



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE DESTILADORES SOLARES DE
AGUA DE ALTO RENDIMIENTO”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

P R E S E N T A

M. EN I. AARÓN CARO GUZMÁN

COMITÉ DE TUTORES

DR. IVÁN GALILEO MARTÍNEZ CIENFUEGOS

DRA. MARÍA DOLORES DURÁN GARCÍA

DRA. IVONNE LINARES HERNÁNDEZ



FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

TOLUCA, MÉXICO, ENERO DE 2020

Resumen

El consumo de agua para la supervivencia, es una necesidad indispensable. El uso de energía solar es una solución posible para la producción de agua destilada, en regiones de alta insolación, principalmente en zonas rurales donde el acceso al agua es limitado. Es por ello que en la presente tesis se diseñaron, construyeron y evaluaron tres destiladores solares de agua, integrados con un concentrador parabólico compuesto (CPC), con el fin de optimizar la productividad.

Los destiladores fueron diseñados con un absorbedor tubular circular, al cual se le manufacturó una abertura para lograr la salida de vapor. El absorbedor fue cubierto mediante un tubo de vidrio en donde se produce la condensación. Para determinar la viabilidad de una bomba de vacío, se probaron 2 prototipos con la misma configuración geométrica, en uno se implementó la bomba de vacío y el otro se dejó sin bomba.

Para validar el modelo térmico, se analizaron los coeficientes convectivos en fase líquida y vapor, para lo cual fue necesario realizar mediciones de temperatura en distintas partes del sistema y a diferentes condiciones de irradiancia. Las zonas en donde se midieron las temperaturas fueron en el absorbedor, en la cubierta de vidrio, en el ambiente y en el agua al interior del absorbedor.

Una vez optimizada la geometría del absorbedor, ésta fue utilizada para construir un tercer destilador, con una configuración geométrica distinta del concentrador parabólico compuesto, y así de validar la optimización del índice de concentración y de éste modo definir el mejor diseño mediante un análisis costo-beneficio.

Con base en pruebas y mediciones obtenidas, se realizó un análisis probabilístico con la finalidad de predecir en qué sitios de la costa mexicana tendría un mejor desempeño y aplicabilidad el destilador solar. Y finalmente se llevaron a cabo estudios fisicoquímicos para verificar que el agua destilada se apegue a la normatividad oficial y cumpla con la calidad para consumo humano.

Abstract

Water consumption for survival is an indispensable necessity. The use of solar energy is a possible solution for the production of distilled water, in regions of high irradiation, mainly in rural areas where access to water is limited. That's why in this thesis three solar water distillers were designed, built and evaluated, integrated with a compound parabolic concentrator (CPC), in order to optimize productivity.

The distillers were made with a circular tubular absorber, to which an opening was made to achieve steam output. The absorber was covered by a glass tube where condensation occurs. To determine the viability of a vacuum pump, test 2 prototypes with the same geometric configuration, one is the vacuum pump and the other is left without a pump.

To validate the thermal model, the convective coefficients in liquid and vapor phase were analyzed, for which it was necessary to perform temperature measurements in different parts of the system and at different irradiance conditions. The zones where the temperatures were measured were in the absorber, in the glass cover, in the environment and in the water inside the absorber.

Once the geometry of the absorber was optimized, it was used to construct a third distiller, with a different geometric configuration of the compound parabolic concentrator, in order to validate the optimization of the concentration index and thus define the best design through a cost analysis -benefit.

Based on tests and measurements obtained, a probabilistic analysis was carried out in order to predict in which places on the Mexican coast the solar distiller would have a better performance and applicability. And finally physicochemical studies were carried out to verify that distilled water adheres to official regulations and complies with quality for human consumption.

Contenido

Introducción	1
CAPÍTULO 1	3
Antecedentes de la destilación solar	3
1.1. Clasificación y funcionamiento de los destiladores solares	5
1.2. Concentración solar	12
1.3. Estado del arte	21
1.4. Normatividad	23
CAPÍTULO 2	29
Descripción del proyecto	29
2.1. Planteamiento del problema.....	31
2.2. Justificación científica y contextual.....	31
2.3. Hipótesis.....	34
2.4. Objetivos	34
CAPÍTULO 3	36
Metodología	36
3.1. Consideraciones.....	38
3.2. Diseño	38
3.2.1. Identificación de los requerimientos	39
3.2.2. Caracterización del diseño	40
3.2.2.1. Geometría del diseño.....	41
3.2.2.2. Análisis energético y de transferencia de calor	48
3.2.3. Optimización del diseño.....	63
3.2.3.1. Optimización de materiales.....	63
3.2.3.2. Optimización geométrica.....	66
CAPÍTULO 4	76
Resultados y análisis económico	76
4.1. Validación del modelo térmico.....	76
4.2. Análisis económico.....	91
4.3. Estudio fisicoquímico.....	96
Conclusiones	102
Trabajos futuros	104
Bibliografía	105
ANEXO 1. Mediciones de variables ambientales	112
ANEXO 2. Panorama global de los destiladores solares	116

Índice de Figuras

Figura 1. Destilador solar de una vertiente.	7
Figura 2. Destilador solar de dos vertientes.	8
Figura 3. Destilador solar de invernadero.	9
Figura 4. Destilador solar de cascada.	10
Figura 5. Destilador solar esférico de barredera.	11
Figura 6. Procesos de destilación multiefecto (MED).	12
Figura 7. Reflexión en una parábola.	13
Figura 8. Esquema básico de captador.	14
Figura 9. Esquema básico de captador plano para agua.	17
Figura 10. Esquema básico de captador plano para aire.	17
Figura 11. Tubos de vacío.	18
Figura 12. Esquema de un CPC.	20
Figura 13. Índice de estrés hídrico para la república mexicana.	33
Figura 14. Diagrama de flujo de destilador solar.	37
Figura 15. Perfil esquemático del destilador solar.	41
Figura 16. Perfil de incidencia angular de los rayos solares.	43
Figura 17. Esquema de pérdidas energéticas.	44
Figura 18. Factor de forma de un CPC.	47
Figura 19. Sección transversal de destilador solar.	49
Figura 20. Modelo de resistencia térmica para el destilador solar.	49
Figura 21. Cilindros no concéntricos.	56
Figura 22. Perfil CPC, $C=1$.	64
Figura 23. Perfil CPC, $C=2$.	64
Figura 24. Energía en el CPC para solsticio de invierno y $KT = 0.2$.	68
Figura 25. Energía en el CPC para solsticio de invierno y $KT = 0.5$.	69
Figura 26. Energía en el CPC para solsticio de invierno y $KT = 0.8$.	69
Figura 27. Energía en el CPC para solsticio de verano y $KT = 0.2$.	70
Figura 28. Energía en el CPC para solsticio de verano y $KT = 0.5$.	70
Figura 29. Energía en el CPC para solsticio de verano y $KT = 0.8$.	71
Figura 30. Eficiencia del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .	72
Figura 31. Temperatura del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .	72
Figura 32. Eficiencia del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .	73
Figura 33. Temperatura del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .	73
Figura 34. Eficiencia del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .	74
Figura 35. Temperatura del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .	74
Figura 36. Comparativo en temperatura del vidrio.	79
Figura 37. Esquema de curva de eficiencia de un captador solar.	80
Figura 38. Curva de eficiencia del destilador solar.	81
Figura 39. Distribución de probabilidad acumulativa para la radiación de Toluca.	83
Figura 40. Matriz de correlaciones del rango neto de la red Bayesiana.	86
Figura 41. Regresión lineal de la productividad en función de la radiación.	86
Figura 42. Distribución acumulativa de probabilidad de producción en Toluca.	87
Figura 43. Producción promedio estimada para la costa mexicana.	90
Figura 44. Producción máxima estimada para la costa mexicana.	91
Figura 45. Sistema de destilación con bomba de vacío.	92
Figura 46. Productividad con y sin bomba de vacío.	93

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Tipos de captadores, concentración, temperatura y seguimiento.</i>	19
<i>Tabla 2. Producción y costo-beneficio de los distintos tipos de destiladores.</i>	21
<i>Tabla 3. Límites permisibles de características microbiológicas.</i>	24
<i>Tabla 4. Límites permisibles de características físicas y organolépticas.</i>	24
<i>Tabla 5. Límites permisibles de características químicas.</i>	25
<i>Tabla 6. Tabla de cumplimiento gradual.</i>	27
<i>Tabla 7. Límites permisibles de características radiactivas.</i>	28
<i>Tabla 8. Metodologías actuales para el diseño del producto.</i>	37
<i>Tabla 9. Ruta de los flujos de calor.</i>	50
<i>Tabla 10. Longitud característica para distintas longitudes de abertura.</i>	57
<i>Tabla 11. Costo de destilador solar (C=1).</i>	65
<i>Tabla 12. Ángulo de aceptación con respecto a la concentración geométrica.</i>	67
<i>Tabla 13. Resultados experimentales de destilación de agua de mar.</i>	77
<i>Tabla 14. Parámetros determinados mediante el modelo de Kumar.</i>	77
<i>Tabla 15. Parámetros determinados mediante el modelo de Rahbar.</i>	78
<i>Tabla 16. Productividad para destiladores con C=1 y C=2.</i>	79
<i>Tabla 17. Coordenadas geográficas de diferentes ubicaciones en la costa mexicana.</i>	87
<i>Tabla 18. Incremento en productividad con bomba de vacío.</i>	93
<i>Tabla 19. Costo por litro de agua destilada.</i>	95
<i>Tabla 20. Comparativo de costo por litro mediante destiladores solares.</i>	95
<i>Tabla 21. Resultados de muestra de agua de mar.</i>	96
<i>Tabla 22. Resultados de indicadores de corrosividad.</i>	99
<i>Tabla 23. Estudio fisicoquímico antes y después de la destilación.</i>	100

Nomenclatura

α_{abs}	Absortancia del tubo absorbedor
α_{vid}	Absortancia del vidrio
h_p	Altura de la parábola
θ_o	Ángulo de aceptación
β	Ángulo de error
θ	Ángulo de incidencia
t	Ángulo de proyección de la parábola
W_a	Apertura del concentrador
$A_{apertura}$	Área de captación
$A_{ext-abs}$	Área de la superficie exterior del absorbedor
$A_{int-vid}$	Área de la superficie interior del vidrio
A_s	Área de sombreado
A_{abs}	Área del absorbedor tomando en cuenta su diámetro exterior
q_{req}	Calor requerido para evaporar un litro de agua
Q_u	Calor útil
$h_{convabs-vid}$	Coefficiente de convección del absorbedor hacia la cubierta de vidrio
$h_{convvid-amb}$	Coefficiente de convección del vidrio hacia el exterior
β	Coefficiente de expansión volumétrica
$h_{radabs-vid}$	Coefficiente de radiación del absorbedor hacia la cubierta de vidrio
$h_{radvid-amb}$	Coefficiente de radiación del vidrio hacia el exterior
h_{ev}	Coefficiente evaporativo
U_L	Coefficiente global de pérdidas
$q_{condabs}$	Conducción del exterior hacia el interior del absorbedor
$q_{condvid}$	Conducción del interior hacia el exterior del vidrio
k_{ef}	Conductividad efectiva
k	Conductividad térmica
k_{abs}	Conductividad térmica del absorbedor
k_{aire}	Conductividad térmica del aire
g	Constante gravitacional
$q_{convagua}$	Convección del absorbedor al fluido de trabajo
$q_{convabs}$	Convección del absorbedor hacia el vidrio
$q_{convvid}$	Convección del vidrio hacia el ambiente
CPL	Costo por litro
$\rho_{aire húmedo}$	Densidad del aire húmedo
δ_r	Desplazamiento del receptor del foco de la parábola
σ^*	Desviación estándar
$D_{ext-abs}$	Diámetro exterior del absorbedor
ΔT	Diferencia de temperaturas
Δr	Diferencia entre radio exterior e interior
f	Distancia focal
η	Eficiencia
η_o	Eficiencia óptica
ε_{abs}	Emisividad del absorbedor
ε_{vid}	Emisividad del vidrio

$q_{ev_{agua}}$	Evaporación del absorbedor hacia el vidrio
E	Excentricidad
F'	Factor de eficiencia del captador
$F_{conc-abs}$	Factor de forma del concentrador
γ	Factor de intercepción del captador
$F_S \cos \theta$	Factor de sombreado
F_{cil}	Factor geométrico de la superficie anular
erf	Función de error gaussiana
$O\&M$	Gastos de operación y mantenimiento
DAG	Gráficos acíclicos dirigidos
IA	Índice de agresividad
K_T	Índice de claridad
C	Índice de concentración
IR	Índice de Ryznar
ISL	Índice de saturación de Langelier
I_i	Inversión inicial
IT	Inversión total
I_{CPC}	Irradiación aprovechable por el CPC
H	Irradiación diaria
I_D	Irradiación obtenida a partir de la radiación difusa
I_B	Irradiación obtenida a partir de la radiación directa
G	Irradiancia
q_{CPC}	Irradiancia reflejada por el CPC
$q_{sol_{abs}}$	Irradiancia solar incidente en el absorbedor
$q_{sol_{CPC}}$	Irradiancia solar incidente en el CPC
$q_{sol_{vid}}$	Irradiancia solar incidente en el vidrio
$q_{CPC_{abs}}$	Irradiancia solar reflejada por el CPC
$q_{CPC_{vid}}$	Irradiancia solar reflejada por el CPC
\bar{L}_C	Longitud característica
t_{abe}	Longitud del ancho de la abertura en el absorbedor
l	Longitud del captador
L_n	Longitud desde el punto de truncamiento del CPC hasta el punto inferior tangente del absorbedor
L_c	Longitud desde el punto de truncamiento del CPC hasta el punto superior tangente del absorbedor
Gr	Número de Grashof
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Ra	Número de Rayleigh
β^*	Parámetro de error no aleatorio universal debido a errores angulares
d^*	Parámetro de error no aleatorio universal debido a la mala ubicación del receptor y errores de perfil del reflector
$P_{sat-agua}$	Presión de saturación del vapor a la temperatura del agua
$P_{sat-vid}$	Presión de saturación del vapor a la temperatura del vidrio
PT	Producción total
$q_{rad_{abs}}$	Radiación del absorbedor hacia el vidrio
$q_{rad_{vid}}$	Radiación del vidrio hacia el ambiente

<i>R</i>	Radio del absorbedor
<i>r_{ext-abs}</i>	Radio exterior del absorbedor
<i>r_{int-vid}</i>	Radio interior del vidrio
<i>BN</i>	Redes bayesianas
<i>NPBN</i>	Redes bayesianas no paramétricas
<i>ρ_{CPC}</i>	Reflectividad del concentrador
<i>R_{ter}</i>	Resistencia térmica
<i>TDS</i>	Sólidos disueltos totales
<i>T_{amb}</i>	Temperatura ambiente
<i>T_{agua}</i>	Temperatura del agua en el interior del absorbedor
<i>T_{ext-vid}</i>	Temperatura en la superficie exterior de la cubierta de vidrio
<i>T_{ext-abs}</i>	Temperatura en la superficie exterior del absorbedor
<i>T_{int-vid}</i>	Temperatura en la superficie interior de la cubierta de vidrio
<i>τ_{vid}</i>	Transmitancia del vidrio
<i>S</i>	Valor de salvamento
<i>v</i>	Viscosidad cinemática
<i>μ_{aire húmedo}</i>	Viscosidad dinámica del aire húmedo
<i>V</i>	Volumen

Introducción

El abastecimiento de agua contribuye de manera importante al desarrollo económico y social de un país. Es una necesidad básica para: uso doméstico, en la industria, en la agricultura, en la construcción, en la seguridad y para contribuir a un ambiente sano. Aunque los beneficios en la salud debido al mejoramiento en el abastecimiento de agua y la eliminación de residuos son difíciles de aislar y prácticamente imposibles de medir, sin embargo, es cierto que la propia agua contaminada es responsable de la mayor parte de las enfermedades del tercer mundo.

El crecimiento demográfico requiere mayor demanda de agua para cubrir las necesidades básicas para el ser humano, lo cual hace indispensable desarrollar técnicas para la obtención de éste líquido, que no está distribuido equitativamente. El agua para que sea potable debe ser libre de materia orgánica, coliformes fecales y bacterias (OMS, 2006). El consumo de agua para la supervivencia, es una necesidad indispensable.

El uso de energía solar es una solución posible para la producción de agua destilada, en regiones de alta insolación, principalmente en zonas rurales. La destilación de agua utilizando la radiación solar, es una técnica ya desarrollada (Hima Bindu, y otros, 2014), con ventajas económicas y ambientales, ya que comprar agua purificada embotellada, incluye costos de transportación, entre otros, y destilar agua empleando un combustible fósil, también acarrea un costo y un impacto ambiental.

Los destiladores solares permiten obtener agua para consumo humano (El-Sebaili & El-Bialy, 2015). En esencia se trata de reproducir a pequeña escala y de manera acelerada el ciclo natural del agua. Los principios de la destilación solar pueden ser aplicados en distintas escalas; desde destiladores pequeños domésticos para

obtener unos cuantos litros de agua al día hasta grandes instalaciones con los que se puede obtener varios metros cúbicos diarios (Ayoub & Malaeb, 2012).

Los sistemas solares de desalinización son clasificados en dos principales categorías: sistemas directos e indirectos. Como su nombre lo dice, en los sistemas directos, la captación de la energía solar y la destilación se realizan en el mismo dispositivo, mientras que en los sistemas indirectos, se emplea un subsistema para captar la radiación solar y otro para desalinizar. Los sistemas directos requieren grandes cantidades de superficie comparados con los sistemas indirectos y relativamente tienen una más baja productividad, sin embargo en pequeña escala son competitivos debido a su bajo costo y simplicidad. Por lo que tienen aplicación en regiones donde la demanda de agua es baja, menor a 200 m³ según lo indica (Naim, Mervat, & El-Kawi, 2003).

En este sentido el proyecto de investigación planteó mejorar la productividad de agua destilada, al integrar un concentrador parabólico compuesto al destilador, para lo cual se diseñó la geometría considerando un absorbedor tubular.

Para el balance térmico se aplicaron herramientas de análisis de transferencia de calor que permitieron la cuantificación de coeficientes de conductividad, radiativos y de convektividad térmica de los fluidos involucrados, que a su vez permitió generar la curva de rendimiento del destilador solar de agua.

Adicionalmente se generaron mapas de productividad a lo largo de la costa de la república mexicana mediante un análisis probabilístico, empleando matriz de correlación entre las variables meteorológicas.

Finalmente se determinó la viabilidad del dispositivo mediante un análisis costo-beneficio y se verificó que el producto destilado cumpliera con la NOM-127 que establece los límites permisibles para que la calidad de agua se apta para consumo humano.

CAPÍTULO 1

Antecedentes de la destilación solar

El periodo de la energía solar aplicada a la destilación empezó en 1872, cuando el ingeniero sueco Carlos Wilson instaló un gran destilador de caseta en Las Salinas, en el desierto del norte de Chile, una de las regiones más asoleadas de la Tierra. Esta instalación, que por lo visto contaba con 4 700 m² de área efectiva de captación de energía solar, dio servicio durante muchos años a una comunidad minera que extraía nitratos en el sitio (Harding, 1883). El aparato constaba de varias hileras de destiladores, de 1.41 m de ancho por 61 m de largo, fabricados sobre bases y bastidores de madera. En él se utilizaron tintes orgánicos de madera y alumbre para ennegrecer la superficie absorbidora y protegerla de la corrosión. Dado que usaba agua salubre con 140 000 ppm de sólidos totales, el arreglo hidráulico para el purgado oportuno de la salmuera era de primordial importancia.

En 1952 la Universidad de California decidió que la energía solar debería ser estudiada cada vez con más intensidad. Esta decisión se apoyó en estudios que demostraban que los sistemas de destilación de etapas múltiples movidos por diesel, ya en boga desde entonces, requerían fuertes cantidades de energía convencional (Strum, 1984).

Para 1960, era claro que la estructura económica del panorama energético de entonces implicaba que el tradicional destilador solar de caseta, en cualquiera de sus formas, no podría competir económicamente con los ventajosos destiladores de energía convencional (Fernández & Chargoy, 1992). Así, desde esos años, las investigaciones relacionadas con destilación solar han sido cada vez menos intensas, casi siempre con énfasis en el abastecimiento de agua potable para áreas residenciales remotas y para pequeñas comunidades rurales. Una instalación, en Patmos Grecia, llegó a producir hasta 40 m³ de agua al día, con algo así como 8 600 m² de área de captación, en casetas, por lo que era posiblemente la más grande del mundo en su tipo (Howe & Tleimat, 1974). En todo caso, hacia principios de la

década de los setentas era claro que, para producir agua en cantidades relevantes, esto es, del orden de los 4 000 m³/día y mayores, varios métodos eran más económicos que el solar.

La mayor parte de las investigaciones del mundo en este tema se suspendieron a más tardar en 1970 (Howe & Tleimat, 1977). El único país industrializado que continuó las investigaciones con este fin fue Australia. Se hicieron notables avances tanto en la comprensión fundamental de los procesos físicos presentes en la destilación solar como en la conceptualización y análisis de ingeniosos y novedosos diseños. A la fecha, el programa australiano sigue dedicado a la solución de la carencia de agua en regiones áridas de ese país, mediante dispositivos de pequeña y mediana escala (Dunkle, 1961). En algunos países con carencia de agua se han realizado algunas experiencias, sin un programa consistente de desarrollo, utilizando tecnología importada. Un ejemplo es la planta de Abu Dhabi, que surte 80 m³/día promedio, instalada con asesoría y tecnología japonesas, esta planta opera bajo el principio de destilación indirecta en etapas múltiples con el propósito de reusar el calor solar (Fernández & Chargoy, 1992).

En México la destilación solar se ha desarrollado en proyectos de investigación de instituciones educativas y de forma aislada en algunos proyectos para proveer agua potable a comunidades costeras aplicando destilación indirecta (Aguilar Arguelles, 2011). De estos últimos resalta el realizado en La Paz, Baja California Sur, dicha instalación producía alrededor de 20 m³ por medio de captadores cilíndrico-parabólicos. Otra instalación importante se llevó a cabo en Puerto Chale, B.C.S., para proveer de agua potable a esta comunidad pesquera. También destaca la planta construida en Puerto Lobos, Sonora, con el mismo propósito que la anterior. En la investigación los avances realizados en destiladores de canal largo y destiladores indirectos por la UNAM en conjunto con la UABCS y el I.T. de La Paz, así como el desarrollo de diversos prototipos de destiladores tipo caseta y de otros tipos destacan los trabajos realizados en el ITESO y el CINVESTAV-Mérida.

Una de las ventajas de los destiladores de gran tamaño es que el mantenimiento es más barato, porque los materiales de construcción, accesos y dimensiones son más manejables. En la comunidad de Puerto Lobos, Sonora, se encuentra una planta destiladora de agua de mar formado por 480 m² de destiladores solares con una producción de agua destilada de 1500 litros por día. (Cabanillas & J. Montaña, 1995)

En cuanto a los destiladores de pequeña escala, en la actualidad hay varios tipos de destiladores solares (Saidur, Elcewadi, Mekhilef, Safari, & Mohammed, 2011), unos más sofisticados que otros; los de tipo caseta son los más usados, debido a su fácil construcción y bajo costo.

1.1. Clasificación y funcionamiento de los destiladores solares

La desalinización, es un proceso de separación que busca la eliminación de sales que contiene el agua. La clasificación de los procesos de desalinización que existen actualmente se divide en dos grupos, aquellos procesos que realizan un cambio de fase para la obtención de agua pura y aquellos procesos que funcionan sin cambio de fase.

Entre los procesos que implican un cambio de fase se encuentran los siguientes:

- Destilación solar
- Destilación en múltiple efecto
- Congelación
- Compresión de vapor

Los procesos que no incluyen un cambio de fase se dividen en:

- Ósmosis inversa
- Electrodialisis

El presente trabajo está enfocado a los destiladores solares, los cuales son dispositivos que permiten obtener agua para consumo humano. A pesar de que hay distintas configuraciones que determinan que estos tengan una mayor o menor eficiencia, los destiladores solares operan por el mismo principio, el cual se basa en evaporar el agua salobre, condensar dicho vapor y recogerlo. Este proceso separa las sales, residuos, bacterias y demás contaminantes, obteniendo agua que es apta para consumo humano. Los destiladores solares solo pueden separar ciertos contaminantes, por lo que no son adecuados para purificar aguas negras ni residuos industriales.

Los destiladores solares se pueden clasificar en sistemas térmicos directos e indirectos. En el directo el destilado se realiza en el captador solar, mientras que el indirecto está compuesto por dos subsistemas, uno para la captación de energía solar y otro para efectuar la desalación. Así podemos encontrar los siguientes modelos de destiladores (Sitiosolar, 2013):

a) Destilador solar de una vertiente o tipo caseta.

Es quizá el modelo de destilador más sencillo de estructura. Se trata de una caja cubierta por un cristal inclinado. La caja está dividida en dos compartimentos: uno con el fondo de color negro donde se coloca el agua a evaporar y que ocupa la mayor parte de la caja y el otro el receptáculo donde se recoge el agua destilada y que se encuentra en el lado de menor altura. La charola utilizada como depósito de agua salada puede ser recubierta con algunos tipos de óxidos, tales como el de cobre, cromo y níquel. Mediante un recubrimiento electrolítico y su posterior oxidación, para dar un color negro y tener una mayor absorción de radiación solar. (Oliva, y otros, 2006). Algunos fabricantes los denominan “células solares destiladoras” ya que algunos tienen la posibilidad de interconectarse entre sí para ampliar la instalación de manera modular.

El destilador posee además una cubierta cuadrangular transparente de vidrio, cuyas dimensiones son variadas, con un grosor de entre 3 y 5 mm., colocada con una determinada inclinación (de 15° a 30°) respecto de las paredes del destilador. Esta inclinación debe ser tal que permita fluir hasta el captador a la totalidad del condensado, sin que nada caiga dentro del compartimiento. (Marchesi, Ducculi, Adaro, & Fasulo, 2006) . En la Figura 1 se muestra un destilador solar de una vertiente en funcionamiento, con una inclinación de 21° en Córdoba, Argentina.



Figura 1. Destilador solar de una vertiente.
(Marchesi, Ducculi, Adaro, & Fasulo, 2006)

b) Destilador solar de dos vertientes.

El siguiente en complejidad estructural. Este modelo consta de un “tejado” de material transparente de dos vertientes. Las gotas de agua que se han condensado en el panel transparente se deslizan por los lados y precipitan a un depósito situado bajo la bandeja donde se dispone el agua para destilar. Desde el depósito de almacenamiento se extrae el agua por medio de un grifo.

En este modelo la captación de energía solar es en principio más eficiente que en el modelo anterior ya que no existen paredes que puedan proyectar sombras al interior de la caja. En la Figura 2 se muestra un destilador solar de dos vertientes

con cubiertas de vidrio de 5 mm colocadas a 45° respecto a la horizontal. (Rubio Cerda E. , 2005).

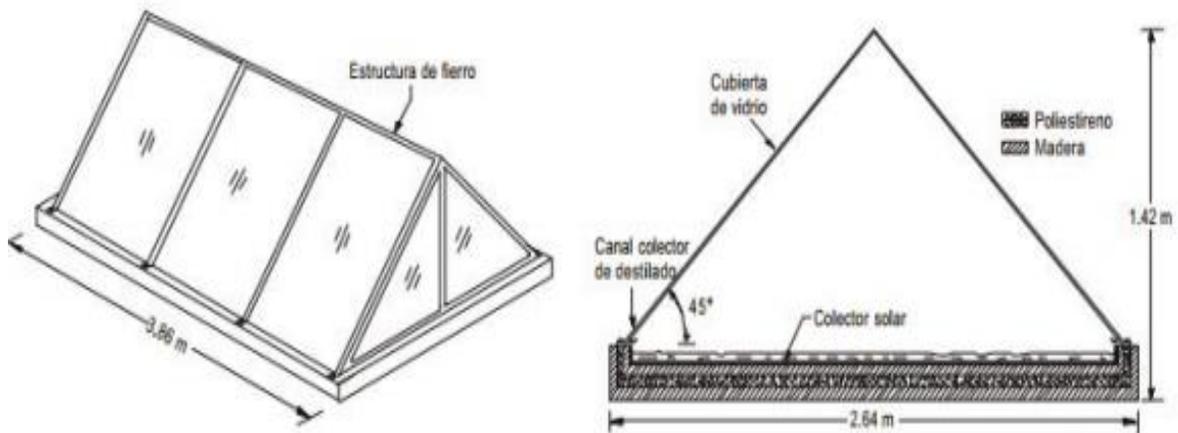


Figura 2. Destilador solar de dos vertientes.

(Rubio Cerda E. , 2005).

c) Destilador solar de invernadero.

Este es un modelo de destilador solar de gran tamaño. Se trata de estructuras de invernaderos que en su interior albergan un estanque de agua de poca profundidad y con el fondo de color negro. El agua evaporada se condensa en las paredes del invernadero y se desliza hacia los receptáculos situados en la base de las paredes. En esencia es el mismo modelo que el destilador solar de dos vertientes pero de grandes proporciones. En la Figura 3 se muestra un destilador solar de tipo invernadero con cubierta de vidrio y un ángulo de 20°. (Pocaterra, 2002).

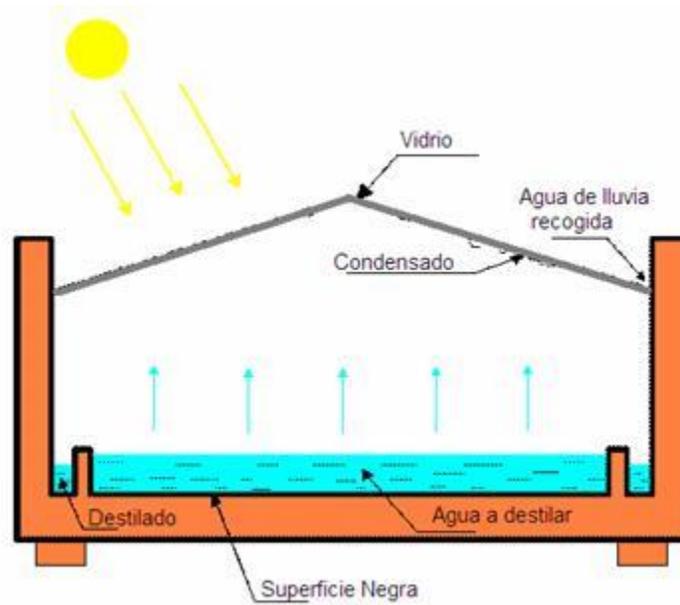


Figura 3. Destilador solar de invernadero.

(Pocaterra, 2002).

d) Destilador solar de cascada.

Modelo de destilador en forma de 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 nombre de cascada le viene dado por los momentos en los que se repone agua para destilar o en los que se efectúan labores de limpieza. En estos procesos se deja correr el agua desde una cañería en la parte superior provocando el efecto cascada conforme esta se desliza por las terrazas. En la base del destilador hay un desagüe para recoger la salmuera u otros residuos dejados por el agua al evaporarse. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del destilador solar de cascada. (Zarza Moya , 1995).

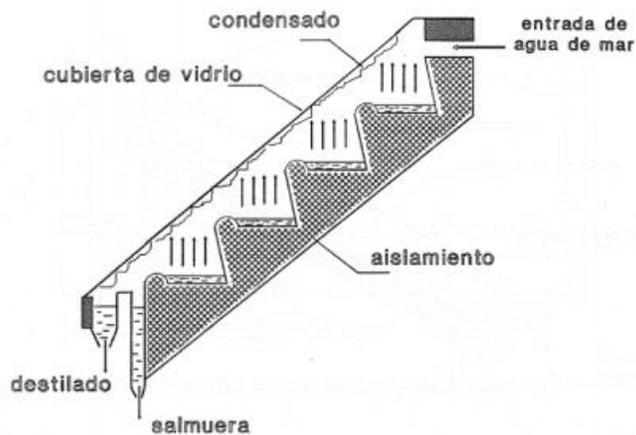


Figura 4. Destilador solar de cascada.

(Zarza Moya , 1995).

e) Destilador solar esférico de barredera.

La particularidad de este modelo se basa en la forma esférica del material transparente así como en la introducción de una barredera que lame 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. Éste modelo tiene forma esférica buscando 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 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. Con el sistema de barredera se evita que las gotas reflejen la radiación solar y se permite que el agua en estado gaseoso se condense con mayor facilidad en las paredes. Estos factores aumentan el rendimiento del equipo si bien como contrapartida se tiene que es necesario suministrarle energía eléctrica para hacer posible el movimiento de la barredera (Sitiosolar, 2013).

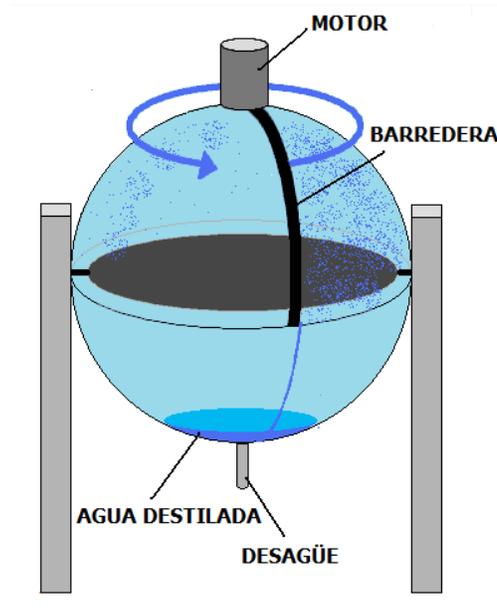


Figura 5. Destilador solar esférico de barrera.

(Sitiosolar, 2013).

f) Destilador solar multietapa.

Este es un modelo más complejo y eficiente que emplea sistemas de captadores solares complejos, concentradores parabólicos, tubos de vacío, e incluso sistemas de placa plana de alta eficiencia para alcanzar altas temperaturas y llevar al punto de ebullición al agua. El vapor de agua se condensa con ayuda de un refrigerante y el calor se recupera y se almacena en depósitos. Este sistema requiere ya de inversiones importantes. (CETENMA, 2008).

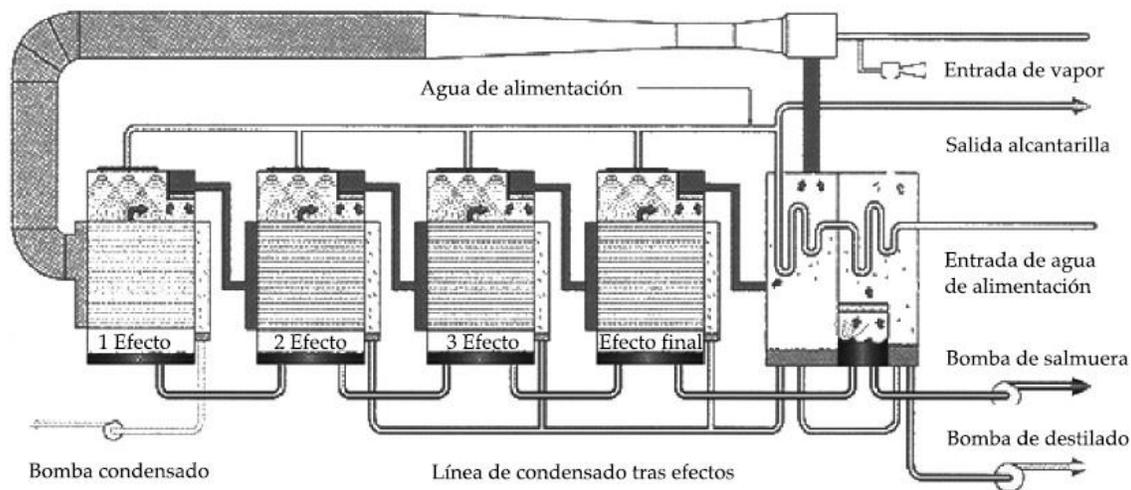


Figura 6. Procesos de destilación multiefecto (MED).

(CETENMA, 2008).

1.2. Concentración solar

La radiación solar que llega al límite externo de la atmósfera es de 1361 W/m^2 . Sobre la superficie terrestre, en regiones de baja latitud y alta transparencia de la atmósfera pueden llegar, a mediodía, hasta poco más de 1000 W/m^2 . (Wyszecki, 1982). Ésta densidad de energía permite aplicaciones térmicas de la energía solar de baja temperatura, tales como los captadores solares planos o los cultivos bajo cubierta.

Cuando se necesitan temperaturas medias de más de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ y altas de hasta varios miles de grados, se necesita concentrar la radiación solar. Algunas aplicaciones son la generación de energía eléctrica, los hornos solares para aplicaciones metalúrgicas o las cocinas solares de concentrador.

Para concentrar la radiación, es decir, obtener intensidades mayores por unidad de superficie, se debe recurrir a concentradores de la radiación solar. La concentración se logra mediante superficies reflectantes, por ejemplo con perfil parabólico. Esto se debe a una propiedad de la parábola, y es que el ángulo formado por la tangente en cualquier punto de la parábola con la recta paralela al eje de la parábola en ese

punto, es igual al formado por dicha tangente con la recta que une el punto de tangencia con el foco de la parábola. Si la parábola o superficie parabólica es reflectante y la recta paralela al eje es un rayo de luz, este se reflejará siempre con un rayo que pase por el foco. (Waldman, 1983). Representado en la figura 7.

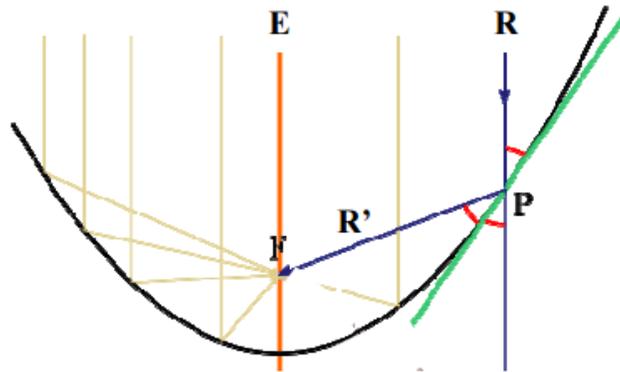


Figura 7. Reflexión en una parábola.

(Waldman, 1983).

Así, el rayo que ingrese paralelo al eje E de la parábola, tal como el R, se reflejara en el punto P con R' que pasa por el foco F. Cualquier otro rayo, como los representados con color claro, se reflejarán pasando siempre por F. En la práctica, F no es un punto, ya que el sol tiene un tamaño aparente, su imagen no es puntual, por lo que en torno al punto F aparece una zona de muy alta densidad, llamada entorno focal.

De forma genérica, como se muestra en la figura 8, un captador solar está constituido en esencia por un absorbedor que recoge la energía solar, una cubierta transparente y un tubo o tubos por los que circula el fluido termo-portador. (Paredes Velasco, 2012).

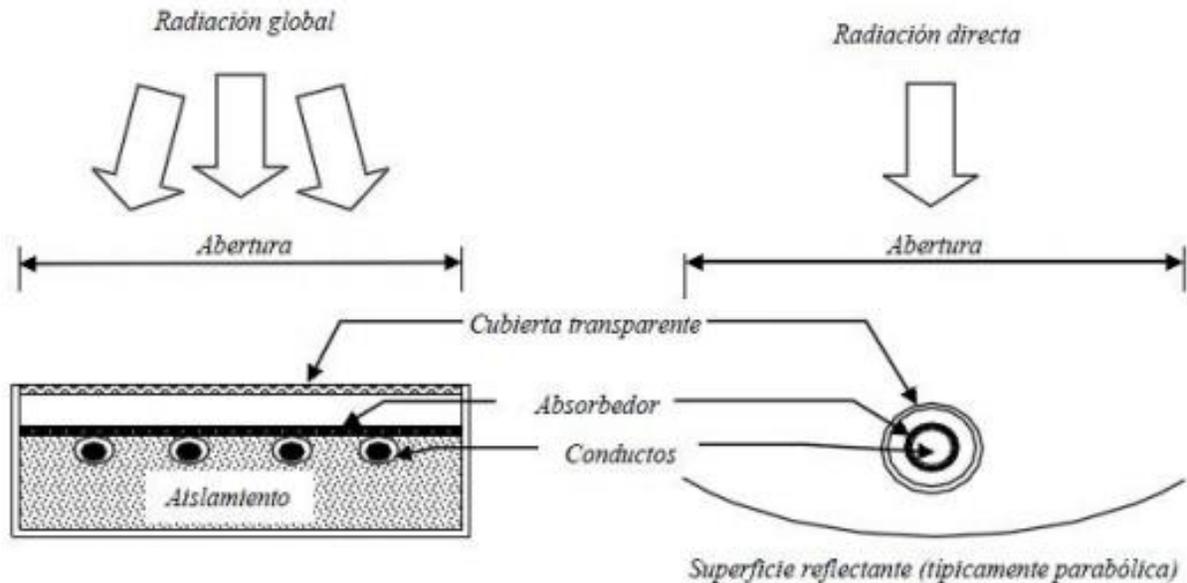


Figura 8. Esquema básico de captador.

(Paredes Velasco, 2012).

El absorbedor es el elemento más importante del sistema captador, pues es el encargado de recibir y absorber primero la radiación solar y transformarla después en radiación térmica, de forma que por conducción esta energía se transfiera al fluido circulante. Por otro lado, la cubierta transparente o semitransparente evita en gran medida la emisión calorífica por convección desde al absorbedor al ambiente, así como lo protege de los agentes externos.

Existen muchos tipos de captadores solares térmicos que, aunque en base tengan el mismo principio, tienen características diferentes. Por ello se pueden clasificar de muchas formas (Paredes Velasco, 2012).

a) En función del aprovechamiento solar

De forma muy general, se puede realizar una primera clasificación de los captadores que pueden funcionar con energía solar global, que son en consecuencia estacionarios, y los captadores que únicamente funcionan con radiación solar directa, y que necesitan un sistema de seguimiento del recorrido del sol a lo largo

del día. A su vez, estos últimos captadores seguidores se subdividen en los que disponen de un único grado de libertad y los que disponen de dos grados de libertad.

b) En función de la temperatura del fluido

Esta división tiene en cuenta las temperaturas a las que puede llegar el fluido transportador, y en consecuencia, las posibles aplicaciones que pueden aprovecharse de dichas temperaturas. Además, el tipo de fluido que se utilice determina el rango de temperaturas de operación del campo solar, lo que acaba por influir en la obtención del rendimiento del ciclo de potencia.

1) Temperatura baja (30°C – 100°C)

Este rango se consigue con captadores planos. Entre sus aplicaciones están las de calentamiento de aguas sanitarias y de piscinas, calefacción, secado, desalinización y destilación. Estos sistemas son en general híbridos ya que casi siempre son usados con apoyo de otros tipos de energía como la eléctrica, pues que la energía solar no siempre está disponible, lo que puede ocasionar un paro en el servicio que se ofrece.

2) Temperatura media (100°C – 400°C)

Se alcanzan con concentradores lineales o esféricos y se usan en procesos industriales (Industria láctea, procesado de residuos, etc.), así como en refrigeración, en procesos químicos (Producción de acetona) y de desalinización.

3) Temperatura alta (400°C – 3000°C)

Estas altas temperaturas se alcanzan gracias a los concentradores puntuales como los de discos parabólicos y los campos de heliostatos o centrales de torre. Se utilizan en centrales solares fototérmicas, fotovoltaicas y fotoquímicas, también en hornos solares para tratamientos térmicos e investigación de materiales.

c) En función de la razón de concentración

Para esta clasificación, hay que introducir un nuevo parámetro, el factor o razón de concentración, denotado por la letra “C”. Antes de definirlo, hay que tener claros los dos elementos básicos dentro del captador, el concentrador y el receptor. El primero constituye el sistema óptico, y es la parte del captador que dirige la radiación sobre el receptor. Éste es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y se convierte en otro tipo de energía. Por tanto, la razón de concentración superficial C, expresada en la ecuación (1-1), se define como el cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor:

$$C = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de absorción}} \quad (1 - 1)$$

1) *Captadores no concentradores*

Para las aplicaciones de baja temperatura se emplean siempre captadores solares sin concentración, donde $C=1$. Esto se debe a que las superficies de apertura y absorción son iguales, es decir, todos los elementos del subsistema solar tienen el mismo emplazamiento físico. Este tipo de captadores no concentradores son, sin duda, los más utilizados en aplicaciones térmicas domésticas. Ya que su coste y régimen de temperaturas permiten su adaptación a las necesidades del usuario de a pie. A su vez, se puede hacer una distinción dentro de los captadores no concentradores, atendiendo al fluido que circula por los tubos:

i) Captador plano para agua

En el ámbito doméstico y de bajas temperaturas, es el más utilizado para, por ejemplo, calentamiento de agua sanitaria.

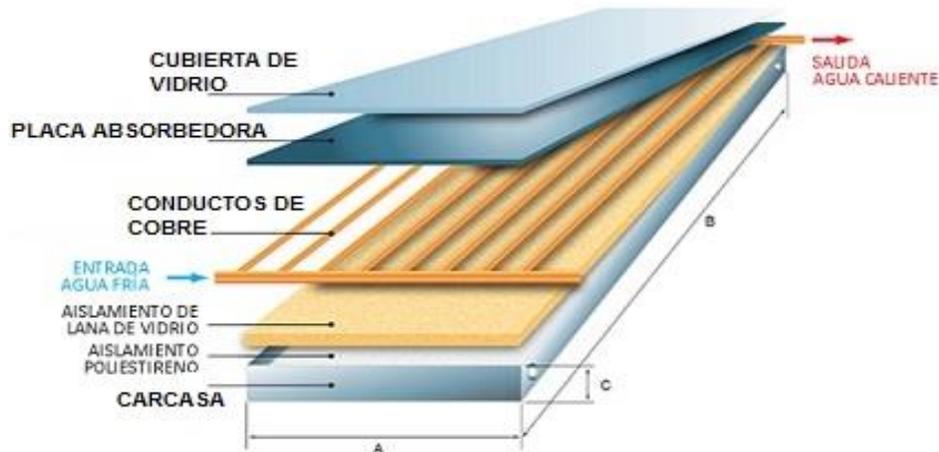


Figura 9. Esquema básico de captador plano para agua.

(Rodríguez, 2018).

ii) Captador plano de aire

Tienen una respuesta rápida a la radiación, y no presentan problemas de congelación ni de corrosión. Por lo que el proceso constructivo se simplifica, pues la estanqueidad del sistema para evitar cualquier fuga de fluido no supone una exigencia. Aun así, el aire tiene una clara desventaja en comparación con el agua, pues el primero tiene una capacidad calorífica cuatro veces menor a la del agua. Una de las aplicaciones más usuales en este tipo de captadores es la de su integración en las fachadas y techos de los edificios con objetivos energéticos.

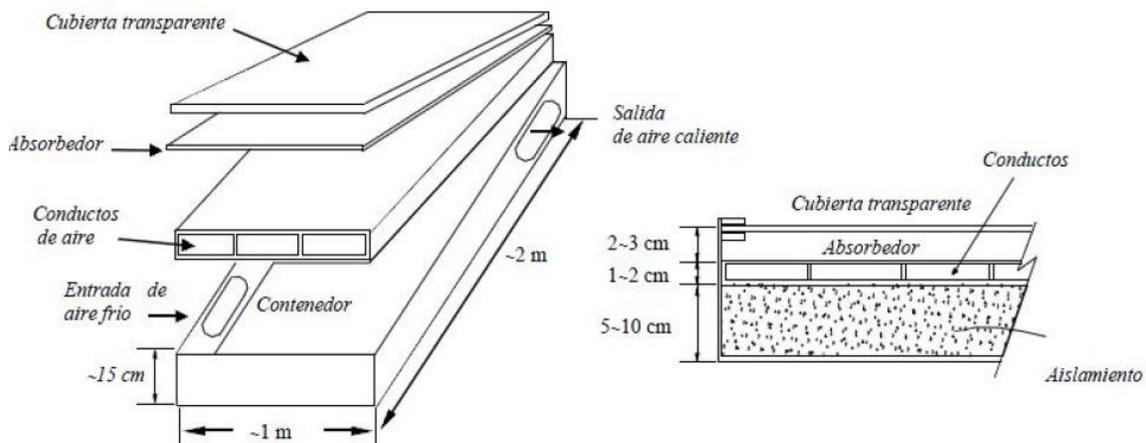


Figura 10. Esquema básico de captador plano para aire.

