Rama de la Física y de la Química que se ocupa de la energía. Se puede decir que es la Ciencia de la Energía. Se originó en la Química y en la Ingeniería.