



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS**

---

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**OPTIMIZACIÓN UN SISTEMA DE DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA  
BASADO EN HUMIDIFICACIÓN-DEHUMIDIFICACIÓN DE AIRE  
MEDIANTE SIMULACIÓN DINÁMICA EN TRNSYS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. INGACIO RAMIRO MARTIN DOMÍNGUEZ**

**CHIHUAHUA, CHIH.**

**2011**

# CONTENIDO

CONTENIDO.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
ÍNDICE DE TABLAS .....	5
RESUMEN .....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Nacimiento de los Destiladores Solares .....	11
1.2 Desalinización solar de agua .....	13
1.3 Desalinización en México .....	14
1.4 Desalinización Solar de Agua por Evaporación y Condensación .	16
1.4.1 Destiladores solares tipo caseta.....	17
1.4.2 Destilación por humidificación-deshumidificación de aire .....	20
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
3. JUSTIFICACIÓN .....	25
4. HIPÓTESIS.....	26
5. OBJETIVO .....	27
5.1 Objetivos Específicos .....	27
6. SIMULACIÓN DE SISTEMAS TÉRMICOS SOLARES EN ESTADO TRANSITORIO POR MEDIO DE TRNSYS.....	28
7. METODOLOGÍA.....	30
7.1 Descripción del Sistema Original .....	30
7.2 Modelación del sistema en TRNSYS.....	32
7.2.1 Colectores solares .....	32
7.2.2 Tanque de almacenamiento térmico: .....	32
7.2.3 Intercambiadores de calor .....	32
7.2.4 Evaporador.....	33
7.2.5 Condensador .....	34
7.3 Simulación en TRNSYS .....	35
7.4 Comportamiento del sistema original .....	36
7.4.1 Comportamiento en un día típico .....	36
7.4.2 Efecto sobre la producción de destilado.....	39
7.5 Limitaciones del sistema propuesto originalmente .....	41

7.6	Modificación al diseño original .....	41
7.6.1	Colector solar de tubos evacuados .....	41
7.6.2	Sistema de Control de flujo .....	43
7.7	Análisis Paramétrico .....	45
7.7.1	Tabla paramétrica en TRNYS .....	48
8.	RESULTADOS .....	49
8.1	Comportamiento Horario .....	49
8.1.1	Comportamiento anual .....	49
8.2	Temperatura ambiente y Radiación solar .....	52
8.3	Temperaturas de aceite y agua en los intercambiadores de calor 53	
8.4	Producción de destilado.....	56
8.5	Análisis paramétrico .....	57
9.	CONCLUSIONES .....	65
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	ANEXOS .....	70

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ciclo hidrológico del agua.....	13
Figura 1-2 Destilador solar tipo caseta [Escobedo Bretado 2010].....	17
Figura 1-3 Escala económica relativa para diferentes tecnologías de desalinización [Thomas, 1997]. .....	19
Figura 1-4 Sistema de desalinización por humidificación-dehumidificación de aire [Said Al-Hallajet al.1998].....	20
Figura 7-1 Sistema de destilación propuesto. ....	31
Figura 7-2 Diseño del evaporador .....	34
Figura 7-3 Diseño del condensador a base de tubos de calor.....	35
Figura 7-4 Temperatura de aceite en los colectores y radiación solar en un día de operación.....	38
Figura 7-5 Temperaturas de los flujos del sistema en un día de operación.....	38
Figura 7-6 Comportamiento de las temperaturas de agua y aceite a lo largo de varios días .....	39
Figura 7-7 Curva de condensación y evaporación instantáneas de agua, en un día de operación. ....	40
Figura 7-8 Temperatura del agua que entra al evaporador y producción instantánea de agua [Escobedo Bretado 2010]. ....	40
Figura 7-9 Estructura del tubo de calor en el colector. ....	42
Figura 7-10 Curva de eficiencia relativa del colector de tubos de vacío.42	
Figura 7-11 Método de la secante utilizado en el control. ....	44
Figura 7-12 Comportamiento óptimo de las temperaturas de agua y aceite. ....	45
Figura 7-13 Tabla paramétrica en TRNEdit. ....	48
Figura 8-1 Pantalla en TRNSYS del comportamiento de temperaturas a lo largo del año con una inclinación del colector de 43°. ....	50
Figura 8-2 Pantalla en TRNSYS del comportamiento de temperaturas a lo largo del año sin inclinación del colector. ....	50
Figura 8-3 Temperatura ambiente y radiación solar los días 1, 2 y 3 de Mayo. ....	52
Figura 8-4. Radiación solar y temperatura del aceite en los colectores.53	
Figura 8-5 Temperaturas de aceite y agua en el intercambiador de calor en todo un año de operación. ....	54
Figura 8-6 Temperaturas de aceite y agua en el intercambiador de calor para el 1, 2 y 3 de mayo.....	55
Figura 8-7 Temperatura y flujo de alimentación de agua al sistema. ...	56
Figura 8-8 Producción de destilado .....	57
Figura 8-9 Producción anual de destilado .....	58
Figura 8-10 Producción anual de destilado por metro cuadrado de colector solar utilizado. ....	59

Figura 8-11 Producción anual de destilado por cantidad de agua suministrada al sistema. ....	61
Figura 8-12 Producción de destilado a diferente número de colectores solares, termo-tanques y flujos de gua. ....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Plantas desalinizadoras en México [Fuentes, 2002].....	14
Tabla 1-2. Plantas desalinizadoras por proceso y por estado [Fuentes, 2002].....	15
Tabla 1-3 Valoración de las diferentes alternativas comerciales de desalinización (Fuentes, 2002). ....	16
Tabla 7-1 Tabla paramétrica tomada para la simulación .....	46
Tabla 7-2 Variables del sistema de destilación.....	47
Tabla 8-1 Relación horas-mes-año.....	51
Tabla 8-2 Relación de parámetros adecuados para sistemas de destilación óptimos. ....	64

## RESUMEN

Se presenta la modelación, simulación en TRNSYS y análisis paramétrico del funcionamiento de un sistema de destilación solar de agua, basado en el ciclo de humidificación-dehumidificación. Los procesos térmicos que componen el ciclo se desarrollan en dispositivos diseñados para tener la mejor eficiencia en cada uno. Para lograr lo anterior, se requiere que el proceso de evaporación del agua, mediante la humidificación de una corriente de aire, ocurra a la más alta temperatura disponible, sin llegar al punto de ebullición. Con ello se pretende incorporar la mayor cantidad de vapor posible al aire. Éste proceso se lleva a cabo en una torre empacada vertical en la cual se tiene una corriente de agua caliente que cae, y una corriente de aire caliente que sube a contraflujo y en contacto directo con el agua. Las condiciones del aire a la salida de la torre corresponden a aire húmedo saturado, a la temperatura del agua de entrada, con lo cual se garantiza la máxima absorción de humedad posible en el aire. El aire húmedo y caliente pasa entonces a un condensador en el cual se rechaza calor hacia la atmósfera, enfriándose hasta casi la temperatura de la misma, para condensar la máxima cantidad del vapor contenido y maximizar la producción de destilado. Para lograr lo anterior se requiere que el sistema de captación y almacenamiento térmico funcione mediante un aceite térmico, termotanque aislado y colectores solares del tipo de tubos evacuados, para alcanzar y mantener una temperatura de operación superior a los 110°C en el aceite. Para la condensación se propone un condensador a base de heat pipes, con un sobredimensionamiento del área de rechazo de calor a la atmósfera, para con ello forzar a que la temperatura de condensación sea lo más cercano a la de la atmósfera. Al obligar al proceso a ocurrir entre los extremos de temperatura descritos, se demuestra que la eficiencia del destilador se incrementa

substancialmente, en forma similar a lo que ocurre en los ciclos de las máquinas térmicas de potencia. El aceite térmico transfiere energía a las corrientes de agua y aire mediante la utilización de dos intercambiadores de calor, y el termo tanque de almacenamiento permite continuar operando al sistema durante el periodo nocturno, mientras se cuenta con aceite a la temperatura requerida. Un sistema de control de flujo regula la temperatura alcanzada en la corriente de agua que va a la torre de evaporación.

Se modeló el sistema descrito en la plataforma de simulación TRNSYS, incorporando la modelación del funcionamiento de la torre de evaporación y la del condensador. Utilizando las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua, México, se realizó un estudio paramétrico del sistema para determinar el efecto de utilizar diferente número de colectores solares, tamaño de termo tanques y flujos de agua. Se simula el comportamiento del sistema a lo largo de un año de operación continua, contabilizando la cantidad de condensado que se logra producir durante ese periodo de tiempo. El objetivo del análisis es determinar cómo varía la producción de destilado, en kg/año y por m<sup>2</sup> de colectores utilizados. Con ello se determinan las características del diseño óptimo del sistema de destilación propuesto.

# 1. INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para todas las formas de vida. El acceso al agua potable se ha incrementado sustancialmente durante las últimas décadas. No obstante, uno de los problemas más graves en el futuro próximo es el aprovisionamiento de agua potable para la población. La escasez de este vital líquido obliga a reiterar nuevamente una llamada a la moderación de consumo por parte de la población a nivel mundial. Ya que solo muy poca agua es la que está disponible para ser utilizada para el consumo del hombre, dado que el 90 % es agua de mar y tiene sal, el 2 % es hielo y está en los polos, y sólo el 1 % de toda el agua del planeta es dulce. Además el agua tal como se encuentra en la naturaleza, para ser utilizada sin riesgo para el consumo humano requiere ser tratada, para eliminar las partículas y organismos que pueden ser dañinos para la salud [Bouchekima, 2003].

El abastecimiento de agua potable a la población es ya un grave problema en zonas áridas y semiáridas del país, debido a que las fuentes de suministro son escasas, o presentan contaminación biológica y/o sales disueltas que hacen necesarias nuevas tecnologías para su potabilización que pueden resultar energéticamente muy costosas. El acceso a fuentes mejoradas de agua potable es parte de uno de los ocho objetivos de desarrollo del milenio (ODM) creado por la organización de las naciones unidas (ONU) y establecidos para el año 2015 (ONU, 2000). Para la potabilización del agua, se conocen dos procesos principales, estos procesos son:

*Los que implican un cambio de fase:* como destilación súbita por efecto flash, destilación por efecto múltiple, destilación por compresión de vapor y evaporación por congelación (MSF, ME, VCD, EC por sus siglas en ingles respectivamente).

*Los que no implican cambio de fase:* como osmosis inversa (OI), electrodiálisis (ED), nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF), microfiltración (MF) e Intercambio Iónico (NRC, 2004). Sin embargo, estos procesos consumen grandes cantidades de energía [Buros, 2000]. Una opción viable para obtener agua potable es a partir de la destilación de agua, el proceso de destilación es altamente eficaz en remover contaminantes presentes en el agua tales como, desechos orgánicos y metales pesados, así como bacterias y virus. El cambio del estado líquido al gaseoso, es el que conlleva la separación del agua de sus impurezas [Bermudez, et al., 2008]. Un aspecto importante de este proceso es la utilización de energía térmica.

En la actualidad la mayor fuente de energía se obtiene a partir de la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, sin embargo sus consecuencias son la contaminación del medio ambiente por la generación de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los cuales contribuyen de manera significativa al calentamiento global y con ello al cambio climático, además de que son fuentes que tenderán a agotarse. Lo anterior hace necesario, por una parte, que se mejore la eficiencia de procesos de sistemas conocidos, y por otra, desarrollar nuevo conocimiento acerca de técnicas y sistemas donde intervengan energías renovables que pueden llevar a una mejor sustentabilidad, ya que provienen de fuentes naturales y se encuentran de forma abundante, además de no contaminar, como es el caso de la energía solar [Jiang, 2010, Peidong, et al., 2009]. Dentro de las energías potencialmente renovables se ha encontrado que, la energía solar es la más prometedora [Cumbre de Bali, 2007]. La energía solar, tanto en sus formas fotovoltaica como fototérmica, es una fuente energética abundante, limpia, barata, tiene amplia distribución geográfica, un elevado potencial de utilización y es potencialmente

renovable. Se dice que la energía solar es de elevada calidad energética, de pequeño o nulo impacto ecológico e inagotable a escala humana; sin embargo existen algunos problemas en cuanto a su aprovechamiento. La energía llega a la tierra de manera dispersa y semi-aleatoria, estando sometida a ciclos de día y noche y estacionales (como invierno y verano).

Por lo tanto la potabilización de agua por destilación mediante el uso de energía solar térmica, contribuye al aumento de la sustentabilidad de los sistemas de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, además de ser económicamente viable y de amplia aplicación [Bermudez, et al., 2008].

Los beneficios y limitaciones de la energía solar para destilación de agua son ampliamente conocidos [Delyannis, E., 2003]. Una alternativa de desalinización por destilación con energía solar, es emular el ciclo hidrológico. Actualmente, para realizar este proceso, se usa la caseta de destilación. Sin embargo, este dispositivo es el menos apropiado para su construcción a gran escala porque, si bien, con capacidades pequeñas tiene un costo relativo bajo, aumenta notablemente cuando aumenta su tamaño [Thomas K. E., 1997], Además, resulta ineficiente debido a que la temperatura de condensación es elevada con respecto a la de evaporación. Debido a complicaciones anteriores, Martín *et al.* (1998), Al-Enezi *et al.* (2006), Yamali *et al.* (2007) y Hermosillo *et al.* (2008) han realizado investigaciones donde se propone un sistema de destilación a través de energía solar basado en un circuito cerrado de aire, el cual es humidificado y dehumidificado a lo largo del proceso.