(Paredes Velasco, 2012)

iii) Tubos de vacío

Aprovechan el vacío creado en su interior para eliminar las pérdidas por convección y aumentar así la temperatura del fluido portador de calor con menos necesidad de superficie de captación efectiva. Estos captadores se utilizan de forma individual, en grupos, en haces o en sistemas de concentración lineal.



Figura 11. Tubos de vacío.

(Paredes Velasco, 2012)

2) *Captadores concentradores*

Para poder alcanzar mayores temperaturas en un captador, es necesario modificar el sistema de captación, de forma que se aumente la concentración. Esto se consigue en los captadores concentradores, que se pueden clasificar según dos características básicas: la geometría del absorbedor, concentración lineal o puntual, y la forma de la concentración, reflexión o refracción. Aun teniendo en cuenta esta primera clasificación, todos ellos pueden concentrar la energía solar en un punto específico para conseguir temperaturas muy elevadas que pueden cubrir las aplicaciones industriales, tales como generación de electricidad.

A modo de resumen, se adjunta la Tabla 1, donde se muestran los diferentes captadores en función de la razón de concentración, se añaden además, el rango de temperaturas a las que se puede llegar y el tipo de seguimiento.

Tabla 1. Tipos de captadores, concentración, temperatura y seguimiento.

(Estrada Gasca, Arancibia Bulnes, Jaramillo Salgado, Pérez Rábago, & Quiñones Aguilar, 2006)

Captador	Concentración	Temperatura (°C)	Seguimiento
Plano	$C < 1$	$30 < T < 80$	Estacionario
Tubo evacuado	$C < 1$	$50 < T < 190$	Estacionario
CPC	$1 < C < 5$	$70 < T < 240$	Estacionario
	$5 < C < 15$	$70 < T < 290$	Un eje
Canal parabólico	$15 < C < 40$	$70 < T < 290$	Un eje
Disco parabólico	$100 < C < 1000$	$70 < T < 930$	Dos ejes
Torre central	$100 < C < 1500$	$130 < T < 2700$	Dos ejes

Para el caso de la integración con el destilador, se requiere que el seguimiento sea estacionario, y el captador de ese tipo que brinda una mayor concentración, es el CPC, el cual puede tener una concentración desde 1 hasta 5 y alcanzar una temperatura de hasta 240 °C.

Concentrador Parabólico compuesto (CPC)

Basicamente consta de reflectores parabólicos que redirigen la radiación desde la apertura hasta el absorbente, como si se tratase de un embudo, es decir, todos los rayos incidentes son dirigidos al absorbedor.

En la figura 12, las mitades derecha e izquierda pertenecen a diferentes parábolas. El eje de las parábolas forman un ángulo θ con el plano medio del captador, y sus focos son A y B respectivamente. En los puntos C y D la inclinación es paralela al plano medio del captador.

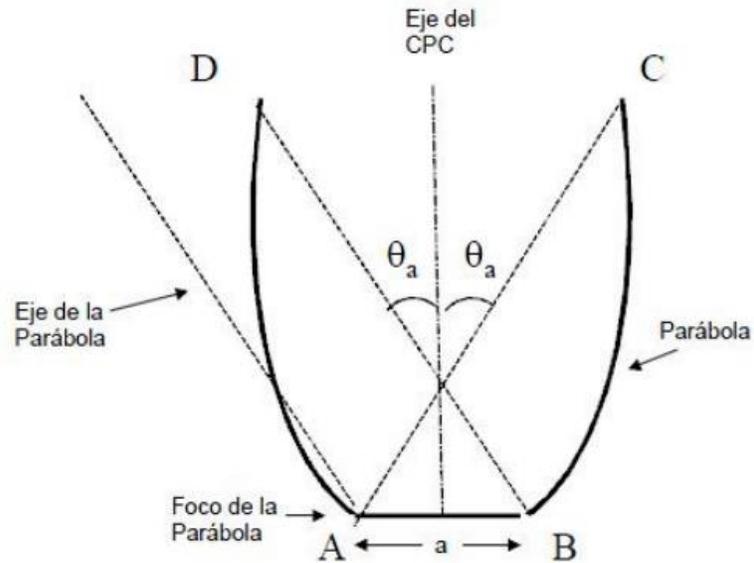


Figura 12. Esquema de un CPC.

(Paredes Velasco, 2012)

Una de las características angulares de este diseño, es que todos los rayos que inciden sobre la apertura con ángulo de aceptación angular, que sean $|\theta| > \theta_a$ serán reflejados entre las dos superficies y expulsados al exterior. Esta propiedad implica que la concentración, si se asume que la reflectividad es igual a 1, es igual al límite termodinámico. Las ventajas que estos diseños ofrecen se pueden resumir en las siguientes (Rabl, 1985):

- a) La concentración es independiente de la forma del absorbente, sino que depende del perímetro y del ángulo de aceptación de éste.
- b) La restricción de los ángulos de salida del receptor. Es importante porque algunos receptores tienen poca absorbancia a ángulos de incidencia altos.
- c) Permiten la orientación asimétrica de la fuente y la apertura para diseños de captadores que presentan variaciones estacionales. Aunque también pueden ser no seguidores.

- d) Aprovechan la radiación difusa.
- e) Pueden ser usados para reconcentradores o concentradores secundarios con altos rendimientos.

1.3. Estado del arte

En las décadas recientes se han desarrollado varias innovaciones para el mejoramiento en el rendimiento y productividad de los destiladores solares, así como estudios y modelos matemáticos para evaluar los parámetros que afectan el desempeño de los mismos. Los desarrollos se han enfocado en la parte de materiales que permitan un buen rendimiento térmico, reflectores internos y externos que incrementan la producción, distintas inclinaciones de meseta y vidrio para determinar el ángulo ideal correspondiente a la producción máxima, escalonamientos, materiales de cambios de fase como guijarros, aletas o esponjas, fuentes externas de calor, vacío, condensadores externos, materiales de buena absorptancia como colorantes y películas selectivas, acoplamientos a captadores planos, captadores parabólicos, sistemas fotovoltaicos, absorbedores tubulares, diferentes profundidades, diferentes concentraciones de sal, variación en cubiertas de vidrio, modelos matemáticos con ecuaciones en estado estable y transitorio, velocidad del viento, flujo másico, análisis exergético y energético, aislamientos, intercambiadores de calor y adecuaciones en los diseños (Ayoub & Malaeb, 2012).

A continuación se presentan, a manera de resumen en la Tabla 2, los estudios, innovaciones y desarrollos más destacados que se han realizado para dicha mejora en el costo, rendimiento y producción.

Tabla 2. Producción y costo-beneficio de los distintos tipos de destiladores.

(Elaboración propia).

<i>País</i>	<i>Tipo de destilador</i>	<i>Productividad (l/m² día)</i>	<i>Costo por litro (USD)</i>	<i>Referencia</i>
<i>Irán</i>	<i>Destilador con captador de tubos evacuados, condensador y materiales de cambio de fase</i>	<i>6.55</i>	<i>0.0153</i>	<i>(Faegh M, 2017)</i>

País	Tipo de destilador	Productividad (l/m² día)	Costo por litro (USD)	Referencia
India	Destilador piramidal integrado con un CPC tubular	7.77	0.0160	(Arunkumar T V. R., 2016)
India	Destilador integrado con un CPC tubular y materiales de cambio de fase	6.46	0.0190	(Arunkumar T V. R., 2016)
Egipto	Destilador escalonado con espejos internos	6.35	0.0197	(Omara ZM, 2013)
Emiratos Árabes	Destilador multietapa con lente Fresnel de enfoque puntual	10.90	0.0200	(Younas O, 2016)
Egipto	Destilador con nanofluidos y unidad de ventilador de condensador externo	8.39	0.0220	(Kabeel AE O. Z., 2014)
Egipto	Destilador con materiales de cambio de fase	7.54	0.0240	(Kabeel AE A. M., 2016)
India	Destilador doble con reflectores integrados y captador de placa plana	6.25	0.0260	(Joe Patrick Gnanaraj S, 2017)
India	Destilador con nanopartículas	5.28	0.0260	(Dsilva Winfred Rufuss D, 2107)
India	Destilador doble con tela de algodón negro.	5.68	0.0265	(Rajaseenivasan T E. T., 2013)
India	Destilador multicapa doble	9.00	0.0280	(Pal P, 2017)
Irán	Destilador activo multiefectos	23.80	0.0281	(Karimi Estahbanati MR, 2015)
India	Destilador tubular con materiales de cambio de fase	7.77	0.0330	(Arunkumar T K. A., 2017)
Omán	Destilador con absorbedor invertido	6.30	0.0378	(Dev R, 2011)
India	Destilador con captador de placa plana	5.82	0.0405	(Rajaseenivasan T N. R., 2014)
Irán	Destilador en cascada con materiales de cambio de fase	6.70	0.0500	(Dashtban M, 2011)
Egipto	Destilador acoplado a un estanque poco profundo	5.01	0.0520	(El-Sebail AA, 2008)
India	Destilador de triple cuenca con concentrador parabólico	16.94	0.0840	(Sarithar K, 2016)
Malasia	Destilador evacuado de etapas múltiples	14.20	0.0903	(Ahmed MI, 2009)
Malasia	Destilador tubular	5.00	0.1050	(Ahsan A, 2012)
Irán	Destilador parabólico	5.12	0.1103	(Gorjian S, 2014)
Canadá	Destilador hemisférico	5.70	0.1800	(BI, 2009)
India	Destilador de doble efecto con tubos de vidrio evacuados	20.00	0.2600	(HN, 2015)

<i>País</i>	<i>Tipo de destilador</i>	<i>Productividad (l/m² día)</i>	<i>Costo por litro (USD)</i>	<i>Referencia</i>
<i>India</i>	<i>Destilador con tubos evacuados</i>	<i>5.00</i>	<i>0.8600</i>	<i>(Panchal H, 2017)</i>

Como se puede observar en la Tabla 2, el destilador que tiene el mejor costo beneficio es el desarrollado por (Faegh M, 2017), el cual consta de un captador de tubos evacuados, un condensador externo y cera de parafina como material de cambio de fase, en donde la productividad aumenta en un 86% en comparación con el sistema sin cera y alcanza los 6.555 kg/m² diarios con una eficiencia del 50%. Dicho destilador además tiene el mejor desempeño en cuanto a costo y productividad, ya que el costo por producción de agua es de \$0.01527 USD por litro destilado.

1.4. Normatividad

Debido a que la finalidad de la destilación solar de agua es separarla de los componentes con los que se encuentra mezclada y obtener un condensado que sea apto para el consumo humano, es necesario apearse a los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Ésta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

- Límites permisibles de características microbiológicas.

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes deben establecer los agentes biológicos nocivos a la salud a investigar.

Tabla 3. Límites permisibles de características microbiológicas.

NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

- Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

- Límites permisibles de características químicas.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 5. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

Tabla 5. Límites permisibles de características químicas.

NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0,20
Arsénico (Nota 2)	0,05
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN ⁻)	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl ⁻)	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como mg/l CaCO ₃)	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Fierro	0,30
Fluoruros (como F ⁻)	1,50
Hidrocarburos aromáticos en µg/l:	
Benceno	10,00
Etilbenceno	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno)	6,5-8,5
Plaguicidas en µg/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00
Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
2,4 – D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO ₄ ²⁻)	400,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

Nota 1. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Nota 2. El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

Tabla 6. Tabla de cumplimiento gradual.

NOM-127-SSA1-1994.

Límite permisible mg/l	Año
0,045	2001
0,040	2002
0,035	2003

Límite permisible mg/l	Año
0,030	2004
0,025	2005

- Límites permisibles de características radiactivas.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 7. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

Tabla 7. Límites permisibles de características radiactivas.

NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE Bq/l
Radiactividad alfa global	0,56
Radiactividad beta global	1,85

CAPÍTULO 2

Descripción del proyecto

En cuanto a destiladores solares de agua a pequeña escala, la innovación con mejor costo-beneficio consta de un destilador solar con captador de tubos evacuados, condensador externo y materiales de cambio de fase. La producción de agua de dicho destilador en un día soleado ronda en los 6,55 L/m² (Faegh M, 2017). El propósito de esta investigación desarrollar un nuevo destilador solar de agua cuyo costo-beneficio sea viable para su implementación en zonas donde el acceso al agua es limitado. El diseño requiere un costo de manufactura inferior a los sofisticados destiladores de múltiples etapas.

El aumento en el desempeño se planteó conseguir con base en los siguientes puntos:

- 1) El empleo de un concentrador solar multicompuesto, que permite una mejor captación de la energía solar disponible.
- 2) El uso de un vacío parcial que permite reducir la temperatura de evaporación del agua, reduciendo las pérdidas térmicas de todo el sistema.

Por lo cual se diseñaron, construyeron y evaluaron tres destiladores. En la superficie reflectiva del concentrador parabólico compuesto, se utilizó lámina de aluminio de ultra-alta-reflectividad, puesto que dicha lámina tiene una excelente eficiencia óptica. Para la base del concentrador se usó una estructura de madera (mdf), aislada térmicamente del medio exterior. En su diseño se determinó la geometría, con base en el índice de concentración.

En el absorbedor de sección circular que contendrá el agua a destilar, se empleó aluminio con aleación 6063 debido a que soporta bien la corrosión ocasionada por el agua de mar, es más viable en cuanto a costo comparado con el acero inoxidable

y tiene 14 veces mayor conductividad (209,13 W/m K). El cilindro absorbedor se cubrió con una capa de pintura negra, la cual permite mejorar la absorción de la radiación. A lo largo del absorbedor se ranuró una abertura para permitir la salida del vapor producido en el interior. La condensación se efectúa cuando el vapor entra en contacto con la cubierta de circular de vidrio que prácticamente envuelve al absorbedor.

En los uno de los dos primeros destiladores, construidos con la misma configuración geométrica, se implementó la bomba de vacío y se realizaron pruebas para cuantificar la viabilidad de su uso al compararlo con el dispositivo sin bomba. Posteriormente se incrementó la longitud de la abertura en el absorbedor de uno de los prototipos con el fin de validar el modelo térmico, por lo que nuevamente se realizaron mediciones del rendimiento y la producción de agua destilada.

Se construyó un tercer destilador, con un índice de concentración distinto a los dos primeros sistemas para validar la optimización de la concentración solar. Fueron también analizados los coeficientes convectivos en fase líquida y vapor, para lo cual fue necesario realizar mediciones de temperatura en distintas partes del sistema y con diferentes condiciones de irradiancia. Las zonas en donde se midió la temperatura, fueron en el absorbedor, en la cubierta de vidrio, en el agua del interior del absorbedor y en el ambiente.

Con las mediciones de productividad se realizó un análisis probabilístico a lo largo de la costa mexicana, empleando técnicas desarrolladas en la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft), con la finalidad de predecir en qué sitios de la costa mexicana tendría un mejor desempeño y aplicabilidad el destilador solar.

Por último se hizo un análisis costo-beneficio del diseño óptimo y se efectuaron estudios fisicoquímicos en el agua destilada para corroborar que es apta para consumo humano.

2.1. Planteamiento del problema

Los mejores destiladores solares de agua tienen un costo accesible a las comunidades rurales. El destilador con mayor costo beneficio, es el desarrollado por (Faegh M, 2017), el cual consta de un captador de tubos evacuados, un condensador externo y cera de parafina como material de cambio de fase, en donde el costo por producir un litro de agua es de \$0.01527 USD.

Los sofisticados destiladores de múltiples etapas tienen un mejor rendimiento térmico y producción, pero el costo se incrementa significativamente, lo cual los hace inaccesibles para las comunidades rurales (Sharon & Reddy, 2015).

Para cubrir ésta necesidad es necesario investigar: ¿Cómo desarrollar un diseño de destilador solar que tenga un buen rendimiento térmico, alta producción y bajo costo?

Para desarrollar un diseño con buena productividad, y bajo costo, es necesario analizar el costo y las propiedades de los materiales así como desarrollar el modelo energético, para efectuar un balance costo-productividad y así optimizar el sistema. Tal equilibrio no se ha desarrollado en los diseños de éste tipo mencionados anteriormente, de modo que esto se considera un problema para la accesibilidad que se quiere dar en comunidades rurales.

2.2. Justificación científica y contextual

Gran parte de los sistemas empleados para potabilizar agua requieren de fuentes de energía que provienen del uso de combustibles fósiles, esto provoca daños irreparables al medio ambiente y planeta en que vivimos (Zhani, Ben Bacha, & Damak, 2009).

Técnicamente es favorable producir agua destilada mediante sistemas que aprovechen la energía solar para realizar el proceso de destilación, es una alternativa desde los puntos de vista de tecnología sanitaria y de tecnología energética. Básicamente es reproducir en diferente escala el fenómeno del ciclo hidrológico que se produce de manera natural en el ambiente. En la actualidad existe una vasta cantidad de distintos diseños que lo pueden corroborar (Aybar & Assefi, 2009).

El agua es vital para la vida y en el país es relativamente abundante, sin embargo hay un alto riesgo de quedarnos sin dicho recurso. En marzo de 2019, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) presentó un informe con datos duros, en el cual se menciona que 10% de la población en el país no tiene acceso, y el 30% de los que sí tienen acceso no la obtiene con cantidad ni calidad suficiente.

Una de las cuestiones por la que es difícil tener agua potable es debido a que la distribución de las lluvias no es homogénea en todo el territorio. Otra razón es la contaminación en ríos y lagos, como por ejemplo la cuenca más grande del país, la de Lerma-Chapala-Santiago (Hermosillo-Villalobos, 1989).

La falta de agua potable se da principalmente en áreas rurales, pero también en las zonas marginadas de las grandes ciudades. La UNAM reporta que de los 653 acuíferos en México, en el año de 1975 solamente 32 estaban sobreexplotados, en 2018 la cifra aumentó a 105. En el país solo se trata la mitad del líquido mediante plantas de potabilización y además el 40% ciento del agua se pierde en fugas. El consumo promedio es de 322 litros por persona al día.

Datos del Instituto de Recursos Mundiales (WRI) señalan que en la república mexicana, 23 estados estarían precipitándose a una posible crisis, ya que padecen estrés hídrico alto o extremadamente alto, lo que quiere decir que están ocupando casi toda el agua disponible. El WRI otorgó a México la categoría de alto estrés hídrico ubicándolo en la posición 24 de 164 en su ranking global. Actualmente al

menos 8 de las 13 regiones hidrológicas del país manifiestan grados de presión altos o muy altos. En la figura 13 se observa que las entidades con estrés hídrico alto o extremadamente alto son: Baja California Sur, Guanajuato, Ciudad de México, Aguascalientes, Estado de México, Querétaro, Hidalgo, Chihuahua, Zacatecas, Sonora, Sinaloa y Nuevo León.

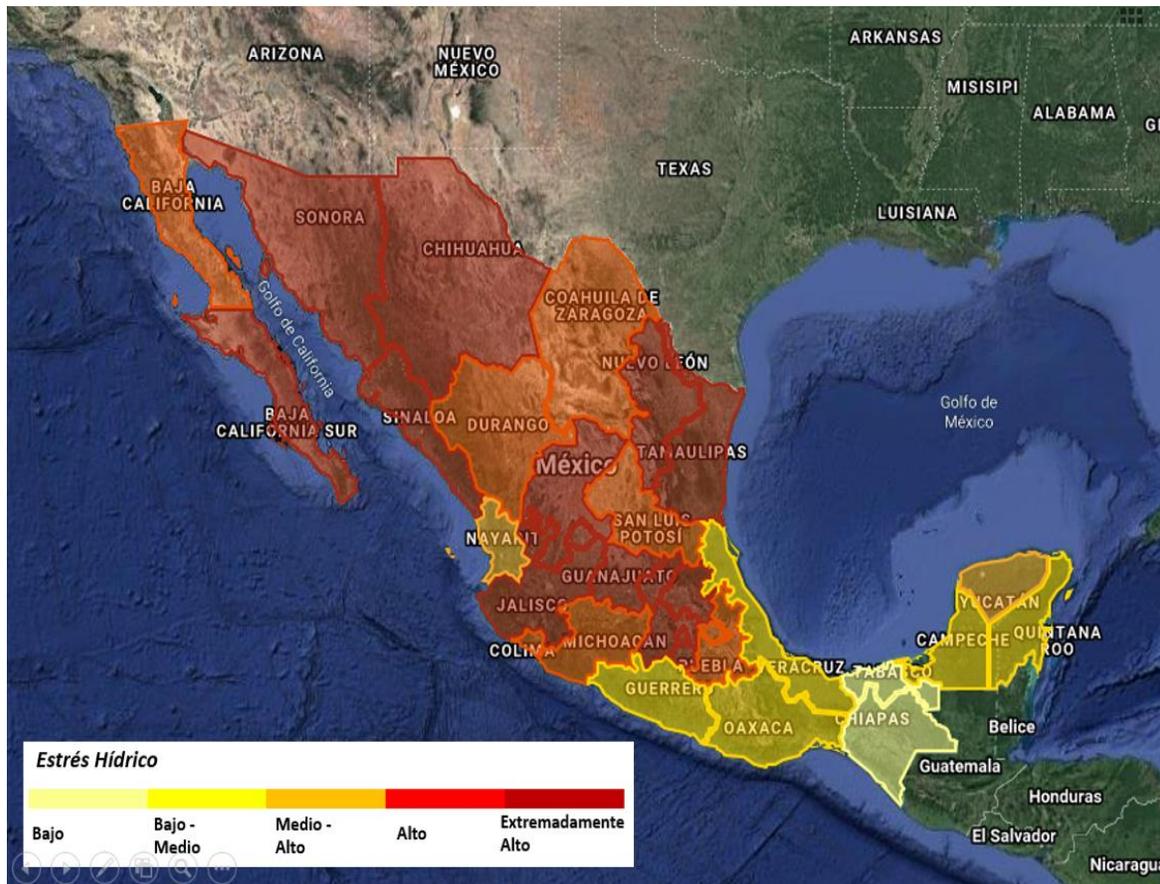


Figura 13. Índice de estrés hídrico para la república mexicana.

Instituto de Recursos Mundiales

Debido a esta perspectiva de riesgo hídrico en el país, resulta imperativo buscar alternativas para poder potabilizar el agua.

2.3. Hipótesis

Es posible diseñar un destilador solar de agua, cuyos materiales de construcción permitan un alto rendimiento de producción y un bajo costo para que estratos socioeconómicos donde el acceso al agua es limitado, puedan disponer del vital líquido. Se desarrollan tres destiladores mediante la optimización de las propiedades térmicas y ópticas de los materiales, así como de las propiedades de transferencia de calor de los fluidos involucrados en la destilación de agua, por lo que se obtiene un buen diseño e innovador de los destiladores solares.

Los equipos de destilación solar, si están fabricados con materiales adecuados, pueden funcionar con pleno rendimiento durante muchos años y ofrecer una gran cantidad de agua potable con un costo de inversión relativamente bajo.

2.4. Objetivos

Objetivo general:

Desarrollar y evaluar el desempeño termodinámico y productivo de dos sistemas de destilación solar de agua, con base en herramientas de análisis de transferencia de calor, que permitan la cuantificación de coeficientes térmicos de transferencia entre los fluidos involucrados, con el fin de implementar en campo el dispositivo desarrollado que tenga el mejor costo-producción.

Objetivos específicos:

- ❖ Diseñar la geometría de los concentradores parabólicos compuestos, con absorbedor cilíndrico, así como determinar los parámetros óptimos de truncamiento.

- ❖ Definir los componentes que van a integrar el sistema de destilación solar de agua (materiales, condensador, bomba de vacío) y optimizar el diseño

empleando una metodología y un modelo energético que se enfoque primordialmente en la productividad y el costo.

- ❖ Construir e integrar el sistema de acuerdo a las características y condiciones establecidas en la fase de diseño para poner en marcha el sistema, verificar que no se tenga ninguna anomalía y corroborar su funcionamiento.
- ❖ Validar de manera experimental el modelo energético, realizando mediciones de temperatura en las áreas del sistema donde sea requerido.
- ❖ Realizar pruebas de la calidad del agua, antes y después de la destilación, para verificar que sea apta para consumo humano y cumpla con los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.
- ❖ Extrapolar, mediante un análisis probabilístico y con base en los resultados, la productividad que se podría obtener a lo largo de la costa mexicana, empleando técnicas desarrolladas en la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft), con la finalidad de predecir en qué sitios de la costa mexicana tendría un mejor desempeño y aplicabilidad el destilador solar.

CAPÍTULO 3

Metodología

Las metodologías de diseño clásicas globalmente pueden ser enmarcadas dentro de cuatro fases en el proceso de diseño (Farias, Aca, Molina , Maury Ramírez, & Riba i Romeva, 2006), las cuales se definen a continuación:

Ideación. En esta fase se hace una definición de las necesidades del mercado y se definen los requerimientos del producto. Actualmente estas actividades se realizan generalmente por áreas como mercadotecnia. También se realiza un plan detallado de trabajo que permite identificar la concurrencia entre las actividades.

Desarrollo Conceptual y Básico. En la fase de Diseño Conceptual se desarrollan las alternativas de solución sobre el producto funcional. Para lograr esto, se realizan actividades de análisis que permiten comparar productos análogos o principios básicos que pueden ser de utilidad en el desarrollo del concepto; actividades de síntesis, que integran los principios o ideas para generar las alternativas conceptuales; y actividades de simulación y evaluación para estimar el comportamiento de las alternativas generadas y seleccionar las mejores.

Desarrollo Avanzado. Involucra todas las actividades que ofrecen como resultado documentos de ingeniería detallados que son la base para la fabricación del producto; es importante anotar, que en muchos de los modelos clásicos esta etapa se denomina diseño de detalle.

Lanzamiento. En esta fase se fabrican prototipos para evaluar el diseño e inclusive, se diseña el proceso de producción y se comienza con la manufactura del producto.

La Tabla 8 muestra que fases son consideradas en las metodologías actuales. Para el presente desarrollo se consideró la metodología Yang & El-Haik, 2003, la cual está constituida por cuatro fases y que se representa mediante un diagrama de flujo:

Tabla 8. Metodologías actuales para el diseño del producto.

(Farias, Aca, Molina , Maury Ramírez, & Riba i Romeva, 2006)

<i>FASE</i>	<i>[Otto y Word, 2001]</i>	<i>[Yang & El-Haik, 2003]</i>
Ideación	Ingeniería Inversa (Investigación, Predicción e Hipótesis).	Identificación de los requerimientos
Desarrollo Conceptual y Básico	Modelado y Análisis (Modelos del diseño y Análisis del diseño).	Caracterización del diseño
Desarrollo Avanzado		Optimización del diseño
Lanzamiento	Rediseño (Paramétrico, Adaptativo y Original).	Validación del diseño

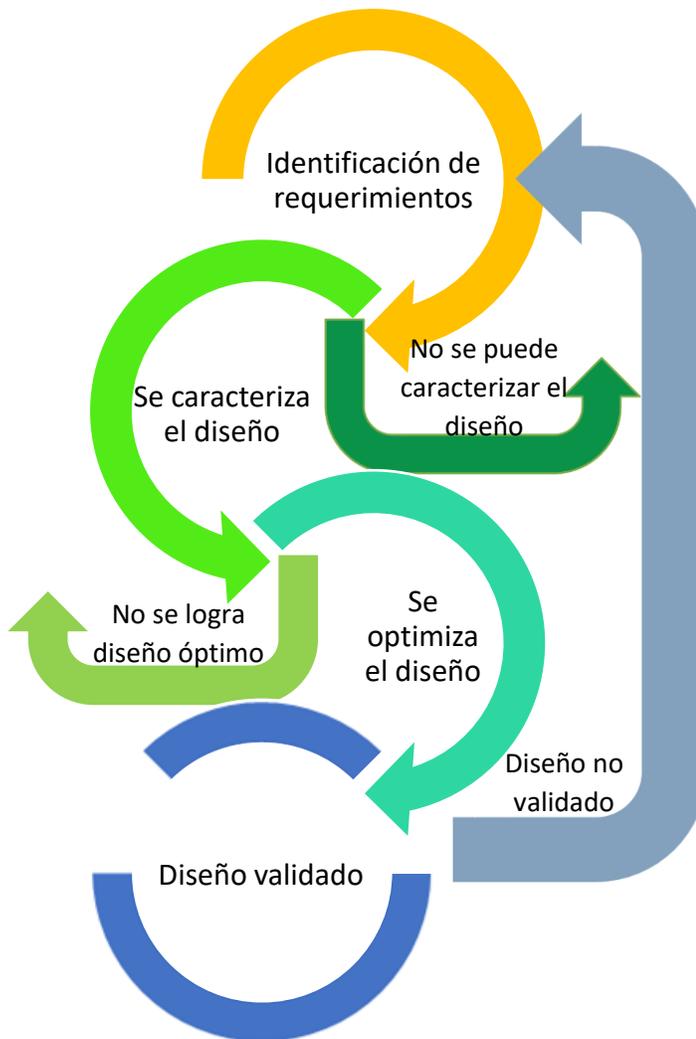


Figura 14. Diagrama de flujo de destilador solar.

(Elaboración propia).

3.1. Consideraciones

La principal y más importante consideración es suponer un flujo uniforme de irradiancia a lo largo de toda la circunferencia del absorbedor tubular y un análisis en estado estacionario, lo cual permite modelar sin grandes complicaciones el fenómeno de transferencia de calor. Dicha suposición simplifica el análisis y en ocasiones nos lleva a tener valores teóricos mayores que los reales, pero con una excelente aproximación.

Al tratarse de un sistema pasivo, también se asume que la temperatura es continua a lo largo del absorbedor tubular y además homogénea a través de toda la longitud de la cubierta circular de vidrio.

Debido a que el absorbedor circular de aluminio, recubierto con pintura negra, recibe casi toda la radiación, se proyecta que sea el elemento de mayor temperatura en el sistema. La cubierta de vidrio está en contacto directo con el exterior, filtra la mayor parte de la radiación externa, y recibe la que emite el absorbedor, por lo cual estará a una temperatura menor que el absorbedor. La lámina del CPC también está en contacto directo con el exterior, y debido a sus excelentes propiedades ópticas reflectivas será el elemento con menor temperatura.

Las diferencias de temperaturas en cada elemento son demasiado pequeñas, por lo que se asume una temperatura promedio de cada superficie para realizar los respectivos cálculos de los flujos convectivos.

3.2. Diseño

Los requerimientos del mercado y las especificaciones de diseño se han hecho más estrictas, esto es la causa de la evolución de las metodologías de diseño. La diferencia entre los modelos clásicos con los actuales se puede ver en la integración de herramientas que permiten ofrecer un valor agregado al producto. En el caso de [Yang y El-Haik, 2003], utilizado en el presente trabajo, se pueden integrar también

las etapas de DFSS (Design for Six Sigma) que intenta crear una metodología de diseño de producto con un enfoque en teoría de calidad.

3.2.1. Identificación de los requerimientos

Dado que la aplicación final del producto, en éste caso el destilador solar, es para uso en comunidades rurales, se pretende optimizar la productividad y el costo.

Una manera teórica de saber cuánta producción de agua se puede tener por metro cuadrado de irradiación durante un día, es mediante la ecuación (3-1):

$$V = \frac{(H)(\eta)}{q_{req}} \quad (3 - 1)$$

Donde:

V - Volumen de agua destilada

η - Eficiencia del destilador

H - Irradiación diaria promedio

q_{req} - Calor requerido para evaporar un litro de agua

Se consideró una concentración correspondiente a un concentrador parabólico compuesto (CPC) y con seguimiento estacionario, como ya se mencionó previamente en el apartado de concentración solar.

La eficiencia depende en gran parte de las propiedades de los materiales, los elementos con que se integre el sistema y el diseño. Para tener buena eficiencia, el concentrador requiere tener alta reflectancia para concentrar en el absorbedor la mayor cantidad de irradiancia posible.

El absorbedor capta la irradiancia y requiere tener alta absorción para aprovechar la mayor parte del calor proveniente y no proveniente del concentrador, y a su vez

baja emitancia para poder contenerlo, además debe ser resistente a la corrosión puesto que el agua de mar es altamente corrosiva, ya que por lo general tiene niveles elevados de cloruros y sulfatos, mayores a los límites permisibles mostrados en la tabla 5, los cuales ocasionan corrosión en los metales. En dicha tabla también se presenta el límite permisible para la dureza; el agua marina es agresiva porque tiene altos niveles de carbonato de calcio, así que su dureza es elevada y esto produce incrustaciones y corrosión.

Los coeficientes de convektividad y conductividad térmica de los materiales, desempeñan un papel esencial para determinar las pérdidas térmicas en el sistema y por ende son de suma importancia para poder efectuar un buen diseño. Dependiendo de los materiales con que se construyan los destiladores, y el diseño, la eficiencia varía.

La irradiación diaria promedio varía dependiendo la latitud y longitud del lugar, así como de la época del año. El calor requerido depende de las condiciones de presión, temperatura y porcentaje de sal del agua. Cuando se tiene baja presión, se requiere menos energía, o calor para evaporar el agua. El porcentaje de sal influye en el calor sensible de fusión, incrementando el punto de ebullición, y en el calor latente de fusión, reduciendo la cantidad de energía requerida.

3.2.2. Caracterización del diseño

Como parte inicial en ésta segunda fase de diseño, se establecen las ecuaciones del concentrador parabólico compuesto.

En la figura 15 se muestra un esquema de perfil del destilador solar. Como se comentó en la parte de concentración, las curvas de las parábolas van a reflejar la radiación hacia el foco de las mismas, lo cual corresponde al absorbedor.

3.2.2.1. Geometría del diseño

Para dicho absorbedor se propuso una forma cilíndrica la cual puede tener distintas dimensiones, por tal motivo es necesario emplear ecuaciones paramétricas que estén en función de su radio o de su diámetro.

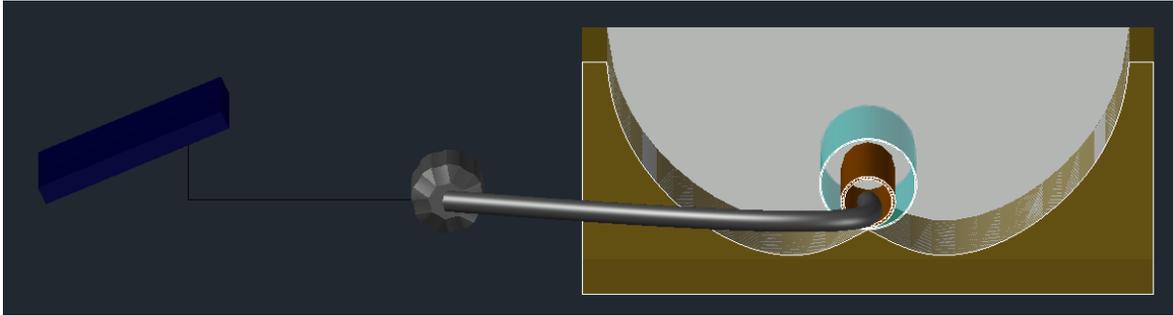


Figura 15. Perfil esquemático del destilador solar.

(Elaboración propia).

El índice de concentración también es un punto esencial en el diseño, y su variación dependerá del ángulo de aceptación. Entre mayor temperatura se quiera alcanzar, mayor tendrá que ser la concentración y por ende el ángulo de aceptación tendrá que reducirse. Así que también es indispensable su implicación en las ecuaciones paramétricas, las cuales se muestran a continuación:

$$x(t) = R \left[\frac{\text{sen } \theta_o \cos(t - \theta_o) - \left(\frac{\pi}{2} + \theta_o + t\right) \cos t}{1 + \text{sen}(t - \theta_o)} + \cos \theta_o \right] \quad (3 - 2)$$

$$y(t) = R \left[\frac{\cos \theta_o \cos(t - \theta_o) - \left(\frac{\pi}{2} + \theta_o + t\right) \text{sen } t}{1 + \text{sen}(t - \theta_o)} - \text{sen } \theta_o \right] \quad (3 - 3)$$

Donde:

R es el radio del absorbedor.

θ_o es el ángulo de aceptación.

t es el ángulo de proyección de la parábola.

Una de las características angulares, es que todos los rayos que incidan sobre la apertura con ángulo de aceptación que sean mayor al de diseño, serán reflejados entre las dos superficies y expulsados al exterior. También como se muestra en la figura 16 el ángulo va a limitar la sección de la curva parabólica compuesta, en éste caso los segmentos BC y DE serían los que corresponderían a dicha sección, los segmentos de curva AB y AD estarían fuera del rango, por tal motivo es necesario definir intervalos en las ecuaciones. Para el punto B, el límite sería en $t = \frac{\pi}{2} + \theta_o$. Para el punto C se considera el criterio de Rincón, el cual establece que: "el CPC debe truncarse de tal forma que los rayos paralelos a los rayos extremos (BE y DC en la figura 16) no estén bloqueados por los espejos del CPC". Observando la figura, esto implica que la línea FG, que es una tangente al segmento BC del espejo parabólico en el punto F, debe ser paralela al rayo extremo DC. Eso ocurre, independientemente de la forma del absorbedor, suponiendo que su superficie es uniformemente convexa o plana, cuando el ángulo de truncamiento $t \leq \frac{3\pi}{2} - 3\theta_o$.

Para los segmentos de curva AB y AD que no pertenecen a la sección parabólica, es necesario que direccionen los rayos también hacia el absorbedor, por lo que se requieren ecuaciones paramétricas de una "envolvente", las cuales se presentan a continuación:

$$x(t) = R(\text{sen } t - t \cos t) \quad (3 - 4)$$

$$y(t) = -R(\cos t + t \text{sen } t) \quad (3 - 5)$$

En este caso el intervalo iría desde $t = 0$ hasta el punto donde hace conexión con la parábola, que corresponde a $t = \frac{\pi}{2} + \theta_o$.

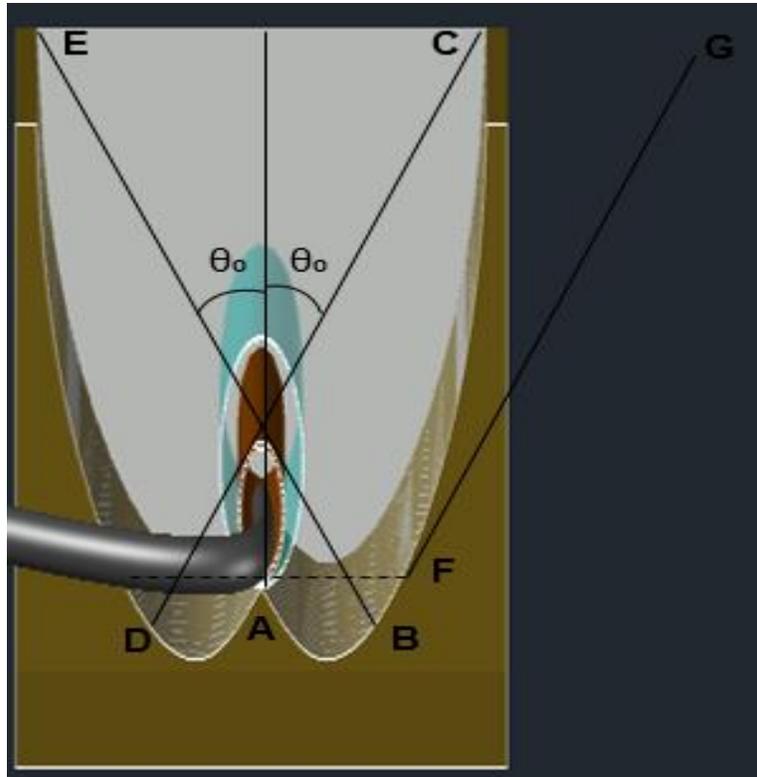


Figura 16. Perfil de incidencia angular de los rayos solares.

(Elaboración propia).

Una vez establecidas las ecuaciones para el concentrador parabólico compuesto, se procede entonces a realizar el análisis energético. En la figura 17 se muestra dicho esquema. Inicialmente al concentrador incide la irradiancia solar la cual se define como \dot{Q}_1 . Parte de esa energía será absorbida por el concentrador y el resto, \dot{Q}_2 , se proyectará hacia el absorbedor. Antes de llegar directamente al absorbedor, la energía tendrá que atravesar la superficie de vidrio templado, la cual transmitirá parte de la energía y una vez que atraviere el vidrio, la energía resultante, \dot{Q}_3 , circulará por la masa de aire contenida entre el vidrio y el absorbedor y cruzará dicho absorbedor para llegar al interior, \dot{Q}_4 , calentará finalmente el fluido de trabajo.

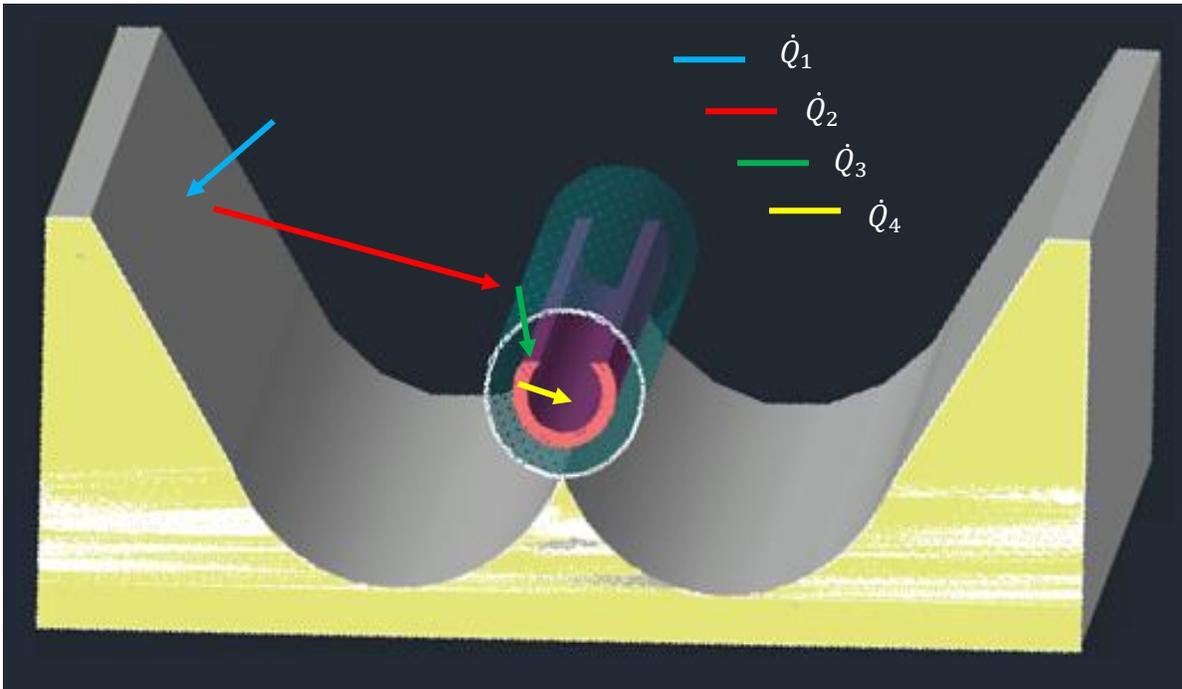


Figura 17. Esquema de pérdidas energéticas.

(Elaboración propia).

\dot{Q}_1 , va a depender de la irradiancia y del área de captación del concentrador, por lo que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_1 = G A_{\text{apertura}} \quad (3 - 6)$$

Donde:

$G = \left[\frac{W}{m^2} \right]$, es la irradiancia en el sitio.

$A_{\text{apertura}} = [m^2]$, corresponde al área de captación del destilador.

$$A_{\text{apertura}} = W_a l \quad (3 - 7)$$

Siendo W_a la apertura del concentrador y l la longitud del captador.

Después \dot{Q}_2 , \dot{Q}_3 y \dot{Q}_4 dependerán de la eficiencia óptica. La eficiencia óptica está definida como la razón de la energía absorbida por el receptor con respecto a la

energía incidente en la apertura del captador. La eficiencia óptica depende de las propiedades ópticas de los materiales involucrados, la geometría del captador y las imperfecciones resultantes de la construcción del captador. La eficiencia óptica se definirá para este caso como (Kalogirou, 2014):

$$\eta_0 = \tau_{vid} \alpha_{abs} \gamma F_S \cos \theta \left[\rho_{CPC} \left(\frac{W_a - D_{ext-abs}}{W_a} \right) + \left(\frac{D_{ext-abs}}{W_a} \right) \right] \quad (3 - 8)$$

En la que $F_S \cos \theta$ se conoce como factor de sombreado, $D_{ext-abs}$ es el diámetro exterior del absorbedor, ρ_{CPC} la reflectancia del concentrador, τ_{vid} es la transmitancia del vidrio, α_{abs} la absorptancia del tubo receptor, γ el factor de intercepción del captador y θ el ángulo de incidencia.

El factor de sombreado $F_S \cos \theta$ es una medida de la reducción efectiva del área de apertura debido a efectos anormales en la incidencia. Con una orientación óptima a la posición del sol (con ángulo de incidencia de 0°) se puede eliminar éste tipo de pérdidas. Su valor puede ser obtenido de la siguiente relación:

$$F_S = (1 - F_{12} \tan \theta) \quad (3 - 9)$$

A su vez F_{12} se obtiene:

$$F_{12} = \frac{A_s}{A_{apertura}} \quad (3 - 10)$$

Donde:

$$A_s = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left(1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right) \quad (3 - 11)$$

Siendo h_p la altura de la parábola y f es la distancia focal.

Para erradicar pérdidas por el factor de sombreado $F_S \cos \theta$ se colocaron reflectores también en la parte lateral del concentrador.

El objetivo en el uso de sistemas de concentración es reducir las pérdidas de calor del absorbedor al reducir su área. La mayoría de los concentradores están contruidos con receptores lo suficientemente grandes como para interceptar una gran fracción de la radiación reflejada, pero no lo suficientemente grandes como para interceptar las franjas de baja intensidad. Valores de γ mayores que 0.9 son comunes.

Los errores asociados a la superficie parabólica son de dos tipos: aleatorios, y no aleatorios. Los errores aleatorios se definen como esos errores que se deben a la naturaleza del azar y, por lo tanto, se puedan representar por distribuciones de probabilidad normales. Los aleatorios se identifican como cambios evidentes en la anchura del sol, los efectos de la dispersión causados por los errores aleatorios de la pendiente de la parábola, es decir, distorsión de la parábola debido a carga del viento, y efectos de dispersión asociados a la superficie reflectiva. Los errores no aleatorios se presentan en el ensamble de fabricación o la operación del captador. Estos se pueden identificar como imperfecciones del perfil del reflector, errores del seguimiento y errores de localización del receptor. Dichas imperfecciones generan pérdidas del concentrador hacia el absorbedor, y va a depender de la relación geométrica que existe entre ambos, así como de sus emisividades. Donde $F_{conc-abs}$, es el factor de forma o factor de visión, el cual involucra la geometría del concentrador y del absorbedor y se aproxima mediante:

$$F_{conc-abs} = \frac{L_c - L_n}{W_a} \quad (3 - 12)$$

Siendo L_c y L_n las longitudes desde del punto de truncamiento del CPC hasta el punto tangente del absorbedor. Esto se muestra en la figura 18.