## **1.1 Nacimiento de los Destiladores Solares**

Durante miles de años el ciclo hidrológico ha provocado que la mayor cantidad de sal del planeta se encuentre en los océanos. Este fenómeno es debido a que cuando el agua se evapora, deja detrás contaminantes orgánicos e inorgánicos, que incluyen metales pesados y sales disueltas. Resulta atractivo pues, emular este fenómeno para obtener agua destilada a partir de agua de mar o salobre.

Alrededor del año 500 a.C. filósofos griegos fueron los primeros en expresar ideas acerca de la naturaleza del agua y la energía. Aristóteles fue quien descubrió el ciclo del agua y comprobar que el agua de mar puede llegar a ser agua dulce y que el vapor de agua no contiene sal cuando se condensa.

Existe numerosa evidencia de que se utilizó la energía solar para producir agua potable a partir del agua marina desde hace muchos años. Algunos autores hacen referencia a los usos que daban los antiguos griegos al fenómeno de la desalación solar desde hace más de dos mil años, pues se sabe que conocían el efecto de invernadero y el empleo de materiales semitransparentes como una variedad del ónix y diversas resinas petrificadas como el ámbar. Según Delyannis (2003), la más antigua aplicación de la energía solar se encontró en el sur de Francia, relacionada con el secado solar de alimentos, y data de hace unos 10000 años.

Sin embargo, no hay evidencia científicamente sólida del conocimiento del fenómeno fundamental sino hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando la investigadora María Telkes (1945) analizó la manera de producir destiladores solares inflables. El usuario debía introducir manualmente algo así como dos litros de agua de mar y esperar algunas

horas al mediodía para purgar una pequeña cantidad de agua ya apropiada para el consumo humano.

Desde esa época hasta los años setenta, la posibilidad de emplear la energía solar para desalar agua marina no pasó de ser una curiosidad de los investigadores, sobre todo en las regiones del mundo donde el agua marina abunda, la potable escasea y el sol es generoso.

Las energías renovables se espera que tengan un futuro próspero y un papel importante en el ámbito de la desalación de agua marina y salobre. Los destiladores solares se utilizan para producir agua dulce del agua salada y representa una mejor solución técnica para suministrar agua potable solo mediante el uso de energía solar térmica [Belessiotis y Delyannis, 2003].

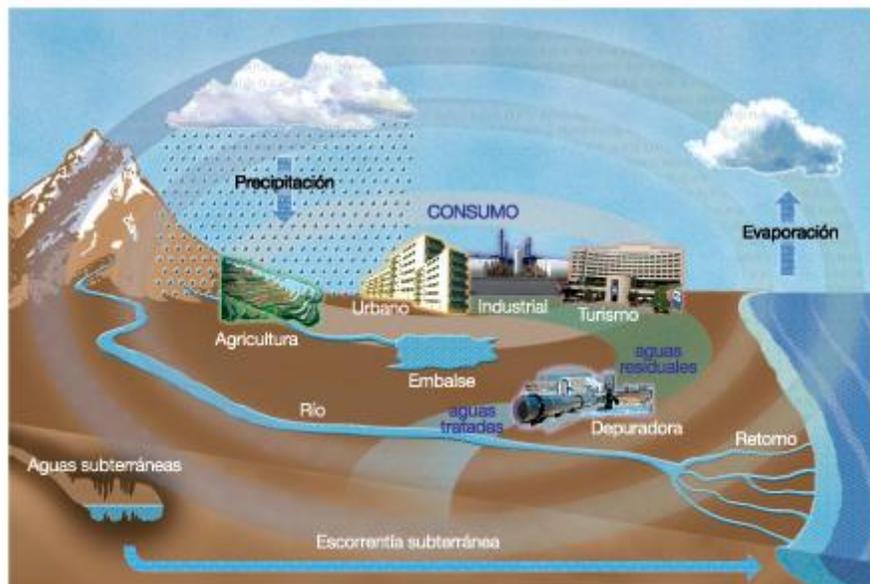
Respecto a la importancia de la explotación de energías renovables para la producción de agua dulce, tres problemas principales se pueden abordar:

- La escasez de agua dulce.
- El agotamiento de la energía fósil.
- La degradación ambiental debido a las emisiones de gases y la contaminación de hidrocarburos.

Se ha estimado que la producción de 1000 m<sup>3</sup> por día de agua dulce requiere 10,000 toneladas de petróleo al año. Problemas relacionados con el uso de combustibles fósiles, se podría resolver considerando la posible utilización de recursos renovables como la solar [Kalogirou, 2005].

## 1.2 Desalinización solar de agua

En la naturaleza, la desalinización solar se produce en la lluvia, cuando la radiación solar es absorbida por el mar y hace que el agua se evapore. El vapor de agua sube por encima de la superficie y se mueve por el viento. Una vez que este vapor se enfría hasta su punto de rocío, la condensación se produce, y el agua dulce cae en forma de lluvia. Este proceso básico es responsable del ciclo hidrológico. Este mismo principio se utiliza en todos los sistemas de destilación por el hombre. Datos históricos, incluyendo descripciones de Aristóteles e Hipócrates quienes describen su uso en el siglo IV aC., muestran que la humanidad siempre ha utilizado la desalinización para producir agua potable [Delyannis, 2003; NRC, 2004].



*Figura 1-1 Ciclo hidrológico del agua*

La desalación utiliza una gran cantidad de energía para extraer una porción de agua pura de una fuente de agua salada.

En la desalación, el agua se introduce en el proceso, y el resultado es un flujo de salida de agua pura y otra de aguas residuales con una alta concentración de sal.

### 1.3 Desalinización en México

México cuenta con una capacidad instalada de 67,487 m<sup>3</sup>/día (781.1 L/s), el 22% no opera por los altos costos de mantenimiento, refacciones de importación y personal calificado. En la Tabla 1-1 se muestra que el estado que cuenta con la mayor capacidad instalada y el número de plantas es Quintana Roo que representa el 44% del total nacional.

*Tabla 1-1 Plantas desalinizadoras en México [Fuentes, 2002].*

Estado	Plantas desalinizadoras	% Nacional	Opera		Capacidad instalada m <sup>3</sup> /día	Capacidad que opera m <sup>3</sup> /día
			si	no		
Baja California	10	5.8	7	3	9540	8040
BCS	38	22.2	32	6	8979	3346
Campeche	2	1.2	2	0	3120	2132
Coahuila	7	4.1	2	5	78	31
Durango	24	14	9	15	650	374
Guerrero	4	2.3	2	2	2000	900
Nuevo León	2	1.2	2	0	325	325
Oaxaca	1	0.6	1	0	13478	13478
Q. Roo	76	44.4	57	19	27058	23266
S.L.P.	1	0.6	1	0	60	5
Sonora	5	2.9	4	1	471	80
Tamaulipas	1	0.6	1	0	1728	363
<b>Total nacional</b>	<b>171</b>	<b>100</b>	<b>118</b>	<b>53</b>	<b>67487</b>	<b>52340</b>

El proceso más utilizado en México es la osmosis inversa. El 53% de las plantas desalinizadoras son para uso turístico con una capacidad instalada de 26,942 m<sup>3</sup>/día (311.81 L/s), 35% para uso municipal con una capacidad instalada de 18,413 m<sup>3</sup>/día (213.11 L/s) y el 12% son

para uso industrial con una capacidad instalada de 22,143 m<sup>3</sup>/día (256.3 L/s) (ver Tabla 1-2).

*Tabla 1-2. Plantas desalinizadoras por proceso y por estado [Fuentes, 2002].*

Estado	Plantas Desalinizadoras	Proceso				Solar Experimental
		OI	CV	SMF	SOLAR	
<b>Baja California</b>	10	3	4	1	2	0
<b>BCS</b>	38	32	3	0	2	1
<b>Campeche</b>	2	2	0	0	0	0
<b>Coahuila</b>	7	7	0	0	0	0
<b>Durango</b>	24	24	0	0	0	0
<b>Guerrero</b>	4	4	0	0	0	0
<b>Nuevo León</b>	2	2	0	0	0	0
<b>Oaxaca</b>	1	1	0	0	0	0
<b>Q. Roo</b>	76	75	1	0	0	0
<b>S.L.P.</b>	1	1	0	0	0	0
<b>Sonora</b>	5	4	0	0	1	0
<b>Tamaulipas</b>	1	1	0	0	0	0
<b>Total nacional</b>	171	156	8	1	5	1

En México, la principal fuente energética para producir agua destilada a partir de agua de mar o salobre es de origen fósil. El uso de esta fuente energética tiene dos inconvenientes, la escasez de hidrocarburos y la producción de gases de efecto invernadero durante la combustión.

Con respecto al análisis técnico y económico de algunas alternativas de desalinización evaluadas en diciembre de 2001, en la Tabla 1-3 se muestran las ventajas y desventajas de las tecnologías comerciales.

Tabla 1-3 Valoración de las diferentes alternativas comerciales de desalinización (Fuentes, 2002).

Características	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
<b>Tipo de energía</b>	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
<b>Consumo energético primario (kJ/kg)</b>	Alto >200	Alto/medio 150-200	Medio 100-150	Bajo >80	Bajo >30
<b>Consumo de energía eléctrica kWh/m<sup>3</sup></b>	3.5-4.0	1.5-2.0	9.0-11.0	2.4-4.5	1.0-2.0
<b>Costo de instalación</b>	Alta	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
<b>Capacidad de producción (m<sup>3</sup>/d)</b>	Alta >50,000	Media <20,000	Baja <5,000	Alta >50,000	Media <30,000
<b>Posibilidad de ampliación</b>	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
<b>Desalación de agua de mar</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	No
<b>Calidad de agua desalada ppm</b>	Alta <50	Alta <50	Alta <50	Media 300-500	Media <300
<b>Superficie de terreno requerida de instalación</b>	Mucha	Media	Poca	Poca	Poca
<b>Costo USD/m<sup>3</sup> tratado</b>	1.14-1.68	0.83-1.115	0.63-0.86	0.32-0.61	0.17-0.32
<b>Costo USD/m<sup>3</sup> plantas pequeñas</b>		1.28-2.16		1.1-1.8	

## 1.4 Desalinización Solar de Agua por Evaporación y Condensación

La aplicación de la energía solar para la desalinización del agua por destiladores solares requiere una inversión de capital relativamente grande, pero a la vez un mínimo costo de operación y mantenimiento.

La tasa de productividad de los destiladores solares depende de la radiación solar disponible. Si no hay sol, la productividad es casi nula. Es importante desarrollar nuevos diseños de sistemas de destilación solar que aumenten la producción mediante el aumento de la temperatura del agua y que el tiempo de operación no sea solo cuando haya radiación solar.

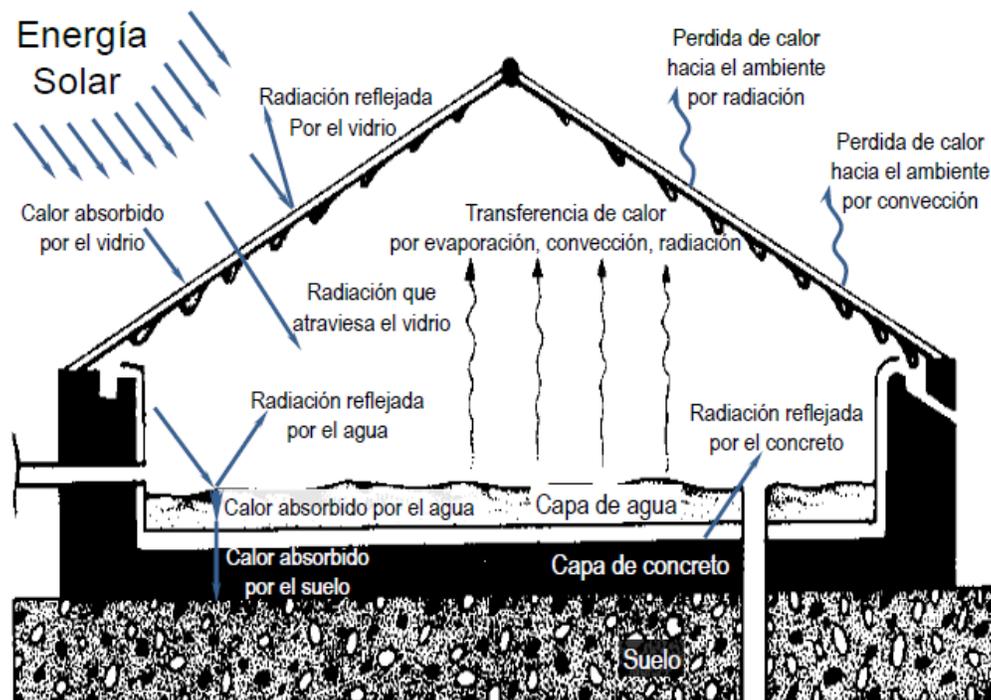
Hasta ahora, los diferentes procesos de desalación solar, como destiladores solares de tipo caseta y los sistemas que trabajan bajo el

principio de humidificación-deshumidificación, se han utilizado para producir agua fresca a partir de agua de mar o agua salina subterránea.

#### **1.4.1 Destiladores solares tipo caseta**

Este dispositivo, patentado en 1870 por Weeler y Evans, opera bajo el principio del ciclo hidrológico [Delyannis, 2003].

La caseta de destilación se caracteriza por la sencillez y facilidad de construcción. La Figura 1-2 ilustra el destilador solar que consiste básicamente en una charola o recipiente de base. En este recipiente se coloca el agua de mar por destilar. Sobre esta charola se construye el techo de material transparente, generalmente mediante dos cristales que forman la clásica estructura "de casita", como muestra la figura.