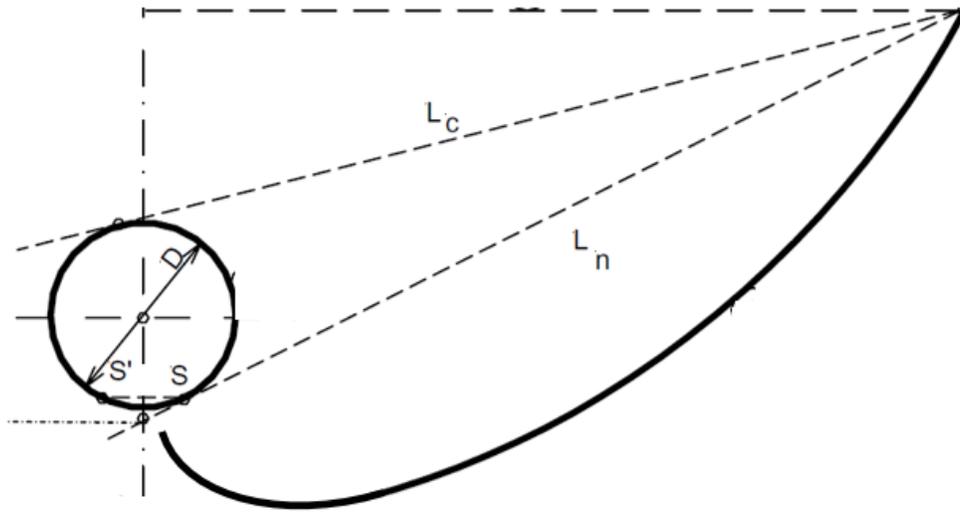


Figura 18. Factor de forma de un CPC.

(Paredes Velasco, 2012).

Los errores aleatorios son modelados estadísticamente, determinando la desviación estándar de la distribución total de la energía reflejada, en la incidencia normal. Los errores no aleatorios son impuestos por el ángulo de error β , es decir, el ángulo entre el rayo reflejado del centro del sol y la normal al plano de abertura del captador; y del desplazamiento del receptor del foco de la parábola δ_r . Puesto que los errores del perfil del reflector y la mala colocación del receptor a lo largo del eje esencialmente tienen el mismo efecto, se utiliza un solo parámetro para explicar ambos. Según Guven y Bannerot (1986), los errores aleatorios y no aleatorios se pueden combinar con los parámetros del captador, el índice de concentración C , y el diámetro geométricos del receptor D . Al usar los parámetros universales del error, se puede formular el factor de intercepción γ mediante:

$$\gamma \cong \frac{1 + \cos t_t}{2 \sin t_t} \int_0^{t_t} \left\{ \left[\operatorname{erf} \left(\frac{(\sin t_t)(1 + \cos \theta)(1 - 2 d^* \sin \theta) - \pi \beta^* (1 + \cos t_t)}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos t_t)} \right) - \operatorname{erf} \left(-\frac{(\sin t_t)(1 + \cos \theta)(1 + 2 d^* \sin \theta) + \pi \beta^* (1 + \cos t_t)}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos t_t)} \right) \right] \frac{1}{1 + \cos \theta} \right\} dt_t$$

(3 - 13)

Donde erf es la función de error gaussiana, σ representa los errores aleatorios modelados estadísticamente mediante la desviación estándar de la distribución de la energía total reflejada, β^* es el parámetro de error no aleatorio universal debido a errores angulares y d^* es el parámetro de error no aleatorio universal debido a la mala ubicación del receptor y errores de perfil del reflector.

La desviación estándar se calcula como $\sigma^* = \sigma C$ y:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4 \sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2} \quad (3 - 14)$$

De acuerdo con Guven H.M., para un captador fabricado cuidadosamente, $\sigma_{mirror} = 0.002 \text{ rad}$, $\sigma_{slope} = 0.004 \text{ rad}$ y el ángulo del cono solar $\sigma_{sun} = 0.004 \text{ rad}$.

Para el caso en particular del diseño planteado, se considerará $\sigma_{sun} = 0.004 \text{ rad}$ para condiciones de cielo claro, $\sigma_{slope} = 0.004 \text{ rad}$ como el error por ajuste para el concentrador con orientación óptima y $\sigma_{mirror} = 0.004 \text{ rad}$ como error de superficie parabólica debido a la distorsión en la pendiente de la curva parabólica por carga de viento y errores de superficie.

Por su parte los valores de β^* y d^* se calculan mediante:

$$\beta^* = \beta C \quad (3 - 15)$$

$$d^* = \frac{\delta_r}{D} \quad (3 - 16)$$

3.2.2.2. Análisis energético y de transferencia de calor

Con la finalidad de cuantificar la eficiencia térmica del sistema de destilación de agua, es necesario realizar un balance energético, el cual incluye pérdidas ópticas, térmicas, la ganancia de calor en el fluido de trabajo, la irradiancia solar directa y difusa, así como su interacción entre la cubierta de vidrio y el absorbedor. Debido a

que la longitud del receptor es corta (menor a un metro), un balance de energía unidimensional otorga resultados razonables. La figura 19 muestra dicho balance en estado estable para la sección transversal del destilador y la figura 20 presenta el modelo de resistencia térmica.

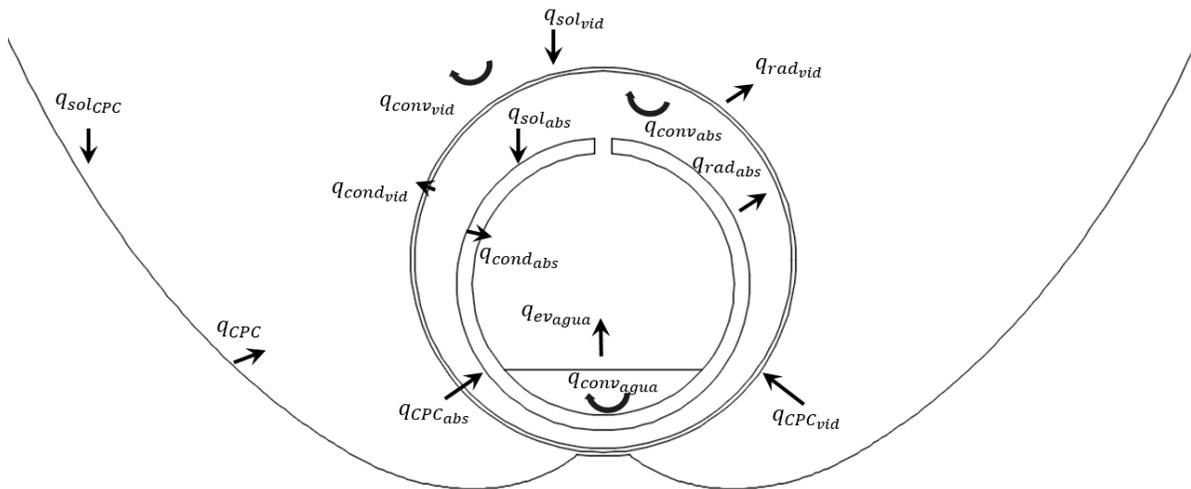


Figura 19. Sección transversal de destilador solar.

(Elaboración propia).

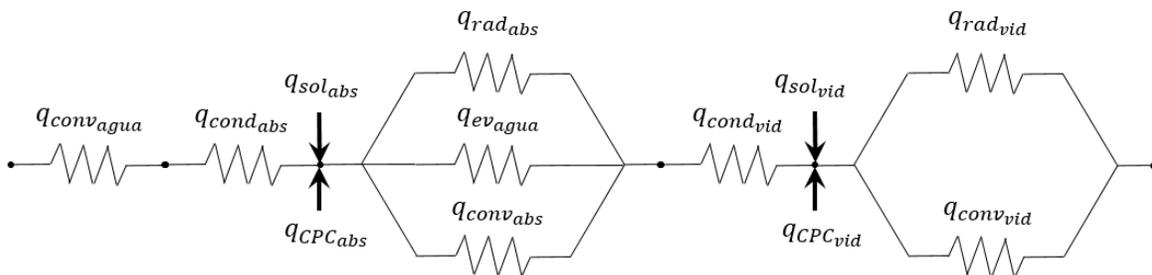


Figura 20. Modelo de resistencia térmica para el destilador solar.

(Elaboración propia).

El uso de resistencias térmicas facilita, de una manera muy sencilla, el dar solución a sistemas complejos de transferencia de calor, ya que la resistencia térmica representa una medida de la diferencia de temperatura mediante la cual una

superficie se opone al flujo de calor. En la siguiente tabla se definen los términos empleados en dicho modelo.

Tabla 9. Ruta de los flujos de calor.

(Elaboración propia).

Flujo de calor (W/m²)	Modo de transferencia de calor	Dirección de la transferencia de calor	
		De	Hacia
$q_{conv_{agua}}$	Convección	Superficie interna del absorbedor tubular	Fluido de trabajo
$q_{cond_{abs}}$	Conducción	Superficie externa del absorbedor tubular	Superficie interna del absorbedor tubular
$q_{sol_{abs}}$	Radiación	Irradiancia solar incidente	Superficie externa del absorbedor tubular
$q_{CPC_{abs}}$	Radiación	Irradiancia solar reflejada por el CPC	Superficie externa del absorbedor tubular
$q_{conv_{abs}}$	Convección	Superficie externa del absorbedor tubular	Superficie interna de la cubierta de vidrio
$q_{rad_{abs}}$	Radiación	Superficie externa del absorbedor tubular	Superficie interna de la cubierta de vidrio
$q_{cond_{vid}}$	Conducción	Superficie interna de la cubierta de vidrio	Superficie externa de la cubierta de vidrio
$q_{ev_{agua}}$	Evaporación	Superficie interna del absorbedor tubular	Superficie interna de la cubierta de vidrio
$q_{sol_{vid}}$	Radiación	Irradiancia solar incidente	Superficie externa de la cubierta de vidrio
$q_{CPC_{vid}}$	Radiación	Irradiancia solar reflejada por el CPC	Superficie externa de la cubierta de vidrio
$q_{conv_{vid}}$	Convección	Superficie externa de la cubierta de vidrio	Medio ambiente
$q_{rad_{vid}}$	Radiación	Superficie externa de la cubierta de vidrio	Medio ambiente
$q_{sol_{CPC}}$	Radiación	Irradiancia solar incidente	Lámina del CPC
q_{CPC}	Radiación	Irradiancia reflejada por el CPC	Medio ambiente y superficie externa de la cubierta de vidrio

Como se observa en la tabla y en el modelo de resistencia térmica, la irradiancia incide en la cubierta de vidrio ($q_{sol_{vid}}$) y en la lámina reflectiva ($q_{sol_{CPC}}$); debido a las buenas propiedades ópticas de la lámina, refleja la mayor parte (q_{CPC}), hacia el ambiente y hacia la cubierta de vidrio, dependiendo del ángulo de incidencia. La

mayor parte de la irradiancia que incide en la cubierta es transmitida hacia el absorbedor, tanto la reflejada por el CPC ($q_{CPC_{abs}}$) como la proveniente directamente del sol ($q_{sol_{abs}}$), una pequeña porción de dicha radiación en la cubierta es absorbida ($q_{CPC_{vid}}, q_{sol_{vid}}$). Una porción de la radiación que captó el absorbedor se transmite por conducción a través del espesor del tubo ($q_{cond_{abs}}$) siendo posteriormente transferido por convección al fluido de trabajo ($q_{conv_{agua}}$).

La temperatura de la superficie exterior del absorbedor y la del agua en su interior, son mayores que la de la cubierta de vidrio, por lo que hay un intercambio radiativo y convectivo desde el absorbedor al vidrio ($q_{rad_{abs}}, q_{conv_{abs}}$) y evaporativo desde el agua hacia la superficie interior del vidrio ($q_{ev_{agua}}$). La pared interna de la cubierta es más caliente que la externa, por lo que se produce una transferencia de calor por conducción hacia el exterior ($q_{cond_{vid}}$), para finalmente ser transmitido por radiación y convección hacia el ambiente ($q_{conv_{vid}}, q_{rad_{vid}}$).

Se establecen entonces las ecuaciones de energía mediante el balance en el absorbedor y en la cubierta:

$$q_{cond_{Abs}} = q_{conv_{Agua}} \quad (3 - 17)$$

$$q_{sol_{abs}} + q_{CPC_{abs}} = q_{rad_{abs}} + q_{conv_{abs}} + q_{ev_{abs}} \quad (3 - 18)$$

$$q_{cond_{vid}} = q_{rad_{abs}} + q_{conv_{abs}} + q_{ev_{abs}} \quad (3 - 19)$$

$$q_{sol_{vid}} + q_{CPC_{vid}} + q_{cond_{vid}} = q_{rad_{vid}} + q_{conv_{vid}} \quad (3 - 20)$$

El balance global en todo el sistema queda establecido de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_u = A_{abs} F' [C G \eta_0 - U_L(T_{agua} - T_{amb})] \quad (3 - 21)$$

Donde \dot{Q}_u es el calor útil, A_{abs} es el área del absorbedor tomando en cuenta su diámetro exterior, F' es el factor de eficiencia del captador, U_L el coeficiente global

de pérdidas, T_{agua} la temperatura del agua en el interior del absorbedor y T_{amb} la temperatura ambiente.

El calor incidente, en las superficies de los distintos elementos, se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$q_{sol_{abs}} = G \tau_{vid} \alpha_{abs} \quad (3 - 22)$$

$$q_{CPC_{abs}} = C G \tau_{vid} \alpha_{abs} \rho_{CPC} \quad (3 - 23)$$

$$q_{sol_{vid}} = G \alpha_{vid} \quad (3 - 24)$$

$$q_{CPC_{vid}} = C G \alpha_{vid} \rho_{CPC} \quad (3 - 25)$$

Donde:

τ_{vid} – Transmitancia del vidrio (0.80).

α_{abs} – Absortancia del absorbedor (0.97).

α_{vid} – Absortancia del vidrio (0.12).

ρ_{CPC} – Reflectividad del CPC (0.90).

De manera general, el calor transferido aplicando el concepto de resistencia térmica se define mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{ter}} \quad (3 - 26)$$

La resistencia térmica (R_{ter}) está definida por el mecanismo de transferencia de calor correspondiente. Para la conducción en el absorbedor y en la cubierta de vidrio se determina de la siguiente manera:

$$R_{ter} = \frac{\Delta r}{k} \quad (3 - 27)$$

Δr representa la diferencia entre el radio exterior y el radio interior, k es la conductividad térmica del elemento (1,05 W/m K para el vidrio y 209,13 W/m K para el absorbedor).

Para la transferencia de calor por radiación, convección y evaporación, aplicando el modelo de resistencia:

$$R_{ter} = \frac{1}{h} \quad (3 - 28)$$

Se necesita determinar los coeficientes de transferencia ya que su resistencia térmica así lo requiere y entonces la transferencia de calor se cuantifica a través de:

$$q_{conv} = \Delta T (h_{conv}) \quad (3 - 29)$$

$$q_{rad} = \Delta T (h_{rad}) \quad (3 - 30)$$

$$q_{ev} = \Delta T (h_{ev}) \quad (3 - 31)$$

En la parte radiativa, las pérdidas de la cubierta de vidrio hacia el ambiente, y entre el absorbedor y el vidrio, se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{rad_{vid-amb}} = \varepsilon_{vid} \sigma (T_{ext-vid} + T_{amb}) (T_{ext-vid}^2 + T_{amb}^2) \quad (3 - 32)$$

$$h_{rad_{abs-vid}} = \frac{\sigma (T_{ext-abs} + T_{int-vid}) (T_{ext-abs}^2 + T_{int-vid}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{A_{ext-abs}}{A_{int-vid}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{vid}} - 1 \right)} \quad (3 - 33)$$

Donde:

$h_{rad_{vid-amb}}$ – Coeficiente de radiación del vidrio hacia el exterior.

$h_{rad_{abs-vid}}$ – Coeficiente de radiación del absorbedor hacia la cubierta de vidrio.

ε_{vid} – Emisividad del vidrio (0.94).

ε_{abs} – Emisividad del absorbedor (0.97).

$T_{ext-vid}$ – Temperatura en la superficie exterior de la cubierta de vidrio.

$T_{ext-abs}$ – Temperatura en la superficie exterior del absorbedor.

$T_{int-vid}$ – Temperatura en la superficie interior de la cubierta de vidrio.

$A_{ext-abs}$ – Área de la superficie exterior del absorbedor.

$A_{int-vid}$ – Área de la superficie interior del vidrio.

El área de la superficie exterior del absorbedor, depende del ancho de su abertura por la cual el vapor de agua va a circular a la cubierta de vidrio. Entonces:

$$A_{ext-abs} = \left[2\pi - 2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{t_{abe}}{2 r_{ext-abs}} \right) \right] r_{ext-abs} l \quad (3 - 34)$$

t_{abe} es la longitud del ancho de la abertura en el absorbedor y $r_{ext-abs}$ el radio exterior del mismo.

A su vez el área de la superficie interior del vidrio, depende del área en la cual se va a producir la condensación directa del vapor proveniente del absorbedor, ya que en esa pequeña superficie la transferencia se dará a través del vapor de agua proveniente del absorbedor.

$$A_{int-vid} = \left[2\pi - 2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{t_{abe}}{2 r_{int-vid}} \right) \right] r_{int-vid} l \quad (3 - 35)$$

Donde $r_{int-vid}$ es el radio interior de la cubierta de vidrio.

Por su parte los coeficientes convectivos dependen de la conductividad térmica y flujo de los fluidos involucrados, así como las condiciones geométricas. Para la transferencia del vidrio hacia el ambiente se calcula de la siguiente manera (Churchill y Chu 1975):

$$h_{convvid-amb} = \frac{Nu \ k_{aire}}{D_{ext-vid}} \quad (3 - 36)$$

En éste caso:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3 - 37)$$

El parámetro adimensional de Rayleigh (Ra) se expresa con la siguiente ecuación

$$Ra = \frac{g \beta (T_{ext-vid} - T_{amb}) D_{ext-vid}^3 Pr}{\nu^2} \quad (3 - 38)$$

Donde g es la constante gravitacional. β , es el coeficiente de expansión volumétrica ($\beta = \frac{1}{T}$). ν es la viscosidad cinemática y Pr el número de Prandtl.

En la transferencia del absorbedor hacia la cubierta de vidrio para espacios cerrados entre cilindros (Raithby y Hollands 1975) también requiere incluir el parámetro adimensional de Rayleigh ya que:

$$h_{conv\,abs-vid} = \frac{2\pi}{k_{ef} A_{ext-abs} \ln\left(\frac{r_{int-vid}}{r_{ext-abs}}\right)} \quad (3-39)$$

Donde la conductividad efectiva se determina mediante:

$$k_{ef} = 0.386 k \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (F_{cil} Ra)^{1/4} \quad (3-40)$$

El número de Rayleigh se expresa con la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{g \beta (T_{ext-abs} - T_{int-vid}) \bar{L}_C^3}{\nu^2} Pr \quad (3-41)$$

El factor geométrico, F_{cil} establecido por (Raithby y Hollands 1975), está definido a partir de la longitud característica:

$$F_{cil} = \frac{\left[\ln \frac{D_{int-vidrio}}{D_{ext-abs}} \right]^4}{\bar{L}_C^3 (D_{ext-abs}^{-3/5} + D_{int-vidrio}^{-3/5})^5} \quad (3-42)$$

En éste caso \bar{L}_C , es la longitud característica que representa la separación entre el absorbedor y el vidrio, para cilindros concéntricos es muy simple de determinar: $\bar{L}_C = r_{int-vidrio} - r_{ext-abs}$. Para cilindros no-concéntricos, no se puede conocer de manera precisa el campo de temperaturas y calor en la geometría, por lo que se propone un valor esperado para la longitud característica que representa al sistema.

Como se observa en la figura 21, la separación, entre el absorbedor y la cubierta, va cambiando ($\bar{L}_C(\theta) = r_{ext}(\theta) - r_{int}(\theta)$), dado que es un sistema cilíndrico, es conveniente ponerlo en coordenadas polares.

Por lo tanto se plantean las ecuaciones en dichas coordenadas de los respectivos radios:

$$r_{ext}(\theta) = r_{int-vid} \quad (3 - 43)$$

$$r_{int}(\theta) = \frac{2 E \cos(\pi - \theta) + \sqrt{[-2 E \cos(\pi - \theta)]^2 - 4(E^2 - r_{ext-abs}^2)}}{2} \quad (3 - 44)$$

E es la excentricidad, la separación entre los centros de las circunferencias. Cabe señalar que para tubos concéntricos $r_{int}(\theta) = r_{ext-abs}$ por lo que el valor esperado se va a mantener constante ($\bar{L}_C = r_{int-vidrio} - r_{ext-abs}$).

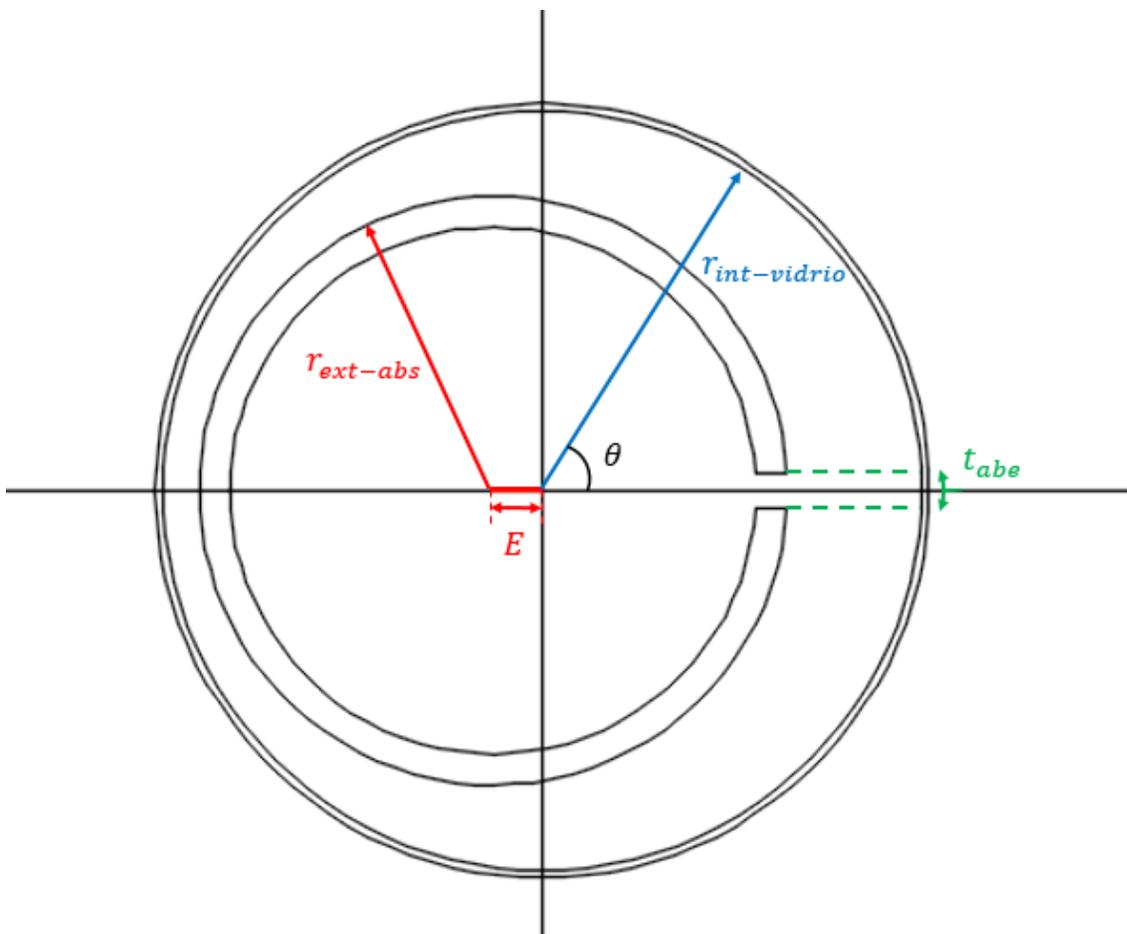


Figura 21. Cilindros no concéntricos.

(Elaboración propia).

Es posible entonces, de manera sencilla, establecer el modelo térmico para una geometría compleja y se espera que los valores de temperatura y calor, aunque no

sean tan exactos, sean lo suficientemente representativos en el sistema. Como se mencionó en las consideraciones, se considera una homogeneidad a lo largo de toda la circunferencia de los elementos involucrados, así entonces emplear un valor esperado es una aproximación al modelo planteado con la geometría de tubos concéntricos.

Como se observa en la figura 21, en la mayor parte de la superficie interna del vidrio, su temperatura será influenciada por la transferencia mediante convección y radiación proveniente del absorbedor, y en mucho menor proporción por el coeficiente evaporativo (h_{ev}) que surge de la evaporación del agua en el interior del absorbedor. Entonces, el valor esperado de la longitud característica que determinará las pérdidas convectivas del absorbedor hacia la cubierta de vidrio, se establece mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{L}_c = \frac{1}{\pi - \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{t_{abs}}{2 r_{int-vid}} \right) \right]} \int_{\text{sen}^{-1} \left(\frac{t_{abs}}{2 r_{int-vid}} \right)}^{\pi} L_c(\theta) d\theta \quad (3 - 45)$$

A continuación se muestra en la Tabla 10 la longitud característica, en milímetros, para diferentes espesores en la abertura del absorbedor considerando una excentricidad de 9.5 mm. Como se observa la variación no es muy significativa, sin embargo, considerarla, dará una mejor estimación del coeficiente convectivo.

Tabla 10. Longitud característica para distintas longitudes de abertura.

(Elaboración propia).

\bar{L}_c (mm)	t_{abe} (mm)
16.5738	5
16.5687	6
16.5636	7
16.5585	8
16.5533	9
16.5482	10
16.5430	11
16.5379	12
16.5327	13

\bar{L}_c (mm)	t_{abe} (mm)
16.5275	14
16.5223	15

También es de suma importancia calcular los coeficientes de transferencia de calor en el interior del absorbedor, los cuales incluyen fase líquida y vapor.

Las transferencias de calor por convección y evaporación tienen lugar simultáneamente. Al revisar los modelos matemáticos desarrollados (Kumar y Tiwari, 2009) para la cuantificación del coeficiente de convectividad, se observó que Dunkle (1961) llevó a cabo la mayoría de los estudios aceptables sobre la transferencia de calor por convección y evaporación en un espacio cerrado. Sin embargo, la relación semi-empírica derivada para evaluar el calor interno y la transferencia de masa en la energía solar todavía tiene algunas limitaciones, tales como:

- Las propiedades del aire húmedo se toman a una temperatura media de 50°C
- El rango equivalente de diferencia de temperatura entre la superficie del agua y la cubierta de condensación se considera como 17°C
- La superficie de evaporación y condensación se consideran paralelas.
- No se considera la longitud característica entre las superficies de condensación y evaporación.

La transferencia de calor por convección en la correlación de Dunkle se basa en la convección libre en el absorbedor y el coeficiente de transferencia de calor por evaporación se introdujo contabilizando el efecto de la presión de vapor.

Malik (1982) desarrolló una correlación para el coeficiente de transferencia de calor evaporativo, basado en la relación de Lewis para un rango de temperatura de operación bajo. En la relación, se asumieron las propiedades físicas del aire saturado a 50°C, descuidando el efecto de la presión de vapor.

Chen (1984) propuso la correlación simple en la transferencia de calor por convección libre en un recinto que puede usarse para un amplio rango del número de Rayleigh ($3.5 \times 10^3 < Ra < 1.0 \times 10^6$).

Clark (1990) propuso los diferentes valores de C y n ($C = 0.21$, $n = 1/4$ para $1.0 \times 10^4 < Gr < 2.5 \times 10^5$ y $C = 0.1255$, $n = 1/3$ para $2.5 \times 10^5 < Gr < 1.0 \times 10^7$) para diferentes rangos de número de Grashof. Sin embargo, los resultados encontrados son contradictorios ya que no es factible lograr la condición ideal en condiciones reales de campo.

Adhikari (1990) presentó un modelo de simulación por computadora para estudiar el rendimiento en estado estable de un destilador solar de dos vertientes, considerando la influencia de la longitud característica.

Shawaqfeh y Farid (1995) llevaron a cabo los estudios de simulación para desarrollar las correlaciones basadas en el mejor ajuste y propusieron el valor reducido de C (0.067). Validaron datos propios y de otros experimentales para interiores y exteriores y predijeron que el modelo de Dunkle predecía el rendimiento del destilado casi en un 30% en comparación con su propio modelo. Esto se debió a una temperatura de operación mayor de 55°C en la instalación solar.

Kumar y Tiwari (1996) desarrollaron el modelo para determinar el coeficiente de transferencia de masa convectiva para diferentes números de Grashof con valores cambiantes de 'C' y 'n' y validados a partir de los resultados experimentales para las condiciones de verano. Propusieron los valores de C (0.0322) y n (0.4144) para $1.794 \times 10^6 < Gr < 5.724 \times 10^6$, usando el análisis de regresión después de realizar experimentos en condiciones de campo reales (Kumar., 1996). Este método para evaluar los coeficientes de transferencia de calor internos se puede utilizar eficazmente tanto en interiores como en exteriores y no presenta fallas como en otros modelos.

Zheng (2002) desarrolló las correlaciones después de algunas modificaciones en el modelo de Chen para evaluar el coeficiente de transferencia de calor por convección y la tasa de rendimiento del destilado.

Los diferentes modelos desarrollados por los investigadores anteriores se basan en simulaciones de interiores para diferentes diseños de captadores solares y en condiciones experimentales. Las correlaciones propuestas tienen valores fijos de "C" y "n" constantes, y no pueden usarse idealmente de forma general para explicar correctamente la transferencia de calor en todas las configuraciones experimentales y condiciones climáticas.

Tripathi y Tiwari (2003) desarrollaron el nuevo modelo para un rango de temperatura de agua alta de 80°C para una cubierta de condensación opaca, metálica y semicilíndrica en destilador solar para estudio experimental en interiores.

Rahbar y Esfahani (2014) determinaron valores de "C" y "n" constantes para un destilador con absorbedor cilíndrico semicircular y cubierta circular de vidrio, también cilíndrica (Nader Rahbar, 2015).

Se ha observado que el modelo de Dunkle ha sido utilizado por la mayoría de los investigadores en el campo de la destilación solar incluso en las condiciones que no están bajo la limitación del modelo.

Para conocer la validez de varios modelos térmicos en condiciones reales de campo para un sistema solar híbrido, Kumar y Tiwari (2009) estimaron los coeficientes de transferencia de calor interno utilizando varios modelos térmicos. Además, con base en el modelo de mejor ajuste, analizaron el efecto estacional sobre el coeficiente de transferencia de calor interno de los destiladores solares activos pasivos e híbridos. Las observaciones experimentales del diseño híbrido se incluyeron para un amplio rango de temperatura del agua, que no se estudió antes. Debido a su menor margen de error dicho modelo (Kumar y Tiwari, 1996) será uno de los empleados para la cuantificación de los coeficientes convectivo y evaporativo en el interior del absorbedor, el convectivo queda definido de la siguiente manera:

$$h_{conv\ abs} = \frac{Nu \ k_{aire\ h\u00famedo}}{L_C} \quad (3 - 46)$$

Donde:

$$Nu = C (Pr \ Gr)^n \quad (3 - 47)$$

$$Gr = \frac{g \ \rho_{aire\ h\u00famedo}^2 \ \Delta T \ \beta \ L_C^3}{\mu_{aire\ h\u00famedo}^2} \quad (3 - 48)$$

$$\Delta T = T_{agua} - T_{int-vid} + \frac{(P_{sat-agua} - P_{sat-vid})(T_{agua})}{268.9 \times 10^3 - P_{sat-agua}} \quad (3 - 49)$$

Y el coeficiente de transferencia de calor por evaporaci3n se expresa como:

$$h_{ev} = 0.016273 \ h_{conv\ abs} \left(\frac{P_{sat-agua} - P_{sat-vid}}{T_{agua} - T_{int-vid}} \right) \quad (3 - 50)$$

Siendo $P_{sat-agua}$ la presi3n de saturaci3n del vapor a la temperatura del agua en el absorbedor. $P_{sat-vid}$, la presi3n de saturaci3n del vapor a la temperatura del interior del vidrio y L_C la separaci3n entre el nivel de agua y la superficie de condensaci3n en el interior del vidrio.

$$P_{sat-agua} = e^{\left(25.327 - \frac{5144}{T_{agua}}\right)} \quad (3 - 51)$$

$$P_{sat-vid} = e^{\left(25.327 - \frac{5144}{T_{int-vid}}\right)} \quad (3 - 52)$$

Por su parte, para el modelo de Rahbar y Esfahani (2014), los coeficientes se obtienen de la siguiente manera:

$$h_{conv\ abs} = 1.6637 (\Delta T)^{0.226} \quad (3 - 53)$$

$$h_{ev} = h_{conv\ abs} \left[0.0005 \left(\frac{T_{agua} + T_{int-vid}}{2} \right)^{2.5894} \right] \quad (3 - 54)$$

La eficiencia del destilador entonces se determina de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G \ A_{apertura}} \quad (3 - 55)$$

El calor útil \dot{Q}_u se obtiene mediante la ecuación (3-21). Donde el coeficiente global de pérdidas U_L y el factor de eficiencia del captador F' se calculan mediante:

$$U_L = \left[\frac{A_{abs}}{(h_{rad_{vid-amb}} + h_{conv_{vid-amb}})A_{ext-vid}} + \frac{1}{h_{conv_{abs-vid}} + h_{rad_{abs-vid}} \left(\frac{A_{abs}}{A_{ext-abs}} \right) + h_{ev_{abs-vid}} \left(\frac{A_{abe-ext}}{A_{ext-vid}} \right)} \right]^{-1} \quad (3-56)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ext-abs}}{h_{ev} D_{int-abs}} + \left(\frac{D_{ext-abs}}{2 k_{abs}} \ln \frac{D_{ext-abs}}{D_{int-abs}} \right)} \quad (3-57)$$

Donde k_{abs} es la conductividad térmica del absorbedor.

Determinar la temperatura de la cubierta del vidrio se vuelve entonces un proceso iterativo, proponiendo un valor inicial, determinando los coeficientes y comprobando que se cumpla la ley de conservación de la energía, donde:

$$T_{vid} = \frac{G A_{ext-vid} \left(\alpha_{vid} \frac{D_{ext-vid}}{W_a} + \rho_{CPC} \alpha_{vid} \frac{W_a - D_{ext-vid}}{W_a} \right)}{A_{ext-vid}(h_{rad_{vid-amb}} + h_{conv_{vid-amb}}) + h_{ev} A_{abe} + (h_{rad_{abs-vid}} + h_{conv_{abs-vid}}) A_{ext-abs}} + \frac{T_{abs} [h_{ev} A_{abe} + (h_{rad_{abs-vid}} + h_{conv_{abs-vid}}) A_{ext-abs}]}{A_{ext-vid}(h_{rad_{vid-amb}} + h_{conv_{vid-amb}}) + h_{ev} A_{abe} + (h_{rad_{abs-vid}} + h_{conv_{abs-vid}}) A_{ext-abs}} + \frac{T_{amb} A_{ext-vid}(h_{rad_{vid-amb}} + h_{conv_{vid-amb}})}{A_{ext-vid}(h_{rad_{vid-amb}} + h_{conv_{vid-amb}}) + h_{ev} A_{abe} + (h_{rad_{abs-vid}} + h_{conv_{abs-vid}}) A_{ext-abs}} \quad (3-58)$$

El modelo entonces se valida a través de pruebas realizadas y mediciones apegadas a la norma ANSI/ASHRAE, 93-1986, lo cual se muestra en la sección inicial del capítulo 4.

3.2.3. Optimización del diseño

La optimización del diseño, o diseño optimizado, debe maximizar el objetivo cambiando las variables que integran el sistema. En ese sentido, el objetivo es tener un buen indicador en el costo-beneficio del sistema, y las variables del sistema son los materiales, y la configuración geométrica.

3.2.3.1. Optimización de materiales

Para el absorbedor se analizaron dos materiales, aluminio y acero inoxidable, debido a sus propiedades para soportar la corrosión generada por el agua de mar. A pesar de que el acero inoxidable resiste mejor la corrosión, el aluminio tiene mejor conductividad térmica y un costo más bajo; por lo tanto se seleccionó para el absorbedor, tubo de aluminio IPS 6063 T6 C-40. La aleación 6063 y el tratamiento térmico T6, proporcionan alta resistencia a la corrosión. La cédula 40 (diámetro de 10 cm), se consideró para tener el espacio que requiere darle mantenimiento.

En el material del concentrador se empleó lámina de ultra-alta-reflectividad, de la marca Alanod, debido a su elevada eficiencia óptica. La cubierta de vidrio tiene un diámetro de 15 cm y una longitud de 70 cm; el diámetro mayor que el del absorbedor para poder cubrirlo, y la longitud con base en la disponibilidad del mercado. Se construyó también una estructura de madera (mdf).

Se consideraron diseños con concentraciones de $C=1$ y $C=2$, con el fin de validar el modelo energético. Empleando las ecuaciones [2-8,2-11] se obtuvo la siguiente geometría, con las dimensiones en mm:

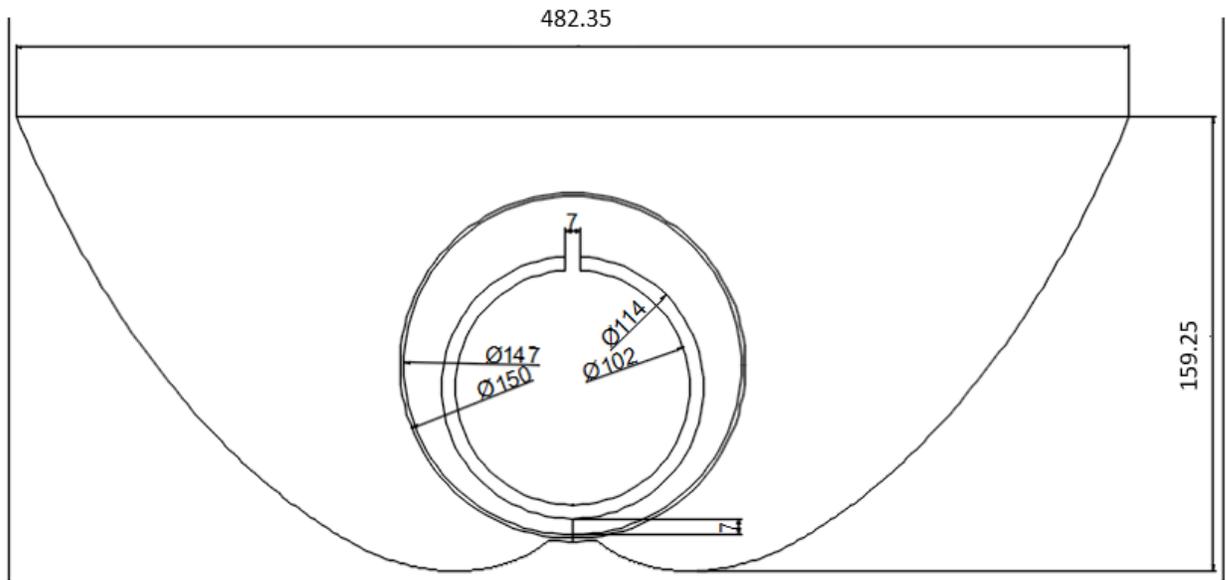


Figura 22. Perfil CPC, C=1.
(Elaboración propia).

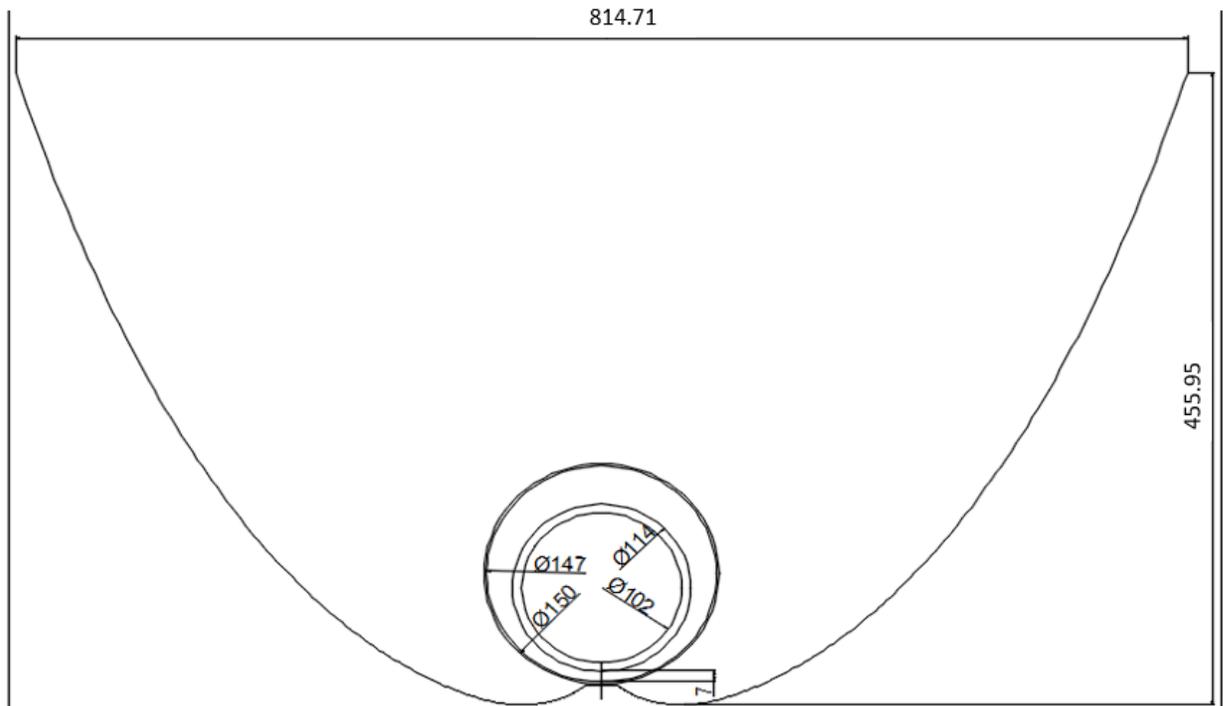


Figura 23. Perfil CPC, C=2.
(Elaboración propia).

Como se puede observar en las figuras 22 y 23, para una concentración $C=1$ y $C=2$, se incrementa en mayor proporción la altura (16 a 46 cm), comparada con la apertura (48 a 81 cm). La longitud activa (profundidad) del destilador es de 65 cm, ya que, la cubierta de vidrio y el absorbedor, requieren sujetarse a la estructura; por lo que, de los 70 cm de largo, se emplean 1,5 cm de cada lado para sujetar dichos elementos.

El uso de la bomba de vacío puede incrementar la producción hasta un 50% (Moses Koilraj, Palanisamy Senthil, Gopal, & Joseph Ebenezer, 2011), pero puede también significar un aumento considerable en el costo del dispositivo, y en ocasiones ese encarecimiento no justifica el incremento de producción. El costo de la bomba de vacío se aprecia demasiado elevado ya que ronda en los \$1,940 USD por lo que es de suponer que no es viable su implementación.

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de materiales empleados y el costo del sistema de destilación para el prototipo con concentración $C=1$:

Tabla 11. Costo de destilador solar ($C=1$).

(Elaboración propia).

No.	Elemento	Material	Cantidad comercial	Unidad	Costo USD	Cantidad empleada	Unidad	Costo unitario USD
1	Base	MDF (Medium Density Fibreboard 9 mm)	2.44	m ² (1,22 x 2,44)	11.64	0.60	m ²	2.86
2	Absorbedor	Alumino (6063)	1.00	kg	6.74	1.00	kg	6.74
		Aluminio (6063 pipe 4" C-40)	6.10	m	202.96	0.75	m	24.95
3	Concentrador	Lámina (Ultra-alta-reflectancia)	2.45	m ² (1,00 x 2,45)	92.19	0.70	m ²	26.34

No.	Elemento	Material	Cantidad comercial	Unidad	Costo USD	Cantidad empleada	Unidad	Costo unitario USD
4	Cubierta	Vidrio (6" esp 3 mm)	0.70	m	12.13	0.70	m	12.13
5	Accesorios	Pijas	1.00	Pieza	0.02	20.00	Piezas	0.49
		Aislante (poliuretano)	1.00	Espuma	4.37	0.50	Espuma	2.18
		Pintura (base)	1.00	Litro	7.76	0.25	Litro	1.94
		Pintura (absorbedor)	1.00	Lata	1.46	0.50	Lata	0.73
6	Manufactura	Base						14.56
		Absorbedor						33.96
		Concentrador						6.07
		Cubierta						2.43
		Armado						9.70
								Total

El costo del sistema con la bomba de vacío incrementa su precio a más de 14 veces comparado con el destilador sin bomba. Con la finalidad de determinar la factibilidad del uso de la bomba de vacío, se construyeron dos primeros prototipos, con la misma configuración geométrica, mostrada en la figura 22. Se efectuaron las pruebas y mediciones en la ciudad de Toluca, empleando agua sin salinidad. En uno de los dos prototipos se implementó la bomba de vacío y el otro se dejó sin bomba. Se midió la cantidad de agua diaria que se logra obtener y se analizó la eficiencia del sistema.

3.2.3.2. Optimización geométrica

La energía que puede aprovechar un CPC depende de la concentración geométrica, ya que dicha concentración va a limitar el ángulo de aceptación del captador. Como se muestra en la tabla 12, para $C=1$ el ángulo de incidencia es de 30° , lo cual se traduce en cuatro horas de sol aprovechables debido a que es un sistema estacionario, por otra parte, una concentración de 2 representa solamente un aprovechamiento de 2.4 horas debido a su ángulo de incidencia de 18° .

Tabla 12. Ángulo de aceptación con respecto a la concentración geométrica.

(Elaboración propia).

C	θ_o
1.0	30
1.0	29
1.1	28
1.1	27
1.2	26
1.3	25
1.3	24
1.4	23
1.5	22
1.6	21
1.7	20
1.8	19
2.0	18
2.1	17
2.3	16
2.4	15
2.6	14
2.9	13
3.2	12
3.5	11
3.9	10
4.4	9
5.0	8
5.7	7
6.8	6
8.2	5
10.3	4
13.9	3
21.1	2
42.6	1

La energía que puede ser captada por un CPC estacionario se establece mediante la siguiente ecuación:

$$I_{CPC} = I_B + \frac{1}{C} I_D \quad (3 - 59)$$

Donde I_B es la energía obtenida a partir de la radiación directa e I_D mediante la radiación difusa. Estandarizando el área del absorbedor igual a 1 m², la energía aprovechable por el CPC se calcula como:

$$Q_{CPC} = I_{CPC} C = (I_B + \frac{1}{C} I_D) C = I_{CPC} = I_B C + I_D \quad (3 - 60)$$

Para optimizar el factor de concentración, se determinó la energía aprovechable en el CPC con las concentraciones de la tabla 12. Mediante el modelo de Collares-Pereira and Rabl se analizaron distintas latitudes con índices de claridad de 0.2, 0.5 y 0.8. El análisis se realizó para los días dónde la incidencia de radiación es la máxima y la mínima, esto es en el solsticio de verano y el solsticio de invierno.

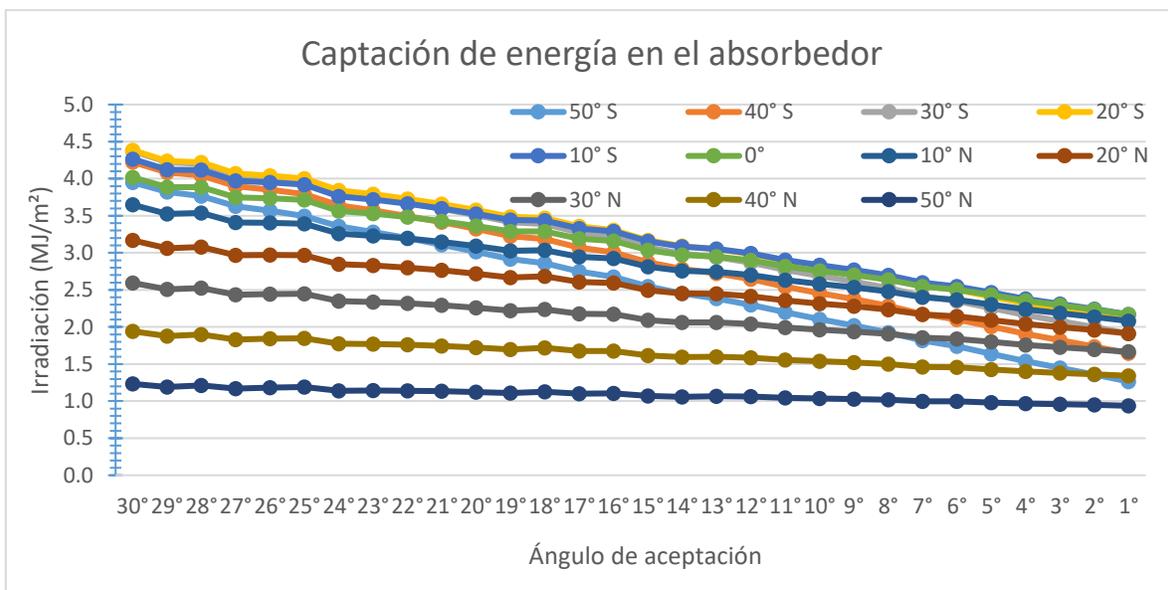


Figura 24. Energía en el CPC para solsticio de invierno y $K_T = 0.2$.

(Elaboración propia).

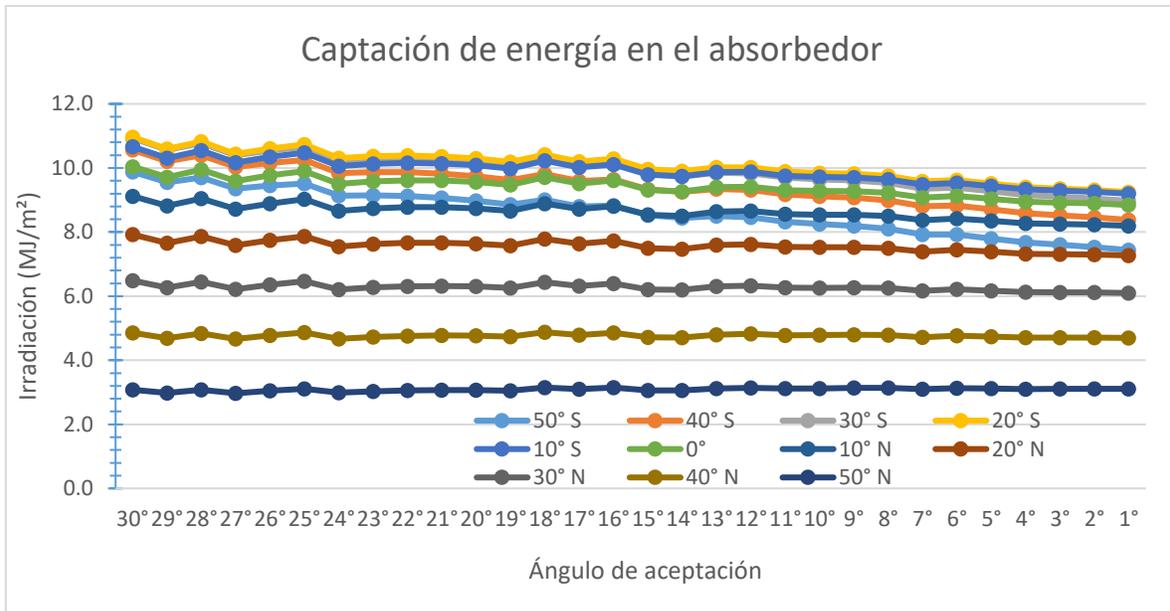


Figura 25. Energía en el CPC para solsticio de invierno y $K_T = 0.5$.

(Elaboración propia).

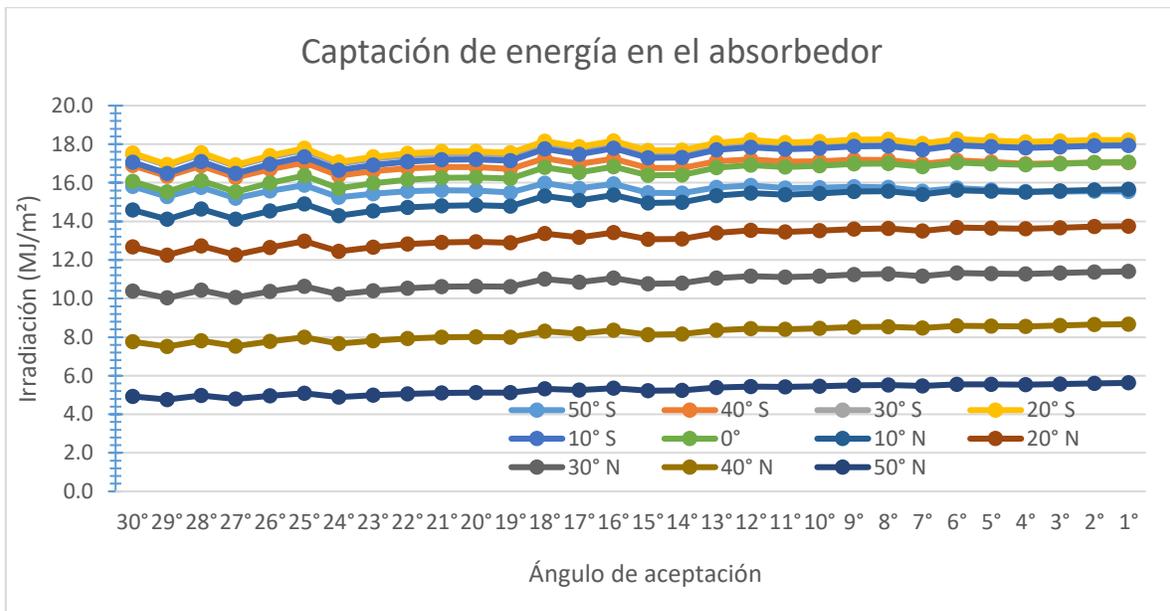


Figura 26. Energía en el CPC para solsticio de invierno y $K_T = 0.8$.

(Elaboración propia).

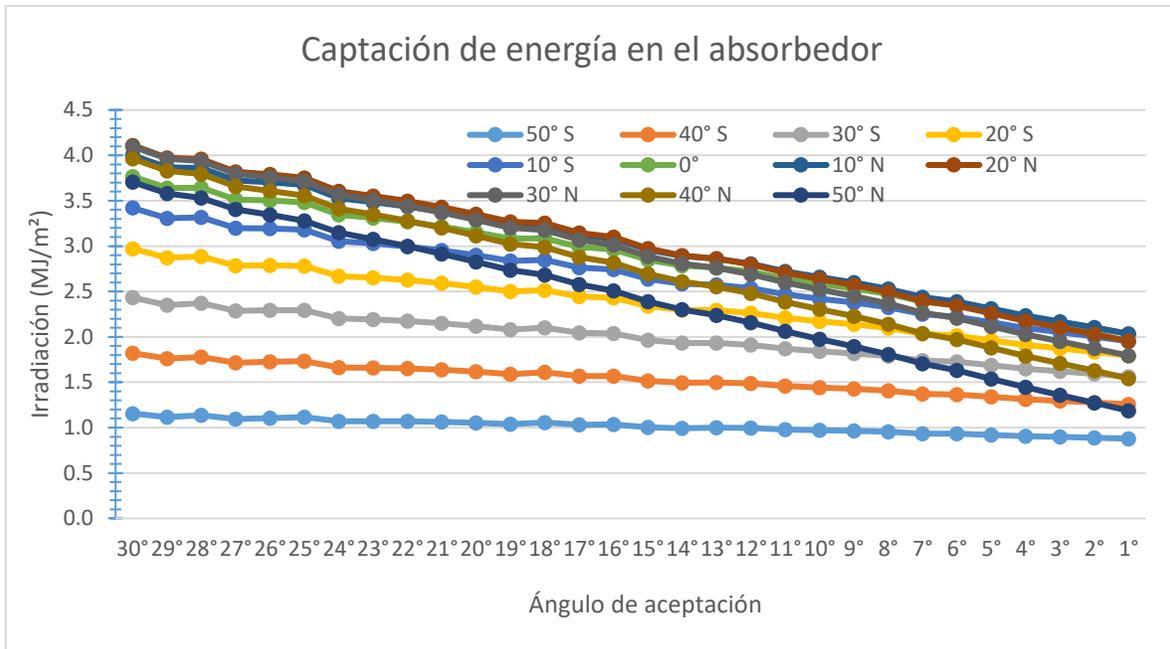


Figura 27. Energía en el CPC para solsticio de verano y $K_T = 0.2$.

(Elaboración propia).

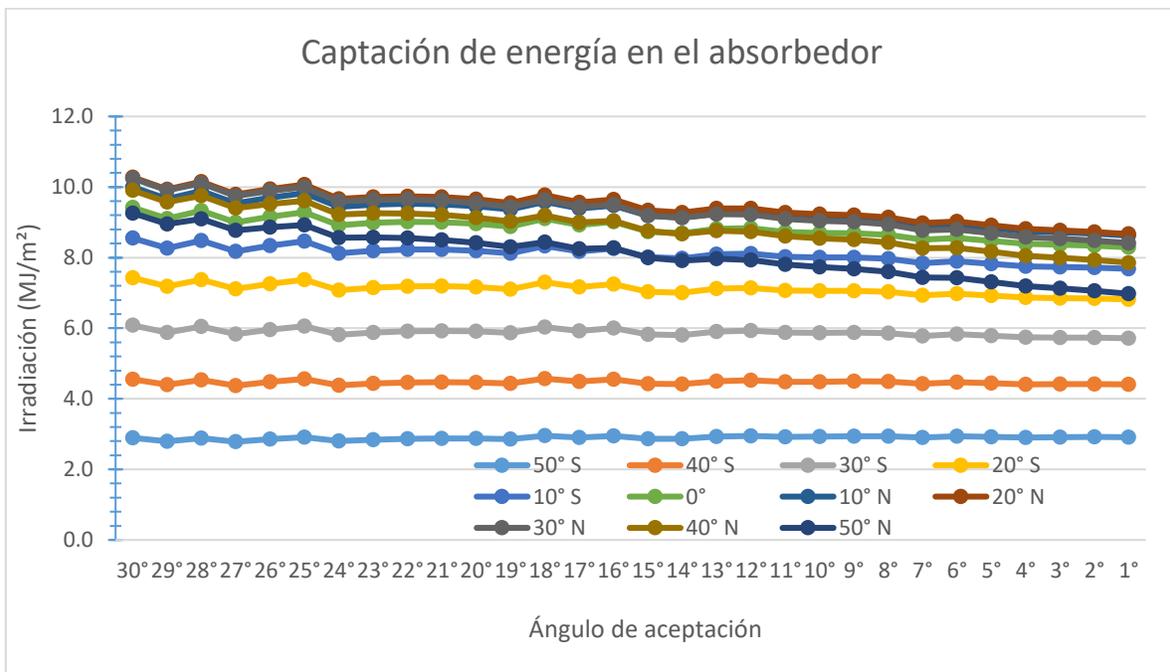


Figura 28. Energía en el CPC para solsticio de verano y $K_T = 0.5$.

(Elaboración propia).

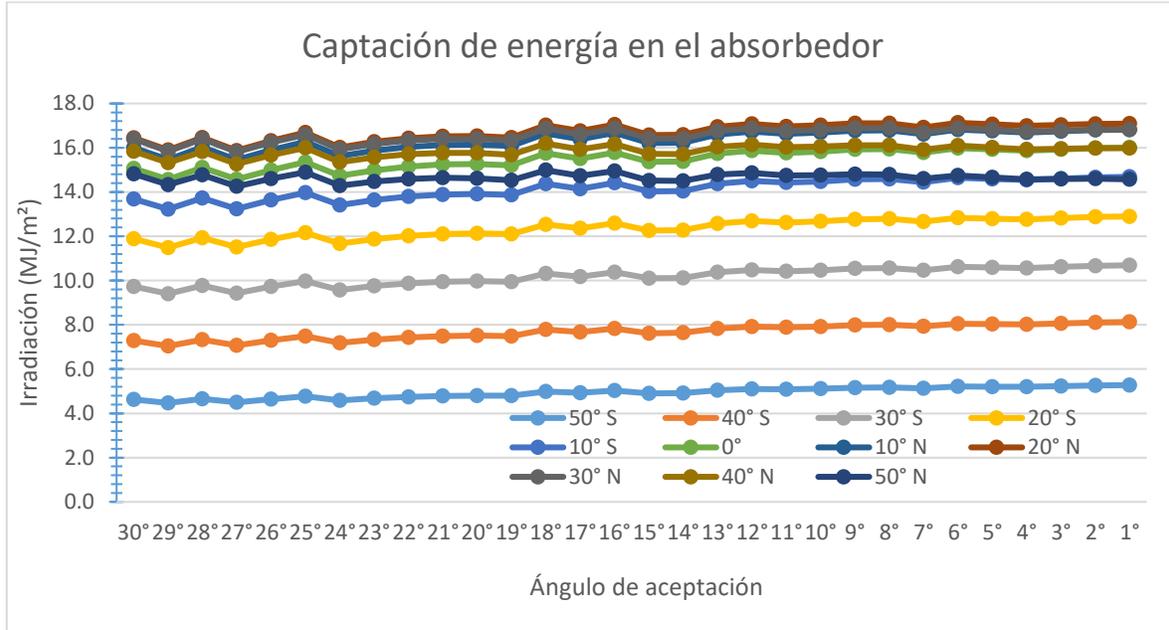


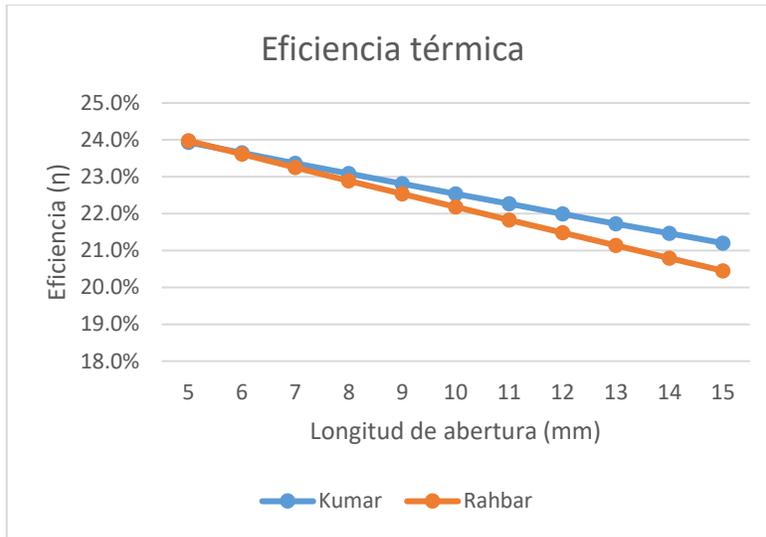
Figura 29. Energía en el CPC para solsticio de verano y $K_T = 0.8$.

(Elaboración propia).

Como se observa en las figuras (24-29), la energía que puede aprovechar el CPC se reduce cuando la concentración aumenta, para índices de claridad (K_T) de 0.2 y 0.5. Para el caso de un $K_T = 0.8$ el incremento en el factor de concentración conlleva a una mayor energía aprovechable, sin embargo el aumento es demasiado pequeño. Tomando en cuenta que índices de claridad de 0.8 no son comunes, y que, en la mayoría de los casos, un aumento en el índice de concentración nos lleva a una pérdida energética y una inversión mayor, se establece un factor de concentración $C=1$ como óptimo para el sistema estacionario.

Para continuar con la optimización en la geometría, se estableció la longitud del ancho de la abertura en el absorbedor que brinda un mejor rendimiento, para ello se empleó el balance energético mostrado en la sección 2.4.2.2 y se plantearon tres escenarios considerando una temperatura ambiente de 20°C:

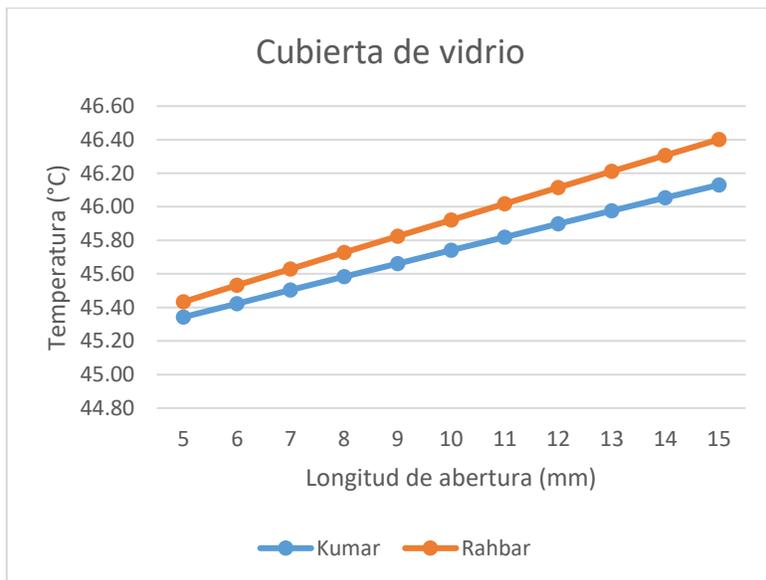
- ❖ $G = 600 \text{ W/m}^2$. Con ésta irradiancia promedio la temperatura en el absorbedor ronda en los 70°C . Las eficiencias varían entre 20% y 24% dependiendo del ancho de la abertura y el modelo utilizado y la temperatura de la cubierta de vidrio 45°C y 46°C como se muestra en la figura 30 y 31.



Abertura (mm)	Eficiencia	
	Kumar	Rahbar
5	23.9%	24.0%
6	23.6%	23.6%
7	23.4%	23.2%
8	23.1%	22.9%
9	22.8%	22.5%
10	22.5%	22.2%
11	22.3%	21.8%
12	22.0%	21.5%
13	21.7%	21.1%
14	21.5%	20.8%
15	21.2%	20.5%

Figura 30. Eficiencia del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .

(Elaboración propia).

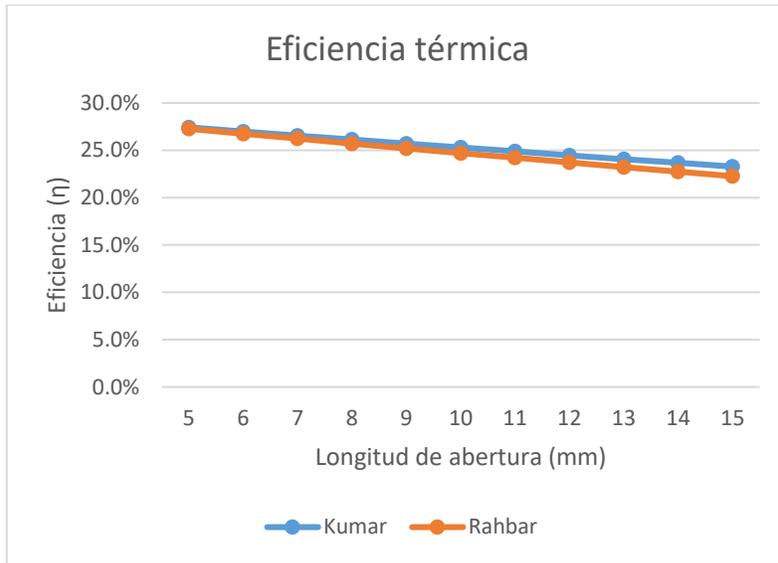


Abertura (mm)	Temperatura del vidrio(°C)	
	Kumar	Rahbar
5	45.34	45.43
6	45.42	45.53
7	45.50	45.63
8	45.58	45.73
9	45.66	45.82
10	45.74	45.92
11	45.82	46.02
12	45.90	46.11
13	45.98	46.21
14	46.05	46.31
15	46.13	46.40

Figura 31. Temperatura del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .

(Elaboración propia).

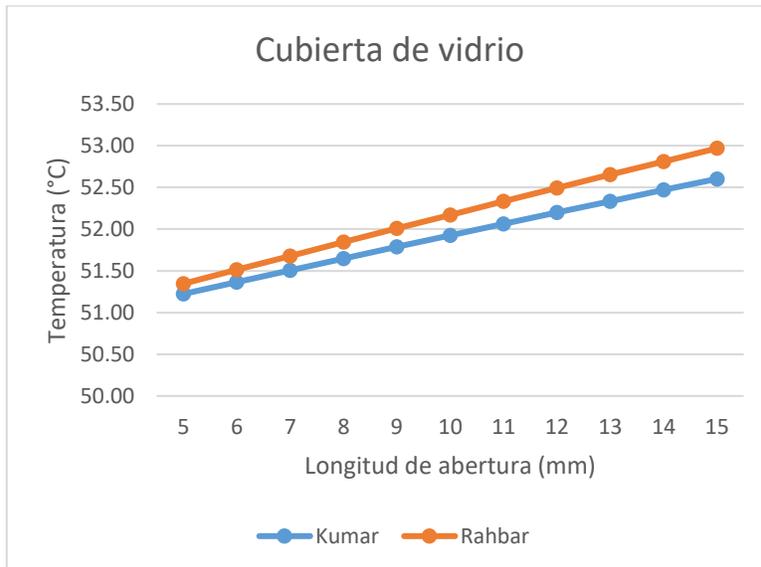
❖ $G = 800 \text{ W/m}^2$. Con ésta irradiancia promedio la temperatura en el absorbedor ronda en los 80°C . Las eficiencias varían entre 22% y 27% dependiendo del ancho de la abertura y el modelo utilizado y la temperatura de la cubierta de vidrio 51°C y 53°C como se muestra en la figura 32 y 33.



Abertura (mm)	Eficiencia	
	Kumar	Rahbar
5	27.4%	27.3%
6	27.0%	26.7%
7	26.6%	26.2%
8	26.1%	25.7%
9	25.7%	25.2%
10	25.3%	24.7%
11	24.9%	24.2%
12	24.5%	23.7%
13	24.1%	23.2%
14	23.7%	22.7%
15	23.3%	22.3%

Figura 32. Eficiencia del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .

(Elaboración propia).

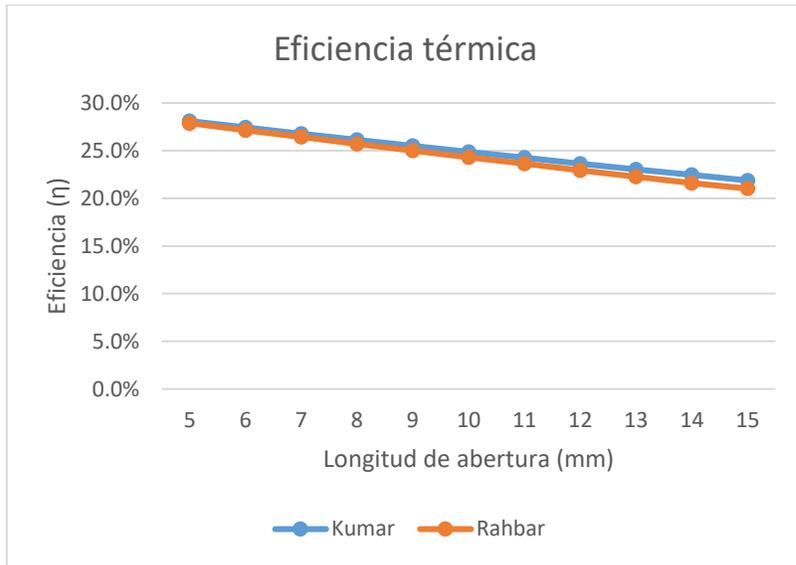


Abertura (mm)	Temperatura del vidrio (°C)	
	Kumar	Rahbar
5	51.22	51.35
6	51.37	51.51
7	51.51	51.68
8	51.65	51.84
9	51.79	52.01
10	51.93	52.17
11	52.06	52.33
12	52.20	52.49
13	52.33	52.65
14	52.47	52.81
15	52.60	52.97

Figura 33. Temperatura del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .

(Elaboración propia).

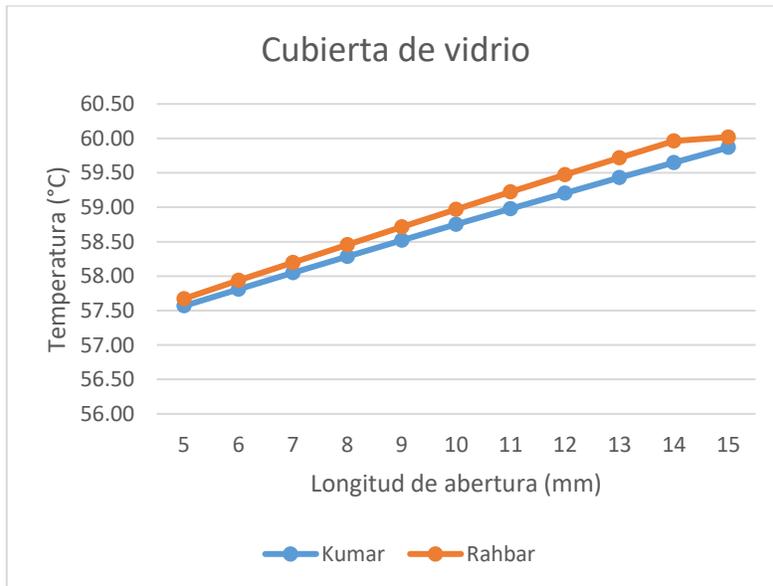
- ❖ $G = 1000 \text{ W/m}^2$. Con ésta irradiancia promedio la temperatura en el absorbedor ronda en los 90°C . Las eficiencias varían entre 21% y 28% dependiendo del ancho de la abertura y el modelo utilizado y la temperatura de la cubierta de vidrio 57°C y 60°C como se muestra en la figura 34 y 35.



Abertura (mm)	Eficiencia	
	Kumar	Rahbar
5	28.1%	27.9%
6	27.4%	27.2%
7	26.8%	26.4%
8	26.1%	25.7%
9	25.5%	25.0%
10	24.9%	24.3%
11	24.2%	23.6%
12	23.6%	22.9%
13	23.0%	22.3%
14	22.4%	21.6%
15	21.9%	21.0%

Figura 34. Eficiencia del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .

(Elaboración propia).



Abertura (mm)	Temperatura del vidrio(°C)	
	Kumar	Rahbar
5	57.57	57.67
6	57.81	57.94
7	58.05	58.20
8	58.29	58.46
9	58.52	58.72
10	58.75	58.97
11	58.98	59.22
12	59.21	59.47
13	59.43	59.72
14	59.65	59.96
15	59.87	60.02

Figura 35. Temperatura del destilador con irradiancia promedio de 600 W/m^2 .

(Elaboración propia).

Como se observa en los diferentes escenarios planteados, independientemente del modelo empleado (Kumar o Rahbar), la eficiencia disminuye conforme se aumenta la longitud de la abertura, por lo que se establece el espesor óptimo en 5 mm. Longitudes menores a 5 mm requieren procesos de manufactura detallados y por ende costosos.

CAPÍTULO 4

Resultados y análisis económico

Se presentan a continuación los resultados que permiten validar el modelo térmico y la realización de los mapas de productividad para visualizar en dónde y en qué periodo se tiene el mejor rendimiento del sistema; además se muestran los resultados de los estudios fisicoquímicos para verificar que el agua destilada cumpla con la NOM-127.

4.1. Validación del modelo térmico

Para la validación del sistema se realizaron pruebas en los prototipos con $C=1$ y $C=2$, ambos con una abertura de 10 mm en el absorbedor.

La norma ANSI/ASHRAE, 93-1986 se usó como guía para llevar a cabo la evaluación térmica. Los requerimientos determinados por el estándar ASHRAE se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Para pruebas en exterior para determinar la eficiencia térmica, el captador debe estar montado en un lugar donde no haya suficiente energía reflejada desde los edificios vecinos o algunas otras superficies. Se debe tener cuidado en la ubicación de las pruebas, de tal forma que evite la alta reflectancia del suelo.
- El rendimiento térmico de un captador solar está determinado en parte obteniendo los valores de la eficiencia instantánea para una combinación de valores de radiación incidente, temperatura ambiente, temperatura del agua, temperatura del absorbedor y cubierta. Todas las características que requieren ser medidas tienen que estar regidas por el estado estacionario o casi-estacionario.

Para validar los los modelos de Kumar y Rahbar se efectuaron las pruebas en los destiladores y se compararon los resultados. La tabla 13 muestra los resultados de las pruebas experimentales.

Tabla 13. Resultados experimentales de destilación de agua de mar.

(Elaboración propia).

<i>Hora</i>	$G \left(\frac{W}{m^2} \right)$	$T_{agua} (^{\circ}C)$	$T_{amb} (^{\circ}C)$	<i>Destilado (ml)</i>	$T_{vidrio} (^{\circ}C)$
11:00-12:00	454	50.5	18	75	34
12:00-13:00	724	61.2	19	105	43
13:00-14:00	653	60.4	20	85	42
14:00-15:00	785	62.7	20	105	43
15:00-16:00	581	57.3	19	80	41

Las pruebas experimentales se efectuaron en la ciudad de Toluca, el 24 de octubre de 2019. Como se observa en los resultados, la temperatura del agua en el interior del absorbedor no supera los 65°C, lo que es conveniente para poder utilizar el modelo de Rahbar, el cual se limita a temperaturas inferiores a dicho valor.

Tabla 14. Parámetros determinados mediante el modelo de Kumar.

(Elaboración propia).

<i>Hora</i>	<i>Modelo Kumar</i>				
	<i>Destilado (ml)</i>	<i>% error</i>	$T_{vidrio} (^{\circ}C)$	$h_{conv abs} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$	$h_{ev} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$
11:00-12:00	79.16	-5.5%	34.7	3.322	23.472
12:00-13:00	98.17	6.5%	41.7	3.809	39.955

13:00-14:00	92.51	-8.8%	41.5	3.750	38.413
14:00-15:00	104.25	0.7%	43.4	3.837	42.971
15:00-16:00	86.76	-8.4%	39.1	3.632	32.996

En las tablas 14 y 15 se comparan los datos experimentales con los valores teóricos obtenidos en los modelos de Kumar y Rahbar. Se determinó el porcentaje de error entre los mililitros producidos comparado con lo que se había previsto en los modelos, se observa que el modelo que mejor se aproxima a los valores reales es el modelo de Kumar.

Tabla 15. Parámetros determinados mediante el modelo de Rahbar.

(Elaboración propia).

Hora	Modelo Rahbar				
	Destilado (ml)	% error	$T_{vidrio} (^{\circ}C)$	$h_{convabs} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$	$h_{ev} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$
11:00-12:00	81.42	-8.6%	34.8	3.422	28.420
12:00-13:00	100.06	4.7%	41.8	3.743	50.733
13:00-14:00	94.32	-11.0%	41.6	3.708	48.933
14:00-15:00	106.22	-1.2%	43.5	3.768	55.188
15:00-16:00	88.70	-10.9%	39.1	3.627	41.418

La siguiente figura muestra la variación en la temperatura del vidrio y se puede observar que ambos modelos se aproximan bastante bien a los datos reales.

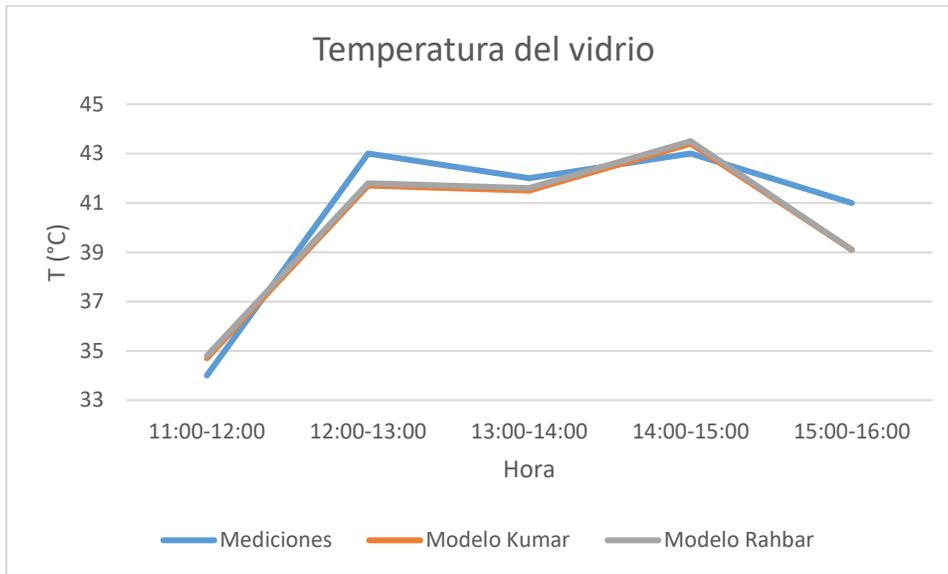


Figura 36. Comparativo en temperatura del vidrio.

(Elaboración propia).

Una vez validados los modelos, se realizaron pruebas simultaneas, con las mismas condiciones ambientales, para los dispositivos con $C=1$ y $C=2$. En la tabla 16 se puede confirmar, mediante las pruebas realizadas, que la limitación del ángulo de aceptación, para sistemas estacionarios, reduce el rendimiento del sistema para altos factores de concentración geométrica.

Tabla 16. Productividad para destiladores con $C=1$ y $C=2$.

(Elaboración propia).

<i>Fecha</i>	<i>Productividad (ml)</i>	
	C = 2	C = 1
25/10/2019	200	380
26/10/2019	220	340
27/10/2019	290	330
28/10/2019	280	380
30/10/2019	310	405

Cuando un captador solar opera bajo irradiancia constante, se puede asumir que la eficiencia óptica, el coeficiente global de pérdidas y el factor de eficiencia del captador son también constantes (Kalogirou, 2014). Por lo tanto la ecuación (3-21)

se representa como una línea recta en un gráfico de eficiencia vs el parámetro de pérdida de calor $\frac{T_{agua}-T_{amb}}{G}$, conocido como temperatura reducida. La intersección de dicha recta con el eje vertical de eficiencia es igual a $F' \eta_0$ como se muestra en la figura 37. La pendiente de la línea, es decir, la diferencia de eficiencia dividida por la diferencia de escala horizontal correspondiente, es igual a $-\frac{F' U_L}{C}$.

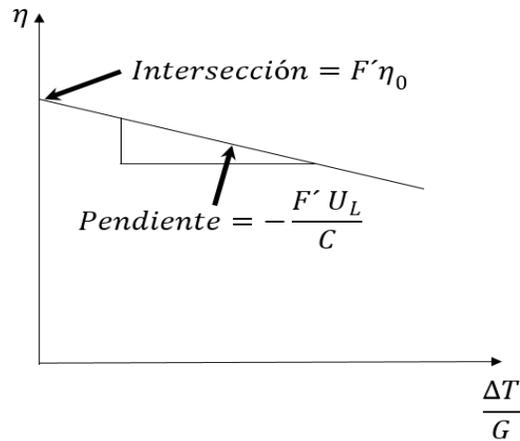


Figura 37. Esquema de curva de eficiencia de un captador solar.

(Elaboración propia).

Si los datos experimentales sobre el suministro de calor del captador a temperaturas y condiciones solares distintas se trazan con eficiencia como el eje vertical y $\frac{T_{agua}-T_{amb}}{G}$ como el eje horizontal, la recta a través de los datos puntuales correlaciona el rendimiento del colector con las condiciones solares y de temperatura. La intersección de la línea con el eje vertical es donde la temperatura del fluido que ingresa al colector es igual a la temperatura ambiente y la eficiencia del colector es máxima. En la intersección de la línea con el eje horizontal, la eficiencia del captador es cero. Esta condición corresponde a un nivel de radiación tan bajo, o una temperatura tan alta del fluido en el captador, que las pérdidas de calor equivalen a la absorción solar y el captador no entrega calor útil. Esta condición, normalmente llamada estancamiento, generalmente ocurre cuando no hay fluido o flujo en el captador.

En condiciones reales el coeficiente global de pérdidas no es constante, sino que está en función de la temperatura del agua y la temperatura ambiente. Por lo tanto:

$$\dot{Q}_u = A_{abs} F' [C G \eta_0 - C_1(T_{agua} - T_{amb}) - C_2(T_{agua} - T_{amb})^2] \quad (4 - 1)$$

Por lo tanto la eficiencia se puede escribir de la siguiente forma:

$$\eta = F' \eta_0 - \frac{C_1(T_{agua}-T_{amb})}{C G} - \frac{C_2(T_{agua}-T_{amb})^2}{C G} \quad (4 - 2)$$

Y denotando $k_0 = F' \eta_0$, $k_1 = \frac{C_1}{C}$, $k_2 = \frac{C_2}{C}$ y $x = \frac{T_{agua}-T_{amb}}{G}$, entonces:

$$\eta = k_0 - k_1x - k_2x^2 \quad (4 - 3)$$

Con base en las mediciones mostradas en la tabla 13, se calculó la eficiencia instantánea del destilador solar y se realizó una regresión para obtener los valores de los coeficientes "k", y así generar la curva de eficiencia del destilador solar para conocer la eficiencia, mostrada en la siguiente figura, a diferentes niveles de irradiancia y condiciones de temperatura:

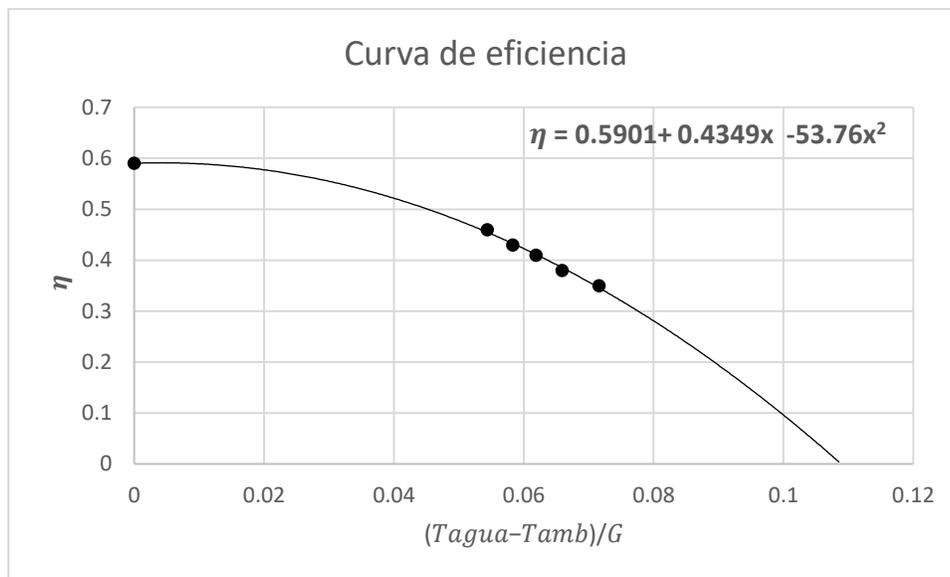


Figura 38. Curva de eficiencia del destilador solar.

(Elaboración propia).

Para tener una más amplia visión de la aplicabilidad e implementación del sistema de destilación solar, con base en las mediciones realizadas en Toluca durante los

meses de Agosto, Septiembre y Octubre de 2018, se realizó un análisis probabilístico a lo largo de la costa mexicana, empleando técnicas desarrolladas en la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft), con la finalidad de predecir en qué sitios de la costa mexicana tendría un mejor desempeño y aplicabilidad el destilador solar.

Mediante el análisis de redes Bayesianas, la Universidad Tecnológica de Delft desarrolló un software (Uninet) para estimar los coeficientes de correlación entre las distintas variables que intervienen en cierto proceso o evento de interés y con base en distribuciones empíricas poder estimar y/o predecir los resultados que se tendrían en condiciones específicas. Para nuestro caso, se determinó la relación de la productividad y rendimiento con las variables ambientales de presión, temperatura, radiación, y humedad relativa.

Para analizar la relación con las variables ambientales, tenemos las distribuciones marginales, estas son las distribuciones unidimensionales que nos informan el número de observaciones para cada valor de una de las variables, independientemente de la información sobre los valores de las otras variables, en el caso bidimensional hay dos y en el caso multidimensional hay tantas como variables.

A partir de la tabla de correlación se pueden construir distribuciones marginales, asignando a cada valor de la variable considerada su frecuencia marginal. En el caso de una dimensión mayor de dos, y suposiciones de datos en forma de una base de datos de matriz, solo se debe considerar una de las variables y, a partir de la lista de observaciones, se puede construir la tabla de frecuencias de la distribución marginal.

La distribución de una variable aleatoria, independientemente del tipo de variable, también se puede representar por su función de distribución. Esta función asigna a cada valor de la variable un valor entre 0 y 1 que indica la probabilidad de que la

variable, observada para un caso particular, asuma un valor menor o igual al valor en el que se evalúa la función.

No todas las funciones matemáticas son útiles para caracterizar una variable aleatoria, por el contrario, las funciones de densidad y distribución acumulada deben reunir una serie de propiedades para que sea posible asignarles probabilidades a los eventos de interés. Desde el punto de vista teórico, se ha estudiado con suficiente detalle un conjunto de funciones matemáticas que verifican las propiedades de las funciones de distribución acumuladas y las funciones de densidad para variables discretas y continuas. En este caso, la distribución de variables meteorológicas es continua, como en las distribuciones normales, por lo que una distribución gaussiana se ajusta sin ningún problema.

La Figura 39 muestra la distribución de probabilidad acumulada de las mediciones realizadas a la variable aleatoria continua de radiación y las distribuciones de probabilidad acumulada con datos de la NASA para la radiación anual de Toluca, así como para cada uno de los meses.

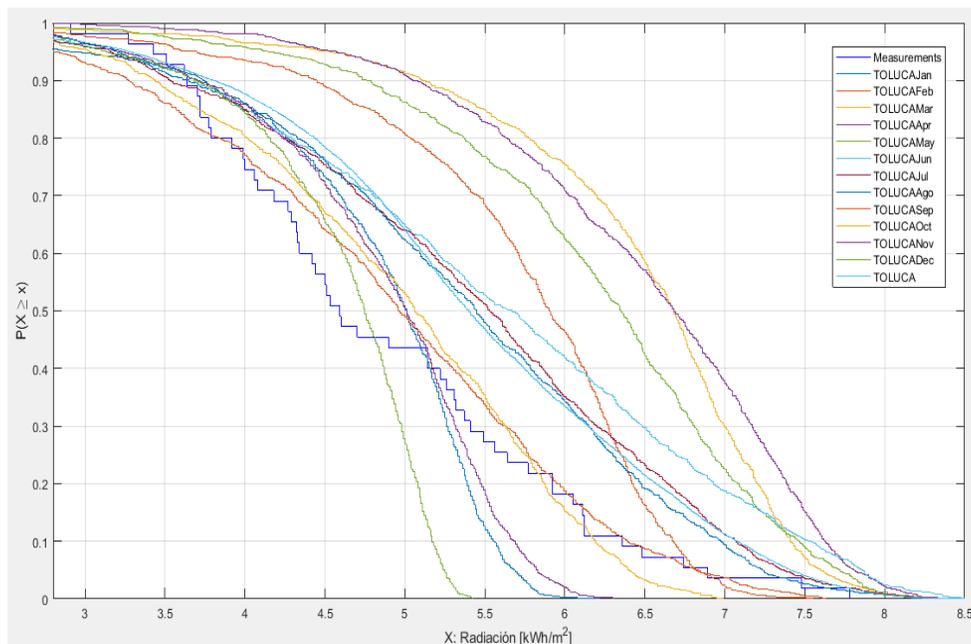


Figura 39. Distribución de probabilidad acumulativa para la radiación de Toluca.

(Elaboración propia).

Las redes bayesianas modelan un fenómeno a través de un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado este modelo, se puede hacer inferencia bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de las variables desconocidas, con base en las variables conocidas. Estos modelos pueden tener diferentes aplicaciones, para clasificación, predicción, diagnóstico, etc. Además, pueden proporcionar información interesante sobre cómo se relacionan las variables de dominio, que a veces pueden interpretarse como relaciones causa-efecto. Inicialmente, estos modelos se construyeron manualmente en base al conocimiento experto, pero en los últimos años se han desarrollado varias técnicas para aprender de los datos, tanto la estructura como los parámetros asociados con el modelo. También es posible combinar el conocimiento experto con los datos para aprender el modelo.

Las redes bayesianas (BN) son gráficos acíclicos dirigidos (DAG), que consisten en nodos y arcos. Los primeros representan variables inciertas o aleatorias que pueden ser continuas, discretas o funcionales. Y estos últimos representan los vínculos causales o influyentes entre estas variables inciertas (Pearl, 1988). Una BN codifica la densidad de probabilidad o la función de masa de un conjunto de variables, especificando un conjunto de oraciones de independencia condicional en el DAG asociado, con un conjunto de funciones de probabilidad condicional. Por lo tanto, proporciona una representación de una distribución de probabilidad dimensional alta en el conjunto.

La teoría de las redes bayesianas no paramétricas (NPBN) se basa en cópulas bivariadas. Son una clase de distribuciones bivariadas cuyos márgenes son uniformes en el intervalo uniforme (Genest & Mackay, 1986). El uso de cópula normal reduce y simplifica el muestreo de la distribución conjunta, cuando se trata de BN continua de alta dimensión. Correlación = 0 implica independencia, para cópula normal.

El NPBN asocia los nodos con variables aleatorias para las cuales no se realiza una suposición de distribución marginal, y los arcos con cupones condicionales de un solo parámetro (Joe, 1997), parametrizados por las correlaciones de rango de Spearman. Las cópulas (condicionales) se asignan a los arcos de la NPBN de acuerdo con un protocolo que depende de una clasificación (no única) de los nodos principales. El resultado principal de las NPBN indica que una elección particular de cópulas condicionales, junto con las distribuciones marginales unidimensionales y las declaraciones de independencia condicional implícitas en el gráfico, determinan de manera única la distribución conjunta, y cada especificación es consistente (Hanea, Kurowicka, & Cooke, 2006). La particularidad de la cópula elegida se refiere a tener la llamada propiedad de independencia cero. Se dice que una cópula tiene esta propiedad si la correlación cero implica una cópula independiente. Cuando se utiliza una cópula con propiedad de independencia cero, se obtienen declaraciones de independencia adicionales (condicionales) asignando una correlación de rango cero a un arco. En otras palabras, hay declaraciones de independencia (condicional) implícitas en la estructura gráfica y declaraciones de independencia (condicional) implícitas en la especificación.

Al crear una NPBN, hay dos propiedades que deben validarse, si los datos tienen una cópula normal y que la BN representa una dependencia suficiente. Para nuestro caso, las variables ambientales: presión (Prs), temperatura (T), radiación (Ra) y humedad relativa (H) tienen una distribución normal y una cópula normal. La relación y dependencia, entre productividad (Prod) y rendimiento (Re) con las variables ambientales, se obtuvo como se puede ver en la Figura 40. La matriz con los coeficientes de correlación muestra una clara dependencia de la productividad con la radiación.