*Figura 1-2 Destilador solar tipo caseta [Escobedo Bretado 2010].*

En la base de cada uno de los cristales se instala un canal colector de agua destilada. Se aprovecha el hecho de que el cristal estará

generalmente más frío que el agua del destilador, por lo que se establecerá un gradiente de presiones parciales de vapor de agua que hará que el agua se difunda (generalmente como humedad debajo del punto de saturación) a través del espacio entre el estanque de agua y cada uno de los cristales, y se formará humedad del condensado sobre la superficie interior de cada cristal, ya que generalmente estarán más fríos que la temperatura de rocío. Este fenómeno es muy común, pues lo mismo sucede sobre la superficie de una botella o lata de refresco o cerveza cuando sale del refrigerador, generalmente a una temperatura menor que la del rocío en la atmósfera libre, por lo que rápidamente acumula humedad sobre su superficie. Esa humedad es en principio agua condensada, químicamente pura, proveniente de la atmósfera.

Las altas temperaturas destruyen agentes patógenos. Al evaporarse el agua, sólo se evapora agua pura, [Fuentes, 2002]. El agua condensada corre hacia abajo por la cubierta, la cual está inclinada hacia el sur. El agua es colectada en el extremo inferior de la cubierta por canales que conducen el agua a contenedores. La caseta de destilación no contiene partes móviles, y sólo se requiere la energía solar para su operación. La caseta, incluyendo la cubierta, debe limpiarse periódicamente para extraer los sedimentos. Los principales mecanismos de transferencia de calor y masa en la caseta de destilación, así como su interacción con el ambiente se muestran en la Figura 1-2. Esta figura muestra que la energía solar radiante incidente en la superficie de la cubierta transparente se divide en tres partes. Parte de la energía se absorbe en la cubierta aumentando su temperatura, otra parte de la energía se refleja en la cubierta hacia la atmósfera y finalmente, parte de la energía atraviesa la cubierta y llega a la superficie del agua. La energía solar radiante que atraviesa la cubierta transparente también se divide en tres partes. Una de ellas es absorbida por el agua aumentando su temperatura y provocando la evaporación, otra parte de la energía se

refleja en la superficie del agua hacia el interior de la caseta de destilación, contribuyendo al aumento de temperatura de ésta, y finalmente, parte de la energía atraviesa el agua y llega hasta la superficie del concreto, donde una parte es absorbida y otra es reflejada por éste. El calor debido a la condensación de vapor mas la radiación reflejada por la superficie del líquido y la reflejada por la superficie del concreto, contribuyen al aumento de temperatura de la cubierta transparente. Se argumenta que una de las razones de la baja eficiencia de las casetas de destilación es el desempeño de la cubierta transparente en su función de condensador [Martín-Domínguez et. al, 1998]. La caseta de destilación sólo disipa calor a la atmosfera por radiación y convección. En cuanto al costo de inversión, para capacidades pequeñas, la caseta de destilación, tiene un costo relativamente bajo, sin embargo, este dispositivo es el menos apropiado para su construcción a gran escala como lo muestra la Figura 1-3.

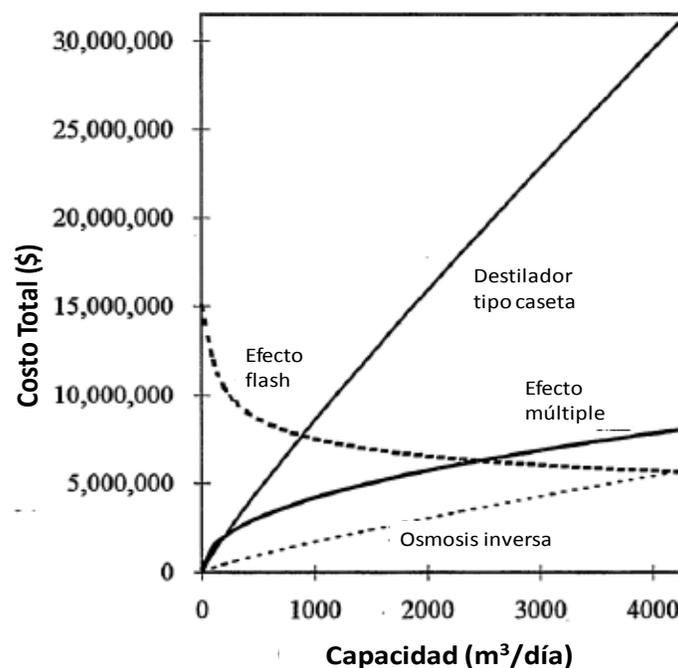
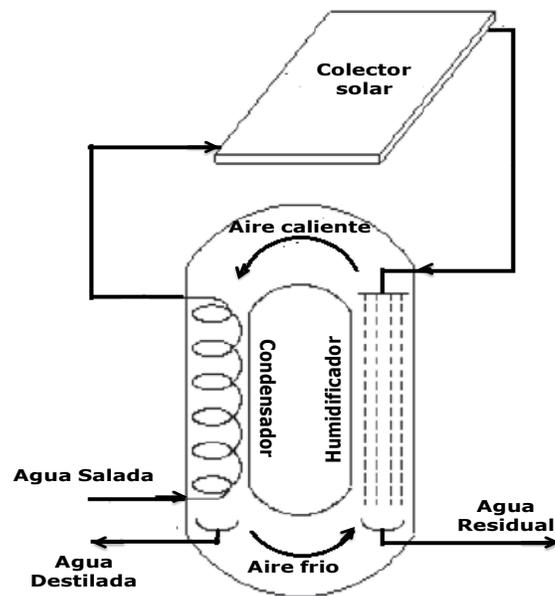


Figura 1-3 Escala económica relativa para diferentes tecnologías de desalinización [Thomas, 1997].

La productividad diaria de los destiladores solares tipo caseta no supera los 3 litros por metro cuadrado, incluso en áreas con niveles relativamente altos de radiación solar [Muñoz *et. al*, 2010].

### **1.4.2 Destilación por humidificación-deshumidificación de aire**

En la desalinización por humidificación-dehumidificación, el aire se utiliza como fluido de trabajo. Este proceso funciona según el principio de difusión de masas y utiliza aire seco para evaporar el agua salina, por lo tanto la humectación del aire. El aire se distribuye por convección natural o forzada. La combinación del evaporador-condensador se denomina un ciclo de humectación, porque el flujo de aire es humidificado en el evaporador y deshumidificado en el condensador, como se muestra en la Figura 1-4.



*Figura 1-4 Sistema de desalinización por humidificación-dehumidificación de aire [Said Al-Hallajet al.1998].*

El proceso se basa en el hecho de que el aire pueda ser mezclado con cantidades significativas de vapor de agua. El vapor tiene una capacidad de transporte que aumenta con la temperatura del aire, es decir, 1 kg de aire seco puede llevar a 0,5 kg de vapor de agua y alrededor de 2805 kJ, cuando su temperatura aumenta 30 a 80 ° C. El agua dulce es producida por la condensación del vapor de agua, lo que resulta en la deshumidificación del aire. Una ventaja significativa de este tipo de tecnología es que ofrece un medio de baja presión, la desalinización de baja temperatura que puede operar fuera del calor residual y puede ser muy competitiva en costos [Müller-Holst, et al., 1999]. Trabajar a temperaturas al rededor de los 88°C puede optimizar la evaporación y por tanto la cantidad de destilado, pero esto arriesga la formación de incrustaciones que requieren un tratamiento de alimentación en los ductos por donde fluye el agua. [Gerofi, et al., 1983].

La productividad de los sistemas de desalación solar basada en la técnica de humidificación-deshumidificación es mayor que el de tipo caseta trabajando bajo las mismas condiciones climáticas [Orfi, et al., 2004], es decir, se puede producir tanto como cinco veces el agua producida por un destilador tipo caseta con la misma energía solar recogida [Amara, et al., 2004]. Por esa razón, el proceso de destilación mediante energía solar por el principio humidificación-deshumidificación es uno de los métodos más sencillos y más eficientes para mejorar la capacidad de producción de agua dulce.

Un aspecto importante para en destiladores que trabajan por humidificación-dehumidificación de aire es la utilización de colectores solares para el calentamiento del agua y del aire, así como el almacenamiento térmico que ayuda a que los tiempos de operación sean más largos. Las unidades de acoplamiento solar de desalinización con una instalación de almacenamiento térmico mejora la productividad y reduce el costo del agua producida, incluso con un buen

almacenamiento térmico se puede lograr una operación de destilación por 24 horas. [Müller-Holst, et al., 1999].

Los colectores de energía solar pueden ser utilizados con el fin de convertir la energía solar en energía térmica y son el principal componente de una unidad de desalinización solar y cualquier mejora en su eficiencia tendrá una influencia directa sobre la tasa de producción de agua y el costo del producto [Ben-Amara, et al., 2005].

Existen trabajos publicados relacionados con destiladores solares que trabajan bajo el principio de humidificación–deshumidificación.

En julio de 1997, una planta piloto de destilación solar mediante humidificación-dehumidificación con almacenamiento térmico fue investigada y medida en detalle por [Müller-Holst, et al. (1999)]. La unidad tenía  $2\text{m}^3$  de almacenamiento térmico, con una superficie de colectores solares de  $38\text{m}^2$ . El destilado diario fue de 505 L, y operado durante 20 horas al día. A la vez este trabajo desarrolló una herramienta de simulación para el programa TRNSYS para calcular y diseñar los componentes de la unidad de desalinización. Bajo condiciones de contorno simulada y calculados para una instalación de almacenamiento de acoplamiento térmico con una operación de 24 horas. Esto dio como resultado una mayor eficiencia.

Un estudio de un sistema de desalinización en Baja California Sur (BCS). En un proyecto conjunto entre la República Federal de Alemania y México a finales de 1970, un destilador solar en varias etapas fue construido en un centro de investigación de desalinización en La Paz. El proyecto fue llamado SMSF. Con una capacidad de  $10\text{m}^3$  por día, la planta entró en servicio en 1980. La planta fue diseñada para operar continuamente las 24 h, mediante el almacenamiento térmico que puede mantener la planta trabajando durante más de 28 h en condiciones normales, mediante el uso de concentradores solares parabólicos [Juarez Cortez, 2006]

De todo lo anterior es importante recalcar, que la mejor opción para la desalación solar de agua es el proceso bajo el principio de humidificación- dehumudificación. Pero también es necesario contar con un buen quipo de almacenamiento térmico que permita tener periodos largos de operación y no depender de la radiación solar, por otra arte es necesario contar con colectores solares óptimos para el calentamiento térmico de los fluidos y que permita alcanzar temperaturas altas para una mayor eficiencia.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se han desarrollado sistemas de destilación solar "integrales", en los cuales dos o más procesos termodinámicos diferentes ocurren en un mismo componente físico del sistema. Esto ocasiona que la eficiencia de cada proceso termodinámico sea menor a la que podría alcanzarse si ocurriera en un dispositivo diseñado específicamente para él. Las modificaciones de diseño introducidas en un componente afectan, por lo tanto, a dos o más procesos termodinámicos simultáneamente, pudiendo beneficiar a uno, pero afectando posiblemente a otros. Éste tipo de sistemas tienen por lo tanto bajas eficiencias de operación, y son inherentemente difíciles de mejorar.

Los sistemas de destilación solar más comunes, tipo caseta, han mostrado tener una baja eficiencia de producción de destilado, y están limitados a capacidades pequeñas debido a que su costo se incrementa fuertemente con el tamaño, haciéndolos incosteables (Thomas, 1997).

Escobedo-Bretado (2010) analizó el comportamiento de un sistema de destilación solar dotado de una torre de evaporación, en el cual cada proceso termodinámico ocurre en un componente diseñado específicamente para su función, y detecto que la variable más importante para conseguir una alta eficiencia de operación es la temperatura del flujo de agua de entrada a la torre.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El uso de la energía solar ofrece una perspectiva prometedora para la cobertura de las necesidades fundamentales de electricidad y agua potable en regiones remotas, donde la conexión a la red eléctrica no es factible y donde la escasez de agua potable es grave. La destilación de agua basada en el uso de energía solar bajo el principio de humidificación-deshumidificación podría ser la solución más económica para ofrecer agua potable a las comunidades remotas y aisladas.

## **4. HIPÓTESIS**

Es posible el diseño y simulación de un nuevo dispositivo de destilación solar bajo el principio de humidificación-dehumidificación donde los procesos ocurren en dispositivos diseñados para cada fin. Este sistema trabajará de forma continua mediante almacenamiento térmico y el uso de colectores solares de tubos de vacío, manteniendo las temperaturas lo más alto posible mediante un control de flujo. Con la simulación en TRNSYS y análisis paramétrico se obtendrán datos precisos del comportamiento del sistema de destilación, que servirá como herramienta para diseñar y optimizar el sistema.

## **5. OBJETIVO**

Optimizar el funcionamiento de un sistema de destilación de agua por energía solar desarrollado en TRNSYS [Escobedo Bretado, 2010], que permitirá obtener las mejores condiciones de operación para el diseño del sistema.

### **5.1 Objetivos Específicos**

- Modificar el programa de simulación en TRNSYS ya existente [Escobedo Bretado, 2010] para mejorar las condiciones del funcionamiento.
- Identificar las condiciones de operación que muestren los mejores resultados en el funcionamiento del sistema que permita incrementar la eficiencia.
- Realizar un análisis paramétrico para determinar el diseño óptimo del sistema de simulación.

## **6. SIMULACIÓN DE SISTEMAS TÉRMICOS SOLARES EN ESTADO TRANSITORIO POR MEDIO DE TRNSYS**

Para tomar una decisión educada acerca del diseño de sistemas de aprovechamiento de energía solar, es necesario entender fenómenos que son intrínsecamente cambiantes a lo largo del tiempo como la irradiación solar y humedad y temperatura ambientes.

Actualmente, para este fin, se usan paquetes de cómputo como la plataforma de simulación de sistemas en estado transitorio (TRNSYS por sus siglas en ingles).

TRNSYS es un completo y extenso ambiente de simulación para sistemas en estado transitorio. Este paquete tiene una estructura modular. Cada componente está representado por una sub-rutina o sub-programa (Escrito en FORTRAN, C, C++ o un lenguaje de programación similar) describiendo su operación. Cada componente es un modelo matemático del equipo basado en balances de materia y energía.

Este sistema es capaz de analizar desde un simple sistema de calentamiento de agua sanitaria para una vivienda hasta el diseño y simulación de edificaciones y su equipamiento incluyendo control de clima, comportamiento de ocupantes y sistemas energéticos alternos como energía proveniente del viento, fototérmica, fotoquímica y sistemas de hidrógeno.

El paquete TRNSYS puede ser conectado fácilmente a otras aplicaciones para pre- o post- procesamiento de información o a través de celdas interactivas llamadas durante la simulación por ejemplo Microsoft Excel, Matlab, COMIS.

Entre las aplicaciones que permite TRNSYS se incluyen:

- Sistemas solares.

- Diseños avanzados de sistemas de refrigeración y aire acondicionado en edificaciones.
- Sistemas de energías renovables.
- Cogeneración y celdas de combustible
- Simulación de fenómenos en estado no estable.

El proyecto de simulación que se hace en TRNSYS permite conectar gráficamente los componentes en la pantalla de simulación. Cada tipo de componente es descrito por un modelo matemático en FORTRAN. Este programa permite simular equipos físicos que tienen que ver con sistemas térmicos, apropiados para desarrollar aplicaciones de sistemas solares como el planteado en el presente trabajo.

## **7. METODOLOGÍA**

Se presenta un sistema para la destilación solar de agua, en el cual cada proceso ocurre en un dispositivo diseñado específicamente para tal fin. El sistema se simula utilizando el paquete TRNSYS. Se analizarán los resultados obtenidos mediante simulación, y se muestra como la producción de destilado varía a lo largo de un año operación. Identificando las condiciones de operación del sistema propuesto, se concluye que para lograr mantener la producción de destilado a los niveles más altos observados, se requiere modificar el diseño original [Escobedo Bretado, 2010], requiriéndose utilizar colectores solares de tubos de vacío, que permitan alcanzar mayores temperaturas en el calentamiento del aceite térmico. Adicionalmente, se determina que se requiere introducir un sistema de control de flujo para lograr mantener la temperatura del agua cercana a los 90°C.

### **7.1 Descripción del Sistema Original**

Como se muestra en la Figura 7-1, el sistema propuesto consta de un campo de colectores solares, un termo tanque de almacenamiento térmico, dos intercambiadores de calor para el calentamiento del agua y el aire, un evaporador y un condensador.

Mediante el uso de colectores solares se calienta el aceite térmico, y la energía es almacenada en un termo tanque estratificado térmicamente. La energía almacenada en el termo tanque se utiliza para calentar la corriente de agua y aire que entran a la torre de evaporación mediante los intercambiadores de calor. La torre de evaporación trabaja a contra flujo, entrando agua por la parte superior y aire por la parte inferior, en este sistema se tiene intercambio de calor y masa por contacto directo,

humedeciendo el aire que posteriormente entrara al condensador para separar el agua destilada.

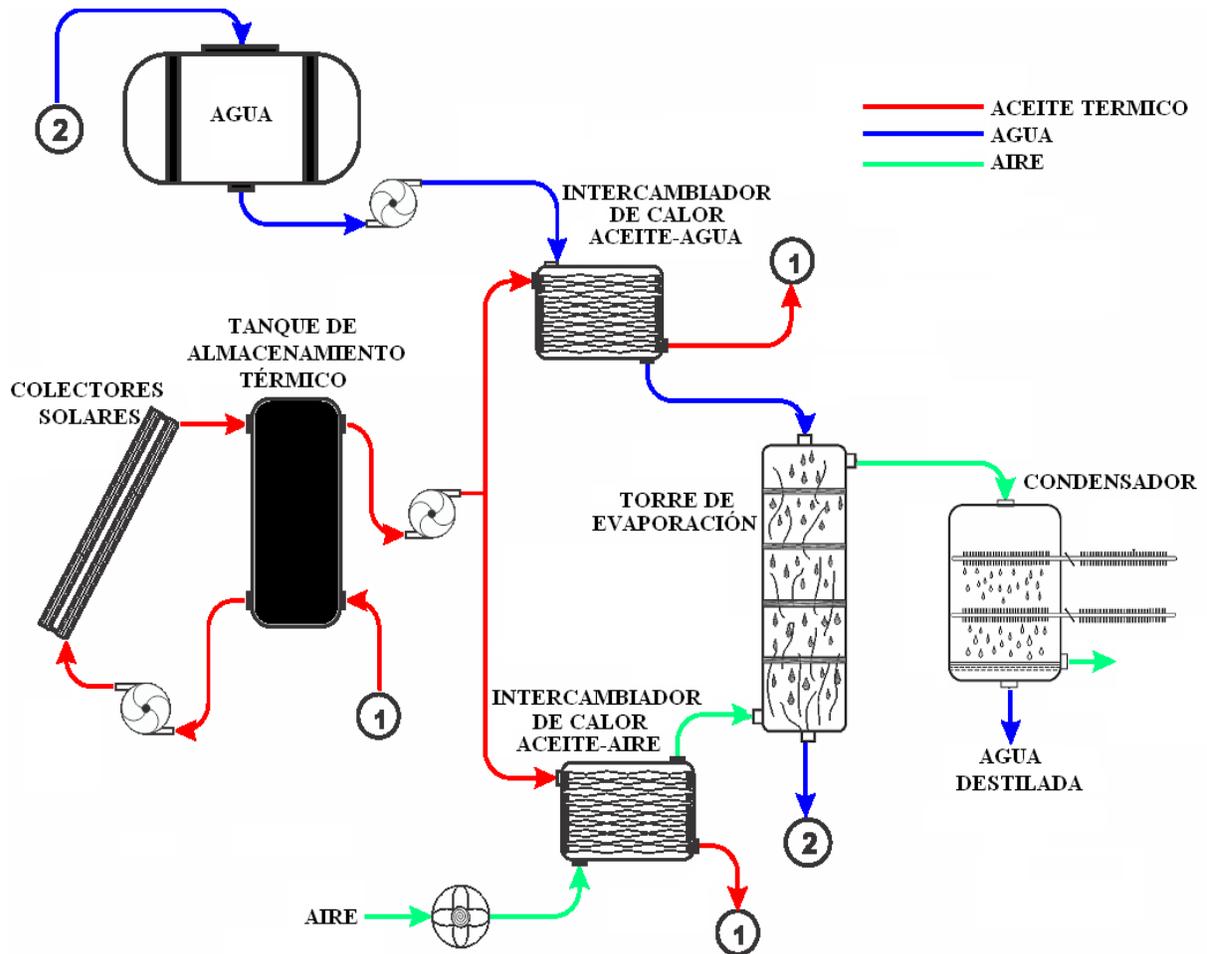


Figura 7-1 Sistema de destilación propuesto.

## **7.2 Modelación del sistema en TRNSYS**

### **7.2.1 Colectores solares**

Inicialmente se tomaron como modelo colectores solares planos comercialmente disponibles en México, con un área de captación de radiación solar de  $1.86 \text{ m}^2$ , con curva de eficiencia térmica lineal y la tasa de flujo de prueba de los colectores es de 2 L/min. Posteriormente se sustituyen los colectores solares planos por tubos evacuados (se describen mas adelante).

### **7.2.2 Tanque de almacenamiento térmico:**

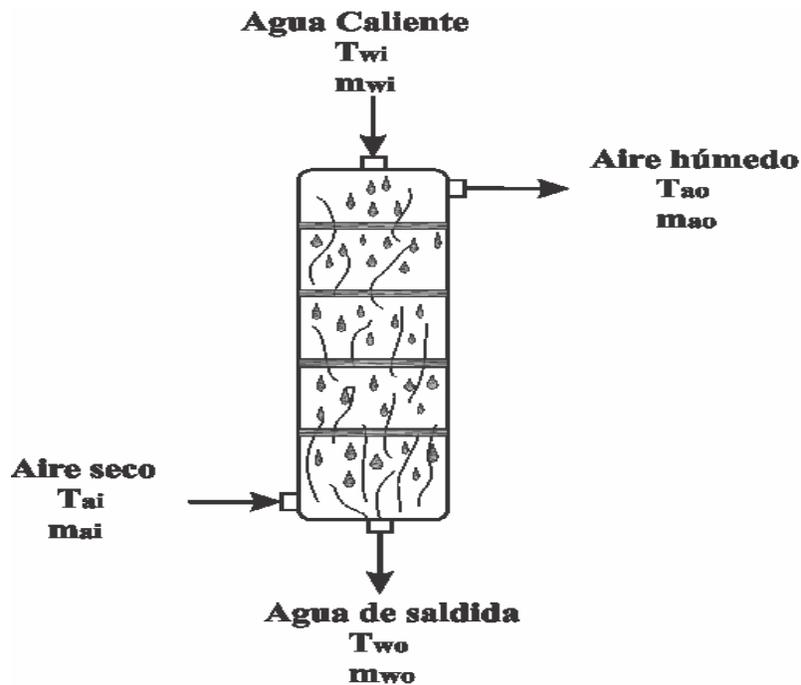
El termo tanque se simula utilizando el modelo de tanque estratificado de TRNSYS. Cuenta con dos entradas y dos salidas de aceite. La entrada del aceite frío, que proviene del intercambiador de calor, se encuentra en la parte inferior del tanque. El flujo proveniente de los colectores solares ingresa al termotanque por la parte superior. La salida del aceite caliente hacia el intercambiador de calor ocurre por la parte superior. La salida hacia los colectores solares es por la parte inferior del tanque.

### **7.2.3 Intercambiadores de calor**

Los intercambiadores de calor considerados son a contra flujo. Las capacidades térmicas de los fluidos utilizados fueron, para el agua  $4.19 \text{ kJ/kg K}$ , para el aire  $1.005 \text{ kJ/kg K}$ , y para el aceite térmico  $2 \text{ kJ/kg K}$ . El aceite considerado es un fluido de transferencia térmica DOWTHERM-Q (The Dow Chemical Company, 2009), que cubre el intervalo de temperatura deseado ( $-15^\circ\text{C}$  a  $200^\circ\text{C}$ ).

### **7.2.4 Evaporador**

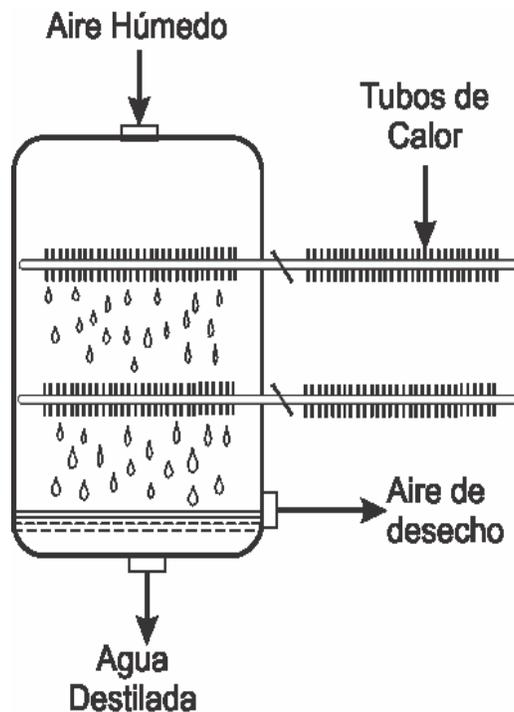
El evaporador consiste en una torre empacada, en la cual fluyen agua y aire a contra flujo. El aire circula en circuito cerrado, y durante el contacto con el agua se humidifica, para después ser deshumidificado en el condensador. Dentro de la columna empacada se tiene transferencia simultánea de calor y masa entre el agua y el aire. El material de empaque ayuda a aumentar el área de contacto entre los dos fluidos, y a prolongar el tiempo de residencia de los fluidos dentro de la torre, incrementando la eficiencia de transferencia de calor y masa. El agua entra a una temperatura  $T_{w_0}$  y sale a una temperatura  $T_{w_i}$ . El aire entra a una temperatura  $T_{a_0}$  y sale a una temperatura  $T_{a_i}$  como se muestra en la Figura 7-2. La corriente de agua de entrada se pretende que tenga una temperatura lo más alta posible, pero sin que llegue a su punto de ebullición. El proceso de evaporación ocasiona que la temperatura del agua vaya disminuyendo conforme baja por el interior de la torre. Al aire de entrada tiene una humedad baja y una temperatura tan alta como lo permita el fluido de calentamiento disponible. Al entrar el aire a la torre entra en contacto con el agua que está por salir de la misma, y que tiene la más baja temperatura. En éste punto se tienen los gradientes de temperatura y concentración más altos del sistema, que ocasionan la transferencia de calor del aire hacia el agua, y la transferencia de masa del agua hacia el aire. Conforme el aire sube por la torre va estando en contacto con agua más caliente, y va ganando humedad. Se pretende que el proceso de humidificación sufrido por el aire a su paso por la torre de evaporación ocurra de tal modo que el salir de la torre habrá alcanzado la temperatura del agua de entrada, y una humedad del 100%.