	Prod	Re	T	H	Prs	Ra
Prod	1	0.199	0.449	-0.634	0.181	1
Re	0.199	1	0.0235	-0.234	0.294	0.199
T	0.449	0.0235	1	-0.257	-0.0179	0.445
H	-0.634	-0.234	-0.257	1	-0.395	-0.631
Prs	0.181	0.294	-0.0179	-0.395	1	0.18
Ra	1	0.199	0.445	-0.631	0.18	1

Figura 40. Matriz de correlaciones del rango neto de la red Bayesiana.

(Elaboración propia).

Casi se podría decir que la dependencia de la productividad con la radiación es totalmente lineal ya que su correlación es de 0.9985. Debido a esta alta dependencia, la distribución de probabilidad acumulativa de las muestras tomadas de la variable de productividad aleatoria continua y las distribuciones de probabilidad acumulativa se pueden estimar mediante una regresión lineal de la productividad en función de la radiación que se muestra en la figura 41, con datos de la NASA para la productividad anual de Toluca, así como para cada mes.

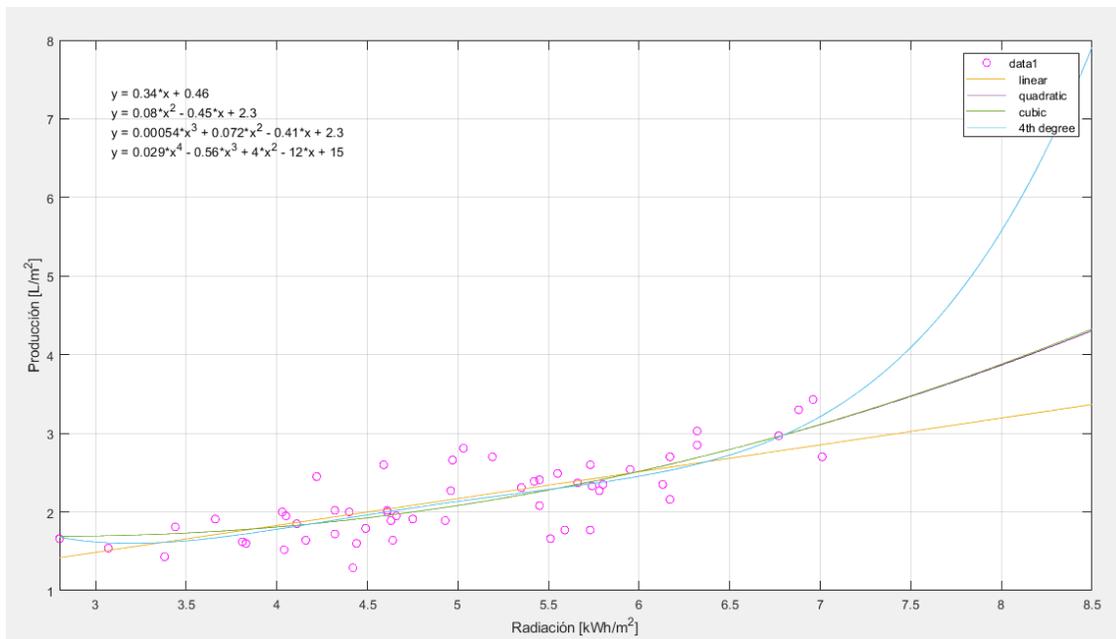


Figura 41. Regresión lineal de la productividad en función de la radiación.

(Elaboración propia).

Es de esperarse que durante los meses con más radiación, principalmente marzo y abril, también habrá una mayor producción, como se muestra en la figura 42.

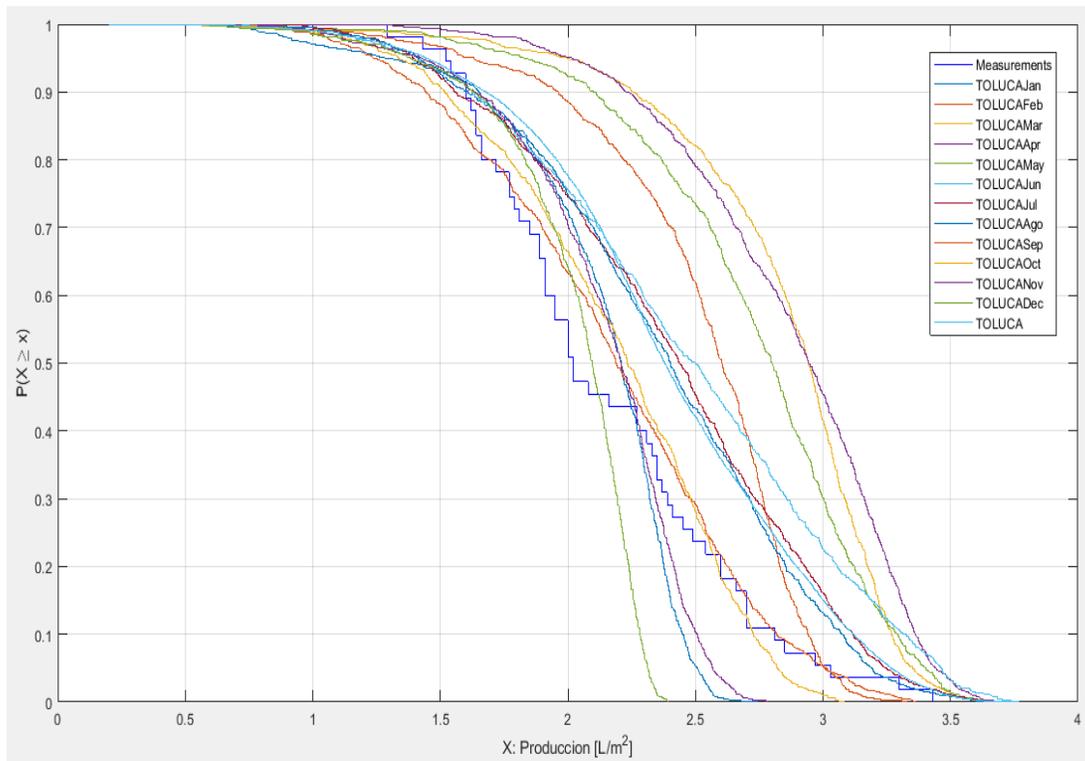


Figura 42. Distribución acumulativa de probabilidad de producción en Toluca.

(Elaboración propia).

La utilidad de generar la distribución de probabilidad acumulativa permite visualizar dónde y en qué período se puede obtener el mayor beneficio. En ese sentido, se desarrolló una estimación completa para diferentes ubicaciones, mostradas en la tabla 17, que se encuentran a lo largo de la costa de la República Mexicana, y así poder predecir dónde sería el mayor beneficio con la implementación del destilador solar.

Tabla 17. Coordenadas geográficas de diferentes ubicaciones en la costa mexicana.

(Elaboración propia).

ESTADO	Latitud (N)	Longitud (O)
BAJA CALIFORNIA	28°53'47"	113°33'37"
BAJA CALIFORNIA	29°43'38"	114°43'09"
BAJA CALIFORNIA	32°02'32"	115°55'18"

ESTADO	Latitud (N)	Longitud (O)
BAJA CALIFORNIA	32°16'20"	116°12'20"
BAJA CALIFORNIA	32°40'00"	115°27'28"
BAJA CALIFORNIA	32°22'40"	117°04'17"
BAJA CALIFORNIA	32°26'50"	116°54'30"
BAJA CALIFORNIA	31°53'29"	116°36'12"
BAJA CALIFORNIA	30°31'54"	115°50'15"
BAJA CALIFORNIA	32°34'07"	116°39'42"
BAJA CALIFORNIA SUR	26°00'35"	111°21'14"
BAJA CALIFORNIA SUR	23°26'43"	109°25'28"
BAJA CALIFORNIA SUR	22°52'52"	109°55'35"
BAJA CALIFORNIA SUR	27°38'37"	113°27'28"
BAJA CALIFORNIA SUR	26°15'27"	112°28'43"
BAJA CALIFORNIA SUR	23°33'20"	109°59'55"
BAJA CALIFORNIA SUR	23°26'48"	110°12'56"
CAMPECHE	19°27'45"	089°43'26"
CAMPECHE	18°36'30"	090°45'14"
CAMPECHE	18°39'30"	091°45'55"
CAMPECHE	19°56'36"	090°22'27"
CAMPECHE	19°00'50"	090°18'40"
CHIAPAS	16°49'42"	093°05'43"
CHIAPAS	15°39'24"	092°48'29"
CHIAPAS	15°17'51"	092°40'34"
CHIAPAS	15°04'06"	092°45'19"
CHIAPAS	15°05'28"	092°08'50"
COLIMA	19°27'49"	103°55'03"
DURANGO	24°11'09"	105°27'58"
ESTADO DE MÉXICO	19°16'59"	099°40'37"
GUERRERO	16°51'47"	099°53'13"
GUERRERO	17°12'35"	100°26'24"
GUERRERO	16°53'04"	099°54'27"
GUERRERO	16°45'31"	099°14'02"
GUERRERO	17°59'04"	102°07'23"
GUERRERO	17°32'59"	098°33'47"
GUERRERO	17°38'42"	101°33'18"
HIDALGO	20°39'54"	098°40'20"
HIDALGO	21°09'17"	098°22'07"
JALISCO	19°29'55"	105°02'41"
JALISCO	19°59'55"	105°08'01"
JALISCO	19°33'16"	104°08'53"
MICHOACÁN	19°04'58"	102°22'18"
MICHOACÁN	18°55'18"	101°55'50"
NAYARIT	22°27'59"	105°23'07"
NAYARIT	21°02'20"	104°17'53"
NAYARIT	22°13'16"	105°19'50"

ESTADO	Latitud (N)	Longitud (O)
OAXACA	15°58'01"	097°41'19"
OAXACA	16°52'58"	095°02'11"
OAXACA	16°20'39"	096°34'47"
OAXACA	16°20'59"	098°03'09"
OAXACA	15°53'29"	097°04'28"
OAXACA	16°10'59"	095°11'46"
PUEBLA	20°10'41"	098°03'59"
PUEBLA	19°53'17"	097°23'26"
QUINTANA ROO	18°16'48"	087°50'08"
QUINTANA ROO	21°01'47"	086°51'08"
QUINTANA ROO	20°28'37"	086°54'25"
QUINTANA ROO	19°45'08"	088°42'14"
QUINTANA ROO	21°06'07"	087°29'10"
QUINTANA ROO	19°43'23"	087°48'46"
SAN LUIS POTOSI	21°58'47"	099°01'51"
SINALOA	26°24'41"	108°37'03"
SINALOA	24°15'04"	107°11'17"
SINALOA	25°29'08"	107°50'36"
SONORA	27°01'18"	108°56'16"
SONORA	30°46'30"	112°26'07"
SONORA	31°40'48"	113°18'17"
SONORA	29°00'48"	111°08'13"
SONORA	32°25'26"	114°47'52"
SONORA	28°22'00"	108°55'00"
TABASCO	17°17'24"	091°13'45"
TABASCO	18°24'23"	092°38'47"
TABASCO	18°25'24"	093°09'20"
TAMAULIPAS	23°03'07"	097°46'20"
TAMAULIPAS	23°24'27"	099°22'31"
TAMAULIPAS	25°53'09"	097°31'07"
TAMAULIPAS	24°50'34"	098°09'27"
VERACRUZ	17°58'37"	094°54'04"
VERACRUZ	18°42'54"	095°37'57"
VERACRUZ	18°11'23"	096°05'53"
VERACRUZ	21°20'04"	097°52'43"
VERACRUZ	18°53'24"	096°55'23"
VERACRUZ	19°03'58"	097°02'28"
VERACRUZ	18°06'21"	094°19'53"
VERACRUZ	18°35'03"	095°04'25"
VERACRUZ	18°22'30"	094°55'52"
VERACRUZ	19°32'43"	097°16'06"
YUCATÁN	20°51'29"	090°22'59"
YUCATÁN	21°23'26"	088°54'15"
YUCATÁN	20°17'28"	089°23'41"

ESTADO	Latitud (N)	Longitud (O)
YUCATÁN	21°34'16"	088°09'37"
YUCATÁN	21°09'42"	087°59'20"

Como se puede ver en las Figuras 43 y 44, en la costa norte, principalmente en los estados de Sinaloa, Sonora, Baja California y Baja California Sur, es donde habría una mayor producción, con un promedio de más de 2 litros por día por metro cuadrado de superficie y un máximo de alrededor de 4 litros.

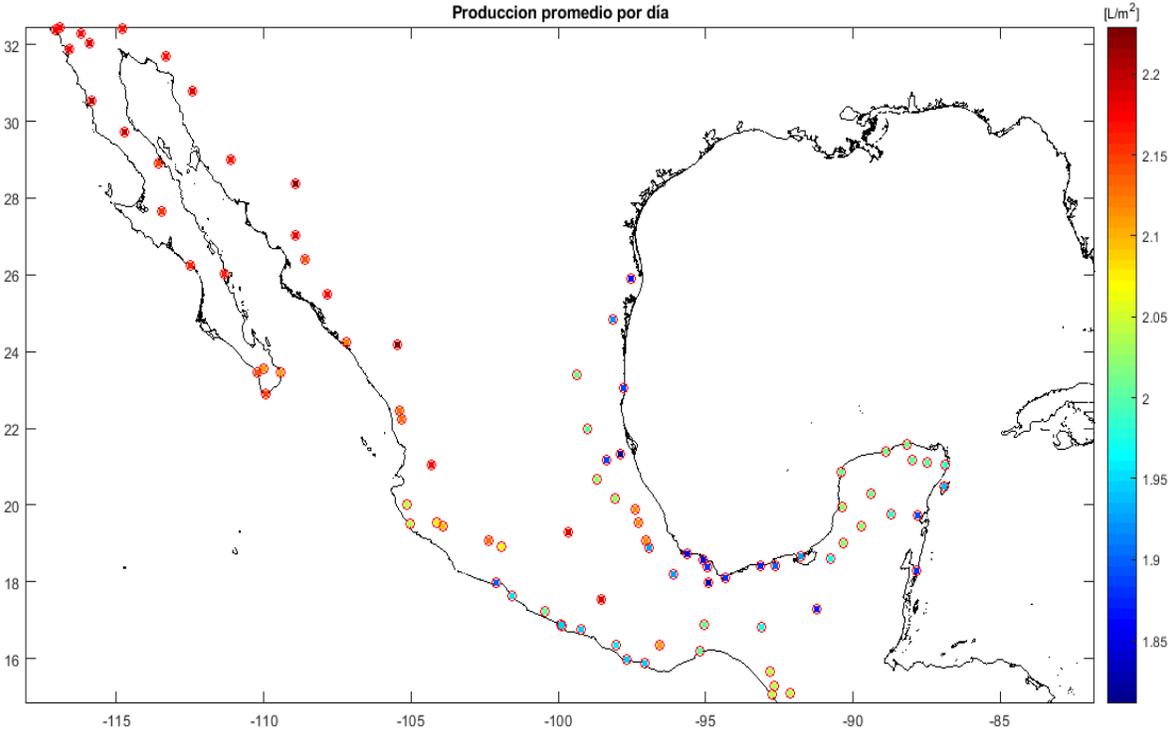


Figura 43. Producción promedio estimada para la costa mexicana.
(Elaboración propia).

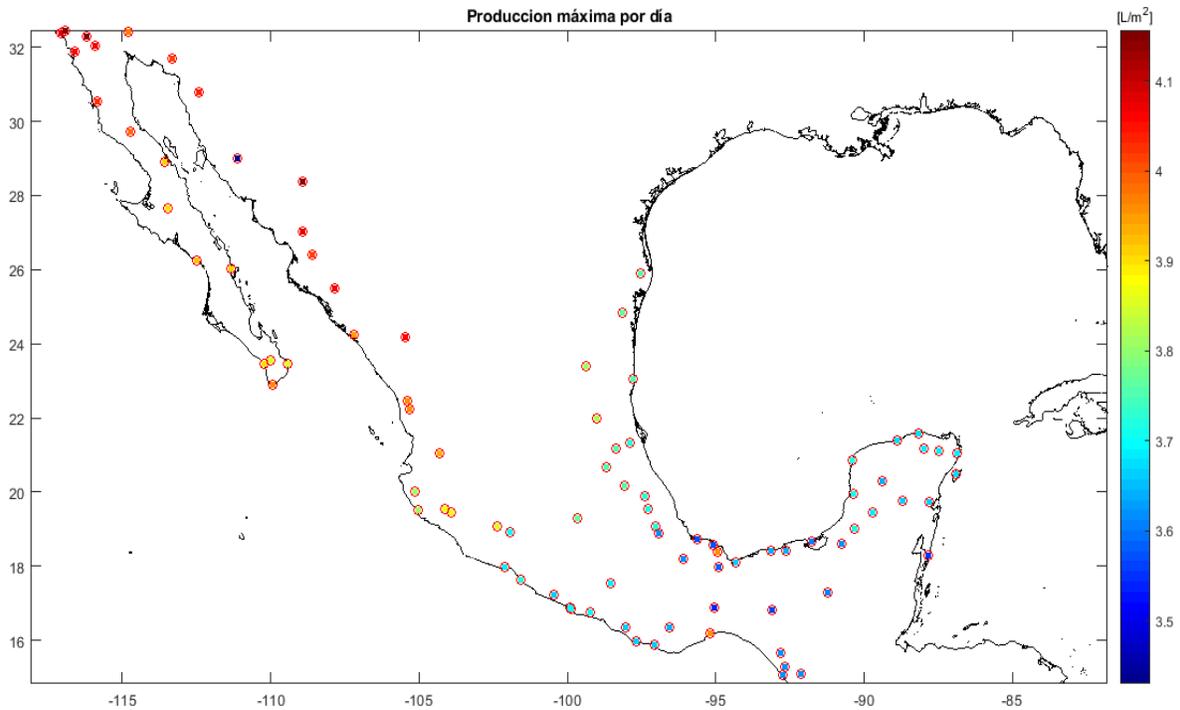


Figura 44. Producción máxima estimada para la costa mexicana.

(Elaboración propia).

4.2. Análisis económico

En la sección de optimización de materiales se presentó la tabla 11 con el desglose de costos del destilador, sin bomba de vacío, que produce en promedio 0.70 litros de agua destilada por día.

Para la integración de la bomba, que permita la entrada de agua y la salida del vapor, se realizaron perforaciones en el absorbedor para conectar las mangueras por donde circulará el fluido. El sistema conectado se muestra en la figura 45.



Figura 45. Sistema de destilación con bomba de vacío.

(Elaboración propia).

El incremento en la productividad no resultó ser muy satisfactorio, quedó muy lejos de alcanzar el esperado 50% que obtuvieron (Moses Koilraj, Palanisamy Senthil, Gopal, & Joseph Ebenezer, 2011). Como se muestra en la figura 46, se tienen incrementos poco significativos, del 5% y 27% para los días del primero y seis de agosto respectivamente. También como lo muestra la tabla 18, el aumento en la producción es mayor para los días cuando se tiene menor cantidad de irradiación.

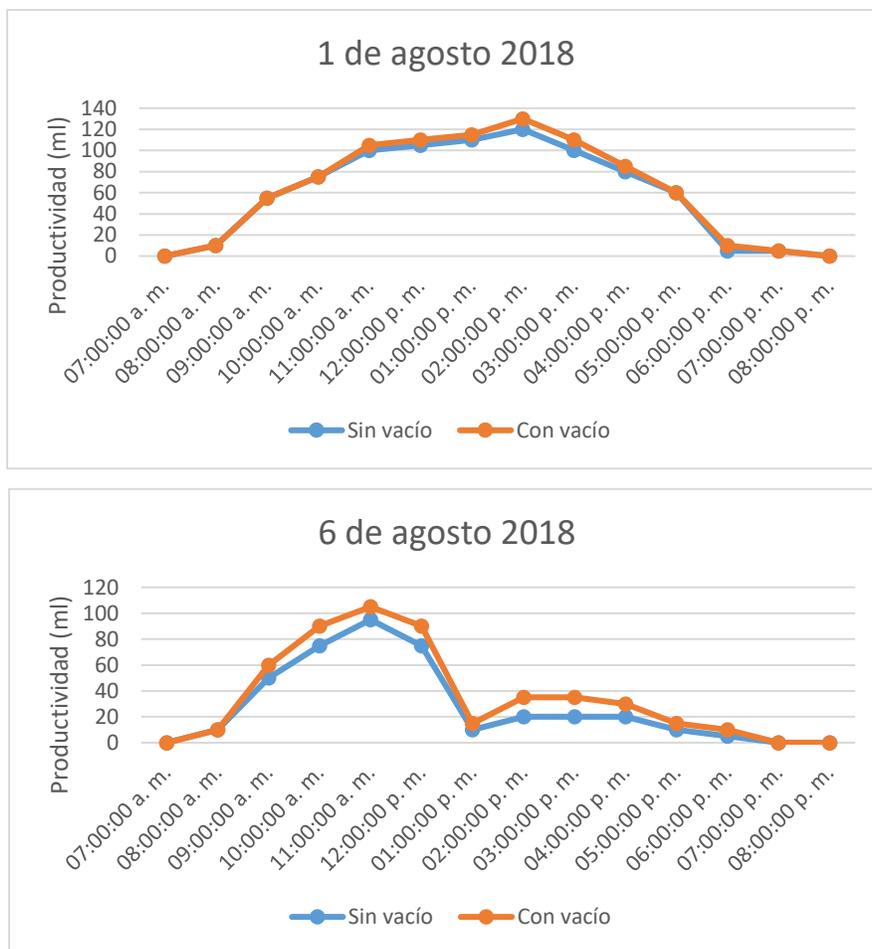


Figura 46. Productividad con y sin bomba de vacío.

(Elaboración propia).

Tabla 18. Incremento en productividad con bomba de vacío.

(Elaboración propia).

Día	Producción diaria (L/m ²)		Incremento producción	Irradiación Global (kWh/ m ² día)
	Sin Bomba	Con Bomba		
01/08/2018	3.43	3.62	5%	7.78
02/08/2018	2.41	2.76	15%	5.49
05/08/2018	2.00	2.41	21%	4.53
06/08/2018	1.62	2.06	27%	3.70
07/08/2018	3.30	3.68	11%	7.48

Considerando el costo que conlleva la inversión en la bomba de vacío y el bajo incremento en la productividad, se optó por descartar su implementación dentro del sistema de destilación solar.

Haciendo un análisis de retorno simple de inversión, se obtiene un periodo de retorno de 427 días, tomando en cuenta un costo de \$10.00 por litro de agua, y una producción diaria promedio de 0,70 litros según las pruebas iniciales.

El costo de la bomba de vacío ronda en los \$40,000 por lo que el retorno se extiende demasiado, tanto que se recuperaría en 11 años y medio si se considera el incremento de producción del 27%. Aún si se considerara el incremento de 50% que obtuvieron (Moses Koilraj, Palanisamy Senthil, Gopal, & Joseph Ebenezer, 2011) el retorno sería casi en diez años.

En el estado del arte se mostró la tabla 2 dónde figuran los destiladores con mejor costo-beneficio. Para poder establecer la viabilidad económica del destilador solar optimizado, es necesario saber cuál es el costo por producir un litro de agua. Debe entonces considerarse la vida útil dispositivo, la productividad y todos los costos de inversión, operación y mantenimiento que conllevan su funcionamiento.

El costo por litro (*CPL*) se calcula como:

$$CPL = \frac{IT}{PT} \quad (4 - 4)$$

Donde *IT* y *PT* representan la inversión total y la producción total respectivamente durante la vida útil del sistema.

Dado que la producción diaria promedio del diseño optimizado es de 0.7 L, durante la vida útil de 25 años, se producirán 6387,5 litros. La inversión total incluye el pago inicial del dispositivo y gastos de operación y mantenimiento, por lo tanto:

$$IT = I_i + O\&M - S \quad (4 - 5)$$

I_i corresponde a la inversión inicial (tabla 11), $O_{\&M}$ son los gastos de operación y mantenimiento, los cuales representan el 15% de la inversión inicial, y S es el valor de salvamento.

El valor residual o valor de salvamento es aquel que se espera tenga el activo al finalizar el tiempo de vida útil. En el sistema de destilación solar, la vida útil está delimitada por la estructura de mdf, ya que es el primer elemento en obstruir el funcionamiento del sistema, sin embargo algunos de los elementos como el aluminio y el vidrio conservan su valor y pueden operar durante periodos mucho más largos, por lo que su valor se puede considerar como recuperable.

En la tabla 19 se muestra el costo por litro de agua destilada, así como los elementos anteriormente mencionados.

Tabla 19. Costo por litro de agua destilada.

(Elaboración propia).

I_i	\$ 145.08 USD
$O_{\&M}$	\$ 21.76 USD
S	\$ 43.83 USD
IT	\$ 123.02 USD
PT	6387,50 litros
CPL	0.0193 \$ USD/litro

El costo por producir un litro de agua destilada es bastante aceptable, aunque no logra superar los desarrollados por Faegh y por Arunkumar (Tabla 20), el costo beneficio está muy cercano a dichos diseños y se podría mejorar mediante adición de materiales de cambio de fase o guijarros.

Tabla 20. Comparativo de costo por litro mediante destiladores solares.

(Elaboración propia).

País	Tipo de destilador	Costo por litro (USD)	Referencia
<i>Irán</i>	<i>Destilador con captador de tubos evacuados, condensador y materiales de cambio de fase</i>	<i>0.0153</i>	<i>(Faegh M, 2017)</i>
<i>India</i>	<i>Destilador piramidal integrado con un CPC tubular</i>	<i>0.0160</i>	<i>(Arunkumar T V. R., 2016)</i>
<i>India</i>	<i>Destilador integrado con un CPC tubular y materiales de cambio de fase</i>	<i>0.0190</i>	<i>(Arunkumar T V. R., 2016)</i>
México	Destilador integrado mediante un CPC tubular	0.0193	(Caro A, 2020)
<i>Egipto</i>	<i>Destilador escalonado con espejos internos</i>	<i>0.0197</i>	<i>(Omara ZM, 2013)</i>
<i>Emiratos Árabes</i>	<i>Destilador multietapa con lente Fresnel de enfoque puntual</i>	<i>0.0200</i>	<i>(Younas O, 2016)</i>
<i>Egipto</i>	<i>Destilador con nanofluidos y unidad de ventilador de condensador externo</i>	<i>0.0220</i>	<i>(Kabeel AE O. Z., 2014)</i>
<i>Egipto</i>	<i>Destilador con materiales de cambio de fase</i>	<i>0.0240</i>	<i>(Kabeel AE A. M., 2016)</i>

4.3. Estudio fisicoquímico

En la metodología de diseño del capítulo 3 se previó, para la optimización de materiales, seleccionar un material adecuado en el absorbedor, ya que es de esperarse que el agua de mar sea altamente corrosiva. Para verificar dicha declaración se tomó una muestra de agua de mar en la costa de Acapulco, Guerrero y se realizó un estudio fisicoquímico del agua, apegado a los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La Tabla 21 muestra los resultados obtenidos de los parámetros que se midieron.

Tabla 21. Resultados de muestra de agua de mar.

(Elaboración propia).

PARÁMETRO	Límite permisible	Resultado	Unidades
Acidez	---	N.D.	mg/L CaCO ₃
Alcalinidad	100-200	125	mg/L CaCO ₃
Calcio	---	383	mg/L
Cloruros	250	16 912,8	mg/L

PARÁMETRO	Límite permisible	Resultado	Unidades
Color	20	N.D.	Pt/Co
COT	---	5,16	ppm
DBO	---	3,24	mg/L
DQO	---	942,5	mg/L
Dureza	500	6 306,19	mg/L CaCO ₃
Fosfatos	---	<0,05	mg/L
Hierro	0,3	<0,5	mg/L
Nitratos	10	<0,23	mg/L
Nitritos	1	<0,001	mg/L
Nitrógeno amoniacal	0,5	0,45	mg/L
pH	6,5-8,5	8,3	
SAAM	0,5	<1	mg/L
Sodio	200	9 014,8	mg/L
Sólidos D. T.	1 000	39 133	mg/L
Sulfatos	400	3 559,04	mg/L

Como era de esperarse, ciertos valores característicos del agua de mar, sobrepasan los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Entre ellos se puede observar que los cloruros, sulfatos, los sólidos disueltos totales, el sodio y la dureza; están por lo menos un orden de magnitud por encima de las cantidades establecidas en la norma.

En soluciones diluidas, los sólidos disueltos totales (TDS) son comparables con TDS en una muestra de agua basado en medida de la conductividad eléctrica (EC), calculada mediante la siguiente ecuación:

$$TDS \left(\frac{mg}{l} \right) = 0,5 \times 1000 \times EC \left(\frac{mS}{cm} \right) \quad (4 - 6)$$

Mediante la ecuación 2-2, se puede obtener la conductividad eléctrica, la cual tiene un valor de 7,83 S/m. Al igual que los parámetros previamente mencionados, también se encuentra por encima del límite permisible, el cual va de 0,005 a 0,05 S/m.

Con base en la caracterización del agua de mar, fue posible determinar los índices de saturación de Langelier (ISL), Ryznar (IR), Agresividad (IA), Larson (RL), con la

finalidad de establecer los métodos de tratamiento y control de corrosión e incrustación en los sistemas hidráulicos donde sean utilizadas. (Lane, 1995; Mora Arellano et al., 2005; Mora Arellano & Cedeño, 2006).

En el caso del índice de saturación de Langelier (IL), define la agresividad del agua con respecto al carbonato de calcio, basado en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad del CaCO₃. En otras palabras, este índice tiende a predecir si:

ISL > 0, se tiene agua sobresaturada, incrustante, tiende a precipitar CaCO₃.

ISL = 0, es agua saturada en equilibrio con CaCO₃, ni disuelve ni deposita CaCO₃.

ISL < 0, es agua subsaturada, corrosiva, tiende a disolver CaCO₃.

El índice de saturación de Langelier se calcula a partir de la ecuación 2-3:

$$ISL = pH_0 - pH_s \quad (4 - 7)$$

pH₀ corresponde al valor inicial obtenido de la muestra. El valor de pH_s se obtiene de la siguiente manera: pH_s = (9,3+A+B) - (C+D). Donde los coeficientes:

$$A = (\text{Log}[\text{TDS}] - 1) / 10$$

$$B = -13,12 \times \text{Log} (T^{\circ}\text{C} + 273) + 34,55$$

$$C = \text{Log} [\text{Calcio como mg/L CaCO}_3]$$

$$D = \text{Log} [\text{Alcalinidad como mg/L CaCO}_3]$$

El índice de Ryznar, representa un índice empírico para determinar el carácter corrosivo o incrustante de las aguas (Lane, 1995; Ryznar, 1994), si:

IR < 6,5 agua sobresaturada, tiende a precipitar CaCO₃.

6,5 < IR < 7 agua saturada, en equilibrio con CaCO₃, ni disuelve ni precipita CaCO₃.

IR > 7 agua subsaturada, corrosiva tiende a disolver CaCO₃.

El índice de Ryznar se calcula a partir de la ecuación 2-4:

$$IR = 2pH_s - pH_0 \quad (4 - 8)$$

El índice de agresividad (IA), es una medida de la tendencia del agua a deteriorar las estructuras, considera:

IA > 12, agua no agresiva.

10 < IA < 12, agua moderadamente agresiva.

IA < 10, agua muy agresiva.

Y se determina mediante la ecuación 2-5:

$$IA = pH0 + \log(A)(D) \quad (4 - 9)$$

Donde A = Alcalinidad total mg/L CaCO₃ y D = Dureza por Calcio mg/L CaCO₃.

A su vez la alcalinidad como bicarbonatos se calcula por:

$$HCO_3^- = \frac{AT\left(\frac{mg}{L}CaCO_3\right)}{\left(1 + \frac{2 \times 10^{-10.3}}{10^{-pH}}\right)} \times 61 \quad (4 - 10)$$

Realizando los cálculos se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 22:

Tabla 22. Resultados de indicadores de corrosividad.

(Elaboración propia).

ISL = 1,73	Agua sobresaturada, incrustante, tiende a precipitar CaCO ₃ .
IR= 4,84	Agua sobresaturada, tiende a precipitar CaCO ₃ .
IA = 13,378	Agua no agresiva.

Analizando los índices, se observó que el agua de mar analizada, puede generar incrustaciones en la superficie que la contenga y de igual modo producir corrosión debido a la concentración elevada de cloruros y sulfatos que la tiende a disolver. Por lo que es crucial la selección de un material apropiado para evitar daño en la superficie.

Como parte final de la investigación, se realizaron un par más de estudios fisicoquímicos para verificar que el agua destilada cumpla con lo establecido en la NOM-127. El primer estudio se realizó a una muestra tomada, nuevamente, de la costa de Acapulco, Guerrero, y como se observa en la tabla 23 era de esperarse que la mayoría de los parámetros se encuentren por encima de los límites permisibles. Un último estudio se efectuó tomando una muestra del agua obtenida mediante el proceso de destilación solar, los resultados también se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Estudio fisicoquímico antes y después de la destilación.

(Elaboración propia).

PARÁMETRO	Límite permisible	Resultados		Unidades
		Agua de mar	Agua destilada	
<i>Aluminio</i>	0.20	0.28	N.D.	mg/L
<i>Cadmio</i>	0.005	0.057	N.D.	mg/L
<i>Cloruros</i>	250	17038.33	30.31	mg/L
<i>Cobre</i>	2	0.041	0.001	mg/L
<i>Color</i>	20	2	3	Pt/Co
<i>Cromo</i>	0.05	0.046	N.D.	mg/L
<i>Flúor</i>	---	0.45	0.02	mg/L
<i>Dureza</i>	500	4141	19.04	mg/L CaCO ₃
<i>Hierro</i>	0.30	1.027	0.004	mg/L
<i>Manganeso</i>	0.30	0.040	0.023	mg/L
<i>Nitratos</i>	10	< 0.23	0.08	mg/L
<i>Nitritos</i>	0.05	< 0.001	0.03	mg/L
<i>Nitrógeno amoniacal</i>	0,5	N.D.	N.D.	mg/L
<i>pH</i>	6.5-8.5	8.38	6.9	
<i>Plomo</i>	0.025	0.58	0.02	mg/L
<i>SAAM</i>	0.5	0.21	0.24	mg/L
<i>Sodio</i>	200	6363.26	9.4328	mg/L
<i>Sólidos Disueltos Totales</i>	1000	39388	80	mg/L
<i>Sólidos Suspendidos Totales</i>	1000	336	5	mg/L
<i>Sólidos Totales Totales</i>	1000	39724	85	mg/L
<i>Sulfatos</i>	400	2386.38	6.79	mg/L
<i>Turbidez</i>	5	0.43	0.86	UTN

PARÁMETRO	Límite permisible	Resultados		Unidades
		Agua de mar	Agua destilada	
Zinc	5	0.11	0.0098	mg/L
Organismos coliformes totales	2	---	N.D.	NMP/100 ml
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	N.D.	---	N.D.	NMP/100 ml

*N.D.: No detectable

En la tabla anterior se observa que en el agua de mar, antes de llevar a cabo la destilación, hay nueve parámetros, unos muy por encima que otros, que superan los límites permisibles: aluminio, cadmio, cloruros, dureza, hierro, plomo, sodio, sulfatos y solidos disueltos totales. De esos nueve, cinco superan en gran proporción dichos límites; la dureza esta 8 veces por encima, el cadmio 11, sodio 31 márgenes, solidos disueltos totales 39 y cloruros 68 veces arriba.

Después que se realizó la destilación solar, en el agua condensada, los nueve parámetros quedaron por debajo de los límites permisibles, incluso en niveles muy bajos. Además de los parámetros que incumplían la NOM-127, por requerimiento de la norma, se hizo un estudio microbiológico en el cual no se detectó nada de organismos coliformes, cumpliendo así al cien por ciento con los requerimientos y por lo tanto la calidad del agua es totalmente adecuada para consumo humano.

Conclusiones

Se cumplió el objetivo principal de la investigación, ya que se desarrolló un sistema de destilación solar con un buen costo-beneficio. El precio por producir un litro de agua mediante el destilador solar de agua integrado al concentrador parabólico compuesto es de \$0.0193 USD.

El acoplamiento de una bomba de vacío, en el sistema de destilación, incrementa la productividad hasta en un 27%, sin embargo mediante un análisis de retorno simple de inversión, se obtiene un periodo de retorno mayor a 11 años, tomando en cuenta un costo de \$10.00 por litro de agua, y una producción diaria promedio de 0,70 litros. Su integración no es factible debido al muy elevado costo de \$40,000.0.

Debido a que el destilador es un sistema estacionario, en la mayoría de los casos, un aumento en el índice de concentración nos lleva a una pérdida energética (figuras 24-29), ya que está limitado por el ángulo de aceptación, el cual disminuye la cantidad de energía aprovechable. Únicamente con índices de claridad elevados, que se tienen durante pocos días al año, es posible tener una mejor captación con concentraciones mayores (figuras 26 y 29). Con el incremento en el factor de concentración geométrico, se pueden obtener temperaturas más altas, sin embargo esto repercute en un costo adicional, además la captación de energía durante todo el día siempre es menor si se tienen índices de claridad menores a 0.8, independientemente de la latitud.

De los modelos empleados para cuantificar los coeficientes convectivo y evaporativo, el de mejor ajuste fue el de Kumar y Tiwari debido a su menor margen de error; la desviación máxima fue del 8.8%, comparado con un 11% en el modelo de Rahbar. Aplicando el modelo, se observó que la eficiencia del

destilador solar disminuye de un 2% a un 7% (dependiendo de los niveles de irradiancia) por cada milímetro que se aumenta la longitud de la abertura en el absorbedor de aluminio, por lo que el espesor óptimo es de 5 mm. Longitudes menores a 5 mm requieren procesos de manufactura detallados y por lo tanto costosos.

Mediante un estudio fisicoquímico del producto destilado, se verificó que los parámetros que estaban por encima de los límites permisibles se redujeran y cumplieran con la NOM-127-SSA1-2000. Se hizo un estudio microbiológico, por requerimiento de la norma, en el cual no se detectó nada de organismos coliformes, cumpliendo así al cien por ciento con los requisitos y por lo tanto se validó que la calidad del agua es totalmente adecuada para consumo humano.

Mediante un análisis probabilístico, se desarrolló una estimación completa para diferentes ubicaciones, que se encuentran a lo largo de la costa de la República Mexicana y se generaron mapas de productividad del sistema. Se puede predecir que en la costa norte se tendría el mayor beneficio con la implementación del destilador solar, principalmente en los estados de Sinaloa, Sonora, Baja California y Baja California Sur, en donde habría una producción promedio cercana a 2 litros diarios por metro cuadrado de superficie y un máximo alrededor de 4 litros.

Trabajos futuros

Parte del objetivo principal del presente proyecto, fue evaluar el desempeño termodinámico del destilador y mejorar el rendimiento mediante la integración de un concentrador parabólico compuesto. El dispositivo que tiene el mejor costo beneficio (Faegh M, 2017), consta de un captador de tubos evacuados, un condensador externo y cera de parafina como material de cambio de fase, en donde la productividad aumenta en un 86% en comparación con el sistema sin cera y alcanza una eficiencia del 50%. El uso de materiales de cambio de fase ha tomado importancia en los últimos años, ya que mejoran significativamente el desempeño de los destiladores, por lo que, implementarlos, en el sistema desarrollado, y analizar su desempeño termodinámico resultaría interesante.

Para el análisis del sistema, las pruebas experimentales con agua de mar se llevaron a cabo en la ciudad de Toluca, Estado de México. Lógicamente en Toluca no hay agua de mar, por ser una ciudad muy alejada de la costa, por lo que resulta evidente, en un siguiente paso, implementar y evaluar el dispositivo en la costa mexicana. Además de verificar su viabilidad, se podría corroborar si las predicciones obtenidas mediante el análisis probabilístico realizado en la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft) son válidas.

Durante la estancia de investigación, en TU Delft, se abrieron las puertas para que el sistema se pueda proyectar de manera global, ya que la universidad cuenta con un programa (Delft global) para impulsar desarrollos a nivel internacional. Uno de los objetivos del programa considera el impacto social y apoyo a comunidades marginadas, por lo que se consideraría implementar el dispositivo en África, debido a que es el continente dónde más comunidades se encuentran es dicha condición. En un principio se esperaba que el destilador tenga una mejor producción debido a la mayor incidencia de radiación, pero se tendría que analizar el costo local de los materiales, para establecer su viabilidad costo-beneficio comparada con otras tecnologías.

Bibliografía

- Abdula, A. (2013). Improving the performance of stepped solar still. En *Desalination* (págs. 319,360-365).
- Aguilar Arguelles, N. (2011). *Diagnóstico y gestión ambiental*. Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Ahmed MI, H. M. (2009). On the characteristics of multistage evacuated solar distillation. *Renew Energy*, 34:1471–8.
- Ahmed, O., Ofri, J., & Nasrallah, S. (2005). Natural Convection effects in solar stills. En *Desalination*, 183 (págs. 173–178).
- Ahsan , A., Imteaz , M., Rahman , A., Yusuf, B., & Fukuhara, T. (2012). Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still. En *Desalination* (págs. 292, 105-112).
- Ahsan A, I. M. (2012). Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still. *Desalination*, 292:105–12.
- Alvarado Juárez, R., Xaman, J., Alvarez, G., & Hernández López, I. (2015). Numerical study of heat and mass transfer in a solar still device: Effect of the glass cover., . En *Desalination* (págs. 359, 200–211.).
- Arjunan, T., Aybar, H., Sadagopan, P., Chandran, B., Neelakrishnan, S., & Nedunchezian, N. (2014). The effect of energy storage materials on the performance of a simple solar still. En *Energy Sources, Part A* (págs. 36, 131–141).
- Arunkumar T, K. A. (2017). Effect of phase change material on concentric circular tubular solar still- Integration meets enhancement. *Desalination*, 414:46–50.
- Arunkumar T, V. R. (2016). Effect of heat removal on tubular solar desalting system. *Desalination*, 379:24–33.
- Arunkumar T, V. R. (2016). Productivity enhancements of compound parabolic concentrator tubular solar stills. *Renew Energy*, 88:391–400.
- Arunkumar, T., Denkenberger, D., Ahsan, A., & Jayaprakash, R. (2013). The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material. En *Desalination* (págs. 314, 189–192).
- Arunkumar, T., Denkenberger, D., Velraj, R., Sathyamurthy, R., Tanaka, H., & Vinothkumar, K. (2015). Experimental study on a parabolic concentrator assisted solar desalting system. En *Energy Conversion and Management* (págs. 105, 665-674.).
- Arunkumar, T., Jayaprakash, R., Ahsan, A., Denkenberger, D., & Okundamiya, M. (2013). Effect of water and air flow on concentric tubular solar water desalting system. . En *Applied Energy* (págs. 103, 109–115).

- Aybar, H., & Assefi, H. (2009a). Simulation of a solar still to investigate water depth and glass angle. En *Desalination and Water Treatment*, 7(1–3) (págs. 35–40).
- Aybar, H., & Assefi, H. (2009b). A review and comparison of solar distillation: Direct and indirect type systems. En *Desalination and Water Treatment*, 10(1–3) (págs. 321–331).
- Ayoub, G., & Malaeb, L. (2012). Developments in solar still desalination systems: A critical review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 2078-2122.
- Ayoub, G., & Malaeb, L. (2014). Economic feasibility of a solar still desalination system with enhanced productivity. En *Desalination* (págs. 335, 27–32.).
- Balan, R., Chandrasekaran, J., Shanmugan, S., Janarthanan, B., & Kumar, S. (2011). Reviews on passive solar distillation. . En *Desalination and water treatment* (págs. 28, 217–238).
- BI, I. (2009). Design and performance of a transportable hemispherical solar still. *Renew Energy*, 34:145–50.
- Cabanillas, R., & J. Montaña. (1995). *Planta de destilación solar en Puerto Lobos, Sonora*.
- CETENMA. (2008). *Memoria anual*. España.
- Chen, Z., Zheng, H., Ma, C., Li, Z., & He, K. (2009). Experiment and optimal parameters of a solar heating system study on an absorption solar desalination unit. En *Desalination and Water Treatment*, 1(1–3) (págs. 128–138).
- Cooper, P. I. (1972). Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills. En *Sol. Energy*, 13(4) (págs. 373–381.).
- Dashtban M, T. F. (2011). Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage. *Desalination*, 279:415–22.
- Dev R, A.-W. S. (2011). Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid. *Appl Energy*, 88:252–64.
- Dev, R., Abdul-Wahab, S., & Tiwari, G. (2011). Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid. En *Applied Energy* (págs. 88, 252–264.).
- Dsilva Winfred Rufuss D, I. S. (2107). Nanoparticles enhanced phase change material (NPCM) as heat storage in solar still application for productivity enhancement. *Energy Procedia*, 141:45–9.
- Dunkle, R. (1961). *Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still*. Nueva York, EUA.: ASME.
- Durkaieswaran, P., & Murugavel, K. (2015). Various special designs of single basin passive solar still—A review. . En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 49, 1048–1060.).
- Elango, T., & Murugavel, K. (2015). The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. En *Desalination* (págs. 359, 82–91.).

- El-Samadony, Y., Abdullah, A., & Omara, Z. (2015). Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser. En *Exp Heat Transf* 28 (págs. 392–404).
- El-Sebaili AA, R. M.-E. (2008). Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond. *Energy Convers Manag*, 49:2839–48.
- El-Sebaili, A., & El-Bialy, E. (2015). Advanced designs of solar desalination systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1198-1212.
- Estrada Gasca, C., Arancibia Bulnes, C., Jaramillo Salgado, O., Pérez Rábago, C., & Quiñones Aguilar, J. (2006). Sistemas de concentración solar para la generación eléctrica. *Sistemas de concentración solar para la generación eléctrica* (pág. 17). México: UNAM.
- Faegh M, S. M. (2017). Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes. *Desalination*, 409:128–35.
- Farias, P., Aca, J., Molina, A., Maury Ramírez, H. E., & Riba i Romeva, C. (2006). EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS DEL PROCESO DE DISEÑO. *ResearchGate*.
- Fernández, J., & Chargoy, N. (1992). *Destiladores solares de difusión de vapor con recuperación de calor*. México, D.F.: Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Genest, C., & Mackay, J. (1986). The joy of the copulas:biivariate distributions with uniform marginals. *The American Statistician*, 280-283.
- Gorjian S, G. B. (2014). Experimental performance evaluation of a stand-alone point-focus parabolic solar still. *Desalination*, 352:1–17.
- Gugulothu, R., Somanchi, N., Reddy, K., & Gantha, D. (2015). A review on solar water distillation using sensible and latent heat. . En *Procedia Earth and Planetary Science* (págs. 11, 354–360.).
- Hanea, A., Kurowicka, D., & Cooke, R. (2006). Hybrid method for quantifying and analyzing Bayesian belief nets. *Qual Reliab Eng Int*, 613-729.
- Harding, J. (1883). *Apparatus for solar distillation*. EUA: Proc. Inst. Civ. Eng.
- Hima Bindu, B., Bhramara, P., Ravi, G., Naga Sarada, S., Devender, G., Devender, V., & Banothu, K. (2014). A review on performance of solar still with different techniques. *Proceedings of international conference on renewable energy and sustainable development*, 393-398.
- HN, P. (2015). Enhancement of distillate output of double basin solar still with vacuum tubes. *J King Saud Univ - Eng Sci*, 27:170–5.
- Howe, E., & Tleimat, B. (1974). *Twenty years of work on solar distillation*. Nueva York, EUA: Solar Energy.
- Howe, E., & Tleimat, B. (1977). *Fundamentals of water desalination*. Nueva York, EUA.: Solar Energy Engineering, AAM Sayigh ed.

- Janarthanan, B., Chandrasekaran, J., & Kumar, S. (2005). Exaporative heat loss and heat transfer for open and closed-cycle system of a floating tilted with solar still. En *Desalination*, 180 (págs. 291–305).
- Joe Patrick Gnanaraj S, R. S. (2017). Enhancing the design to optimize the performance of double basin solar still. *Desalination*, 411:112–23.
- Joe, H. (1997). *Multivariate models and dependence concepts*. London: Chapman & Hall.
- Kabeel AE, A. M. (2016). Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions. *Desalination*, 383:22–8.
- Kabeel AE, O. Z. (2014). Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: an experimental approach. *Energy Convers Manag*, 78:493–8.
- Kabeel, A. (2009). Performance of solar still with a concave wick evaporation surface. En *Energy*, 34(10) (págs. 1504–1509).
- Kabeel, A., & El-Agouz, S. (2011). Review of researches and developments on solar stills. . En *Desalination* (págs. 276, 1–12).
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. Kidlington, Oxford: Elsevier.
- Karimi Estahbanati MR, F. M. (2015). Experimental investigation of a multi-effect active solar still: the effect of the number of stages. *Appl Energy*, 37:46–55.
- Kumar, A., Anand, J., & Tiwari, G. (1991). Transient analysis of a double slope-double basin solar distiller. En *Energ. Convers. And Manage.*, 31(2) (págs. 129–139).
- Kumar, A., Jayaprakash, R., Denkenberger, D., Ahsan, A., Okundamiya, M., & Kumar, S. (2012). An experimental study on a hemispherical solar still. En *Desalination* 286 (págs. 342–348).
- Kumar, S., & Tiwari, A. (2008). An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T) active solar still. En *Int J Energy Res* 32 (págs. 847–858).
- Kumar, Sanjay, & Tiwari, G. (1996). Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. En *Sol. Energy*, 57(6) (págs. 459–464).
- Kumar, T., Denkenberger, D., Ahsan, A., & Jayaprakash, R. (2013). The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material. . En *Desalination* (págs. 314, 189–92.).
- Kumar., T. y. (1996). Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. *Desalination*.
- Marchesi, J., Ducculi, E., Adaro, J., & Fasulo, A. (2006). *Destilación solar en la UNRC construcción y primeros resultados*.
- Moses Koilraj, G., Palanisamy Senthil, K., Gopal, S., & Joseph Ebenezer, S. D. (2011). Design and Performance Analysis of a Modified Vacuum Single Basin Solar Still. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2, 388-395.

- Muftah, A., Alghoul, M., Fudholi, A., Abdul-Majeed, M., & Sopian, K. (2014). Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review. . En *Renewable and sustainable energy reviews* (págs. 32, 430–447.).
- Muller-Holst, H., Engelhardt, M., & Scholkopf, W. (1999). Small-scale thermal seawater desalination simulation and optimization of system design. En *Desalination*, 122 (págs. 255–262).
- Murugavel, K., Anburaj, P., Hanson, R., & Elango, T. (2013). Progress in inclined type solar still. . En *Renewable and sustainable energy reviews* (págs. 20, 364–377.).
- Nader Rahbar, J. A.-B. (2015). Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still – CFD simulation and theoretical analysis. *Solar Energy*, 313–323.
- Naga Sarada, S., Hima Bindu, B., Ravi, G., & Mohan, B. (2014). A Review on Parametric Performance of Solar Still. . *International Conference on Industrial Engineering Science and Applications (IESA)*, (págs. 167-172).
- Naga Sarada, S., Sri Rama, D., Hima Bindu, B., & Ravi, G. (2014). A Review of Solar Water Distillation Techniques. *National Conference on Renewable and Sustainable Energy (NCRSE)*.
- Naim, M., Mervat, A., & El-Kawi, A. (2003). Non-conventional solar stills with charcoal particles as absorber medium. *Desalination Volume 153*, 55-64.
- Oliva, A., Jaen, A., Costa, M., Colomer, P., Casals, M., Carreras, R., . . . Calventus, Y. (2006). *Tecnología energética y medio ambiente I*. Barcelona: UPC.
- Omara ZM, K. A. (2013). Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors. *Desalination*, 314:67–72.
- Omara, Z., Kabeel, A., & Younes, M. (2013). Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors. En *Desalination 314* (págs. 67–72).
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Génova, Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- Pal P, Y. P. (2017). Performance analysis of modified basin type double slope multi-wick solar still. *Desalination*, 422:68–82.
- Panchal H, S. R. (2017). Annual performance analysis of a single-basin passive solar still coupled with evacuated tubes: comprehensive study in climate conditions of Mahesana, Gujarat. *Int J Ambient Energy*, 1-14.
- Paredes Velasco, C. (2012). *DISEÑO DE CAPTADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO PARA APLICACIONES RURALES EN PARAGUAY* . Paraguay: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS.

- Pearl, J. (1988). Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. En J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Francisco, CA.: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Pocaterra, L. (2002). *Diseño de planta experimental de desalinización solar para abastecer agua potable a zonas rurales*. Caracas.
- Rahbar, N., & Esfahani, J. (2012). Experimental study of a novel portable solar still by utilising the heat pipe and thermoelectric module. . En *Desalination* (págs. 284, 55–61.).
- Rajaseenivasan T, E. T. (2013). Comparative study of double basin and single basin solar stills. *Desalination*, 309:27–31.
- Rajaseenivasan T, N. R. (2014). An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector. *Desalination*, 347:131–7.
- Rodríguez, H. (2018). *Tutorial Nº 188*. Obtenido de Instalaciones Termosolares para la Producción de Agua Caliente Sanitaria (A.C.S.): <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn188.html>
- Rubio Cerda, E. (2005). *Estudio experimental de un destilador solar*. La paz B.C.S.
- Rubio Cerda, E., Porta-Gandara, M., & Fernandez Zayas, J. (2002). Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still. En *Renew. Energ.*, 27 (págs. 301–308).
- Saidur, R., Elcewadi, E., Mekhilef, S., Safari, A., & Mohammed, H. (2011). An overview of different distillation methods for small scale applications. . En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 15, 4756–4764.).
- Saidur, R., Elcewadi, E., Mekhilef, S., Safari, A., & Mohammed, H. (2011). An overview of different distillation methods for small scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4756-4764.
- Shankar, P., & Kumar, S. (2012). “Solar Distillation – A Parametric Review”. *VSRD International Journal of Mechanical, Automobile and Production Engineering*, Vol. 2 No. 1, 17-33.
- Sharon, H., & Reddy, K. (2015). A review of solar energy driven desalination. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1080-1118.
- Sitiosolar. (2013). *Los destiladores solares*. Obtenido de Sitiosolar.com portal de energías renovables: <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>
- Sivakumar, V., & Sundaram, E. (2013). Improvement techniques of solar still efficiency: A review. . En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 28, 246–264.).
- Srithar K, R. T. (2016). Stand alone triple basin solar desalination system with cover cooling and parabolic dish concentrator. *Renew Energy*, 90:157–65.
- Strum, H. (1984). *Eisenhower’s Solar Energy Policy*. EUA: The Public Historian.
- T. Arunkumar, K. R. (2019). A review of efficient high productivity solar stills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197–220.

- Tiwari, G., Singh, H., & Tripathi, R. (2003). Present status of solar distillation. En *Sol. Energy*, 75(5) (págs. 367–373).
- Velmurugan, V., & Srithar, K. (2011). Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity—A review. . En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 15, 1294–1304.).
- Waldman, G. (1983). *Introduction to light, the physics of light, vision and color*. Prentice-Hall.
- Wyszecki, G. a. (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. Wiley.
- Yadav, S., & Sudhakar, K. (2015). Different domestic designs of solar stills: A review. . En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 47, 718–731.).
- Younas O, B. F. (2016). Seasonal behavior and techno economical analysis of a multi-stage solar still coupled with a point-focus Fresnel lens. *Desalin Water Treat*, 57:4796–809.
- Zarza Moya , E. (1995). *Desalinización de agua de mar mediante energías renovables*. Almería.

ANEXO 1

Mediciones de variables ambientales para generar los mapas de productividad.

Día	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura del aire		Humedad relativa (%)		Presión en kPa	
		Promedio	Máxima	Promedio	Máxima	Promedio	Máxima
01/08/2018	N/D	15.58	16.02	66.25	68.74	74.01	74.02
02/08/2018	N/D	15.38	15.76	66.30	68.60	73.98	73.99
05/08/2018	N/D	12.96	13.40	85.63	88.04	73.96	73.98
06/08/2018	N/D	13.68	14.02	84.31	86.36	73.98	74.00
07/08/2018	N/D	14.22	14.59	63.36	65.94	74.02	74.03
08/08/2018	N/D	14.43	14.88	65.48	68.12	74.02	74.04
09/08/2018	N/D	13.40	13.83	78.22	80.82	74.08	74.10
11/08/2018	0.90	13.53	14.03	83.30	85.95	74.11	74.13
13/08/2018	1.07	12.64	13.05	80.86	84.41	74.08	74.09
14/08/2018	1.52	12.77	13.27	79.27	81.73	73.98	73.99
15/08/2018	1.20	13.50	13.88	84.28	86.23	74.06	74.08
16/08/2018	1.42	14.53	15.15	71.96	75.52	74.17	74.19
17/08/2018	1.19	14.02	14.72	73.98	77.69	74.23	74.26
18/08/2018	1.22	13.86	14.38	79.92	82.93	74.14	74.16
20/08/2018	1.05	13.89	14.41	83.77	86.81	74.01	74.03
21/08/2018	1.86	13.54	14.01	78.25	81.85	74.13	74.15
23/08/2018	1.26	13.79	14.20	79.92	82.86	74.15	74.17
24/08/2018	1.48	13.12	13.76	80.16	84.17	74.00	74.02
25/08/2018	1.27	14.01	14.60	80.25	82.81	74.00	74.02
27/08/2018	1.11	13.35	13.89	81.33	84.74	73.98	73.99
28/08/2018	1.51	12.99	13.42	84.05	86.83	73.97	73.99
29/08/2018	1.13	13.84	14.27	82.05	83.94	74.02	74.03
31/08/2018	1.28	13.89	14.25	85.12	86.88	73.89	73.91
01/09/2018	1.30	14.59	14.98	77.47	79.55	73.91	73.92
04/09/2018	1.15	14.73	15.31	80.49	83.73	73.85	73.87
05/09/2018	1.36	14.03	14.51	83.36	86.01	73.92	73.94
06/09/2018	1.53	13.41	13.76	83.18	85.17	74.02	74.04
07/09/2018	1.22	13.18	13.62	83.92	86.16	74.01	74.03
09/09/2018	0.95	13.23	13.77	82.87	85.49	73.81	73.83
10/09/2018	1.14	14.73	15.22	80.22	82.70	73.77	73.78

Día	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura del aire		Humedad relativa (%)		Presión en kPa	
		Promedio	Máxima	Promedio	Máxima	Promedio	Máxima
11/09/2018	1.10	14.09	14.50	82.74	85.19	73.86	73.87
12/09/2018	1.04	14.53	14.99	84.98	87.27	73.86	73.88
14/09/2018	1.84	14.26	14.68	81.29	83.71	73.81	73.82
15/09/2018	1.41	14.87	15.34	72.71	75.36	73.87	73.89
16/09/2018	1.20	14.27	14.71	79.28	82.09	73.89	73.90
17/09/2018	1.18	14.05	14.49	78.39	81.34	73.93	73.95
21/09/2018	1.41	15.21	15.63	73.44	75.48	73.92	73.94
22/09/2018	1.48	14.78	15.34	79.18	81.88	73.92	73.94
23/09/2018	1.42	13.71	14.28	80.81	83.73	73.87	73.89
24/09/2018	1.36	14.31	14.93	78.16	81.38	73.85	73.87
25/09/2018	1.44	14.39	14.84	83.39	86.15	73.91	73.93
27/09/2018	1.77	14.32	14.72	72.82	75.36	73.88	73.90
28/09/2018	1.83	13.95	14.38	75.85	78.90	73.92	73.94
29/09/2018	1.41	13.47	13.94	80.59	84.01	73.95	73.96
30/09/2018	1.01	13.99	14.47	82.30	85.27	73.98	73.99
01/10/2018	1.52	14.22	14.55	76.21	78.18	74.02	74.04
02/10/2018	1.97	14.19	14.64	69.27	71.14	74.01	74.02
03/10/2018	1.57	14.34	14.67	75.26	77.23	73.92	73.94
05/10/2018	1.24	14.39	14.91	74.35	77.66	73.86	73.88
06/10/2018	1.01	12.69	13.17	85.06	87.99	73.82	73.84
07/10/2018	0.77	12.41	12.87	89.09	91.82	73.77	73.79
08/10/2018	0.88	12.62	13.30	86.78	89.41	73.65	73.67
09/10/2018	1.08	13.34	13.75	85.75	87.94	73.62	73.64
11/10/2018	1.36	14.80	15.29	82.69	84.86	73.89	73.90
12/10/2018	1.11	14.36	15.03	84.80	86.84	73.86	73.88

Día	Irradiación Global en el captador (J / día)		Irradiación Global (J/m ² día)		Eficiencia (%)	Producción diaria	
	Promedio	Máxima	Promedio	Máxima		Litros	Litros/m ²
01/08/2018	6737619.64	7886034.27	28005000.45	32778400.25	28.72	0.83	3.43
02/08/2018	4758709.14	8041263.48	19779634.17	33423612.41	28.59	0.58	2.41
05/08/2018	3919416.55	5822070.28	16291103.99	24199508.09	28.73	0.48	2.00
06/08/2018	3205887.70	4692266.56	13325312.41	19503464.74	28.54	0.39	1.62
07/08/2018	6481775.33	7456125.05	26941580.38	30991477.22	28.77	0.80	3.30
08/08/2018	5837618.55	7080870.29	24264134.65	29431726.11	28.73	0.72	2.97
09/08/2018	3909396.78	5939657.11	16249456.71	24688259.21	28.80	0.48	2.00
11/08/2018	3719030.00	5657565.66	15458194.82	23515742.58	28.70	0.46	1.89

Día	Irradiación Global en el captador (J / día)		Irradiación Global (J/m ² día)		Eficiencia (%)	Producción diaria	
	Promedio	Máxima	Promedio	Máxima		Litros	Litros/m ²
13/08/2018	3154568.15	4794663.81	13112002.03	19929080.20	28.63	0.39	1.60
14/08/2018	5236338.85	7053597.97	21764908.06	29318368.35	28.67	0.64	2.66
15/08/2018	3221712.62	5106845.94	13391088.88	21226669.16	28.76	0.40	1.64
16/08/2018	5969485.32	7541260.09	24812240.53	31345342.08	28.69	0.73	3.03
17/08/2018	5293703.25	6771666.86	22003343.89	28146518.17	28.80	0.65	2.70
18/08/2018	5298054.87	7095845.94	22021431.46	29493972.58	28.78	0.65	2.70
20/08/2018	4557167.05	6198534.91	18941921.94	25764288.04	28.83	0.56	2.33
21/08/2018	2831471.24	4975804.24	11769045.68	20681992.69	28.58	0.35	1.43
23/08/2018	3895817.86	6094862.75	16193015.74	25333373.41	28.90	0.48	2.00
24/08/2018	4247509.92	6237099.57	17654828.22	25924582.53	28.72	0.52	2.16
25/08/2018	5609617.38	7821924.61	23316444.95	32511927.67	28.65	0.69	2.85
27/08/2018	3466685.41	5653696.95	14409321.36	23499662.22	28.76	0.43	1.77
28/08/2018	3752131.41	5426329.47	15595781.21	22554606.46	28.76	0.46	1.91
29/08/2018	3757939.26	5809277.84	15619921.64	24146336.16	28.72	0.46	1.91
31/08/2018	4607443.19	6495934.85	19150895.35	27000434.59	28.77	0.57	2.35
01/09/2018	4521059.90	6679210.03	18791842.15	27762220.19	28.80	0.56	2.31
04/09/2018	4068752.75	6548815.21	16911821.79	27220232.47	28.83	0.50	2.08
05/09/2018	3737856.43	6143122.64	15536447.11	25533966.24	28.87	0.46	1.91
06/09/2018	3261250.53	4348785.77	13555428.69	18075782.56	28.77	0.40	1.66
07/09/2018	3281395.11	6026644.13	13639159.90	25049821.86	28.60	0.40	1.66
09/09/2018	4448357.10	6160464.91	18489652.02	25606049.58	28.74	0.55	2.27
10/09/2018	3971417.95	5515685.89	16507248.47	22926017.52	28.65	0.49	2.02
11/09/2018	2522689.43	3608569.19	10485590.25	14999063.08	28.83	0.31	1.29
12/09/2018	3514516.41	5356705.81	14608131.49	22265214.83	28.70	0.43	1.79
14/09/2018	5299312.63	6983764.40	22026659.38	29028104.26	28.77	0.65	2.70
15/09/2018	4816684.28	6427885.27	20020608.59	26717585.70	28.73	0.59	2.45
16/09/2018	3980076.24	5797049.13	16543236.77	24095507.36	28.59	0.49	2.02
17/09/2018	3537532.76	4638789.54	14703799.23	19281186.86	28.85	0.44	1.81
21/09/2018	4997553.06	6431107.83	20772391.91	26730980.28	28.63	0.61	2.54
22/09/2018	5127781.63	6638021.15	21313688.63	27591018.11	28.59	0.63	2.60
23/09/2018	4687001.29	6551652.60	19481579.59	27232026.15	28.78	0.58	2.39
24/09/2018	4882412.25	6797146.96	20293807.72	28252426.50	28.83	0.60	2.49
25/09/2018	4650999.20	6619162.02	19331936.48	27512629.88	28.75	0.57	2.37
27/09/2018	5509785.83	7007603.66	22901493.84	29127192.42	28.74	0.68	2.81
28/09/2018	4453423.08	6299929.93	18510708.84	26185737.72	28.71	0.55	2.27
29/09/2018	3832283.56	4912420.01	15928934.63	20418535.33	28.77	0.47	1.95
30/09/2018	3457787.00	5277527.02	14372335.00	21936107.20	28.83	0.43	1.77
01/10/2018	3395794.22	5322921.13	14114661.24	22124788.38	28.67	0.42	1.72
02/10/2018	5127627.89	6468469.18	21313049.59	26886273.19	28.59	0.63	2.60
03/10/2018	3845969.85	5611156.84	15985821.88	23322843.72	28.67	0.47	1.95
05/10/2018	4599006.33	5657022.20	19115827.44	23513483.68	28.82	0.57	2.35

<i>Día</i>	<i>Irradiación Global en el captador (J / día)</i>		<i>Irradiación Global (J/m² día)</i>		<i>Eficiencia (%)</i>	<i>Producción diaria</i>	
	<i>Promedio</i>	<i>Máxima</i>	<i>Promedio</i>	<i>Máxima</i>		<i>Litros</i>	<i>Litros/m²</i>
06/10/2018	3622035.07	4786447.35	15055034.16	19894928.39	28.82	0.45	1.85
07/10/2018	2968119.76	4050813.97	12337026.96	16837259.05	28.85	0.37	1.52
08/10/2018	3036421.28	4586810.31	12620923.10	19065134.52	28.59	0.37	1.54
09/10/2018	3701430.16	5735327.54	15385040.84	23838960.80	28.84	0.46	1.89
11/10/2018	3135188.13	4931600.60	13031448.75	20498259.71	28.81	0.39	1.60
12/10/2018	3220004.98	5439704.64	13383991.06	22610200.50	28.78	0.40	1.64

ANEXO 2

Panorama global de los destiladores solares.

<i>Referencia</i>	<i>Estudio, desarrollo o innovación</i>	<i>Resultado</i>
(Cooper P. , The absorption of radiation in solar stills, 1969)	Se presentó un método para calcular la fracción de la radiación solar incidente en los destiladores solares.	La ecuación presentada se puede utilizar para encontrar una absorbancia media efectiva para cualquier valor dado de variables (día del año, la latitud, cubierta de la pendiente, la orientación, la radiación difusa y la intermitencia de insolación).
(Cooper P. I., 1972) (Sodha, Kumar, Tiwari, & Pandey, Effect of dye on the thermal performance of solar still, 1980)	Se estudió el efecto de las adiciones de colorante en la cuenca que contiene la masa de agua.	La adición de colorante en la cuenca muestra una mejora en la productividad de la destilación.
(Garg & Mann, 1976) (Solimon, 1972) (Tiwari & Thakur, An analytical expression for efficiency of solar still, 1991)	Se hicieron intentos para hallar el efecto de la velocidad del viento en el rendimiento del destilador.	El aumento en la velocidad del viento cuando la temperatura del agua en la cuenca es alta y el aumento de la velocidad del viento para los valores fijos de otros parámetros, aumentó la eficiencia del destilador.
(Cooper P. I., 1972) (Garg & Mann, 1976) (Morse & Read, 1968)	Se examinó el efecto de la temperatura ambiente sobre el rendimiento del destilador.	La producción disminuye con la disminución de la temperatura ambiente más allá de 26,7 ° C.
(Frick & Von Sommerfeld, 1973)	Se analizó la evaporación durante 8 años	La eficiencia de aproximadamente el 30% disminuyó debido a la decoloración.
(Baibutaev, Achilov, & Kamaeva, 1970)	Se analizó el efecto de la concentración de sal del agua a destilar en la salida del destilador.	La producción de destilado disminuyó cuando la concentración de sal del agua a destilar aumentó más allá del punto de saturación.
(Cooper P. , The maximum efficiency of single effect solar still, 1973)	Se diseñó y analizó un destilador solar convencional de un solo efecto.	Un rendimiento térmico máximo de alrededor del 60%.
M (Moustafa, Bruswitz, & Farmer, 1979)	Se comparó un destilador solar del tipo de cuenca convencional y destilador solar de tipo de meseta inclinada.	El destilador solar de meseta inclinada tiene ventajas sobre el destilador solar del tipo de la cuenca.
(Tiwari, Kumar, & Sodha, A review-cooling by water evaporation over roof, 1982)	Se diseñó y analizó el destilador solar simple de meseta múltiple	La producción de destilado fue de 2,5 l / m ² d en días fríos y soleados, lo que corresponde a una eficiencia total del 34% (frente a un máximo del 30% para el destilador solar de tipo cuenca) y el costo del destilador fue inferior a la mitad del costo de destilador solar tipo cuenca.
(Sodha, Nayak, Tiwari , & Kumar, 1980 b)	Se analizó periódicamente y se observó el rendimiento de un destilador solar de doble cuenca.	La producción de destilados aumentó en promedio un 36% más que la del destilador solar de una sola cuenca.
(Yeh & Chen, 1986)	Se investigaron los efectos de los parámetros climáticos y de diseño del destilador solar tipo meseta.	La unidad destiladora sin aislamiento redujo el rendimiento del destilado.
(Egariyewe, Animalu, & Okeke, 1991)	Se analizó un destilador solar con techo de cristal y una cuenca de hormigón revestida con cloruro de polivinilo negro (PVC).	La adición de carbón vegetal, carbón y combinación de carbón y carbón vegetal sobre el agua impura incrementa la eficiencia del destilador.
(Franco & Saravia, 1994)	Se compararon dos destiladores uno con superficie de vidrio inclinada en la superficie superior y el otro con una superficie inclinada de múltiples etapas dentro del destilador a condición de que el agua salina es precalentada por un colector solar.	El rendimiento del destilador multietapa fue mejor.
(Riffat, 1995)	Se diseñó un sistema con colector de placa, absorbedor, condensador y evaporador.	El sistema de anorción utilizando H ₂ O/LiBr termodinámicamente produjo baja eficiencia, pero significativa producción de calor.
(Al-Karaghoulí & Minasian, 1995)	Se analizó el destilador de meseta flotante, es decir, la meseta de yute ennegrecida en forma ondulada se había flotado con una lámina de poliestireno en la masa de agua de la cuenca.	Se obtuvo una mayor producción de destilado en comparación con el destilador solar de tipo de cuenca.
(Porta, Chargoy, & Fernandez, 1997)	Se construyó un destilador solar Mc Cracken Porta con área de destilación efectiva de 8,18 m ² que había añadido aislamiento en la parte inferior y los bordes.	Debido a la gran inercia térmica, la producción durante la noche aumentó, pero la producción total disminuyó.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Aboul-Enein, El-Sebai, & El-Bialy, 1998)	Se diseñó un destilador solar de una cuenca del área 1 m ² con la tapa superior de vidrio inclinada 15° con la cuenca profunda.	La profundidad del agua tuvo un efecto inverso en la productividad en la luz del día y durante la noche.
(Mink, Horvath, Evseev, & Kudish, 1998)	Se diseñó un destilador solar con módulo fijo, simulador solar, dos separadores de vapor, intercambiadores de calor, bomba de persistencia, medidor de flujo de gas, válvulas magnéticas y balance eléctrico.	El destilador dio una productividad total máxima de 3,05 x 10 ⁻⁴ kg/m ² s.
(Elkader, 1998)	Se construyeron tres destiladores de diferentes pendientes de base y ángulos de inclinación de cubierta de vidrio con área de 1 m ² .	El mejor resultado coincidió con la pendiente de la base de 15° y el ángulo de inclinación de la cubierta de cristal de 35°.
(Rommel, 1998)	Un nuevo absorbedor hecho de material plástico pulverizado con una capa de metal que actúa como un espejo infrarrojo.	Los absorbentes de polímero recubiertos selectivamente en el colector de placa plana mostraron un rendimiento atractivo para aplicaciones de desalinización.
(Muller-Holst, Engelhardt, & Scholkopf, 1999)	Se diseñó un sistema piloto de desalinización solar mediante la humidificación de efecto múltiple (MEH).	El sistema garantiza un suministro confiable de agua potable de alta calidad para el uso descentralizado en las zonas rurales.
(Bachir, Gros, Ouahes, & Diboun, 1999)	Unidad de destilación con varias etapas de evaporador, formada por una tela delgada mantenida en contacto con una placa sobre-colgante que hace que la interfaz placa-tela sea una película capilar.	La eficiencia aumentó cuando aumentó la temperatura de la salmuera, la intensidad solar y el número de etapas.
(El-Bahi & Inan, Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser, 1999)	Se ha diseñado un destilador solar con un área de evaporación de 1 m ² cubierto con dos láminas de vidrio paralelas de 3 mm de espesor, integradas con el condensador a través de la ranura horizontal provista de un reflector vertical.	La eficiencia incrementó significativamente.
(Haddad, Al-Nimr, & Maqableh, 2000)	Se construyó un destilador solar de tipo cuenca integrado con un condensador externo, es decir, un tanque de almacenamiento de lecho empacado.	La productividad aumentó con el aumento de la radiación solar, pero la eficiencia del destilador disminuyó.
(Rubio Cerda, Porta-Gandara, & Fernandez Zayas, 2002)	Se construyó un destilador solar triangular con área de evaporación efectiva de 8,8 m ² formada por las dimensiones del evaporador de 3,64 m por 2,42 m con cubiertas de vidrio de doble pendiente de 0,005 m de espesor en un ángulo de 45° orientado con Norte-Sur y Este-Oeste.	La orientación Norte-Sur y Este-Oeste reprodujo satisfactoriamente la producción medida de cada cubierta.
(Haralambopoulos, Biskos, Halvadakis, & Lekkas, 2002)	Se diseñó un destilador solar para la deshidratación de los lodos de aguas residuales utilizando el proceso de lodos activados.	El destilado había aumentado la contaminación debido a la intensa producción de vapor que llevaba compuestos orgánicos volátiles dentro del destilador.
(Bannat, Jumah, & Garaibeh, 2002)	Se diseñó un destilador solar de 0.98 x 0.98 m con inclinación de 19° utilizando el módulo de membrana de cáscara y tubo.	La concentración de sal fue marginal debido al módulo de membrana.
(Hongfei & Xinshi, 2002)	Destilador de dos cámaras con partición central, con un tubo vertical de evaporación con película, condensador, un separador de gas líquido con intercambiadores de calor y un ventilador de aire.	La relación de rendimiento fue dos o tres veces mayor que la de un destilador solar convencional tipo cuenca.
(El-Wify & Metias, 2002)	Destilador solar tipo L con aspecto de proporción 2.0 con paredes orientadas al Sur, Este y Oeste cubiertas por un material altamente reflectante desde la superficie exterior y cubierto por una pendiente de cubierta de vidrio de 25°.	La productividad aumentó considerablemente.
(Valsaraj, 2002)	Se construyeron dos destiladores idénticos de una sola pendiente, uno con chapa de aluminio rectangular perforada y recubierta de negro, doblada en forma de "V", posicionada en el destilador.	El rendimiento fue alto en la hoja de aluminio del destilador cuando la profundidad permanecía alta.
(Rahim, 2003)	Se construyó y analizó una unidad de desalinización con aislamiento térmico en la parte inferior y una zona de almacenamiento de calor formada mediante la colocación de una chapa de aluminio pintada de negro en la superficie superior.	La eficiencia es más alta que el destilador solar horizontal superficial aislado.
(Al-Kharabsheh & Yogi Goswami, 2003)	Se diseñó un sistema consistente en la fuente de calor, el evaporador, el condensador y las tuberías de la descarga basadas en una técnica innovadora pasiva de vacío.	Los destiladores solares, junto con el sistema solar térmico, aumentaron la productividad durante el día y la noche.
(Zhang, Zheng, & Wu, 2003)	Se construyó un sistema de desalinización solar con un colector solar o un área de 2.01 m ² .	La producción de destilado fue alta por unidad de área en comparación con otros diseños de destilador solar.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Abdallah & Badran, 2007)	Destilador solar de una sola pendiente con revestimiento de asfalto y rociador es construido y estudiado experimentalmente.	La productividad del destilador se incrementa hasta el 51% cuando se combina con potenciadores.
(Hanson, y otros, 2004)	Ensayos de laboratorio y de campo se llevaron a cabo sobre el rendimiento de destiladores solares de una sola cuenca para la eliminación de un grupo seleccionado de contaminantes inorgánicos, bacteriológicos y orgánicos.	La capacidad de eliminar los contaminantes no varió significativamente entre las unidades y la capacidad de eliminar los compuestos orgánicos, se encuentra que depende directamente de la volatilidad del compuesto medida por la constante de la ley de Henry.
(Ward, 2003)	Se construyó y diseñó un destilador solar de plástico.	El rendimiento del destilador hasta 9 l/m ² se obtiene a 35° C ambiente o aproximadamente 1000 W/m ² .
(Singh & Tiwari, 2004)	Se han hecho intentos para encontrar el rendimiento mensual de los destiladores solares pasivos y activos mediante cálculos numéricos para las variaciones horarias de la insolación media en las estaciones de Chennai, Jodhpur, Kolkata, Mumbai y Nueva Delhi.	Los cálculos numéricos revelan que el rendimiento anual depende significativamente de la profundidad del agua, la inclinación de la cubierta de condensación y el colector para los destiladores solares pasivos y activos y el rendimiento anual para una determinada profundidad de agua aumenta linealmente con el área del colector para un destilador solar activo.
(Sow, Siroux, & Desmet, 2005)	Se ha analizado el destilador de efecto simple, doble y triple. Exergética y energéticamente.	El análisis energético es útil para encontrar la energía necesaria para la condensación de vapor y el consumo de energía por unidad de masa de agua pura. El análisis exergético ha mostrado que las pérdidas de exergía más significativas son pérdidas de condensador y pérdidas de alimentación de agua.
(Boukar & Harmim, Parametric study of a vertical Solar still under desert climatic conditions, 2004)	Un destilador solar vertical es construido y probado para estudiar los parámetros que afectan el rendimiento del destilador bajo condiciones climáticas desérticas.	El estudio demostró que la productividad del destilador depende fuertemente de la radiación solar, la temperatura ambiente y la orientación solar.
(Tanaka, Nakatake, & Watanabe, 2004)	Se evalúa la influencia paramétrica de un destilador solar de tipo difusión vertical de efecto múltiple acoplado con un colector solar de tubería de calor.	Se encontró que la productividad aumenta con un aumento en el número de particiones y la temperatura del agua salina alimentada a las mesetas, y con una disminución en la relación del área del colector solar a cada área de partición, el grosor de la difusión, los huecos entre las particiones y la velocidad de alimentación del agua salina a las mesetas.
(Tanaka & Nakatake, Factors influencing the productivity of a multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat plate reflector, 2005)	Se construye un destilador solar de tipo de difusión vertical de múltiples efectos acoplado con un colector solar de tubería de calor y se realiza experimento en interiores para encontrar el rendimiento del destilador.	El resultado revela que la tasa de producción del destilador es de aproximadamente el 93% y el tubo de calor del destilador puede transportar energía térmica bien desde el colector solar hasta el destilador solar vertical de múltiples efectos de tipo difusión.
(Boukar & Harmim, Design parameters and preliminary experimental investigation of an indirect vertical solar still, 2007)	Se construye y prueba un destilador solar vertical indirecto con colector plano, una cámara de evaporación y una cámara de condensación.	La productividad diaria del destilador solar durante el periodo de invierno varió de 0,863 a 1,323 l/m ² d cuando la intensidad de la radiación solar en el rango de 19,15 a 26,08 MJ/m ² , bajo temperatura ambiente diaria varió de 10,68 a 15,19 °C y la eficiencia horaria máxima varió de 47,69 a 57,85%.
(Badran & Al-Tahaine, 2005)	El efecto del acoplamiento de un colector solar plano sobre la productividad del destilador solar es probado experimentalmente.	Se ha encontrado que la productividad del destilador se incrementa en un 36% cuando se acopla con un colector solar y la productividad disminuye con el aumento de la profundidad del agua y proporcional a la intensidad de la radiación solar.
(Sahoo, y otros, 2008)	Se realizaron trabajos para eliminar el contenido de fluoruro en el agua potable utilizando un destilador solar y también para modificar el revestimiento de la cuenca y el aislamiento para aumentar la eficiencia del destilador.	Los resultados mostraron que el fluoruro se redujo en un 92-96% y la eficiencia aumentó en un 6% con revestimiento de cuenca ennegrecido adecuado y aislamiento térmico de carbón.
(Kumar & Kasturi Bai, 2008)	Se construyó un destilador solar de 0,5 m ² de tipo cuenca con técnica de condensación mejorada y probado con diferentes muestras como el agua del grifo, el agua de mar y el efluente de la industria láctea.	La producción diaria máxima fue de alrededor de 1.4 l/m ² d y su eficiencia fue de aproximadamente 36% con una irradiación solar promedio correspondiente de 28 MJ/d.
(Shanmugan, Rajamohan, & Mutharasu, 2008)	Se construyó un destilador solar con espejo de refuerzo de acrílico con chapa de aluminio comercial y aislado con una lámina térmica de carbón.	Para la unidad de destilación potenciada, la producción de destilado fue de 4,2 l/m ² d a 890 W/m ² máx.
(Ismail, 2009)	Destilador solar hemisférico se fabricó para encontrar su rendimiento.	La producción diaria media de destilado varió de 2,8 a 5,7 l/m ² d y su eficacia se encontró que era del 33%. La eficiencia disminuye en un 8% con el aumento de la profundidad del agua del 50%.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Zhani, Ben Bacha, & Damak, 2009)	Se diseñó un nuevo sistema de desalinización trabajando con humidificación (método de deshumidificación). Se derivó un conjunto de sistemas algebraicos de ecuaciones basados en transferencia de calor y masa en cada componente de la unidad en régimen de estado permanente.	La ecuación desarrollada se utiliza para simular el sistema HD con el fin de investigar el comportamiento en estado estacionario de cada componente de la unidad.
(Soufari, Zamen, & Amidpour, 2009)	Se construyó una unidad de desalinización de deshumidificación por humidificación solar para 10 l/h de producción de agua dulce. Las ecuaciones teóricas desarrolladas han sido validadas con observación experimental.	Los resultados teóricos están en buen acuerdo con el resultado experimental.
(Murase, Yamagishi, & Tano, 2009)	Un destilador solar de tipo tubular híbrido, un destilador solar de cuenca convencional con una membrana de separación de aire y el destilador solar tipo tubo acoplado con un destilador solar de cuenca con una membrana de tipo plano son fabricados y probados en Japón.	Las producciones diarias fueron de 2,18 kg/m ² d con irradiación intermitente de lámparas por día 22,6 m ³ /m ² d. El destilador híbrido solar mejoró la productividad para aplicaciones prácticas.
(Mousa & Abu Arabi, 2009)	Se desarrollaron las ecuaciones del balance energético para la unidad de la desalinización solar con la película descendente y las ecuaciones resueltas usando MATLAB mediante el método de Rungakutta cuarto orden.	La productividad aumentó disminuyendo el flujo de agua de alimentación, la temperatura de la cubierta de vidrio y aumentando la temperatura del agua de alimentación y la intensidad de la radiación solar.
(Khalifa & Hamood, Experimental validation and enhancement of some solar still performance correlations, 2009)	El valor cuadrático medio se desarrolló para las correlaciones de desempeño desarrolladas por los investigadores con respecto al destilador solar de tipo cuenca.	Para la profundidad de la salmuera, el valor R2 aumentó de 0,832 a 0,865, de 0,734 a 0,793 para el ángulo de inclinación y de 0,833 a 0,904 para el efecto del colorante.
(Hossain & Davies, 2009)	Se diseñó y probó un innovador sistema de desalinización de múltiples efectos térmicos con evaporación de película descendente.	El concentrado de sal del módulo RO se utiliza para enfriar el invernadero a través de una almohadilla evaporativa y ha demostrado el enfriamiento evaporativo con éxito utilizando RO. La unidad tiene un buen potencial para aplicaciones prácticas. El MED con tubos de calor tiene un área de transferencia de calor reducida en un 25%.
(Gao, Zhang, & Zhang, 2009)	Se diseñó un sistema de ósmosis inversa impulsado por energía fotovoltaica. Se evaluó el tamaño y el costo del sistema y desarrollaron las ecuaciones del balance energético.	Existe una relación entre las variables, la radiación solar, la producción de agua dulce y la demanda de evapotranspiración.
(Chen, Zheng, Ma, Li, & He, 2009)	Se probó una unidad de desalinización solar de absorción de regeneración de efecto cuadripolar en puertas, para predecir la relación de rendimiento y la velocidad de flujo de agua dulce a diferentes temperaturas de funcionamiento.	Los parámetros óptimos que son el volumen de almacenamiento del área del colector solar, la temperatura de arranque y de rotura ilustran la ventaja de la absorción del sistema de desalación.
(Aybar & Assefi, Simulation of a solar still to investigate water depth and glass angle, 2009a)	Se realizó la simulación del destilador solar convencional para investigar la profundidad del agua y el ángulo del vidrio.	Los resultados simulados son buenos acuerdos con los resultados experimentales.
(Aybar & Assefi, A review and comparison of solar distillation: Direct and indirect type systems, 2009b)	Se intentó predecir el rendimiento del destilador solar de desagüe de la cuenca y del tipo de meseta, conectado en serie con un estanque solar y un destilador solar a pasos.	El análisis teórico del destilador está en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Abu-Arabi, Mousa, & Abdelrahman, 2009)	Se hizo el análisis teórico de un destilador solar de un paso con seguimiento de inclinación azimutal y un reflector de placa vertical, se realizó en cuatro días, los equinoccios y solsticios, a 30° de latitud norte.	El ángulo de inclinación adecuado del destilador según las estaciones aumentó la cantidad diaria de rendimiento del destilado.
(Velmurugan, y otros, 2009a)	Se intentó desarrollar un modelo geométrico para calcular la radiación reflejada de un reflector externo de un destilador solar de tipo cuenca.	La productividad del destilador se incrementa, con un aumento menor en verano.
(Tanaka & Nakatake, One step azimuth tracking tilted wick solar still with a vertical flat plate reflector, 2009a)	Se diseñó una unidad de desalación a bajas temperaturas y bajas presiones mediante una cabeza barométrica de aplicación sin ninguna entrada de energía mecánica.	El nuevo diseño tiene el potencial de evaporar el agua salina a temperatura ambiente cercana.
(Tanaka H. , Effect of inclination of external reflector of basin type still in summer, 2009)	Se hizo el análisis teórico de un destilador solar de meseta inclinada con un reflector externo de placa plana, de inclinación en un día de solsticio de invierno a 30° de latitud norte.	El rendimiento del destilado aumentó en 15% o 27%, mayor que con un reflector vertical cuando la longitud de los reflectores es la mitad o la misma longitud del destilador.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Khalifa & Hamood, On the verification of the effect of water depth on the performance of basin type solar stills, 2009a)	Se desarrolló una ecuación de correlación a partir de todos los datos de profundidad de salmuera para predecir la influencia de la profundidad de salmuera en la productividad del destilador solar de tipo cuenca.	La productividad del destilador es influenciada por la profundidad de la salmuera hasta en un 48%.
(Vinoth Kumar & Kasturi Bai, 2009)	Se diseñó un destilador solar tipo cuenca de 0,5 m ² con técnica de condensación mejorada y se hizo un estudio de rendimiento.	La circulación del agua a través del tubo unido en las paredes de la superficie realizó la eficiencia del destilador.
(Jiang, Tian, Cui, & Liu, 2009)	Se diseñó y analizó el rendimiento de un sistema de destilación solar con calentamiento directo integrado con equipo de flash.	Los resultados experimentales están en buen acuerdo con el análisis teórico.
(Ahmed, Hrairi, & Ismail, 2009)	Se propuso un modelo matemático de un sistema de destilación solar de vacío multietapa y se realizó un análisis estructurado utilizando el software NASTLAN.	El análisis reveló que, a medida que aumenta la altura, la productividad disminuye.
(Velmurugan, Kumar, Haq, & Srithar, 2009b)	Se fabricó un destilador solar escalonado con tanque de decantación de efluentes para desalinizar el efluente textil.	La productividad aumentó en un 98% cuando se usan estaño, esponja y guijarros en la cuenca.
(Kabeel, Performance of solar still with a concave wick evaporation surface, 2009)	Se fabricó y evaluó un destilador solar con superficie de meseta cóncava como área de evaporación y cuatro lados de un destilador en forma de pirámide como superficie de condensación.	La productividad media del destilado es de 4,11 l/m ² , y la eficiencia instantánea máxima es del 45%.
(Kumar & Umanand, 2009)	Se ha propuesto y validado un modelo detallado de gráficas de enlace para la unidad de desalación con integración perfecta de un flujo de potencia a través de dominios eléctricos, térmicos e hidráulicos.	El sistema se valida en estado estacionario mediante simulación y experimentación.
(Khalifa & Hamood, Effect of insulation thickness on the productivity of basin type solar stills: An experimental verification under local climate, 2009b)	Se analizó el efecto del aislamiento sobre la productividad de un destilador solar tipo cuenca, para espesores de 30, 60 y 100 mm.	El espesor del aislamiento influyó en la productividad del destilador más del 80%.
(Tiwari, Kumar, & Sodha, A review-cooling by water evaporation over roof, 1982)	Se han realizado intentos para obtener expresiones analíticas para la pérdida de calor por evaporación (modo de ciclo abierto) basadas en la velocidad de transferencia de masa desde una superficie mojada a la atmósfera en función de la humedad relativa.	Los resultados teóricos estuvieron en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Tiwari & Rao, Transient performance of a single basin solar still with water flowing over the glass cover, 1984)	Se estudió el rendimiento transitorio de un destilador solar de una sola cuenca con agua que fluye sobre la cubierta de vidrio.	Un flujo uniforme de agua sobre la cubierta de vidrio disminuyó la temperatura de la cubierta de vidrio y aumentó la productividad.
(Tiwari & Mohammed Salim, Double slope fibre reinforced plastic multi still, 1984)	Se diseñó un multidestilador de plástico reforzado con fibra, de doble pendiente, y se desarrollaron expresiones analíticas para temperaturas de agua y vidrio así como para la eficiencia térmica incorporando el diseño del sistema y los parámetros climáticos.	Los resultados teóricos estuvieron en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Prakash & Kavanthekar, 1986)	Se diseñó y analizó el rendimiento del destilador solar regenerativo.	La producción diaria de destilado fue de aproximadamente 7,5 l/m ² .
(Tiwari & Madhuri, Effect of water depth on daily yield of still, 1987)	Se ha estudiado el efecto de la profundidad del agua utilizando un análisis transitorio de un destilador solar.	La dependencia del rendimiento en la profundidad del agua fue una fuerte función de la temperatura de la salmuera en la cuenca y el rendimiento diario aumentó para una temperatura inicial de la salmuera $\leq 45^\circ \text{C}$ y disminuyó cuando la temperatura de la salmuera $\leq 40^\circ \text{C}$.
(Tiwari, Lawrence, & Gupta, Analytical study of multi-effect solar still, 1989a)	Se realizó el estudio analítico del destilador solar de tipo de meseta multiefecto, incorporando los efectos de la longitud del destilador, la velocidad del flujo de agua, la inclinación del absorbedor, etc.	El rendimiento aumentó con una velocidad de flujo disminuida para una longitud particular del destilador y el número óptimo de superficie de condensación fue 3.
(Tiwari, Gupta, & Lawrence, Transient analysis of solar still in the presence of dye, 1989b)	Análisis transitorio de un destilador solar en presencia de colorante en términos de atenuación del flujo solar con profundidad de agua en la cuenca.	Para mayor profundidad de agua y bajo coeficiente de absorción, la teoría dio resultados más precisos.
(Lawrence, Gupta, & Tiwari, Effect of heat capacity on the performance of solar still with water flow over the glass cover, 1990)	Se estudió el efecto del flujo de agua sobre la cubierta de vidrio de un destilador solar convencional pasivo.	La eficiencia aumentó con la velocidad 1,5 m/s de caudal de agua sobre la cubierta de vidrio.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Lawrence & Tiwari, Theoretical evaluation of solar distillation under natural circulation with heat exchanger, 1990)	Las expresiones analíticas derivadas de Tiwari et al. (1982) se utilizaron para estudiar el efecto de la pérdida de calor por evaporación en el modo de funcionamiento en ciclo abierto del destilador.	Las expresiones fueron satisfechas.
(Tiwari & Singh, Thermal efficiency of Double Slope FRP solar distiller: An analytical and experimental studies, 1991a)	Se diseñó un destilador solar de doble pendiente y desarrollaron expresiones analíticas para la eficiencia térmica mediante la incorporación del flujo de agua uniforme en ambas vertientes.	La eficiencia térmica se incrementó significativamente para el menor flujo de agua debido a la acción capilar de la meseta.
(Tiwari & Singh, Thermal efficiency of evaporative heat loss for open and closed-cycle system, 1991b)	Se desarrollaron las expresiones analíticas para la eficiencia térmica de la pérdida de calor por evaporación en sistemas de ciclo abierto y cerrado en términos de diseño de sistemas y parámetros climáticos de un destilador solar de múltiples capas reforzado con fibra, de doble pendiente.	Los resultados numéricos obtenidos mediante expresiones analíticas estuvieron en concordancia con los resultados experimentales.
(Tiwari & Thakur, An analytical expression for efficiency of solar still, 1991)	Se derivaron expresiones analíticas para la eficiencia de un destilador solar convencional.	La eficiencia aumentó para la disminución de la masa de agua, el aumento de la velocidad del viento y la insolación solar nominal cuando se fijaron otros valores de los parámetros.
(Yadav & Kumar, Transient analytical investigations on single basin solar still with water flow in the basin, 1991)	Se diseñó un destilador solar de la cuenca y expresiones derivadas para la temperatura del agua en la cuenca, la temperatura de la cubierta de cristal, la temperatura del trazador de líneas de la cuenca, la salida del destilado y la eficiencia.	La temperatura del agua de salida, la producción y la eficiencia del destilado aumentaron con la disminución del caudal másico, el aumento de la longitud del destilador, el aumento de la capacidad de absorción del revestimiento de la cuenca y el aumento de la temperatura inicial del agua.
(Tiwari, Sumegha, & Yadav, Effect of wáter depth on the transient performance of a double basin solar still, 1991)	Se desarrollaron expresiones analíticas para diversos componentes de temperatura del destilador solar de doble cuenca.	El rendimiento del destilado aumentó cuando la profundidad del agua era menor en la cuenca inferior y se redujo cuando la profundidad del agua era alta en la cuenca inferior.
(Yadav & Prasad, Parametric investigations on a basin type solar still, 1991)	Análisis de la influencia paramétrica en un destilador solar de tipo cuenca.	La eficiencia, la producción de destilado y la temperatura del agua aumentaron con el aumento de la temperatura inicial del agua, la absorción del revestimiento de la cuenca y disminuyó con el aumento de la masa de agua en la cuenca.
(Kumar, Anand, & Tiwari, Transient analysis of a double slope-double basin solar distiller, 1991)	Análisis transitorio del destilador solar de doble cuenca para predecir el rendimiento del destilador.	La eficiencia fue significativamente mayor que el destilador solar de una sola cuenca.
(Tiwari & Lawrence, New heat and mass transfer relations for a sol. still, 1991)	Se intentó predecir el coeficiente de transferencia de calor convectivo basado en las propiedades físicas del vapor de agua en el volumen de la cavidad.	El coeficiente de transferencia de calor convectivo depende de la temperatura del vapor de agua, la inclinación de la cubierta de vidrio y la separación entre la evaporación y la superficie de condensación.
(Mowla & Karimi, 1995)	Se desarrolló el modelo matemático para el destilador solar del tipo cuenca de área 1m ² con una cubierta invertida del vidrio en forma de V.	La productividad aumentó con la disminución de la profundidad del agua y los resultados teóricos estuvieron en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Adhikari, Kumar, & Sootha, 1995)	Se construyó un destilador solar multietapa de bandeja apilada.	La producción de destilado fue alta en comparación con los destiladores solares convencionales.
(Shawaqfeh & Mehdi Farid, 1995)	Se analizó un destilador solar de una sola cuenca con dimensiones de 0,98 x 0,98 m para predecir el calor y la transferencia de masa.	El modelo Dunkle (1961) para el calor y la transferencia de masa sobre la tasa de evaporación prevista fue de alrededor del 30%.
(Kumar, Sanjay, & Tiwari, 1996)	Estimación de la transferencia de masa convectiva para destiladores solares activos y pasivos con superficie de 1 m ² .	A partir de cualquier valor estándar de C y n en $Nu = C (Gr Pr)^n$, el rendimiento del destilador solar no puede evaluarse teóricamente a menos que se valide experimentalmente.
(Yaghoubi & Sabzevari, 1996)	Método empírico para el cálculo de la producción horaria a lo largo de un ciclo de 24 horas mediante la introducción de la nueva variable, el tiempo de servicio.	El rendimiento mejoró con la adición de agua de compensación a la cuenca para el tiempo de servicio periódico.
(Aggarwal & Tiwari, Convective mass transfer in a double-condensing chamber and a conventional solar still, 1998)	Se ha intentado descubrir C y n en $Nu = C (Gr Pr)^n$ por regresión lineal para diferentes rangos de temperatura de cámara de doble condensación (DCS) y destilador solar convencional de una sola pendiente (CSS).	El orden de C y n fue el mismo que el propuesto por Dunkle (1961) para los rangos de funcionamiento bajos y estos cambios de valores para la temperatura de funcionamiento distintos de Dunkle (1961).
(Suneja & Tiwari, Effect of water flow on internal heat transfer solar distillation, 1999)	Expresiones analíticas de los coeficientes internos de transferencia de calor del absorbedor invertido y análisis del efecto del flujo de agua sobre la cubierta de vidrio.	Para una tasa de flujo particular, los coeficientes de transferencia de calor por evaporación disminuyeron con el aumento de la profundidad del agua en la cuenca.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Sanjeev & Tiwari, 1999)	El método de Runge-Kutta se utilizó para resolver ecuaciones diferenciales acopladas de un orden para el sistema de destilación solar activa multiefecto para evaluar el rendimiento diario.	El rendimiento máximo se obtuvo en diferentes áreas de colectores para un número diferente de efectos para un área de cuenca dada.
(Aggarwal & Tiwari, Thermal modeling of a double condensing chamber solar still: an experimental validation, 1999)	Se desarrolló un modelo térmico de una cámara de condensación doble (DCS) y se realizaron observaciones experimentales tanto para el destilador solar convencional de una sola pendiente (CSS) como para el DCS para comparar su rendimiento.	El rendimiento de los destilados fue alto para DCS y hubo concordancia entre las observaciones teóricas y experimentales.
(Tiwari, Singh, & Tripathi, Present status of solar distillation, 2003)	Se revisó brevemente la destilación solar y su estado, las fuentes de agua, la demanda y disponibilidad de agua.	Se dieron las recomendaciones, económicas de un destilador solar de una y doble pendiente, de fibra de plástico reforzado sobre la base del rendimiento, a largo plazo para el futuro.
(Tripathi & Tiwari, Effect of size and material of a semi-cylindrical condensing cover on heat and mass transfer for distillation, 2004)	Se utilizaron cubiertas de condensación con dimensiones características de 0,14 cm y 0,07 cm de aluminio y cobre para estudiar los coeficientes de transferencia de calor convectivo y evaporativo.	Se encontró que hubo un aumento de 15% y 7,5% en los coeficientes de transferencia de calor por evaporación debido al cambio en el tamaño y el material de la cubierta de condensación.
(Tripathi & Tiwari, Effect of water depth on internal hat and mass transfer for active solar distillation, 2005)	Se estudió el efecto de la profundidad del agua (0.05, 0.1 y 0.15 m) para el sistema de destilación solar pasivo y activo.	Mayor rendimiento obtenido durante las horas de sol en comparación con el día para una mayor profundidad de agua en el destilador solar (0,10 y 0,15 m) debido al efecto de almacenamiento.
(Janarthanan, Chandrasekaran, & Kumar, Exaporative heat loss and heat transfer for open and closed-cycle system of a fl oating titled with solar still, 2005)	Se intentó derivar las expresiones analíticas para la eficiencia térmica de la pérdida de calor por evaporación y la transferencia de calor para sistemas de ciclo abierto y cerrado de destilador solar flotante con inclinación, de meseta inclinada en términos de diseño del sistema y parámetros climáticos.	Se han utilizado expresiones analíticas derivadas para optimizar el diseño del destilador para el enfriamiento evaporativo (ciclo abierto) y la unidad de destilación (ciclo cerrado) para instalaciones a gran escala.
(Badran A. , Performance of cool towers under various climates in Jordan, 2003)	Se construyó un destilador solar de goteo invertido y se estudió el rendimiento.	El destilador mostró un aumento del 18% de la producción y un 13% de la reducción de la salinidad del agua de alimentación de entrada.
(Radhwan, 2004)	Destilador solar escalonado construido para calefacción y humidificación de invernaderos agrícolas (GH).	La eficiencia media diaria se encuentra en el 63% y el rendimiento diario total es de aproximadamente 4,92 l/m ² , de los cuales 0,81 l/m ² y el resto 4,11 l/m ² entra en la GH como humedad transportada por el aire circulante. La disminución del caudal de aire tiene una influencia insignificante en la productividad del sistema.
(Ahmed, Ofri, & Nasrallah, 2005)	Simulación numérica de los flujos de convección natural en una cavidad triangular sometida a un flujo de calor uniforme usando el método de los Elementos Finitos de Volumen de Control.	El estudio ha demostrado que la estructura del flujo y la transferencia de calor son sensibles a la forma de la cavidad y al número de Rayleigh.
(Tanaka & Nakatake, Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors, 2006)	Se fabrica un destilador solar de tipo cuenca con reflectores internos y externos y se realiza un análisis numérico del calor y transferencia de masa en el destilador.	Los reflectores internos y externos aumentaron notablemente la productividad del destilado a lo largo del año y el aumento de las cantidades diarias de destilado se determinó que promedió un 48%.
(Voropoulos, Mathioulakis, & Belessiotis, Solar still coupled with solar collectors and storage tank-analytical simulation and experimental validation of energy behavior, 2003)	Un destilador solar convencional tipo invernadero acoplado con tanque de almacenamiento de agua caliente calentado por un colector solar es investigado con un modelo matemático eficiente y evaluado experimentalmente.	El resultado de la investigación ha mostrado el modelo como una herramienta valiosa para el diseño de sistemas similares de destilación solar para su optimización.
(Mamlook & Badran, 2007)	Se investigó el efecto de diferentes parámetros en la salida del destilador solar empleando la técnica del conjunto difuso.	La implementación del conjunto difuso ha revelado el hecho de que el rendimiento se ve afectado por la velocidad del viento, la temperatura ambiente, la intensidad solar, los rociadores, la concentración de sal y la profundidad del agua.
(Ben Bacha, Damak, Bouzguenda, & Malaej, 2003)	Se realizó la simulación y validación experimental del módulo de destilación basado en el Ciclo Solar de Evaporación por Condensación Múltiple (SMCEC).	El modelo de simulación desarrollado puede ser usado para diseñar y probar el comportamiento de este tipo de unidad de desalación.
(Matioulakis & Belessiotis, 2003)	Se realizaron intentos para investigar la optimización del uso de un destilador solar simple mediante su incorporación en un entorno multi-fuente y multiuso.	El modelado ha dado la capacidad de estimar el rendimiento esperado del sistema en función de las condiciones climáticas, permitiendo la elección de las soluciones de diseño adecuadas en relación con el uso deseado.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Tanaka & Nakatake, Numerical analysis of the vertical multiple effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector: optimum reflector angle and optimum orientation of the still at various seasons and locations, 2007)	El análisis numérico del destilador solar de difusión vertical de efecto múltiple acoplado con un reflector de placa plana se determina asumiendo que el destilador está situado en el ecuador y a 10°, 20°, 30° y 40° de latitud norte.	Se ha encontrado que el ángulo del reflector de la lámina debe ser fijo a 10° desde la horizontal y cambiado a 0° durante la estación de invierno a latitudes más altas y la orientación del destilador debe ser ajustada de acuerdo con el mes a cualquier latitud. La productividad diaria del destilador propuesto se encuentra en más de 30 kg/m ² en cualquier latitud, excepto en la temporada de invierno a 40° N de latitud.
(Tanaka & Nakatake, Numerical analysis of the vertical multiple effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector: optimum reflector angle and optimum orientation of the still at various seasons and locations, 2007)	Se analiza teóricamente un destilador solar de tipo cuenca con un reflector interno (dos lados y paredes traseras) y un reflector plano inclinado en un día de solsticio de invierno a 30° de latitud N para determinar la efectividad de la inclinación del reflector externo.	La cantidad diaria de destilado del destilador con el reflector externo inclinado es 16% mayor que la que tiene el reflector externo vertical.
(Tsilingiris, The influence of binary mixture thermophysical properties in the analysis of heat and mass transfer processes in solar distillation systems, 2007)	Se ha intentado indicar el efecto de las propiedades termofísicas de la mezcla binaria en los procesos de transporte y las cantidades asociadas y evaluar las propiedades termofísicas del medio de trabajo en los sistemas de destilación.	La investigación revela que el uso de aire seco inadecuado conduce a una sobrestimación significativa del coeficiente convectivo de transferencia de calor y, por lo tanto, una sobreestimación moderada de la producción de destilado, que se estima hasta un 10%.
(Kazuo, Tobata, & shigeki Toyama, 2006)	Se construye y evalúa, experimental y numéricamente un destilador solar tipo tubo que integra un destilador convencional y una red de distribución de agua adecuada al concepto de plantación del desierto.	El resultado simulado ha demostrado que el rendimiento no es necesario para el aislamiento de un destilador y es posible montar la parte inferior del destilador bajo el suelo.
(Tiwari & Tiwari, 2007)	Se ha intentado encontrar el rendimiento estacional de un destilador solar pasivo de pendiente única, de inclinación de cubierta de 30° para diferentes profundidades de agua experimentalmente y también se ha intentado modelar térmicamente.	El resultado obtenido está de acuerdo con los resultados obtenidos por investigadores anteriores.
(El-Sebail, Thermal performance of a triple-basin solar still, 2005)	Se ha intentado escribir un modelo matemático transitorio para un destilador solar de triple cuenca.	En días de verano típicos, la productividad total diaria es de 12,635 kg/m ² d, lo cual es de acuerdo con los resultados reportados para el destilador solar de triple efecto.
(Samee, Mirza, Majeed, & Ahamed, 2007)	Se construyó un destilador solar de base única y se analizó el rendimiento en la ubicación de latitud 33.3° N.	Se encontró que la inclinación óptima de la cubierta de vidrio era de 33,3° N tanto para el verano como para el invierno. Los valores de sales totales disueltas (TDS) y valor de pH concordaron con las directrices de la OMS para la calidad del agua potable.
(Tsilingiris, Analysis of the and heat and mass transfer processes in solar stills-The validation of a model, 2008)	Se han realizado intentos para encontrar la constante numérica en la correlación de Nusselt-Rayleigh para la evaluación del coeficiente de transferencia de calor convectivo para una mayor temperatura de operación.	La constante numérica es menor que 0,05 y también las propiedades termofísicas, la presión de vapor de saturación en la salmuera y la placa de condensación y el efecto de las propiedades de transporte influyen el coeficiente de transferencia de calor convectivo para una mayor temperatura de funcionamiento.
(Tochia-Nunez, Porta-Gandara, & Cervantes-de Gortari, 2008)	Se ha probado el análisis exergético teórico transitorio en estado estacionario de un destilador solar pasivo y se han encontrado los factores que se centran en la destrucción de exergía en el destilador.	La temperatura ambiente no es un parámetro influyente para la eficiencia de exergía y el espesor de aislamiento debe ser superior a 0,02 m para obtener una mayor eficiencia de exergía. Se obtiene un mejor comportamiento termodinámico cuando se reducen las diferencias de temperatura.
(Tanaka & Nakatake, Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter, 2009)	Se ha probado el análisis teórico de un destilador solar de meseta inclinada con un reflector externo de placa inclinada.	Se encontró que la producción de destilado fue 15% o 27% mayor que la del destilador con reflector vertical.
(Madhlopa & Johnstone, Model for computation of solar fraction in a single-slope solar still, 2009)	Se ha derivado un nuevo modelo para calcular la distribución de la radiación solar dentro de un destilador solar de una sola pendiente al dividir la fracción solar en una superficie vertical en haz y en partes difusas.	Se encontró que la fracción solar del rayo fue afectada tanto por la geometría del destilador solar como por la posición del sol en el cielo donde la fracción difusa depende de la geometría del destilador solar.
(Tanaka & Nakatake, One step azimuth tracking tilted-wick solar still with a vertical flat plate reflector, 2009a)	Se realizó el análisis teórico de un destilador solar de un paso con seguimiento de azimut con un reflector vertical de placa plana para determinar el ángulo de inclinación óptimo del destilador y la orientación óptima del destilador en cuatro días típicos a 30° de latitud N.	El destilador se hizo girar una vez al día al sur del sol y el ángulo de inclinación adecuado proporcionó la cantidad diaria de 40%, 57%, 40% y 27% mayor que la del destilador de meseta inclinada convencional en el equinoccio de primavera y otoño, en el solsticio de verano e invierno respectivamente.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Kumar, y otros, 2012)	Destilador de cuenca con tapa superior hemisférica. Variando el flujo de agua sobre la cubierta, temperaturas del agua, cubierta, aire y ambiente e incidencia de radiación solar.	Aumento de la producción de destilados con un aumento de la eficiencia del 34% al 42% por sobreenfriamiento.
(Tayeb, 1992)	Destilador de cuenca con cuatro cubiertas de vidrio, con diferentes cubiertas, temperaturas de cuenca, cubierta y ambiente e intensidad solar.	En días de sol, la productividad fue de aproximadamente 1,25 kg/m ² d, 1,1 kg/m ² d, 1,2 kg/m ² d y 0,83 kg/m ² d para el destilador con cubierta de vidrio plana inclinada, semi-esferoidal.
(Tanaka H. , Experimental study of abasin type solar still with internal and external reflectors in winter, 2009)	Destilador de la cuenca con reflectores internos y externos con variación en radiación solar global, radiación directa y difusa sobre superficie horizontal y temperatura.	Incremento en la productividad diaria en un 70-100% en días de invierno usando reflectores.
(El-Bahi & Inan, A solar stil lwith minimum inclination, coupled to an outside condenser, 1999)	Destilador de cuenca conectado a condensador exterior pasivo.	Productividad del destilado de aproximadamente 7 kg/m ² d, y la eficiencia fue de aproximadamente 75% de Junio a Agosto.
(Srivastava Pankaj & Agrawal, 2013)	Destilador de cuenca de una sola pendiente con múltiples amortiguadores flotantes por inercia térmica y refuerzo de reflector doble.	Un aumento del 68% y del 35% en el rendimiento del destilado en días claros y nublados. Con el refuerzo se observó un aumento del rendimiento del 79%.
(Tabrizi, Mohammad, & Hamid, 2010)	Destilador solar en cascada de tipo presa con PCM como medio de almacenamiento.	En días soleados típicos, ambos destiladores con y sin medio de almacenamiento PCM tienen la misma productividad. En días nublados, el destilador con almacenamiento tiene más productividad.
(Ahsan A. , Imteaz , Rahman , Yusuf, & Fukuhara, 2012)	Destilador tubular con la cubierta de película de cloruro de vinilo.	El destilador mejorado con película de polietileno fue duradero, económico, ligero y fácilmente moldeado a diferentes tamaños. Se observó una relación lineal entre el calor total y los coeficientes de transferencia de masa.
(Eze & Ojike, 2012)	Destilador rectangular y de forma piramidal del mismo tamaño y material.	El destilador rectangular tiene alta temperatura del agua y temperatura baja del vidrio con la eficiencia del 36% comparada al destilador de la pirámide con la temperatura baja del agua y la temperatura alta del vidrio de la eficiencia del 28.9%.
(Badran, Al-Hallaq, Eyal Salman, & Odat, 2005)	Destilador de doble pendiente conectado al colector de placas planas.	Destilador acoplado con un colector de placa plana produjo un rendimiento de destilado de 2,3 kg/m ² d de rendimiento del 22,26% en comparación con 1,5 kg/m ² d con un rendimiento del 28,56% para un destilador sin acoplamiento.
(Voropoulos, Mathioulakis, & Belessiotis, Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors, 2001)	Destilador de doble pendiente acoplado al campo colector solar.	La productividad diaria del destilador híbrido fue el doble que la del destilador pasivo y especialmente a las noches, se encontró que era triple.
(Kargar Sharif , Ghiasi, Jahangiri Mamouri, & Shafii, 2013)	Destilador de una sola pendiente acoplado a un tubo de calor pulsante.	El PHP es un dispositivo de conducción térmica de alto rendimiento que eleva la temperatura del agua de la cuenca muy rápidamente. Los resultados muestran una productividad máxima por hora de hasta 875 ml/m ² para una profundidad de agua de la cuenca óptima del 40% y la relación de llenado de PHP de 1cm.
(Abdel-Rehim & Lasheen, 2007)	Destilador de una sola pendiente acoplado a un canal parabólico.	La productividad de agua dulce ha aumentado un 18% en comparación con el destilador pasivo.
(Kumar & Tiwari, 2008)	Destilador híbrido solar activo PV/T.	La productividad fue 3,5 veces más que el destilador solar pasivo. Para una profundidad de agua de 0.05m, los coeficientes son 0,78 y 2,41 W/m ² K para los destiladores pasivos y activos respectivamente.
(El-Sebail, Ramadan, Aboul-Enein, & Salem, 2008)	Destilador inclinado simple acoplado a estanque solar profundo.	Los valores óptimos del espesor del agua y del caudal másico son respectivamente 0,03 m y 0,0009 kg/s. También se encontró que la productividad y eficiencia diaria del destilador era 52,36% y 43,80% mayor que la del destilador sin SSP, respectivamente.
(Eltawil & Zhengming, 2009)	Destilador de una sola pendiente integrado con turbina eólica y destilador inclinado.	La productividad disminuyó con el aumento de la profundidad del agua a caudales fijos. El sistema inclinado es más productivo en comparación con el destilador principal. La eficiencia promedio diaria del destilador principal y el sistema inclinado para la operación sur debido fue de 67,21 a 69,59% y 57,77 a 62,01%, mientras que para la operación de seguimiento