*Figura 7-2 Diseño del evaporador*

### **7.2.5 Condensador**

Para éste proceso se propone utilizar tubos de calor (caloriductos, heat pipes) para conseguir que el rechazo de calor hacia el medio ambiente pueda hacerse a la más baja temperatura posible. Para ello se aprovechará la característica de los tubos de calor de operar casi isotérmicamente, y dotando al condensador de un área de intercambio de calor mucho mayor del lado exterior, se forzará a operar a temperaturas cercanas a la atmosférica, como se muestra en la Figura 7-3. La cantidad de agua destilada obtenida en el condensador es función de la diferencia entre las humedades absolutas de entrada y salida de aire en el condensador y el flujo másico del aire.



*Figura 7-3 Diseño del condensador a base de tubos de calor.*

### **7.3 Simulación en TRNSYS**

Se simula la operación del sistema durante periodos de un año, realizando cálculos cada 15 minutos. Las condiciones climáticas son idénticas para cada corrida y corresponden a un año típico en la ciudad de Chihuahua, Chih., México. Se toman como variables independientes (parámetros) el número de colectores solares, tamaño del termostanque y flujo de agua. Se realizaron corridas de simulación para numerosas combinaciones de valores de los parámetros mencionados, y se compararon los resultados así obtenidos.

Los resultados generados por TRNSYS se muestran en la Figura 7-4, donde se muestra el sistema propuesto implementado en TRNSYS. Se observa la posición de los equipos y sus interconexiones. Además se muestran y distinguen los subsistemas de almacenamiento térmico y destilación.

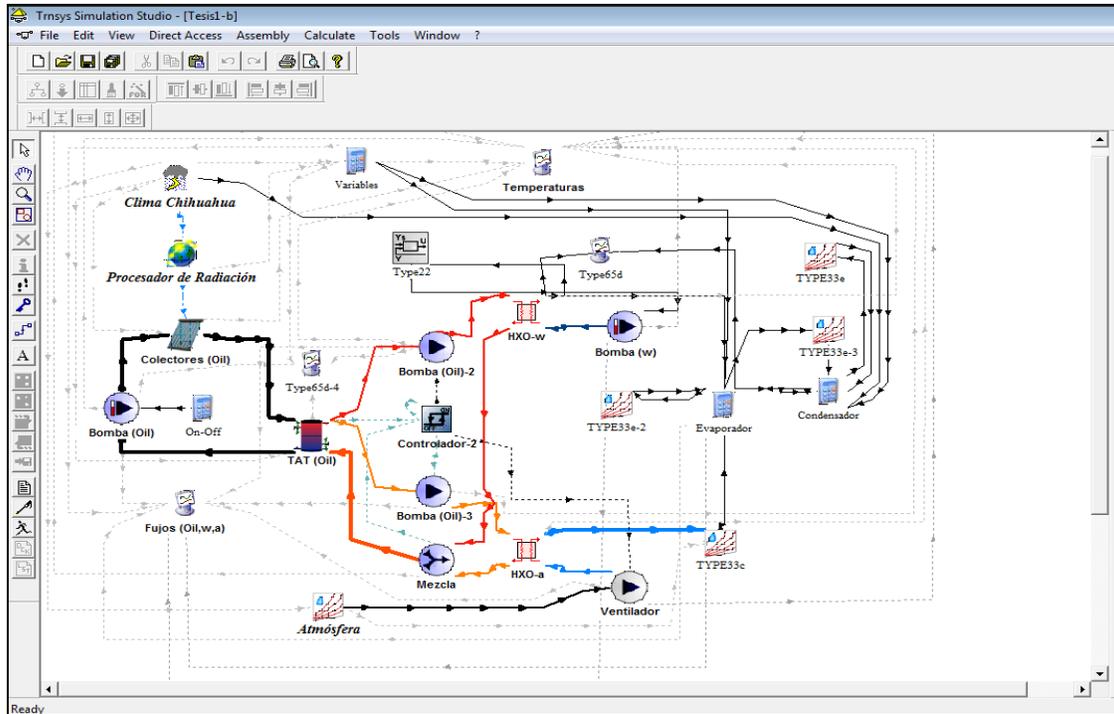


Figura 7-4 Diagrama en TRNSYS del sistema desalinizador.

## 7.4 Comportamiento del sistema original

De los resultados obtenidos en el proceso de simulación del trabajo realizado por Escobedo Bretado (2010), se observó un comportamiento que inicialmente se consideró como erróneo, pues la mayor productividad de agua destilada se obtenía cuando se tenía el tamaño de termo tanque más pequeño y el flujo de agua más bajo, para igual número de colectores simulados. Los detalles completos de los casos analizados pueden consultarse en es trabajo. La explicación a dicho comportamiento puede inferirse del siguiente análisis.

### 7.4.1 Comportamiento en un día típico

Tomando la simulación de un día típico, en la Figura 7-5 se puede observar la temperatura del aceite térmico a la salida del campo de colectores solares, la cual responde a la

disponibilidad de radiación durante el periodo diurno, y se estabiliza con la temperatura ambiente al detenerse el flujo por la llegada de la noche. El aceite así calentado cíclicamente, pasa al termotanque, donde se estratifica térmicamente. La Figura 7-6 muestra como la temperatura del aceite proveniente del termotanque determina la temperatura que alcanzan las corrientes de agua y aire a la salida de los intercambiadores. La Figura 7-7 muestra la misma información que la Figura 7-6, pero para varios días seguidos de operación. Conjuntando el comportamiento mostrado en las Figuras 7-5, 7-6 y 7-7, se observa que el comportamiento cíclico de la radiación solar tiene un efecto inevitable sobre los niveles de temperatura que pueden alcanzarse en el calentamiento de las corrientes de agua y aire. Las diferentes corridas de simulación efectuadas, para diferentes tamaños de termo-tanques y flujos de agua, mostraron que al aumentar el tamaño del termo-tanque, la amplitud vertical de la oscilación de temperaturas se disminuía, pero el valor promedio diario de temperaturas permanecía casi sin variación. Al disminuir el flujo de agua, la temperatura de la misma alcanzaba temperaturas mayores en los puntos más altos de las curvas cíclicas.

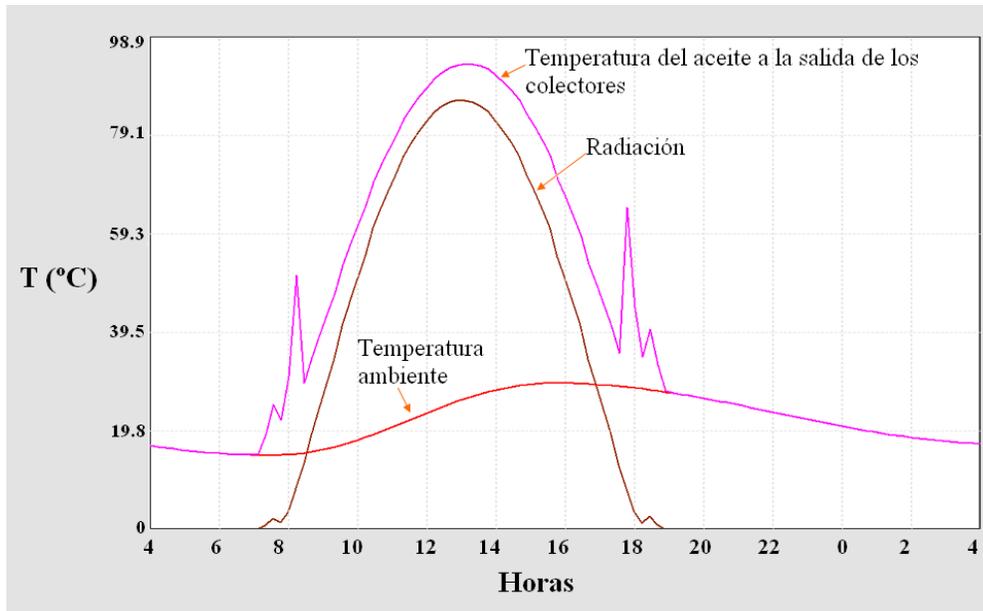


Figura 7-5 Temperatura de aceite en los colectores y radiación solar en un día de operación.

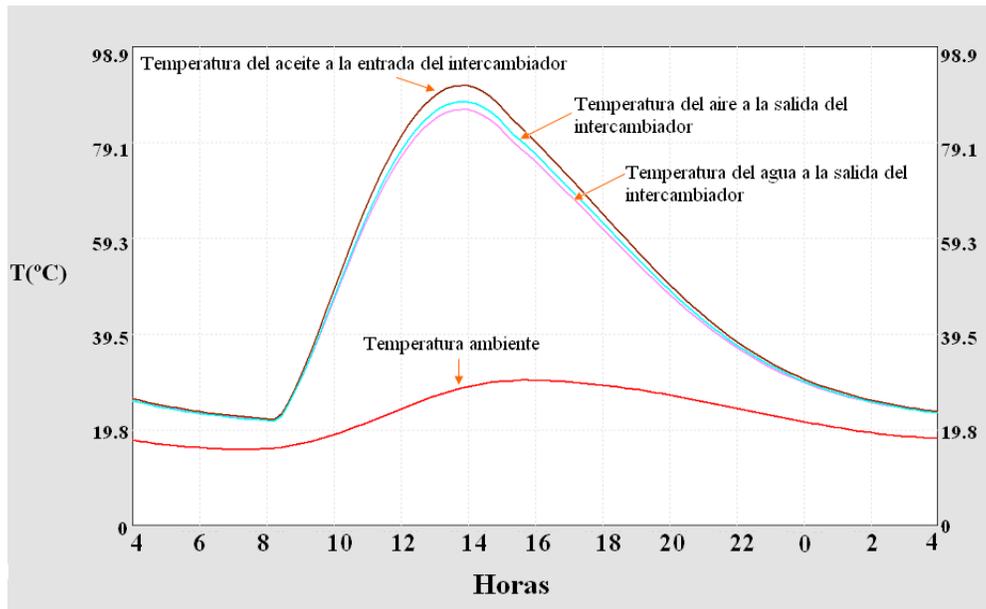
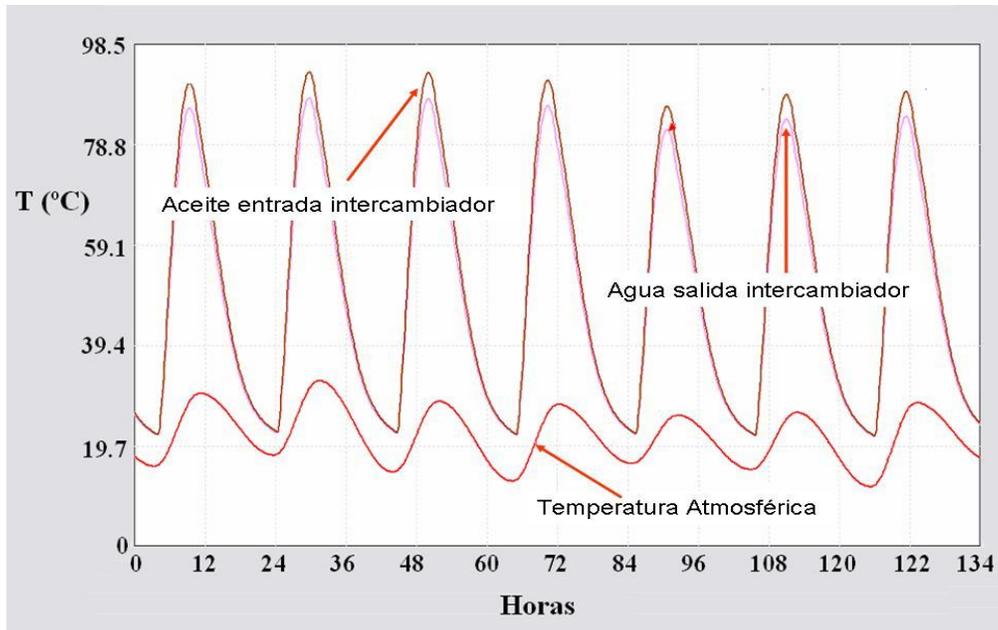


Figura 7-6 Temperaturas de los flujos del sistema en un día de operación.



*Figura 7-7 Comportamiento de las temperaturas de agua y aceite a lo largo de varios días*

#### **7.4.2 Efecto sobre la producción de destilado**

Al observar el comportamiento predicho para la tasa de condensación instantánea, alcanzada en el condensador, se pudo apreciar que su magnitud es fuertemente dependiente de la temperatura alcanzada por el agua a la salida del intercambiador de calor, que es la temperatura con la que entra el agua a la torre de evaporación, como puede observarse en la Figura 7-8 y Figura 7-9. Éste resultado, por sí solo, explica la aparente contradicción discutida anteriormente, pues muestra que la temperatura alcanzada por el agua en el intercambiador de calor tiene un efecto determinante en la capacidad de producción de destilado del sistema. Es la temperatura la variable que gobierna, y no la cantidad de energía colectada, lo importante es que el agua que llega a la torre lo haga a temperaturas cercanas al punto de ebullición, durante el mayor tiempo posible, y con ello se tendría la máxima tasa de producción de destilado.

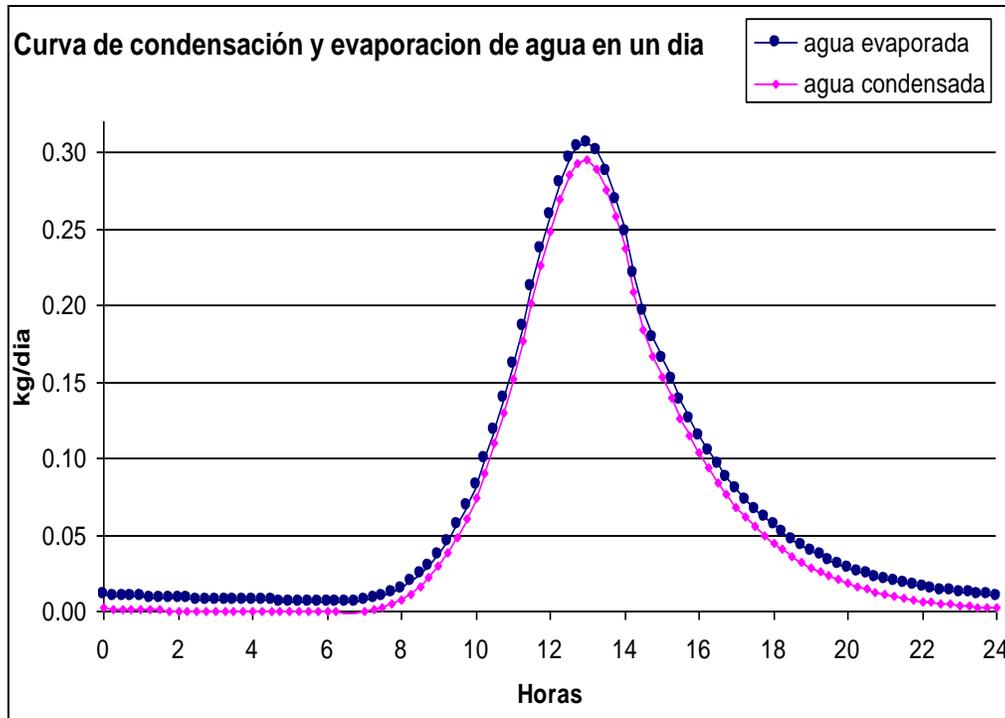


Figura 7-8 Curva de condensación y evaporación instantáneas de agua, en un día de operación.

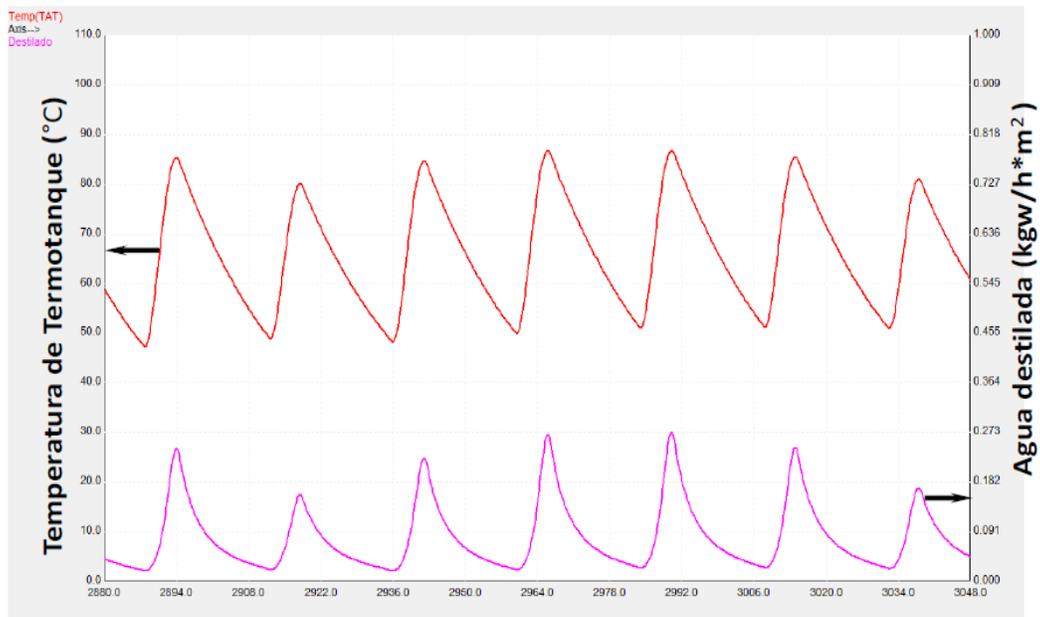


Figura 7-9 Temperatura del agua que entra al evaporador y producción instantánea de agua [Escobedo Bretado 2010].

## **7.5 Limitaciones del sistema propuesto originalmente**

Como resultado del análisis paramétrico realizado al sistema original se pudo establecer lo siguiente:

1) La temperatura alcanzada por el aceite térmico en el campo de colectores solares es insuficiente, para lograr que el sistema propuesto pueda operar a máxima eficiencia, por lo que se requiere contar con otro tipo de colectores que permitan alcanzar mayores temperaturas.

2) Aún si se logra tener aceite térmico a mayor temperatura, la naturaleza cíclica del suministro de energía hace forzoso el regular el flujo de aceite que alimenta al calentador de agua, para mantener la temperatura cercana al punto de ebullición, pero evitando que el sistema se presurice o que la temperatura baje.

## **7.6 Modificación al diseño original**

Se propone cambiar el tipo de colectores, de planos simples a tubos evacuados de forma tal que sea posible alcanzar temperaturas de aproximadamente 130°C a 150°C. Se propone introducir un sistema de control de temperatura, regulando el flujo del agua que entra al calentador de agua, que mantenga la temperatura de la misma cercana a 90°C.

### **7.6.1 Colector solar de tubos evacuados**

El modelo utilizado del colector solar de tubos evacuados tiene una curva de eficiencia cuadrática. Los colectores de tubos de vacío utilizados corresponden a un modelo disponible comercialmente por SOLMANN S.C. ([www.solmann.pl](http://www.solmann.pl)) en Polonia, la construcción puede verse en la Figura 7-10. El colector solar tiene un área de captación de 2

m<sup>2</sup>, un caudal mínimo de 72L/h, una presión de operación de 6bar y una temperatura de estancamiento de 199°C. La curva de eficiencia relativa provista por el fabricante se muestra en la Figura 7-11.

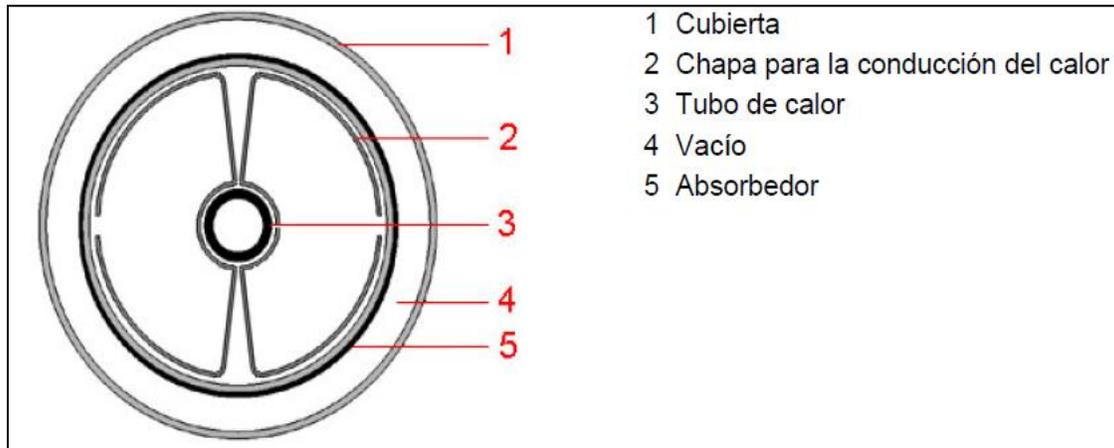


Figura 7-10 Estructura del tubo de calor en el colector.

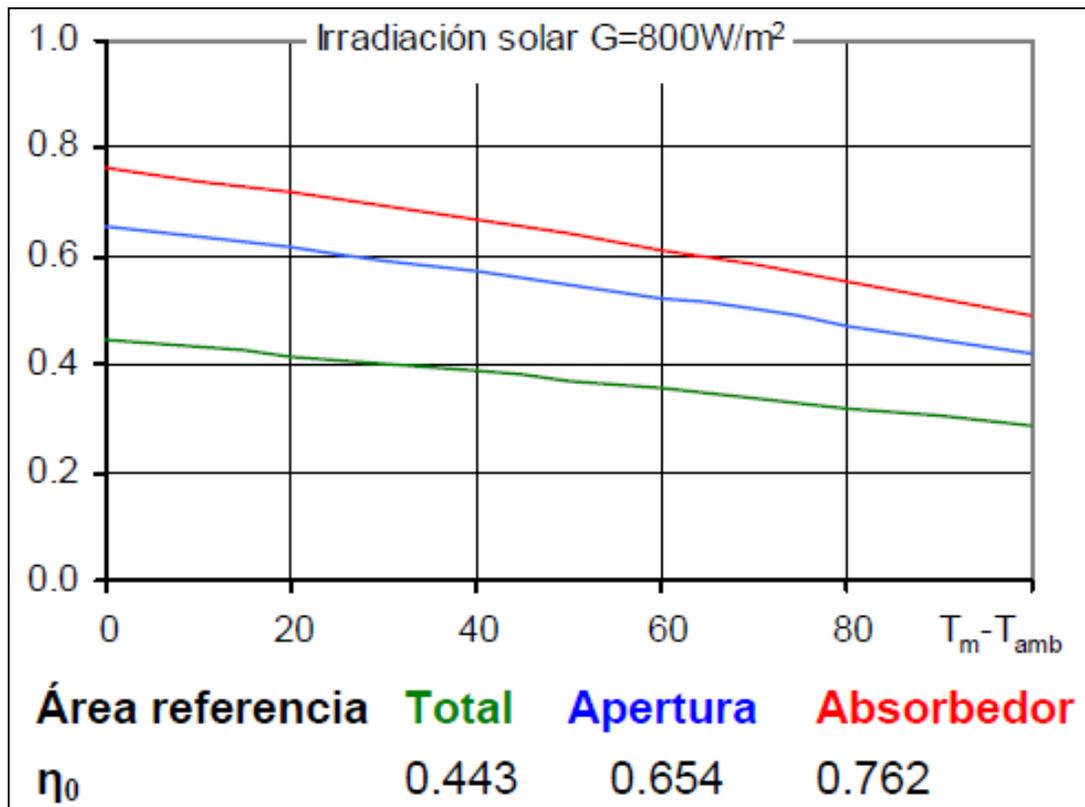


Figura 7-11 Curva de eficiencia relativa del colector de tubos de vacío.

## **7.6.2 Sistema de Control de flujo**

Se introdujo una bomba de flujo variable disponible en TRNSYS, esta funciona mediante una señal de control. El control tiene una set point fijo de temperatura de 90°C, este a su vez controla el caudal de entrada de agua al intercambiador de calor mediante la bomba de flujo permitiendo mantener la temperatura del agua fija al set point.

### *7.6.2.1 Control*

Se utilizo un controlador de retroalimentación iterativa disponible en TRNSYS, que calcula la señal de control ( $u$ ) para mantener la variable controlada ( $y$ ) en el punto de ajuste (Set Point). Este controlador puede adaptar su señal de control de forma continua o con un paso de tiempo discreto mucho más corto que el intervalo de tiempo de simulación de TRNSYS. El controlador dispone de una señal ON / OFF y los límites pueden ser fijados para la señal de control.

El controlador de retroalimentación iterativa utiliza un método de la secante para calcular la señal de control. El principio de funcionamiento es el siguiente:

En la Figura 7-12. La trayectoria del sistema en el plano ( $u$ ,  $e$ ) es la línea gruesa, salpicada de gris. El primer controlador genera una señal de control  $u_1$ . El sistema es simulado usando ese valor, lo que da el punto 1. El controlador genera una segunda señal  $u_2$ , que se elige para ser diferente, pero no demasiado lejos de  $u_1$ . Ahora, el sistema emite una señal de error ( $e$ ) que corresponde al punto 2. El controlador extrapola la línea entre los puntos 1 y 2, y calcula el valor de  $u$ . En este ejemplo, este valor está fuera del rango permitido, por lo que se utiliza  $U_{min}$ . Esto le da el punto 3. Una interpolación lineal entre los puntos 2 y 3 le da el punto 4. Los puntos 5 y 6 se obtienen de manera similar y el controlador se detiene en la iteración cuando la tolerancia ( $tol$ ) se

alcance o cuando la variación en la salida del controlador se encuentra dentro de los límites de tolerancia global.