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
		solar, fue de 66,81 a 69,01 y 57,08 a 62,38%, respectivamente.
(Taamneh & Taamneh, 2012)	Destilador solar en forma de pirámide con y sin ventilador.	Hubo un aumento del 25% en la productividad diaria de los destiladores en comparación con el destilador convencional y es una manera rentable de usar ventilador accionado por energía solar para mejorar la tasa de evaporación.
(Ahmed & Alfaylakawi, 2012)	Destilador de una sola pendiente con aspersores de agua y ventilador de enfriamiento.	La productividad se incrementó en un 8% y un 15,5% al aumentar la velocidad media del viento de 1,2 m/s a 3 m/s y 4,5 m/s, respectivamente. También mediante el uso de rociadores de agua a intervalos preestablecidos de 20 minutos y 10 minutos, la productividad se incrementó en 15,7% y 31,8%, respectivamente.
(Rajaseenivasan, Elango, & Murugavel, Comparative study of double basin and single basin solar still, 2013)	Estudio de destilador de cuenca simple y doble cuenca, experimentando con diferentes profundidades de agua, materiales de meseta, materiales de almacenamiento de energía y materiales porosos.	Los resultados muestran que en la cuenca inferior del destilador con materiales de almacenamiento de energía, la productividad fue 169,2% mayor que la del destilador convencional.
(Madhlopa & Johnstone, Numerical study of a passive solar still with separate condenser, 2009)	Destilador multi-cuenca de una sola pendiente con condensador separado.	La purga es significativa en la transferencia de vapor desde la evaporación a la cámara del condensador, para este destilador se encuentra un incremento de la productividad global del 62% en comparación con el destilador convencional. En el rendimiento total del destilado, 60, 22 y 18% contribuyen al 1er, 2do y 3er efectos respectivamente.
(Singh & Tiwari, 1992)	Destilador de doble efecto tipo meseta múltiple.	La eficiencia térmica de los destiladores el primer efecto es más que la del segundo efecto. Con el aumento del caudal másico, el rendimiento térmico global del destilador disminuye.
(Tanaka & Nakatake, A simple and highly productive solar still: a vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat-plate mirror, 2005)	Destilador de difusión de efecto múltiple acoplado con un reflector.	La productividad del destilado fue de 29,2 kg/m ² d y 34,5 kg/m ² d, respectivamente en días soleados para equinoccio de primavera y solsticio de invierno para el destilador con 10 compartimentos y 10 mm de espacio entre ellos. Para un destilador con seis particiones con intervalos de difusión de 5 mm entre ellos, la productividad máxima fue de 13,4 kg/m ² d.
(Yeh H. , 1993)	Destilador de doble efecto de tipo ascendente.	La productividad se incrementa con las tasas de flujo de aire con aislamiento bajo. Por otro lado, para los altos niveles de aislamiento de alrededor de 419 kcal/m ² h, la productividad se puede mejorar si los caudales de aire están limitados a menos de 15 kg/m h.
(Yadav Y. , Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector, 1989)	Destilador de efecto doble de una sola pendiente acoplado a un colector de placas planas.	El destilador activo tiene un mejor rendimiento que el pasivo, mientras que el sistema con circulación forzada es más productivo que el destilador con efecto termosifón.
(Tanaka, Nakatake, & Tanaka, Indoor experiments of the vertical multiple effect diffusion type solar still coupled with a heat pipe solar collector, 2005)	Destilador de difusión múltiple tipo efecto vertical acoplado con colector de tubo de calor.	Las mesetas sobre placas de separación conducen a múltiples evaporaciones y fenómenos de condensación. Mediante la incorporación de un colector de tubería de calor, la energía térmica se transporta mejor al destilador, dando lugar a una tasa de producción de destilado de aproximadamente el 93%.
(Bhagwan & Tiwari, 1996)	Destilador de efecto doble de una pendiente, acoplado a un colector de CPC.	Teniendo en cuenta los supuestos, encontraron que el sistema da un mejor rendimiento en comparación con el destilador de una sola etapa debido a la recuperación de calor latente. Con el aumento del caudal de agua en la cuenca de la segunda etapa, la producción de destilado de la primera etapa aumenta debido a la disminución de su temperatura de cubierta de condensación.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Reddy, Ravi Kumar, O'Donovan, & Mallick, 2012) (Reddy, Ravi Kumar, Vishwanath Kumar, Mallick, & O'Donovan, 2010) (Vishwanath Kumar, Kumar Kaviti, Prakash, & Reddy, 2012)	Destilador de vacío multietapa acoplado con colectores planos.	Modelado en MATLAB 7.7., para obtener el mejor rendimiento durante todo el año, se encontró que la configuración del sistema era de cuatro etapas con una separación de 100 mm entre ellas suministradas con un caudal másico de 55 kg/m ² d conectado a colectores de placas planas en paralelo. El rendimiento máximo se encuentra en marzo a una presión de trabajo de 0,03 bar.
(Abdel Dayem, 2006)	Sistema de destilación por condensación- evaporación de múltiples efectos.	Modelado en TRNSYS15. Hay un rendimiento de destilado continuo del sistema. El rendimiento máximo se obtiene para una temperatura media de colector de 50° C y un área óptima de colector de 6 m ² . La unidad de destilación de efectos múltiples produce 24 l/día de agua destilada.
(Suneja, Tiwari, & Rai, Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system, 1997)	Destilador de doble cuenca de doble cuenca con absorbedor invertido.	El aumento porcentual en el rendimiento del destilado es 10% aumentando la temperatura inicial del agua de la cuenca de 22 ° C a 35 ° C, respectivamente. Un aumento del 99% en la productividad con la absorptividad de la placa absorbente a elevarse de 0,55 a 0,95.
(Minasian & AL-Karaghoul, 1995)	Destilador solar de meseta simple. Comparativo	Un destilador solar meseta-cuenca es simple, eficiente y económico en comparación con otros tipos de destilador.
(Aybar, Egelioglu, & Atikol, An experimental study on an inclined solar water distillation system, 2005)	Destilador solar de meseta simple.	El uso de la meseta aumenta el rendimiento del destilado por dos o tres veces de la placa desnuda.
(Helmy, El-Gayar, & Hisham, 2011)	Eficiencia en destilador solar de meseta simple.	En el período de 30 s y fuera del período de 25 min se sospecha como la mejor combinación para la máxima eficiencia térmica.
(Hansen, Narayanan, & Murugavel, 2015)	Material de absorción en destilador de meseta simple.	Se obtuvo lana de coral de agua como material de meseta más adecuado para una mayor productividad. Se registró una producción máxima de 4,28 l/día cuando se utilizó coral de agua con placa de absorción escalonada con malla de presa.
(Sodha, Kumar, Tiwari, & Tyagi, Simple multiple wick solar still: analysis and performance, 1981)	Destilador solar de meseta múltiple con variación en temperatura ambiente, insolación solar, temperatura de la cubierta de vidrio, temperatura del agua, velocidad del viento.	El rendimiento obtenido fue 2,51 l/m ² d y una eficiencia de alrededor del 34% durante el día soleado.
(Kumar & Anand, Modelling and performance of a tubular multiwick solar still, 1992)	Eficiencia en destilador solar de meseta múltiple.	El destilador solar de meseta múltiple tabular produjo 3 l/m ² d y una eficiencia 13% mayor que el destilador de mecha múltiple convencional y un 8% mayor que el destilador solar tabular simple.
(Janarthanan, Chandrasekaran, & Kumar, Performance of floating cum tilted-wick type solar still with the effect of water flowing over the glass cover, 2006)	Destilador solar de meseta inclinada.	La producción de destilado aumenta significativamente al enfriar la cubierta durante las horas pico de sol, también se encontró un flujo de agua de 1,5 m/s óptimo, ya que más allá de esta eficiencia disminuye.
(Tanaka & Nakatake, Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector, 2007)	Destilador solar de meseta inclinada con reflector externo.	La integración del reflector externo en el destilador aumenta la cantidad de destilado diario en un 9%.
(Tanaka H. , Tilted wick solar still with flat plate bottom reflector, 2011)	Destilador solar de meseta inclinada con reflector inferior.	Se registró un aumento del 13% en el rendimiento promedio del destilado durante cuatro días de experimento (equinoccios de primavera y de otoño, solsticios de verano e invierno) utilizando un reflector inferior inclinado a 35 °.
(Rajaseenivasan & Murugavel, Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. , 2013)	Destilador solar inclinado multiefecto.	El destilador solar de la cuenca doble produjo 85% más destilado en comparación con el de una sola cuenca.
(Kudret, 1964)	Rendimiento y costo de destilador solar inclinado multiefecto.	El rendimiento del destilador multiefecto es mejor que el destilador solar tipo techo, pero su costo inicial de construcción es alto.
(Tiwari & GAM, Double slope fiber reinforced plastic (FRP) multiwick solar still, 1984)	Destilador solar tipo meseta de múltiple efecto con fabricación en FRP.	El destilador solar de doble efecto fabricado en FRP resultó ser más económico y eficiente.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Moses Koilraj, Palanisamy Senthil, Gopal, & Joseph Ebenezer, 2011)	Destilador solar de cuenca simple con vacío modificado.	El vacío incrementó la producción a 8 l/m ² d, además se observó que a menor profundidad de masa de agua y menor cantidad de concentración de sal, la productividad mejora.
(Yeh H. , 1993)	Estudio de destilador solar tipo meseta de doble efecto.	El destilador de doble efecto de tipo ascendente tiene mayor productividad que el tipo cerrado a baja insolación.
(Moustafa M. E., 1986)	Destilador de difusión multiefecto.	Al aumentar el número de efectos y la magnitud del flujo de radiación solar y al disminuir el espacio de difusión y la velocidad de alimentación, aumenta la eficiencia del destilador.
(Rajan, Raja, & Marimuthu, 2014)	Destilador de múltiple efecto con fuente de calor externa.	La integración de la fuente de calor de biomasa (que contiene un cierto material sensible del almacenaje del calor) aumenta la salida en 73%.
(Awad & El-Agouz, 2013)	Destilador solar escalonado para calefacción y humidificación de invernaderos con PCM.	No se informó aumento significativo en la eficiencia, ya que el destilador con LHTESS dio una eficiencia del 57% con un rendimiento diario de 4,6 l/m ² frente al 61% sin LHTESS.
(Velmurugan, Senthil, Niranjan, & Srithar, 2008)	Productividad en destilador solar escalonado con aletas y esponjas.	La productividad del destilado fue de 76%, 60,3% y 96% cuando se utilizaron aletas, esponjas y combinación de ambos.
(Velmurugan, Naveen Kumar, Noorul Haq, & Srithar, 2009)	Productividad en destilador solar escalonado con aletas y esponjas y guijarros.	La combinación de aletas, esponjas y guijarros aumenta la productividad en un 98%.
(Velmurugan, y otros, 2009a)	Destilador solar escalonado con mini estanque solar, aletas y esponjas acoplado a un destilador solar de una cuenca.	El estanque solar, el destilador solar escalonado y el destilador de cuenca conectados en serie dieron una productividad máxima del 80% cuando se utilizaron aletas y esponjas en ambos destiladores.
(Velmurugan, Srithar, Mandlin, & Stalin, 2009)	Destilador solar escalonado con mini estanque solar, aletas, esponjas y guijarros.	100% de mejora en la productividad se informó cuando las aletas, esponjas y guijarros se utilizaron en el destilador solar escalonado integrado con mini estanque solar.
(Omara, Kabeel, & Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors, 2013)	Destilador solar escalonado con reflector interno.	Con reflector interno la productividad del destilador aumenta en un 76%.
(Headley, 1973)	Destilador solar escalonado con reflector interno y externo	Cuando se usa reflector interno y externo, la productividad del destilador eleva hasta un 125%.
(El-Samadony, Abdullah, & Omara, Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser, 2015)	Destilador solar escalonado con reflector, acoplado a un condensador.	El destilador acoplado por condensador produce un 66% más de producción.
(Abdullah, 2013)	Destilador solar escalonado con cubierta de refrigeración de vidrio acoplado con calentador solar de aire.	El sistema acoplado con calentador de aire solar y cubierta de vidrio mejora la productividad del agua en un 112% frente al destilador convencional.
(El-Samadony & Kabeel, 2014)	Rendimiento de un destilador solar escalonado con cubierta de refrigeración de vidrio.	Se obtuvo un aumento del 8,2% en rendimiento diario a $2,5 \times 10^{-4}$ a $5,5 \times 10^{-4}$ m de espesor de película y 4×10^{-5} a $8,5 \times 10^{-5}$ m ³ /s de caudal de agua.
(Ziabari, Sharak, Moghadam, & Tabrizi, 2013)	Destilador solar tipo presa en cascada.	El agua dulce promedio obtenida aproximadamente 6.7 l/m ² d, a un 26% más de eficiencia que el destilador convencional.
(Mohammad & Tabrizi, 2011)	Destilador solar en cascada con almacenamiento de calor latente de energía (LHTESS).	El destilador con PCM produjo un 31% más de destilado en comparación con el destilador sin PCM.
(Sathyamurthy R. , y otros, 2014)	Efecto del material de cambio de fase en el destilador solar de pirámide triangular.	Hay un aumento de aproximadamente el 35% en la producción de agua dulce con LHTESS que la del destilador solar sin LHTESS. Se encontró que el destilador solar con y sin LHTESS era de 5,5 l/m ² d y 3,5 l/m ² d.
Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Cooper P. , The absorption of radiation in solar stills, 1969)	Se presentó un método para calcular la fracción de la radiación solar incidente en los destiladores solares.	La ecuación presentada se puede utilizar para encontrar una absorbancia media efectiva para cualquier valor dado de variables (día del año, la latitud, cubierta de la pendiente, la orientación, la radiación difusa y la intermitencia de insolación).
(Cooper P. I., 1972) (Sodha, Kumar, Tiwari, & Pandey, Effect of dye on the thermal performance of solar still, 1980)	Se estudió el efecto de las adiciones de colorante en la cuenca que contiene la masa de agua.	La adición de colorante en la cuenca muestra una mejora en la productividad de la destilación.
(Garg & Mann, 1976) (Solimon, 1972) (Tiwari & Thakur, An analytical expression for efficiency of solar still, 1991)	Se hicieron intentos para hallar el efecto de la velocidad del viento en el rendimiento del destilador.	El aumento en la velocidad del viento cuando la temperatura del agua en la cuenca es alta y el aumento de la velocidad del viento para los valores fijos de otros parámetros, aumentó la eficiencia del destilador.
(Cooper P. I., 1972) (Garg & Mann, 1976) (Morse & Read, 1968)	Se examinó el efecto de la temperatura ambiente sobre el rendimiento del destilador.	La producción disminuye con la disminución de la temperatura ambiente más allá de 26,7 ° C.
(Frick & Von Sommerfeld, 1973)	Se analizó la evaporación durante 8 años	La eficiencia de aproximadamente el 30% disminuyó debido a la decoloración.
(Baibutaev, Achilov, & Kamaeva, 1970)	Se analizó el efecto de la concentración de sal del agua a destilar en la salida del destilador.	La producción de destilado disminuyó cuando la concentración de sal del agua a destilar aumentó más allá del punto de saturación.
(Cooper P. , The maximum efficiency of single effect solar still, 1973)	Se diseñó y analizó un destilador solar convencional de un solo efecto.	Un rendimiento térmico máximo de alrededor del 60%.
M (Moustafa, Bruswitz, & Farmer, 1979)	Se comparó un destilador solar del tipo de cuenca convencional y destilador solar de tipo de meseta inclinada.	El destilador solar de meseta inclinada tiene ventajas sobre el destilador solar del tipo de la cuenca.
(Tiwari, Kumar, & Sodha, A review-cooling by water evaporation over roof, 1982)	Se diseñó y analizó el destilador solar simple de meseta múltiple	La producción de destilado fue de 2,5 l / m ² d en días fríos y soleados, lo que corresponde a una eficiencia total del 34% (frente a un máximo del 30% para el destilador solar de tipo cuenca) y el costo del destilador fue inferior a la mitad del costo de destilador solar tipo cuenca.
(Sodha, Nayak, Tiwari , & Kumar, 1980 b)	Se analizó periódicamente y se observó el rendimiento de un destilador solar de doble cuenca.	La producción de destilados aumentó en promedio un 36% más que la del destilador solar de una sola cuenca.
(Yeh & Chen, 1986)	Se investigaron los efectos de los parámetros climáticos y de diseño del destilador solar tipo meseta.	La unidad destiladora sin aislamiento redujo el rendimiento del destilado.
(Egariyewe, Animalu, & Okeke, 1991)	Se analizó un destilador solar con techo de cristal y una cuenca de hormigón revestida con cloruro de polivinilo negro (PVC).	La adición de carbón vegetal, carbón y combinación de carbón y carbón vegetal sobre el agua impura incrementa la eficiencia del destilador.
(Franco & Saravia, 1994)	Se compararon dos destiladores uno con superficie de vidrio inclinada en la superficie superior y el otro con una superficie inclinada de múltiples etapas dentro del destilador a condición de que el agua salina es precalentada por un colector solar.	El rendimiento del destilador multietapa fue mejor.
(Riffat, 1995)	Se diseñó un sistema con colector de placa, absorbedor, condensador y evaporador.	El sistema de adsorción utilizando H ₂ O/LiBr termodinámicamente produjo baja eficiencia, pero significativa producción de calor.
(Al-Karaghoulí & Minasian, 1995)	Se analizó el destilador de meseta flotante, es decir, la meseta de yute ennegrecida en forma ondulada se había flotado con una lámina de poliestireno en la masa de agua de la cuenca.	Se obtuvo una mayor producción de destilado en comparación con el destilador solar de tipo de cuenca.
(Porta, Chargoy, & Fernandez, 1997)	Se construyó un destilador solar Mc Cracken Porta con área de destilación efectiva de 8,18 m ² que había añadido aislamiento en la parte inferior y los bordes.	Debido a la gran inercia térmica, la producción durante la noche aumentó, pero la producción total disminuyó.
(Aboul-Enein, El-Sebai, & El-Bialy, 1998)	Se diseñó un destilador solar de una cuenca del área 1 m ² con la tapa superior de vidrio inclinada 15° con la cuenca profunda.	La profundidad del agua tuvo un efecto inverso en la productividad en la luz del día y durante la noche.
(Mink, Horvath, Evseev, & Kudish, 1998)	Se diseñó un destilador solar con módulo fijo, simulador solar, dos separadores de vapor, intercambiadores de calor, bomba de persistencia, medidor de flujo de gas, válvulas magnéticas y balance eléctrico.	El destilador dio una productividad total máxima de 3,05 x 10 ⁻⁴ kg/m ² s.
(Elkader, 1998)	Se construyeron tres destiladores de diferentes pendientes de base y ángulos de inclinación de cubierta de vidrio con área de 1 m ² .	El mejor resultado coincidió con la pendiente de la base de 15° y el ángulo de inclinación de la cubierta de cristal de 35°.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Rommel, 1998)	Un nuevo absorbedor hecho de material plástico pulverizado con una capa de metal que actúa como un espejo infrarrojo.	Los absorbentes de polímero recubiertos selectivamente en el colector de placa plana mostraron un rendimiento atractivo para aplicaciones de desalinización.
(Muller-Holst, Engelhardt, & Scholkopf, 1999)	Se diseñó un sistema piloto de desalinización solar mediante la humidificación de efecto múltiple (MEH).	El sistema garantiza un suministro confiable de agua potable de alta calidad para el uso descentralizado en las zonas rurales.
(Bachir, Gros, Ouahes, & Diboun, 1999)	Unidad de destilación con varias etapas de evaporador, formada por una tela delgada mantenida en contacto con una placa sobre-colgante que hace que la interfaz placa-tela sea una película capilar.	La eficiencia aumentó cuando aumentó la temperatura de la salmuera, la intensidad solar y el número de etapas.
(El-Bahi & Inan, Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser, 1999)	Se ha diseñado un destilador solar con un área de evaporación de 1 m ² cubierto con dos láminas de vidrio paralelas de 3 mm de espesor, integradas con el condensador a través de la ranura horizontal provista de un reflector vertical.	La eficiencia incrementó significativamente.
(Haddad, Al-Nimr, & Maqableh, 2000)	Se construyó un destilador solar de tipo cuenca integrado con un condensador externo, es decir, un tanque de almacenamiento de lecho empacado.	La productividad aumentó con el aumento de la radiación solar, pero la eficiencia del destilador disminuyó.
(Rubio Cerda, Porta-Gandara, & Fernandez Zayas, 2002)	Se construyó un destilador solar triangular con área de evaporación efectiva de 8,8 m ² formada por las dimensiones del evaporador de 3,64 m por 2,42 m con cubiertas de vidrio de doble pendiente de 0,005 m de espesor en un ángulo de 45° orientado con Norte-Sur y Este-Oeste.	La orientación Norte-Sur y Este-Oeste reprodujo satisfactoriamente la producción medida de cada cubierta.
(Haralambopoulos, Biskos, Halvadakis, & Lekkas, 2002)	Se diseñó un destilador solar para la deshidratación de los lodos de aguas residuales utilizando el proceso de lodos activados.	El destilado había aumentado la contaminación debido a la intensa producción de vapor que llevaba compuestos orgánicos volátiles dentro del destilador.
(Bannat, Jumah, & Garaibeh, 2002)	Se diseñó un destilador solar de 0.98 x 0.98 m con inclinación de 19° utilizando el módulo de membrana de cáscara y tubo.	La concentración de sal fue marginal debido al módulo de membrana.
(Hongfei & Xinshi, 2002)	Destilador de dos cámaras con partición central, con un tubo vertical de evaporación con película, condensador, un separador de gas líquido con intercambiadores de calor y un ventilador de aire.	La relación de rendimiento fue dos o tres veces mayor que la de un destilador solar convencional tipo cuenca.
(El-Wify & Metias, 2002)	Destilador solar tipo L con aspecto de proporción 2.0 con paredes orientadas al Sur, Este y Oeste cubiertas por un material altamente reflectante desde la superficie exterior y cubierto por una pendiente de cubierta de vidrio de 25°.	La productividad aumentó considerablemente.
(Valsaraj, 2002)	Se construyeron dos destiladores idénticos de una sola pendiente, uno con chapa de aluminio rectangular perforada y recubierta de negro, doblada en forma de "V", posicionada en el destilador.	El rendimiento fue alto en la hoja de aluminio del destilador cuando la profundidad permanecía alta.
(Rahim, 2003)	Se construyó y analizó una unidad de desalinización con aislamiento térmico en la parte inferior y una zona de almacenamiento de calor formada mediante la colocación de una chapa de aluminio pintada de negro en la superficie superior.	La eficiencia es más alta que el destilador solar horizontal superficial aislado.
(Al-Kharabsheh & Yogi Goswami, 2003)	Se diseñó un sistema consistente en la fuente de calor, el evaporador, el condensador y las tuberías de la descarga basadas en una técnica innovadora pasiva de vacío.	Los destiladores solares, junto con el sistema solar térmico, aumentaron la productividad durante el día y la noche.
(Zhang, Zheng, & Wu, 2003)	Se construyó un sistema de desalinización solar con un colector solar o un área de 2.01 m ² .	La producción de destilado fue alta por unidad de área en comparación con otros diseños de destilador solar.
(Abdallah & Badran, 2007)	Destilador solar de una sola pendiente con revestimiento de asfalto y rociador es construido y estudiado experimentalmente.	La productividad del destilador se incrementa hasta el 51% cuando se combina con potenciadores.
(Hanson, y otros, 2004)	Ensayos de laboratorio y de campo se llevaron a cabo sobre el rendimiento de destiladores solares de una sola cuenca para la eliminación de un grupo seleccionado de contaminantes inorgánicos, bacteriológicos y orgánicos.	La capacidad de eliminar los contaminantes no varió significativamente entre las unidades y la capacidad de eliminar los compuestos orgánicos, se encuentra que depende directamente de la volatilidad del compuesto medida por la constante de la ley de Henry.
(Ward, 2003)	Se construyó y diseñó un destilador solar de plástico.	El rendimiento del destilador hasta 9 l/m ² se obtiene a 35° C ambiente o aproximadamente 1000 W/m ² .