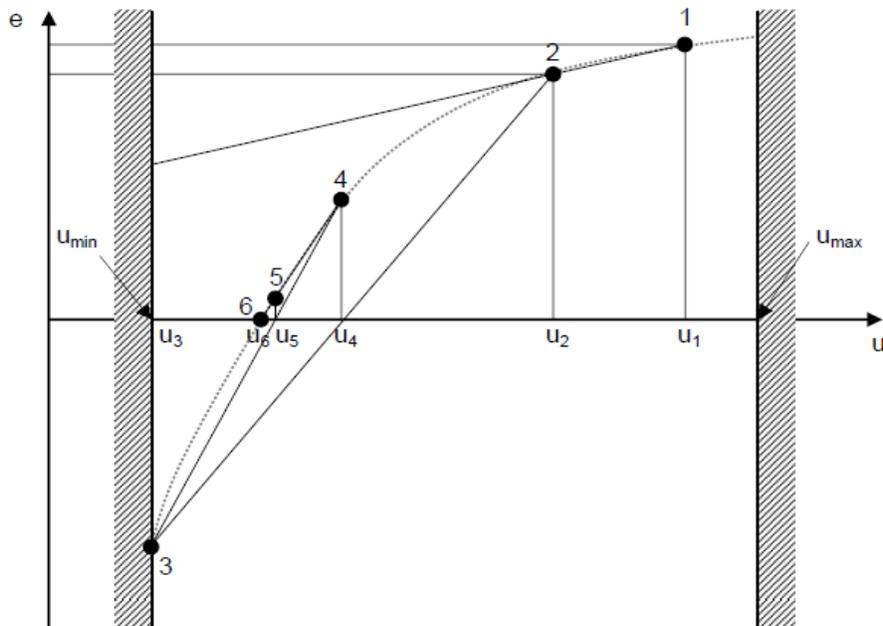


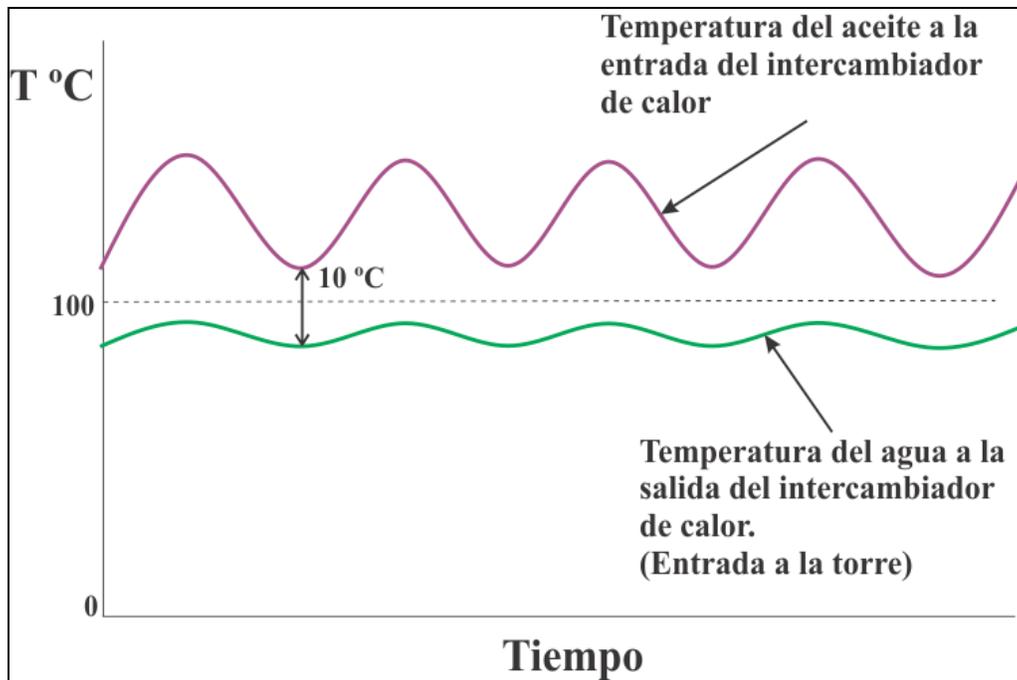
Figura 7-12 Método de la secante utilizado en el control.

#### 7.6.2.2 Bomba de flujo variable

Se utilizó una bomba de velocidad variable disponible en TRNSYS, que es capaz de mantener una masa caudal de salida entre cero y un valor dado. La tasa de flujo de masa de la bomba varía linealmente con la configuración de la señal de control. La bomba toma caudal total como entrada, pero pasa por alto el valor, excepto para realizar los controles de balance de masa y establece el caudal de salida en función de su parámetro de caudal nominal y el valor de su señal de entrada de control.

Con lo anterior se obtiene un comportamiento similar a lo mostrado en la Figura 7-13, en el cual se logra mantener estable la temperatura del agua que entra a la torre de evaporación, a un valor cercano a los 90°C, mientras que el efecto de la disponibilidad cíclica de energía solar afecta

solamente a la temperatura del aceite térmico, pero el efecto del tamaño del termotanque y el sistema de control de temperatura, sumados a la disponibilidad de temperaturas altas en el aceite, permiten mantener constante la temperatura del agua que llega a la torre de evaporación.



*Figura 7-13 Comportamiento óptimo de las temperaturas de agua y aceite.*

Con lo anterior, implementado en el simulador, se procede a analizar nuevamente el efecto del tamaño del termo-tanque, el número de colectores utilizado y el del flujo de agua que circula por el sistema, para encontrar el diseño óptimo del nuevo sistema.

## **7.7 Análisis Paramétrico**

Se modeló el sistema descrito en la plataforma de simulación TRNSYS, incorporando la modelación del funcionamiento de la torre de evaporación y la del condensador. Utilizando las condiciones climáticas

de la ciudad de Chihuahua, México, se realizó un estudio paramétrico del sistema para determinar el efecto de utilizar diferente número de colectores solares, volumen de termo tanque y diferentes flujos de agua. Se simuló el comportamiento del sistema a lo largo de un año de operación continua, contabilizando la cantidad de condensado que se logra producir durante ese periodo de tiempo. El objetivo del análisis es determinar cómo varía la producción de destilado, en kilogramos de agua destilada por año y por metro cuadrado de colectores utilizados. Con ello se determinan las características del diseño óptimo del sistema de destilación propuesto. La Tabla 7-1 muestra los parámetros que se variaron en el análisis paramétrico.

*Tabla 7-1 Tabla paramétrica tomada para la simulación*

Variables	Cantidad	Combinaciones
Numero de Colectores solares	2, 4, 6, 8, 10 y 12	6
Volumen de Termo-tanque (m <sup>3</sup> )	0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.5, 1.8, 2, 2.5, 3, 4, 5 y 6	13
Flujo de Agua de entrada a al evaporador (kg/h)	De 1 a 220	30
Número total de corridas		2340

El análisis de sistemas dependientes del clima es especialmente complicado debido a que las condiciones cambian a cada momento y resulta difícil hacer comparaciones con diferentes configuraciones de variables.

La Tabla 7-2 presenta algunas de las variables que intervienen en el sistema de desalinización. Debido al gran número de variables, se

eligieron tres de ellas para realizar simulaciones (Tabla 7-1) y el resto toma valores en función de las primeras.

*Tabla 7-2 Variables del sistema de destilación.*

<b>fuerce</b>		<b>Variable</b>	<b>Naturaleza</b>
<b>Climática</b>	Ambiental	Temperatura del Aire	Dependiente del ambiente
		Radiación solar	Dependiente del ambiente
<b>Equipo Térmico</b>	Colectores	Aéreas	independiente
	Termotanque	Volumen	independiente
		Coeficiente de pérdidas de calor	independiente
	Intercambiador de calor Aceite-Agua	Coeficiente de transferencia de calor	independiente
	Intercambiador de calor Aceite-Aire	Coeficiente de transferencia de calor	independiente
	Evaporador	Relación de flujo agua-aire	independiente
		Humedad relativa del aire de salida	independiente
	Condensador	Temperatura del Aire de salida	independiente
		Humedad relativa del aire de salida	independiente
Bomba de aceite a Colectores	Flujo de Aceite	independiente	
<b>Flujo de Fluidos</b>	Bomba de aceite al intercambiador de calor aceite-agua	Flujo de Aceite	Depende el flujo de agua
	Bomba de agua al evaporador	Señal de Control	Set point de Temperatura del agua
	Bomba de aceite al intercambiador de calor aceite-aire	Flujo de Aceite	Depende del flujo de aire
	Ventilador para aire al evaporador	Flujo de Aire	Depende del flujo de agua

### 7.7.1 Tabla paramétrica en TRNYS

La tabla paramétrica se hizo mediante TRNEdit, que es una herramienta de TRNSYS que se utiliza para modificar archivos de entrada.

El archivo madre de TRNSYS se modificó mediante TRNEdit para seleccionar cuáles serán los parámetros de estudio, y posteriormente realizar las corridas paramétricas.

Dentro de TRNEdit se hace una tabla paramétrica donde se introducen los parámetros a analizar y el número de combinaciones que se desean realizar, posteriormente se pone en marcha la corrida paramétrica y los resultados numéricos son arrojados en un archivo de texto que posteriormente son analizados. En la Figura 7-14 se puede ver la tabla paramétrica en TRNEdit.

The screenshot shows the TRNEdit interface. The main window displays a code file with the following content:

```
20 0.0 1 0.6 0.9
-----
* EQUATIONS "Variables"
*
CONSTANTS 3
NumCol = 10
VolumenTAT = 1
ma = 1

EQUATIONS 16
mw = 10*ma
AreaCol = NumCol*2
TAmbiente = [2,4]
Radiación = [22,7]/3.6
FlujoAceiteLH = LcMinColAceite*60*NumCol
FlujoAceiteHXow = mw*(Cpw/CpOil)
FlujoAceiteHXoa = ma*(Cpa/CpOil)
LcMinColAceite = 2
CpOil = 2
Cpw = 4.19
Cpa = 1.005
HRaiC = HRaoE
HRaoC = HRaiC
HRaoE = 100
UAHXO_w = 2232
UAHXO_a = 72
*SUNIT_NAME Variables
*$LAYER Main
*$POSITION 320 58
-----
* Model "HXO-a" (Type 5)
*
UNIT 10 TYPE 5 HXO-a
*SUNIT_NAME HXO-a
*$MODEL \Program Files\Trnsys16\Studio\Proformas\Heat Exchangers\Counter Flow\TYPE5b.tmf
```

On the right side, a table window displays the parametric data:

	1	2	3
1	1.500	2.000	1.0000
2	4.000	4.000	1.0000
3	8.000	6.000	1.0000
4	11.00	8.000	1.0000
5	15.00	10.00	1.0000
6	18.00	12.00	1.0000
7	1.500	2.000	1.200
8	3.000	4.000	1.200
9	6.000	6.000	1.200
10	10.00	8.000	1.200
11	13.00	10.00	1.200
12	16.00	12.00	1.200
13	1.500	2.000	1.500
14	3.000	4.000	1.500
15	5.000	6.000	1.500
16	8.000	8.000	1.500
17	11.00	10.00	1.500
18	15.00	12.00	1.500
19	1.500	2.000	1.800
20	2.500	4.000	1.800
21	4.000	6.000	1.800
22	7.000	8.000	1.800
23	10.00	10.00	1.800
24	13.00	12.00	1.800
25	1.200	2.000	2.000
26	2.500	4.000	2.000
27	4.000	6.000	2.000
28	6.000	8.000	2.000
29	9.000	10.00	2.000
30	11.00	12.00	2.000

Figura 7-14 Tabla paramétrica en TRNEdit.

## **8. RESULTADOS**

En este trabajo se llevó a cabo un análisis de simulación de un sistema de desalinización solar. Los datos anualizados obtenidos son el resultado de la integración diaria de las funciones de respuesta. Los resultados de la simulación muestran principalmente la producción anual de agua destilada, el tiempo anual de operación del subsistema de destilación y la producción anual de agua destilado por metro cuadrado de colectores utilizados.

### **8.1 Comportamiento Horario**

La simulación permite ver gráficamente los resultados del comportamiento del sistema de desalinización día por día los 365 del año con resolución de 15 minutos.

#### **8.1.1 Comportamiento anual**

En la Figura 8-1 se muestran la manera en que la simulación presenta los datos en pantalla. Se observa el comportamiento continuo de las diferentes temperaturas del sistema a lo largo de un año con las condiciones climáticas de la ciudad de chihuahua. En esta figura el eje horizontal esta escalado en horas debido a que es la manera en que lo arroja el programa. Los resultados mostrados en la Figura 8-1 corresponden a una simulación con 12 colectores ( $24 \text{ m}^2$ ), un volumen de termotanque de  $3 \text{ m}^3$  y un flujo másico de agua de  $10 \text{ kg/h}$ . Se observa que en el periodo de verano hay un decremento de temperatura en comparación al invierno. Esto se debe a la inclinación ( $43^\circ$  con respecto a la horizontal) del colector. Sin esta inclinación del colector, el comportamiento seguiría la forma de una curva cóncava hacia abajo como lo muestra la Figura 8-2.

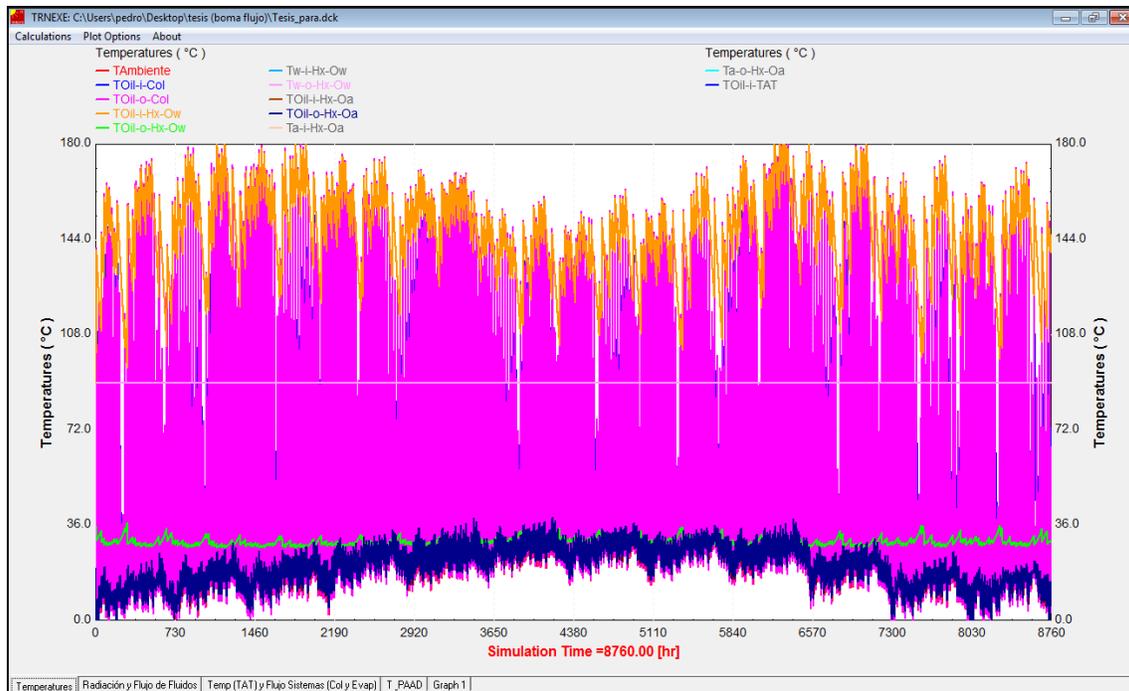


Figura 8-1 Pantalla en TRNSYS del comportamiento de temperaturas a lo largo del año con una inclinación del colector de 43°.