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Singh & Tiwari, 2004)	Se han hecho intentos para encontrar el rendimiento mensual de los destiladores solares pasivos y activos mediante cálculos numéricos para las variaciones horarias de la insolación media en las estaciones de Chennai, Jodhpur, Kolkata, Mumbai y Nueva Delhi.	Los cálculos numéricos revelan que el rendimiento anual depende significativamente de la profundidad del agua, la inclinación de la cubierta de condensación y el colector para los destiladores solares pasivos y activos y el rendimiento anual para una determinada profundidad de agua aumenta linealmente con el área del colector para un destilador solar activo.
(Sow, Siroux, & Desmet, 2005)	Se ha analizado el destilador de efecto simple, doble y triple. Exergética y energéticamente.	El análisis energético es útil para encontrar la energía necesaria para la condensación de vapor y el consumo de energía por unidad de masa de agua pura. El análisis exergético ha mostrado que las pérdidas de exergía más significativas son pérdidas de condensador y pérdidas de alimentación de agua.
(Boukar & Harmim, Parametric study of a vertical Solar still under desert climatic conditions, 2004)	Un destilador solar vertical es construido y probado para estudiar los parámetros que afectan el rendimiento del destilador bajo condiciones climáticas desérticas.	El estudio demostró que la productividad del destilador depende fuertemente de la radiación solar, la temperatura ambiente y la orientación solar.
(Tanaka, Nakatake, & Watanabe, 2004)	Se evalúa la influencia paramétrica de un destilador solar de tipo difusión vertical de efecto múltiple acoplado con un colector solar de tubería de calor.	Se encontró que la productividad aumenta con un aumento en el número de particiones y la temperatura del agua salina alimentada a las mesetas, y con una disminución en la relación del área del colector solar a cada área de partición, el grosor de la difusión, los huecos entre las particiones y la velocidad de alimentación del agua salina a las mesetas.
(Tanaka & Nakatake, Factors influencing the productivity of a multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat plate reflector, 2005)	Se construye un destilador solar de tipo de difusión vertical de múltiples efectos acoplado con un colector solar de tubería de calor y se realiza experimento en interiores para encontrar el rendimiento del destilador.	El resultado revela que la tasa de producción del destilador es de aproximadamente el 93% y el tubo de calor del destilador puede transportar energía térmica bien desde el colector solar hasta el destilador solar vertical de múltiples efectos de tipo difusión.
(Boukar & Harmim, Design parameters and preliminary experimental investigation of an indirect vertical solar still, 2007)	Se construye y prueba un destilador solar vertical indirecto con colector plano, una cámara de evaporación y una cámara de condensación.	La productividad diaria del destilador solar durante el período de invierno varió de 0,863 a 1,323 l/m ² d cuando la intensidad de la radiación solar en el rango de 19,15 a 26,08 MJ/m ² , bajo temperatura ambiente diaria varió de 10,68 a 15,19 °C y la eficiencia horaria máxima varió de 47,69 a 57,85%.
(Badran & Al-Tahaine, 2005)	El efecto del acoplamiento de un colector solar plano sobre la productividad del destilador solar es probado experimentalmente.	Se ha encontrado que la productividad del destilador se incrementa en un 36% cuando se acopla con un colector solar y la productividad disminuye con el aumento de la profundidad del agua y proporcional a la intensidad de la radiación solar.
(Sahoo, y otros, 2008)	Se realizaron trabajos para eliminar el contenido de fluoruro en el agua potable utilizando un destilador solar y también para modificar el revestimiento de la cuenca y el aislamiento para aumentar la eficiencia del destilador.	Los resultados mostraron que el fluoruro se redujo en un 92-96% y la eficiencia aumentó en un 6% con revestimiento de cuenca ennegrecido adecuado y aislamiento térmico de carbón.
(Kumar & Kasturi Bai, 2008)	Se construyó un destilador solar de 0,5 m ² de tipo cuenca con técnica de condensación mejorada y probado con diferentes muestras como el agua del grifo, el agua de mar y el efluente de la industria láctea.	La producción diaria máxima fue de alrededor de 1.4 l/m ² d y su eficiencia fue de aproximadamente 36% con una irradiación solar promedio correspondiente de 28 MJ/d.
(Shanmugan, Rajamohan, & Mutharasu, 2008)	Se construyó un destilador solar con espejo de refuerzo de acrílico con chapa de aluminio comercial y aislado con una lámina térmica de carbón.	Para la unidad de destilación potenciada, la producción de destilado fue de 4,2 l/m ² d a 890 W/m ² máx.
(Ismail, 2009)	Destilador solar hemisférico se fabricó para encontrar su rendimiento.	La producción diaria media de destilado varió de 2,8 a 5,7 l/m ² d y su eficacia se encontró que era del 33%. La eficiencia disminuye en un 8% con el aumento de la profundidad del agua del 50%.
(Zhani, Ben Bacha, & Damak, 2009)	Se diseñó un nuevo sistema de desalinización trabajando con humidificación (método de deshumidificación). Se derivó un conjunto de sistemas algebraicos de ecuaciones basados en transferencia de calor y masa en cada componente de la unidad en régimen de estado permanente.	La ecuación desarrollada se utiliza para simular el sistema HD con el fin de investigar el comportamiento en estado estacionario de cada componente de la unidad.
(Soufari, Zamen, & Amidpour, 2009)	Se construyó una unidad de desalinización de deshumidificación por humidificación solar para 10 l/h de producción de agua dulce. Las ecuaciones teóricas desarrolladas han sido validadas con observación experimental.	Los resultados teóricos están en buen acuerdo con el resultado experimental.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Murase, Yamagishi, & Tano, 2009)	Un destilador solar de tipo tubular híbrido, un destilador solar de cuenca convencional con una membrana de separación de aire y el destilador solar tipo tubo acoplado con un destilador solar de cuenca con una membrana de tipo plano son fabricados y probados en Japón.	Las producciones diarias fueron de 2,18 kg/m ² d con irradiación intermitente de lámparas por día 22,6 m ³ /m ² d. El destilador híbrido solar mejoró la productividad para aplicaciones prácticas.
(Mousa & Abu Arabi, 2009)	Se desarrollaron las ecuaciones del balance energético para la unidad de la desalinización solar con la película descendente y las ecuaciones resueltas usando MATLAB mediante el método de Rungakutta cuarto orden.	La productividad aumentó disminuyendo el flujo de agua de alimentación, la temperatura de la cubierta de vidrio y aumentando la temperatura del agua de alimentación y la intensidad de la radiación solar.
(Khalifa & Hamood, Experimental validation and enhancement of some solar still performance correlations, 2009)	El valor cuadrático medio se desarrolló para las correlaciones de desempeño desarrolladas por los investigadores con respecto al destilador solar de tipo cuenca.	Para la profundidad de la salmuera, el valor R2 aumentó de 0,832 a 0,865, de 0,734 a 0,793 para el ángulo de inclinación y de 0,833 a 0,904 para el efecto del colorante.
(Hossain & Davies, 2009)	Se diseñó y probó un innovador sistema de desalinización de múltiples efectos térmicos con evaporación de película descendente.	El concentrado de sal del módulo RO se utiliza para enfriar el invernadero a través de una almohadilla evaporativa y ha demostrado el enfriamiento evaporativo con éxito utilizando RO. La unidad tiene un buen potencial para aplicaciones prácticas. El MED con tubos de calor tiene un área de transferencia de calor reducida en un 25%.
(Gao, Zhang, & Zhang, 2009)	Se diseñó un sistema de ósmosis inversa impulsado por energía fotovoltaica. Se evaluó el tamaño y el costo del sistema y desarrollaron las ecuaciones del balance energético.	Existe una relación entre las variables, la radiación solar, la producción de agua dulce y la demanda de evapotranspiración.
(Chen, Zheng, Ma, Li, & He, 2009)	Se probó una unidad de desalinización solar de absorción de regeneración de efecto cuadrípolar en puertas, para predecir la relación de rendimiento y la velocidad de flujo de agua dulce a diferentes temperaturas de funcionamiento.	Los parámetros óptimos que son el volumen de almacenamiento del área del colector solar, la temperatura de arranque y de rotura ilustran la ventaja de la absorción del sistema de desalación.
(Aybar & Assefi, Simulation of a solar still to investigate water depth and glass angle, 2009a)	Se realizó la simulación del destilador solar convencional para investigar la profundidad del agua y el ángulo del vidrio.	Los resultados simulados son buenos acuerdos con los resultados experimentales.
(Aybar & Assefi, A review and comparison of solar distillation: Direct and indirect type systems, 2009b)	Se intentó predecir el rendimiento del destilador solar de desagüe de la cuenca y del tipo de meseta, conectado en serie con un estanque solar y un destilador solar a pasos.	El análisis teórico del destilador está en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Abu-Arabi, Mousa, & Abdelrahman, 2009)	Se hizo el análisis teórico de un destilador solar de un paso con seguimiento de inclinación azimutal y un reflector de placa vertical, se realizó en cuatro días, los equinoccios y solsticios, a 30° de latitud norte.	El ángulo de inclinación adecuado del destilador según las estaciones aumentó la cantidad diaria de rendimiento del destilado.
(Velmurugan, y otros, 2009a)	Se intentó desarrollar un modelo geométrico para calcular la radiación reflejada de un reflector externo de un destilador solar de tipo cuenca.	La productividad del destilador se incrementa, con un aumento menor en verano.
(Tanaka & Nakatake, One step azimuth tracking tiltedwick solar still with a vertical flat plate reflector, 2009a)	Se diseñó una unidad de desalación a bajas temperaturas y bajas presiones mediante una cabeza barométrica de aplicación sin ninguna entrada de energía mecánica.	El nuevo diseño tiene el potencial de evaporar el agua salina a temperatura ambiente cercana.
(Tanaka H. , Effect of inclination of external refl ector of basin type still in summe, 2009)	Se hizo el análisis teórico de un destilador solar de meseta inclinada con un reflector externo de placa plana, de inclusión en un día de solsticio de invierno a 30° de latitud norte.	El rendimiento del destilado aumentó en 15% o 27%, mayor que con un reflector vertical cuando la longitud de los reflectores es la mitad o la misma longitud del destilador.
(Khalifa & Hamood, On the verification of the effect of water depth on the performance of basin type solar stills, 2009a)	Se desarrolló una ecuación de correlación a partir de todos los datos de profundidad de salmuera para predecir la influencia de la profundidad de salmuera en la productividad del destilador solar de tipo cuenca.	La productividad del destilador es influenciada por la profundidad de la salmuera hasta en un 48%.
(Vinoth Kumar & Kasturi Bai, 2009)	Se diseñó un destilador solar tipo cuenca de 0,5 m ² con técnica de condensación mejorada y se hizo un estudio de rendimiento.	La circulación del agua a través del tubo unido en las paredes de la superficie realizó la eficiencia del destilador.
(Jiang, Tian, Cui, & Liu, 2009)	Se diseñó y analizó el rendimiento de un sistema de destilación solar con calentamiento directo integrado con equipo de flash.	Los resultados experimentales están en buen acuerdo con el análisis teórico.
(Ahmed, Hrairi, & Ismail, 2009)	Se propuso un modelo matemático de un sistema de destilación solar de vacío multietapa y se realizó un análisis estructurado utilizando el software NASTLAN.	El análisis reveló que, a medida que aumenta la altura, la productividad disminuye.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Velmurugan, Kumar, Haq, & Srithar, 2009b)	Se fabricó un destilador solar escalonado con tanque de decantación de efluentes para desalinizar el efluente textil.	La productividad aumentó en un 98% cuando se usan estaño, esponja y guijarros en la cuenca.
(Kabeel, Performance of solar still with a concave wick evaporation surface, 2009)	Se fabricó y evaluó un destilador solar con superficie de meseta cóncava como área de evaporación y cuatro lados de un destilador en forma de pirámide como superficie de condensación.	La productividad media del destilado es de 4,11 l/m ² , y la eficiencia instantánea máxima es del 45%.
(Kumar & Umanand, 2009)	Se ha propuesto y validado un modelo detallado de gráficas de enlace para la unidad de desalación con integración perfecta de un flujo de potencia a través de dominios eléctricos, térmicos e hidráulicos.	El sistema se valida en estado estacionario mediante simulación y experimentación.
(Khalifa & Hamood, Effect of insulation thickness on the productivity of basin type solar stills: An experimental verification under local climate, 2009b)	Se analizó el efecto del aislamiento sobre la productividad de un destilador solar tipo cuenca, para espesores de 30, 60 y 100 mm.	El espesor del aislamiento influyó en la productividad del destilador más del 80%.
(Tiwari, Kumar, & Sodha, A review-cooling by water evaporation over roof, 1982)	Se han realizado intentos para obtener expresiones analíticas para la pérdida de calor por evaporación (modo de ciclo abierto) basadas en la velocidad de transferencia de masa desde una superficie mojada a la atmósfera en función de la humedad relativa.	Los resultados teóricos estuvieron en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Tiwari & Rao, Transient performance of a single basin solar still with water flowing over the glass cover, 1984)	Se estudió el rendimiento transitorio de un destilador solar de una sola cuenca con agua que fluye sobre la cubierta de vidrio.	Un flujo uniforme de agua sobre la cubierta de vidrio disminuyó la temperatura de la cubierta de vidrio y aumentó la productividad.
(Tiwari & Mohammed Salim, Double slope fibre reinforced plastic multi still, 1984)	Se diseñó un multidestilador de plástico reforzado con fibra, de doble pendiente, y se desarrollaron expresiones analíticas para temperaturas de agua y vidrio así como para la eficiencia térmica incorporando el diseño del sistema y los parámetros climáticos.	Los resultados teóricos estuvieron en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Prakash & Kavanthekar, 1986)	Se diseñó y analizó el rendimiento del destilador solar regenerativo.	La producción diaria de destilado fue de aproximadamente 7,5 l/m ² .
(Tiwari & Madhuri, Effect of water depth on daily yield of still, 1987)	Se ha estudiado el efecto de la profundidad del agua utilizando un análisis transitorio de un destilador solar.	La dependencia del rendimiento en la profundidad del agua fue una fuerte función de la temperatura de la salmuera en la cuenca y el rendimiento diario aumentó para una temperatura inicial de la salmuera $\leq 45^\circ \text{C}$ y disminuyó cuando la temperatura de la salmuera $\leq 40^\circ \text{C}$.
(Tiwari, Lawrence, & Gupta, Analytical study of multi-effect solar still, 1989a)	Se realizó el estudio analítico del destilador solar de tipo de meseta multiefecto, incorporando los efectos de la longitud del destilador, la velocidad del flujo de agua, la inclinación del absorbedor, etc.	El rendimiento aumentó con una velocidad de flujo disminuida para una longitud particular del destilador y el número óptimo de superficie de condensación fue 3.
(Tiwari, Gupta, & Lawrence, Transient analysis of solar still in the presence of dye, 1989b)	Análisis transitorio de un destilador solar en presencia de colorante en términos de atenuación del flujo solar con profundidad de agua en la cuenca.	Para mayor profundidad de agua y bajo coeficiente de absorción, la teoría dio resultados más precisos.
(Lawrence, Gupta, & Tiwari, Effect of heat capacity on the performance of solar still with water flow over the glass cover, 1990)	Se estudió el efecto del flujo de agua sobre la cubierta de vidrio de un destilador solar convencional pasivo.	La eficiencia aumentó con la velocidad 1,5 m/s de caudal de agua sobre la cubierta de vidrio.
(Lawrence & Tiwari, Theoretical evaluation of solar distillation under natural circulation with heat exchanger, 1990)	Las expresiones analíticas derivadas de Tiwari et al. (1982) se utilizaron para estudiar el efecto de la pérdida de calor por evaporación en el modo de funcionamiento en ciclo abierto del destilador.	Las expresiones fueron satisfechas.
(Tiwari & Singh, Thermal efficiency of Double Slope FRP solar distiller: An analytical and experimental studies, 1991a)	Se diseñó un destilador solar de doble pendiente y desarrollaron expresiones analíticas para la eficiencia térmica mediante la incorporación del flujo de agua uniforme en ambas vertientes.	La eficiencia térmica se incrementó significativamente para el menor flujo de agua debido a la acción capilar de la meseta.
(Tiwari & Singh, Thermal efficiency of evaporative heat loss for open and closed-cycle system, 1991b)	Se desarrollaron las expresiones analíticas para la eficiencia térmica de la pérdida de calor por evaporación en sistemas de ciclo abierto y cerrado en términos de diseño de sistemas y parámetros climáticos de un destilador solar de múltiples capas reforzado con fibra, de doble pendiente.	Los resultados numéricos obtenidos mediante expresiones analíticas estuvieron en concordancia con los resultados experimentales.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Tiwari & Thakur, An analytical expression for efficiency of solar still, 1991)	Se derivaron expresiones analíticas para la eficiencia de un destilador solar convencional.	La eficiencia aumentó para la disminución de la masa de agua, el aumento de la velocidad del viento y la insolación solar nominal cuando se fijaron otros valores de los parámetros.
(Yadav & Kumar, Transient analytical investigations on single basin solar still with water flow in the basin, 1991)	Se diseñó un destilador solar de la cuenca y expresiones derivadas para la temperatura del agua en la cuenca, la temperatura de la cubierta de cristal, la temperatura del trazador de líneas de la cuenca, la salida del destilado y la eficiencia.	La temperatura del agua de salida, la producción y la eficiencia del destilado aumentaron con la disminución del caudal másico, el aumento de la longitud del destilador, el aumento de la capacidad de absorción del revestimiento de la cuenca y el aumento de la temperatura inicial del agua.
(Tiwari, Sumegha, & Yadav, Effect of water depth on the transient performance of a double basin solar still, 1991)	Se desarrollaron expresiones analíticas para diversos componentes de temperatura del destilador solar de doble cuenca.	El rendimiento del destilado aumentó cuando la profundidad del agua era menor en la cuenca inferior y se redujo cuando la profundidad del agua era alta en la cuenca inferior.
(Yadav & Prasad, Parametric investigations on a basin type solar still, 1991)	Análisis de la influencia paramétrica en un destilador solar de tipo cuenca.	La eficiencia, la producción de destilado y la temperatura del agua aumentaron con el aumento de la temperatura inicial del agua, la absorción del revestimiento de la cuenca y disminuyó con el aumento de la masa de agua en la cuenca.
(Kumar, Anand, & Tiwari, Transient analysis of a double slope-double basin solar distiller, 1991)	Análisis transitorio del destilador solar de doble cuenca para predecir el rendimiento del destilador.	La eficiencia fue significativamente mayor que el destilador solar de una sola cuenca.
(Tiwari & Lawrence, New heat and mass transfer relations for a sol. still, 1991)	Se intentó predecir el coeficiente de transferencia de calor convectivo basado en las propiedades físicas del vapor de agua en el volumen de la cavidad.	El coeficiente de transferencia de calor convectivo depende de la temperatura del vapor de agua, la inclinación de la cubierta de vidrio y la separación entre la evaporación y la superficie de condensación.
(Mowla & Karimi, 1995)	Se desarrolló el modelo matemático para el destilador solar del tipo cuenca de área 1m ² con una cubierta invertida del vidrio en forma de V.	La productividad aumentó con la disminución de la profundidad del agua y los resultados teóricos estuvieron en buen acuerdo con los resultados experimentales.
(Adhikari, Kumar, & Sootha, 1995)	Se construyó un destilador solar multietapa de bandeja apilada.	La producción de destilado fue alta en comparación con los destiladores solares convencionales.
(Shawaqfeh & Mehdi Farid, 1995)	Se analizó un destilador solar de una sola cuenca con dimensiones de 0,98 x 0,98 m para predecir el calor y la transferencia de masa.	El modelo Dunkle (1961) para el calor y la transferencia de masa sobre la tasa de evaporación prevista fue de alrededor del 30%.
(Kumar, Sanjay, & Tiwari, 1996)	Estimación de la transferencia de masa convectiva para destiladores solares activos y pasivos con superficie de 1 m ² .	A partir de cualquier valor estándar de C y n en $Nu = C (Gr Pr)^n$, el rendimiento del destilador solar no puede evaluarse teóricamente a menos que se valide experimentalmente.
(Yaghoubi & Sabzevari, 1996)	Método empírico para el cálculo de la producción horaria a lo largo de un ciclo de 24 horas mediante la introducción de la nueva variable, el tiempo de servicio.	El rendimiento mejoró con la adición de agua de compensación a la cuenca para el tiempo de servicio periódico.
(Aggarwal & Tiwari, Convective mass transfer in a double-condensing chamber and a conventional solar still, 1998)	Se ha intentado descubrir C y n en $Nu = C (Gr Pr)^n$ por regresión lineal para diferentes rangos de temperatura de cámara de doble condensación (DCS) y destilador solar convencional de una sola pendiente (CSS).	El orden de C y n fue el mismo que el propuesto por Dunkle (1961) para los rangos de funcionamiento bajos y estos cambios de valores para la temperatura de funcionamiento distintos de Dunkle (1961).
(Suneja & Tiwari, Effect of water flow on internal heat transfer solar distillation, 1999)	Expresiones analíticas de los coeficientes internos de transferencia de calor del absorbedor invertido y análisis del efecto del flujo de agua sobre la cubierta de vidrio.	Para una tasa de flujo particular, los coeficientes de transferencia de calor por evaporación disminuyeron con el aumento de la profundidad del agua en la cuenca.
(Sanjeev & Tiwari, 1999)	El método de Runge-Kutta se utilizó para resolver ecuaciones diferenciales acopladas de un orden para el sistema de destilación solar activa multiefecto para evaluar el rendimiento diario.	El rendimiento máximo se obtuvo en diferentes áreas de colectores para un número diferente de efectos para un área de cuenca dada.
(Aggarwal & Tiwari, Thermal modeling of a double condensing chamber solar still: an experimental validation, 1999)	Se desarrolló un modelo térmico de una cámara de condensación doble (DCS) y se realizaron observaciones experimentales tanto para el destilador solar convencional de una sola pendiente (CSS) como para el DCS para comparar su rendimiento.	El rendimiento de los destilados fue alto para DCS y hubo concordancia entre las observaciones teóricas y experimentales.
(Tiwari, Singh, & Tripathi, Present status of solar distillation, 2003)	Se revisó brevemente la destilación solar y su estado, las fuentes de agua, la demanda y disponibilidad de agua.	Se dieron las recomendaciones, económicas de un destilador solar de una y doble pendiente, de fibra de plástico reforzado sobre la base del rendimiento, a largo plazo para el futuro.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Tripathi & Tiwari, Effect of size and material of a semi-cylindrical condensing cover on heat and mass transfer for distillation, 2004)	Se utilizaron cubiertas de condensación con dimensiones características de 0,14 cm y 0,07 cm de aluminio y cobre para estudiar los coeficientes de transferencia de calor convectivo y evaporativo.	Se encontró que hubo un aumento de 15% y 7,5% en los coeficientes de transferencia de calor por evaporación debido al cambio en el tamaño y el material de la cubierta de condensación.
(Tripathi & Tiwari, Effect of water depth on internal hat and mass transfer for active solar distillation, 2005)	Se estudió el efecto de la profundidad del agua (0.05, 0.1 y 0.15 m) para el sistema de destilación solar pasivo y activo.	Mayor rendimiento obtenido durante las horas de sol en comparación con el día para una mayor profundidad de agua en el destilador solar (0,10 y 0,15 m) debido al efecto de almacenamiento.
(Janarthanan, Chandrasekaran, & Kumar, Exaporative heat loss and heat transfer for open and closed-cycle system of a fl oating titled with solar still, 2005)	Se intentó derivar las expresiones analíticas para la eficiencia térmica de la pérdida de calor por evaporación y la transferencia de calor para sistemas de ciclo abierto y cerrado de destilador solar flotante con inclinación, de meseta inclinada en términos de diseño del sistema y parámetros climáticos.	Se han utilizado expresiones analíticas derivadas para optimizar el diseño del destilador para el enfriamiento evaporativo (ciclo abierto) y la unidad de destilación (ciclo cerrado) para instalaciones a gran escala.
(Badran A. , Performance of cool towers under various climates in Jordan, 2003)	Se construyó un destilador solar de goteo invertido y se estudió el rendimiento.	El destilador mostró un aumento del 18% de la producción y un 13% de la reducción de la salinidad del agua de alimentación de entrada.
(Radhwan, 2004)	Destilador solar escalonado construido para calefacción y humidificación de invernaderos agrícolas (GH).	La eficiencia media diaria se encuentra en el 63% y el rendimiento diario total es de aproximadamente 4,92 l/m ² , de los cuales 0,81 l/m ² y el resto 4,11 l/m ² entra en la GH como humedad transportada por el aire circulante. La disminución del caudal de aire tiene una influencia insignificante en la productividad del sistema.
(Ahmed, Ofri, & Nasrallah, 2005)	Simulación numérica de los flujos de convección natural en una cavidad triangular sometida a un flujo de calor uniforme usando el método de los Elementos Finitos de Volumen de Control.	El estudio ha demostrado que la estructura del flujo y la transferencia de calor son sensibles a la forma de la cavidad y al número de Rayleigh.
(Tanaka & Nakatake, Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors, 2006)	Se fabrica un destilador solar de tipo cuenca con reflectores internos y externos y se realiza un análisis numérico del calor y transferencia de masa en el destilador.	Los reflectores internos y externos aumentaron notablemente la productividad del destilado a lo largo del año y el aumento de las cantidades diarias de destilado se determinó que promedió un 48%.
(Voropoulos, Mathioulakis, & Belessiotis, Solar still coupled with solar collectors and storage tank-analytical simulation and experimental validation of energy behavior, 2003)	Un destilador solar convencional tipo invernadero acoplado con tanque de almacenamiento de agua caliente calentado por un colector solar es investigado con un modelo matemático eficiente y evaluado experimentalmente.	El resultado de la investigación ha mostrado el modelo como una herramienta valiosa para el diseño de sistemas similares de destilación solar para su optimización.
(Mamlook & Badran, 2007)	Se investigó el efecto de diferentes parámetros en la salida del destilador solar empleando la técnica del conjunto difuso.	La implementación del conjunto difuso ha revelado el hecho de que el rendimiento se ve afectado por la velocidad del viento, la temperatura ambiente, la intensidad solar, los rociadores, la concentración de sal y la profundidad del agua.
(Ben Bacha, Damak, Bouzguenda, & Malaej, 2003)	Se realizó la simulación y validación experimental del módulo de destilación basado en el Ciclo Solar de Evaporación por Condensación Múltiple (SMCEC).	El modelo de simulación desarrollado puede ser usado para diseñar y probar el comportamiento de este tipo de unidad de desalación.
(Matioulakis & Belessiotis, 2003)	Se realizaron intentos para investigar la optimización del uso de un destilador solar simple mediante su incorporación en un entorno multi-fuente y multiuso.	El modelado ha dado la capacidad de estimar el rendimiento esperado del sistema en función de las condiciones climáticas, permitiendo la elección de las soluciones de diseño adecuadas en relación con el uso deseado.
(Tanaka & Nakatake, Numerical analysis of the vertical multiple effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector: optimum reflector angle and optimum orientation of the still at various seasons and locations, 2007)	El análisis numérico del destilador solar de difusión vertical de efecto múltiple acoplado con un reflector de placa plana se determina asumiendo que el destilador está situado en el ecuador y a 10 °, 20 °, 30 ° y 40 ° de latitud norte.	Se ha encontrado que el ángulo del reflector de la lámina debe ser fijo a 10 ° desde la horizontal y cambiado a 0 ° durante la estación de invierno a latitudes más altas y la orientación del destilador debe ser ajustada de acuerdo con el mes a cualquier latitud. La productividad diaria del destilador propuesto se encuentra en más de 30 kg/m ² en cualquier latitud, excepto en la temporada de invierno a 40 ° N de latitud.
(Tanaka & Nakatake, Numerical analysis of the vertical multiple effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector: optimum reflector angle and optimum orientation of the still at various seasons and locations, 2007)	Se analiza teóricamente un destilador solar de tipo cuenca con un reflector interno (dos lados y paredes traseras) y un reflector plano inclinado en un día de solsticio de invierno a 30 ° de latitud N para determinar la efectividad de la inclinación del reflector externo.	La cantidad diaria de destilado del destilador con el reflector externo inclinado es 16% mayor que la que tiene el reflector externo vertical.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Tsilingiris, The influence of binary mixture thermophysical properties in the analysis of heat and mass transfer processes in solar distillation systems, 2007)	Se ha intentado indicar el efecto de las propiedades termofísicas de la mezcla binaria en los procesos de transporte y las cantidades asociadas y evaluar las propiedades termofísicas del medio de trabajo en los sistemas de destilación.	La investigación revela que el uso de aire seco inadecuado conduce a una sobrestimación significativa del coeficiente convectivo de transferencia de calor y, por lo tanto, una sobreestimación moderada de la producción de destilado, que se estima hasta un 10%.
(Kazuo, Tobata, & Shigeki Toyama, 2006)	Se construye y evalúa, experimental y numéricamente un destilador solar tipo tubo que integra un destilador convencional y una red de distribución de agua adecuada al concepto de plantación del desierto.	El resultado simulado ha demostrado que el rendimiento no es necesario para el aislamiento de un destilador y es posible montar la parte inferior del destilador bajo el suelo.
(Tiwari & Tiwari, 2007)	Se ha intentado encontrar el rendimiento estacional de un destilador solar pasivo de pendiente única, de inclinación de cubierta de 30 ° para diferentes profundidades de agua experimentalmente y también se ha intentado modelar térmicamente.	El resultado obtenido está de acuerdo con los resultados obtenidos por investigadores anteriores.
(El-Sebail, Thermal performance of a triple-basin solar still, 2005)	Se ha intentado escribir un modelo matemático transitorio para un destilador solar de triple cuenca.	En días de verano típicos, la productividad total diaria es de 12,635 kg/m ² d, lo cual es de acuerdo con los resultados reportados para el destilador solar de triple efecto.
(Samee, Mirza, Majeed, & Ahamed, 2007)	Se construyó un destilador solar de base única y se analizó el rendimiento en la ubicación de latitud 33.3 ° N.	Se encontró que la inclinación óptima de la cubierta de vidrio era de 33,3 ° N tanto para el verano como para el invierno. Los valores de sales totales disueltas (TDS) y valor de pH concordaron con las directrices de la OMS para la calidad del agua potable.
(Tsilingiris, Analysis of the and heat and mass transfer processes in solar stills-The validation of a model, 2008)	Se han realizado intentos para encontrar la constante numérica en la correlación de Nusselt-Rayleigh para la evaluación del coeficiente de transferencia de calor convectivo para una mayor temperatura de operación.	La constante numérica es menor que 0,05 y también las propiedades termofísicas, la presión de vapor de saturación en la salmuera y la placa de condensación y el efecto de las propiedades de transporte influyen al coeficiente de transferencia de calor convectivo para una mayor temperatura de funcionamiento.
(Tochia-Nunez, Porta-Gandara, & Cervantes-de Gortari, 2008)	Se ha probado el análisis exergético teórico transitorio en estado estacionario de un destilador solar pasivo y se han encontrado los factores que se centran en la destrucción de exergía en el destilador.	La temperatura ambiente no es un parámetro influyente para la eficiencia de exergía y el espesor de aislamiento debe ser superior a 0,02 m para obtener una mayor eficiencia de exergía. Se obtiene un mejor comportamiento termodinámico cuando se reducen las diferencias de temperatura.
(Tanaka & Nakatake, Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter, 2009)	Se ha probado el análisis teórico de un destilador solar de meseta inclinada con un reflector externo de placa inclinada.	Se encontró que la producción de destilado fue 15% o 27% mayor que la del destilador con reflector vertical.
(Madhlopa & Johnstone, Model for computation of solar fraction in a single-slope solar still, 2009)	Se ha derivado un nuevo modelo para calcular la distribución de la radiación solar dentro de un destilador solar de una sola pendiente al dividir la fracción solar en una superficie vertical en haz y en partes difusas.	Se encontró que la fracción solar del rayo fue afectada tanto por la geometría del destilador solar como por la posición del sol en el cielo donde la fracción difusa depende de la geometría del destilador solar.
(Tanaka & Nakatake, One step azimuth tracking tilted-wick solar still with a vertical flat plate reflector, 2009a)	Se realizó el análisis teórico de un destilador solar de un paso con seguimiento de azimut con un reflector vertical de placa plana para determinar el ángulo de inclinación óptimo del destilador y la orientación óptima del destilador en cuatro días típicos a 30 ° de latitud N.	El destilador se hizo girar una vez al día al sur del sol y el ángulo de inclinación adecuado proporcionó la cantidad diaria de 40%, 57%, 40% y 27% mayor que la del destilador de meseta inclinada convencional en el equinoccio de primavera y otoño, en el solsticio de verano e invierno respectivamente.
(Kumar, y otros, 2012)	Destilador de cuenca con tapa superior hemisférica. Variando el flujo de agua sobre la cubierta, temperaturas del agua, cubierta, aire y ambiente e incidencia de radiación solar.	Aumento de la producción de destilados con un aumento de la eficiencia del 34% al 42% por sobreenfriamiento.
(Tayeb, 1992)	Destilador de cuenca con cuatro cubiertas de vidrio, con diferentes cubiertas, temperaturas de cuenca, cubierta y ambiente e intensidad solar.	En días de sol, la productividad fue de aproximadamente 1,25 kg/m ² d, 1,1 kg/m ² d, 1,2 kg/m ² d y 0,83 kg/m ² d para el destilador con cubierta de vidrio plana inclinada, semi-esferoidal.
(Tanaka H. , Experimental study of abasin type solar still with internal and external reflectors in winter, 2009)	Destilador de la cuenca con reflectores internos y externos con variación en radiación solar global, radiación directa y difusa sobre superficie horizontal y temperatura.	Incremento en la productividad diaria en un 70-100% en días de invierno usando reflectores.
(El-Bahi & Inan, A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser, 1999)	Destilador de cuenca conectado a condensador exterior pasivo.	Productividad del destilado de aproximadamente 7 kg/m ² d, y la eficiencia fue de aproximadamente 75% de Junio a Agosto.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Srivastava Pankaj & Agrawal, 2013)	Destilador de cuenca de una sola pendiente con múltiples amortiguadores flotantes por inercia térmica y refuerzo de reflector doble.	Un aumento del 68% y del 35% en el rendimiento del destilado en días claros y nublados. Con el refuerzo se observó un aumento del rendimiento del 79%.
(Tabrizi, Mohammad, & Hamid, 2010)	Destilador solar en cascada de tipo presa con PCM como medio de almacenamiento.	En días soleados típicos, ambos destiladores con y sin medio de almacenamiento PCM tienen la misma productividad. En días nublados, el destilador con almacenamiento tiene más productividad.
(Ahsan A. , Imteaz , Rahman , Yusuf, & Fukuhara, 2012)	Destilador tubular con la cubierta de película de cloruro de vinilo.	El destilador mejorado con película de polietileno fue duradero, económico, ligero y fácilmente moldeado a diferentes tamaños. Se observó una relación lineal entre el calor total y los coeficientes de transferencia de masa.
(Eze & Ojike, 2012)	Destilador rectangular y de forma piramidal del mismo tamaño y material.	El destilador rectangular tiene alta temperatura del agua y temperatura baja del vidrio con la eficiencia del 36% comparada al destilador de la pirámide con la temperatura baja del agua y la temperatura alta del vidrio de la eficiencia del 28.9%.
(Badran, Al-Hallaq, Eyal Salman, & Odat, 2005)	Destilador de doble pendiente conectado al colector de placas planas.	Destilador acoplado con un colector de placa plana produjo un rendimiento de destilado de 2,3 kg/m ² d de rendimiento del 22,26% en comparación con 1,5 kg/m ² d con un rendimiento del 28,56% para un destilador sin acoplamiento.
(Voropoulos, Mathioulakis, & Belessiotis, Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors, 2001)	Destilador de doble pendiente acoplado al campo colector solar.	La productividad diaria del destilador híbrido fue el doble que la del destilador pasivo y especialmente a las noches, se encontró que era triple.
(Kargar Sharif , Ghiasi, Jahangiri Mamouri, & Shafii, 2013)	Destilador de una sola pendiente acoplado a un tubo de calor pulsante.	El PHP es un dispositivo de conducción térmica de alto rendimiento que eleva la temperatura del agua de la cuenca muy rápidamente. Los resultados muestran una productividad máxima por hora de hasta 875 ml/m ² para una profundidad de agua de la cuenca óptima del 40% y la relación de llenado de PHP de 1cm.
(Abdel-Rehim & Lasheen, 2007)	Destilador de una sola pendiente acoplado a un canal parabólico.	La productividad de agua dulce ha aumentado un 18% en comparación con el destilador pasivo.
(Kumar & Tiwari, 2008)	Destilador híbrido solar activo PV/T.	La productividad fue 3,5 veces más que el destilador solar pasivo. Para una profundidad de agua de 0.05m, los coeficientes son 0,78 y 2,41 W/m ² K para los destiladores pasivos y activos respectivamente.
(El-Sebail, Ramadan, Aboul-Enein, & Salem, 2008)	Destilador inclinado simple acoplado a estanque solar profundo.	Los valores óptimos del espesor del agua y del caudal másico son respectivamente 0,03 m y 0,0009 kg/s. También se encontró que la productividad y eficiencia diaria del destilador era 52,36% y 43,80% mayor que la del destilador sin SSP, respectivamente.
(Eltawil & Zhengming, 2009)	Destilador de una sola pendiente integrado con turbina eólica y destilador inclinado.	La productividad disminuyó con el aumento de la profundidad del agua a caudales fijos. El sistema inclinado es más productivo en comparación con el destilador principal. La eficiencia promedio diaria del destilador principal y el sistema inclinado para la operación sur debido fue de 67,21 a 69,59% y 57,77 a 62,01%, mientras que para la operación de seguimiento solar, fue de 66,81 a 69,01 y 57,08 a 62,38%, respectivamente.
(Taamneh & Taamneh, 2012)	Destilador solar en forma de pirámide con y sin ventilador.	Hubo un aumento del 25% en la productividad diaria de los destiladores en comparación con el destilador convencional y es una manera rentable de usar ventilador accionado por energía solar para mejorar la tasa de evaporación.
(Ahmed & Alfaylakawi, 2012)	Destilador de una sola pendiente con aspersores de agua y ventilador de enfriamiento.	La productividad se incrementó en un 8% y un 15,5% al aumentar la velocidad media del viento de 1,2 m/s a 3 m/s y 4,5 m/s, respectivamente. También mediante el uso de rociadores de agua a intervalos preestablecidos de 20 minutos y 10 minutos, la productividad se incrementó en 15,7% y 31,8%, respectivamente.
(Rajaseenivasan, Elango, & Murugavel, Comparative study of double basin and single basin solar still, 2013)	Estudio de destilador de cuenca simple y doble cuenca, experimentando con diferentes profundidades de agua, materiales de meseta, materiales de almacenamiento de energía y materiales porosos.	Los resultados muestran que en la cuenca inferior del destilador con materiales de almacenamiento de energía, la productividad fue 169,2% mayor que la del destilador convencional.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Madhlopa & Johnstone, Numerical study of a passive solar still with separate condenser, 2009)	Destilador multi-cuenca de una sola pendiente con condensador separado.	La purga es significativa en la transferencia de vapor desde la evaporación a la cámara del condensador, para este destilador se encuentra un incremento de la productividad global del 62% en comparación con el destilador convencional. En el rendimiento total del destilado, 60, 22 y 18% contribuyen al 1er, 2do y 3er efectos respectivamente.
(Singh & Tiwari, 1992)	Destilador de doble efecto tipo meseta múltiple.	La eficiencia térmica de los destiladores el primer efecto es más que la del segundo efecto. Con el aumento del caudal másico, el rendimiento térmico global del destilador disminuye.
(Tanaka & Nakatake, A simple and highly productive solar still: a vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat-plate mirror, 2005)	Destilador de difusión de efecto múltiple acoplado con un reflector.	La productividad del destilado fue de 29,2 kg/m ² d y 34,5 kg/m ² d, respectivamente en días soleados para equinoccio de primavera y solsticio de invierno para el destilador con 10 compartimentos y 10 mm de espacio entre ellos. Para un destilador con seis particiones con intervalos de difusión de 5 mm entre ellos, la productividad máxima fue de 13,4 kg/m ² d.
(Yeh H. , 1993)	Destilador de doble efecto de tipo ascendente.	La productividad se incrementa con las tasas de flujo de aire con aislamiento bajo. Por otro lado, para los altos niveles de aislamiento de alrededor de 419 kcal/m ² h, la productividad se puede mejorar si los caudales de aire están limitados a menos de 15 kg/m h.
(Yadav Y. , Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector, 1989)	Destilador de efecto doble de una sola pendiente acoplado a un colector de placas planas.	El destilador activo tiene un mejor rendimiento que el pasivo, mientras que el sistema con circulación forzada es más productivo que el destilador con efecto termosifón.
(Tanaka, Nakatake, & Tanaka, Indoor experiments of the vertical multiple effect diffusion type solar still coupled with a heat pipe solar collector, 2005)	Destilador de difusión múltiple tipo efecto vertical acoplado con colector de tubo de calor.	Las mesetas sobre placas de separación conducen a múltiples evaporaciones y fenómenos de condensación. Mediante la incorporación de un colector de tubería de calor, la energía térmica se transporta mejor al destilador, dando lugar a una tasa de producción de destilado de aproximadamente el 93%.
(Bhagwan & Tiwari, 1996)	Destilador de efecto doble de una pendiente, acoplado a un colector de CPC.	Teniendo en cuenta los supuestos, encontraron que el sistema da un mejor rendimiento en comparación con el destilador de una sola etapa debido a la recuperación de calor latente. Con el aumento del caudal de agua en la cuenca de la segunda etapa, la producción de destilado de la primera etapa aumenta debido a la disminución de su temperatura de cubierta de condensación.
(Reddy, Ravi Kumar, O'Donovan, & Mallick, 2012) (Reddy, Ravi Kumar, Vishwanath Kumar, Mallick, & O'Donovan, 2010) (Vishwanath Kumar, Kumar Kaviti, Prakash, & Reddy, 2012)	Destilador de vacío multietapa acoplado con colectores planos.	Modelado en MATLAB 7.7., para obtener el mejor rendimiento durante todo el año, se encontró que la configuración del sistema era de cuatro etapas con una separación de 100 mm entre ellas suministradas con un caudal másico de 55 kg/m ² d conectado a colectores de placas planas en paralelo. El rendimiento máximo se encuentra en marzo a una presión de trabajo de 0,03 bar.
(Abdel Dayem, 2006)	Sistema de destilación por condensación- evaporación de múltiples efectos.	Modelado en TRNSYS15. Hay un rendimiento de destilado continuo del sistema. El rendimiento máximo se obtiene para una temperatura media de colector de 50° C y un área óptima de colector de 6 m ² . La unidad de destilación de efectos múltiples produce 24 l/día de agua destilada.
(Suneja, Tiwari, & Rai, Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system, 1997)	Destilador de doble cuenca de doble cuenca con absorbedor invertido.	El aumento porcentual en el rendimiento del destilado es 10% aumentando la temperatura inicial del agua de la cuenca de 22 ° C a 35 ° C, respectivamente. Un aumento del 99% en la productividad con la absorción de la placa absorbente a elevarse de 0,55 a 0,95.
(Minasian & AL-Karaghoul, 1995)	Destilador solar de meseta simple. Comparativo	Un destilador solar meseta-cuenca es simple, eficiente y económico en comparación con otros tipos de destilador.
(Aybar, Egelioglu, & Atikol, An experimental study on an inclined solar water distillation system, 2005)	Destilador solar de meseta simple.	El uso de la meseta aumenta el rendimiento del destilado por dos o tres veces de la placa desnuda.
(Helmy, El-Gayar, & Hisham, 2011)	Eficiencia en destilador solar de meseta simple.	En el período de 30 s y fuera del período de 25 min se sospecha como la mejor combinación para la máxima eficiencia térmica.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Hansen, Narayanan, & Murugavel, 2015)	Material de absorción en destilador de meseta simple.	Se obtuvo lana de coral de agua como material de meseta más adecuado para una mayor productividad. Se registró una producción máxima de 4,28 l/día cuando se utilizó coral de agua con placa de absorción escalonada con malla de presa.
(Sodha, Kumar, Tiwari, & Tyagi, Simple multiple wick solar still: analysis and performance, 1981)	Destilador solar de meseta múltiple con variación en temperatura ambiente, insolación solar, temperatura de la cubierta de vidrio, temperatura del agua, velocidad del viento.	El rendimiento obtenido fue 2,51 l/m ² d y una eficiencia de alrededor del 34% durante el día soleado.
(Kumar & Anand, Modelling and performance of a tubular multiwick solar still, 1992)	Eficiencia en destilador solar de meseta múltiple.	El destilador solar de meseta múltiple tabular produjo 3 l/m ² d y una eficiencia 13% mayor que el destilador de mecha múltiple convencional y un 8% mayor que el destilador solar tabular simple.
(Janarthanan, Chandrasekaran, & Kumar, Performance of floating cum tilted-wick type solar still with the effect of water flowing over the glass cover, 2006)	Destilador solar de meseta inclinada.	La producción de destilado aumenta significativamente al enfriar la cubierta durante las horas pico de sol, también se encontró un flujo de agua de 1,5 m/s óptimo, ya que más allá de esta eficiencia disminuye.
(Tanaka & Nakatake, Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector, 2007)	Destilador solar de meseta inclinada con reflector externo.	La integración del reflector externo en el destilador aumenta la cantidad de destilado diario en un 9%.
(Tanaka H. , Tilted wick solar still with flat plate bottom reflector, 2011)	Destilador solar de meseta inclinada con reflector inferior.	Se registró un aumento del 13% en el rendimiento promedio del destilado durante cuatro días de experimento (equinoccios de primavera y de otoño, solsticios de verano e invierno) utilizando un reflector inferior inclinado a 35 °.
(Rajaseenivasan & Murugavel, Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. , 2013)	Destilador solar inclinado multiefecto.	El destilador solar de la cuenca doble produjo 85% más destilado en comparación con el de una sola cuenca.
(Kudret, 1964)	Rendimiento y costo de destilador solar inclinado multiefecto.	El rendimiento del destilador multiefecto es mejor que el destilador solar tipo techo, pero su costo inicial de construcción es alto.
(Tiwari & GAM, Double slope fiber reinforced plastic (FRP) multiwick solar still, 1984)	Destilador solar tipo meseta de múltiple efecto con fabricación en FRP.	El destilador solar de doble efecto fabricado en FRP resultó ser más económico y eficiente.
(Moses Koilraj, Palanisamy Senthil, Gopal, & Joseph Ebenezer, 2011)	Destilador solar de cuenca simple con vacío modificado.	El vacío incrementó la producción a 8 l/m ² d, además se observó que a menor profundidad de masa de agua y menor cantidad de concentración de sal, la productividad mejora.
(Yeh H. , 1993)	Estudio de destilador solar tipo meseta de doble efecto.	El destilador de doble efecto de tipo ascendente tiene mayor productividad que el tipo cerrado a baja insolación.
(Moustafa M. E., 1986)	Destilador de difusión multiefecto.	Al aumentar el número de efectos y la magnitud del flujo de radiación solar y al disminuir el espacio de difusión y la velocidad de alimentación, aumenta la eficiencia del destilador.
(Rajan, Raja, & Marimuthu, 2014)	Destilador de múltiple efecto con fuente de calor externa.	La integración de la fuente de calor de biomasa (que contiene un cierto material sensible del almacenaje del calor) aumenta la salida en 73%.
(Awad & El-Agouz, 2013)	Destilador solar escalonado para calefacción y humidificación de invernaderos con PCM.	No se informó aumento significativo en la eficiencia, ya que el destilador con LHTESS dio una eficiencia del 57% con un rendimiento diario de 4,6 l/m ² frente al 61% sin LHTESS.
(Velmurugan, Senthil, Niranjan, & Srithar, 2008)	Productividad en destilador solar escalonado con aletas y esponjas.	La productividad del destilado fue de 76%, 60,3% y 96% cuando se utilizaron aletas, esponjas y combinación de ambos.
(Velmurugan, Naveen Kumar, Noorul Haq, & Srithar, 2009)	Productividad en destilador solar escalonado con aletas y esponjas y guijarros.	La combinación de aletas, esponjas y guijarros aumenta la productividad en un 98%.
(Velmurugan, y otros, 2009a)	Destilador solar escalonado con mini estanque solar, aletas y esponjas acoplado a un destilador solar de una cuenca.	El estanque solar, el destilador solar escalonado y el destilador de cuenca conectados en serie dieron una productividad máxima del 80% cuando se utilizaron aletas y esponjas en ambos destiladores.

Referencia	Estudio, desarrollo o innovación	Resultado
(Velmurugan, Srithar, Mandlin, & Stalin, 2009)	Destilador solar escalonado con mini estanque solar, aletas, esponjas y guijarros.	100% de mejora en la productividad se informó cuando las aletas, esponjas y guijarros se utilizaron en el destilador solar escalonado integrado con mini estanque solar.
(Omara, Kabeel, & Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors, 2013)	Destilador solar escalonado con reflector interno.	Con reflector interno la productividad del destilador aumenta en un 76%.
(Headley, 1973)	Destilador solar escalonado con reflector interno y externo	Cuando se usa reflector interno y externo, la productividad del destilador eleva hasta un 125%.
(El-Samadony, Abdullah, & Omara, Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser, 2015)	Destilador solar escalonado con reflector, acoplado a un condensador.	El destilador acoplado por condensador produce un 66% más de producción.
(Abdullah, 2013)	Destilador solar escalonado con cubierta de refrigeración de vidrio acoplado con calentador solar de aire.	El sistema acoplado con calentador de aire solar y cubierta de vidrio mejora la productividad del agua en un 112% frente al destilador convencional.
(El-Samadony & Kabeel, 2014)	Rendimiento de un destilador solar escalonado con cubierta de refrigeración de vidrio.	Se obtuvo un aumento del 8,2% en rendimiento diario a $2,5 \times 10^{-4}$ a $5,5 \times 10^{-4}$ m de espesor de película y 4×10^{-5} a $8,5 \times 10^{-5}$ m ³ /s de caudal de agua.
(Ziabari, Sharak, Moghadam, & Tabrizi, 2013)	Destilador solar tipo presa en cascada.	El agua dulce promedio obtenida aproximadamente 6.7 l/m ² d, a un 26% más de eficiencia que el destilador convencional.
(Mohammad & Tabrizi, 2011)	Destilador solar en cascada con almacenamiento de calor latente de energía (LHTESS).	El destilador con PCM produjo un 31% más de destilado en comparación con el destilador sin PCM.
(Sathyamurthy R. , y otros, 2014)	Efecto del material de cambio de fase en el destilador solar de pirámide triangular.	Hay un aumento de aproximadamente el 35% en la producción de agua dulce con LHTESS que la del destilador solar sin LHTESS. Se encontró que el destilador solar con y sin LHTESS era de 5,5 l/m ² d y 3,5 l/m ² d.