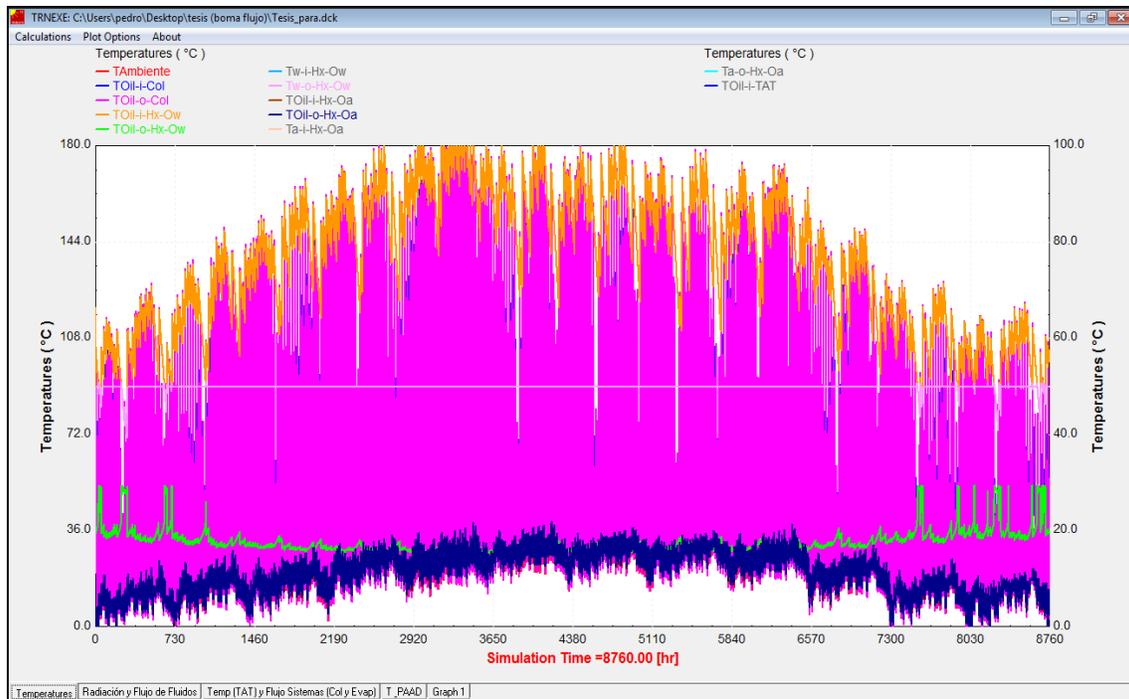


Figura 8-2 Pantalla en TRNSYS del comportamiento de temperaturas a lo largo del año sin inclinación del colector.

En el presente trabajo los colectores son colocados con una inclinación de 43°. Los resultados pueden tomarse durante ciertos intervalos de tiempo para observar el comportamiento detalladamente. Para seleccionar estos intervalos se colocan las horas inicial y final del segmento que se desea analizar. Y para saber el número de horas de un mes determinado, se presenta la Tabla 8-1. Esta tabla muestra la cantidad de horas por año y mes.

*Tabla 8-1 Relación horas-mes-año*

<b>Mes</b>	<b>Días</b>	<b>Horas por mes</b>	<b>Horas acumuladas</b>
<b>Enero</b>	31	744	744
<b>Febrero</b>	28	672	1416
<b>Marzo</b>	31	744	2160
<b>Abril</b>	30	720	2880
<b>Mayo</b>	31	744	3624
<b>Junio</b>	30	720	4344
<b>Julio</b>	31	744	5088
<b>Agosto</b>	31	744	5832
<b>Septiembre</b>	30	720	6552
<b>Octubre</b>	31	744	7296
<b>Noviembre</b>	30	720	8016
<b>Diciembre</b>	31	744	8760

## 8.2 Temperatura ambiente y Radiación solar

La temperatura ambiente aumenta a medida que avanza el día. Cuando la radiación solar disminuye, la temperatura ambiente hace lo mismo. Se observan pues, los ciclos de día y noche, como se puede ver en la Figura 8-3.

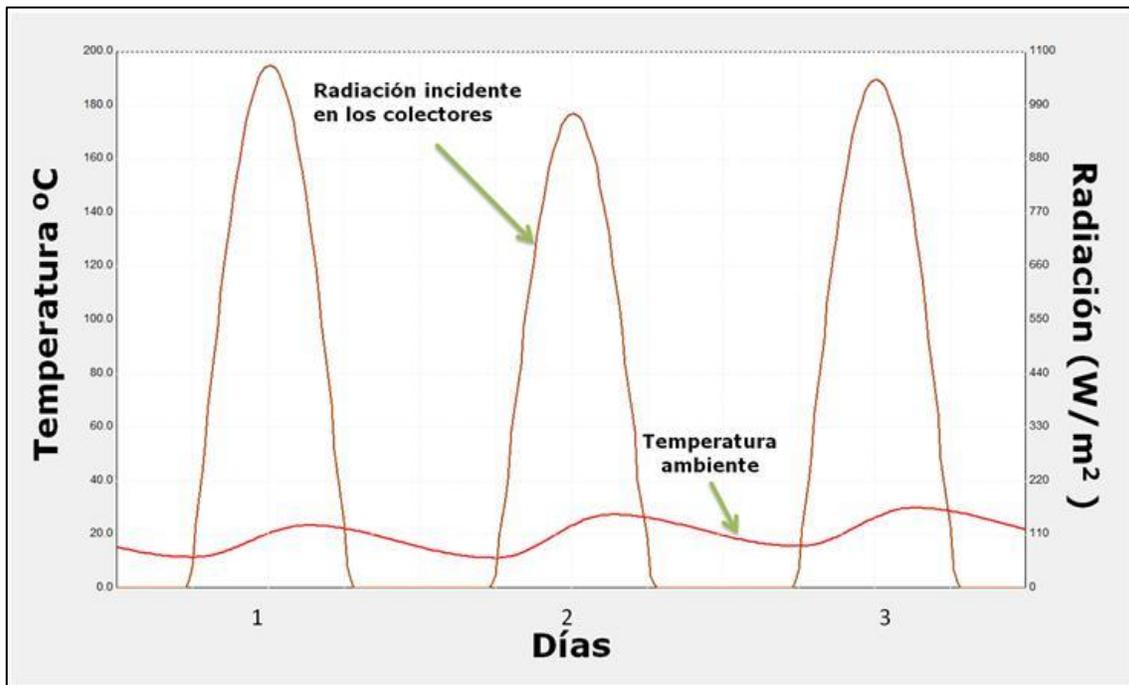


Figura 8-3 Temperatura ambiente y radiación solar los días 1, 2 y 3 de Mayo.

La radiación solar que se muestra es la radiación incidente en una superficie con inclinación de  $43^\circ$  sobre la horizontal, que es la inclinación de los colectores solares. Los picos máximos corresponden a la hora del día donde hay más radiación solar que es alrededor de las 2 de la tarde.

### 8.3 Temperaturas de aceite y agua en los intercambiadores de calor

Analizando los resultados obtenidos mediante simulación, se observa que el tipo de colectores solares, el almacenamiento térmico y los flujos de agua y aire son los parámetros más importantes en el sistema de destilación. La energía almacenada en el termo tanque es dependiente de la cantidad de energía solar disponible y de la capacidad de los colectores solares en transformar la radiación del sol en energía térmica. En la Figura 8-4 se muestra como la disponibilidad cíclica de la radiación solar determina el comportamiento de la temperatura en el aceite térmico en los colectores solares.

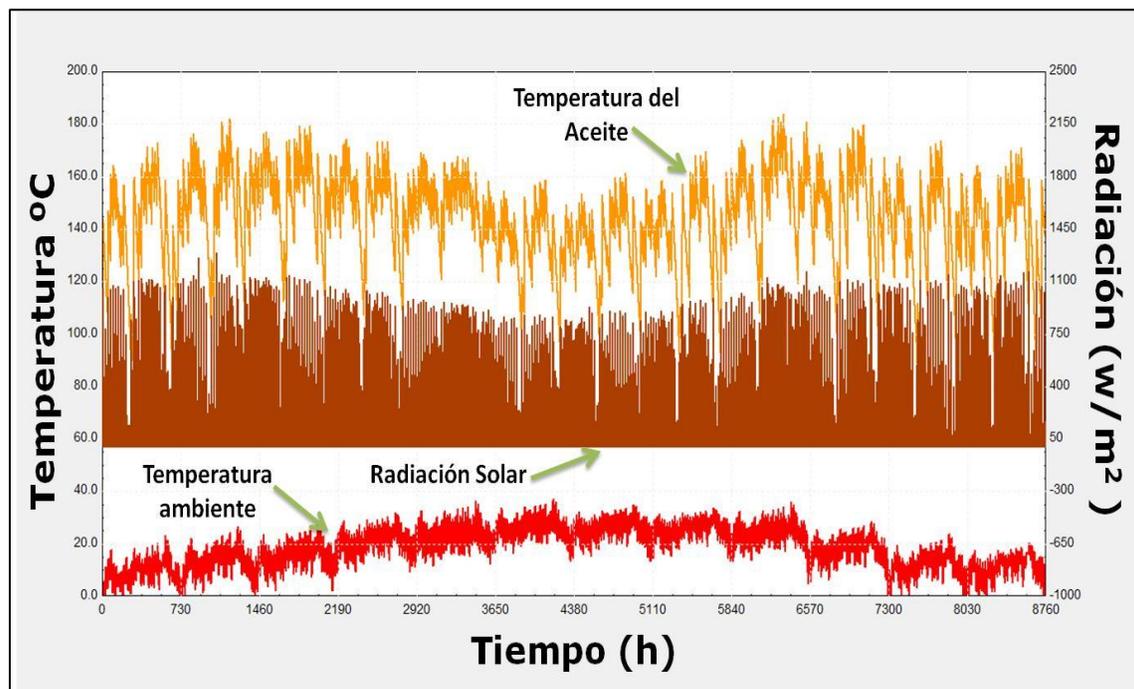
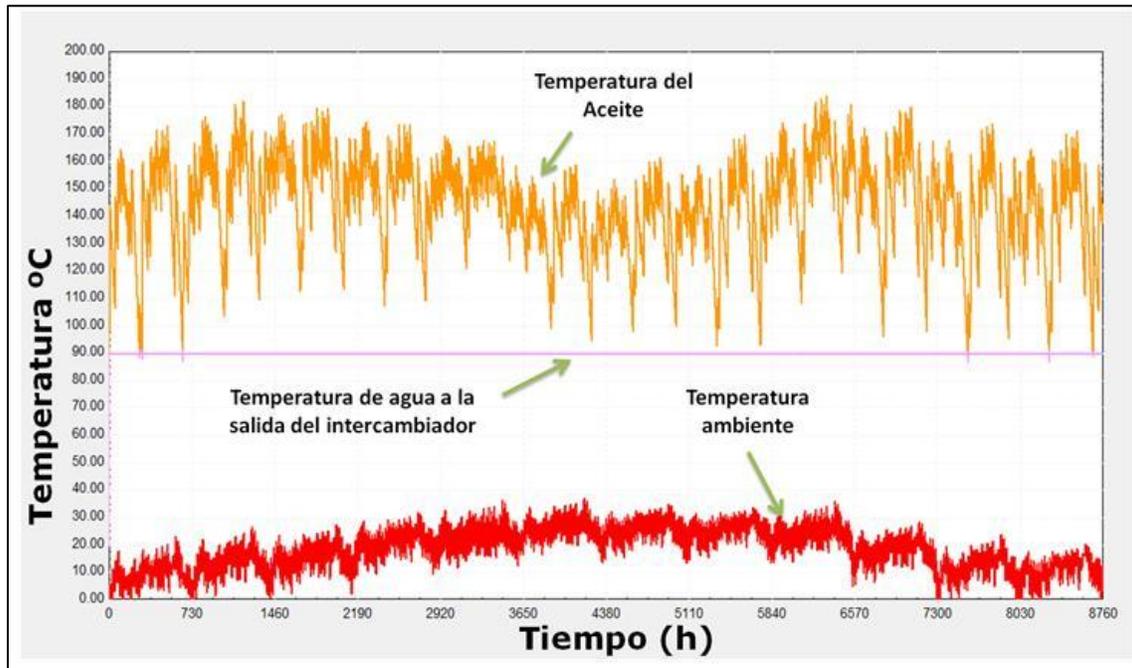


Figura 8-4. Radiación solar y temperatura del aceite en los colectores.

Empleando el control de flujo, se logra mantener controlada la temperatura del agua de alimentación a la torre de destilación en 90°C.

La Figura 8-5 muestra el comportamiento simultáneo y continuo de las temperaturas del aceite a la salida de los colectores solares y del agua a la salida del intercambiador de calor durante un año de operación.

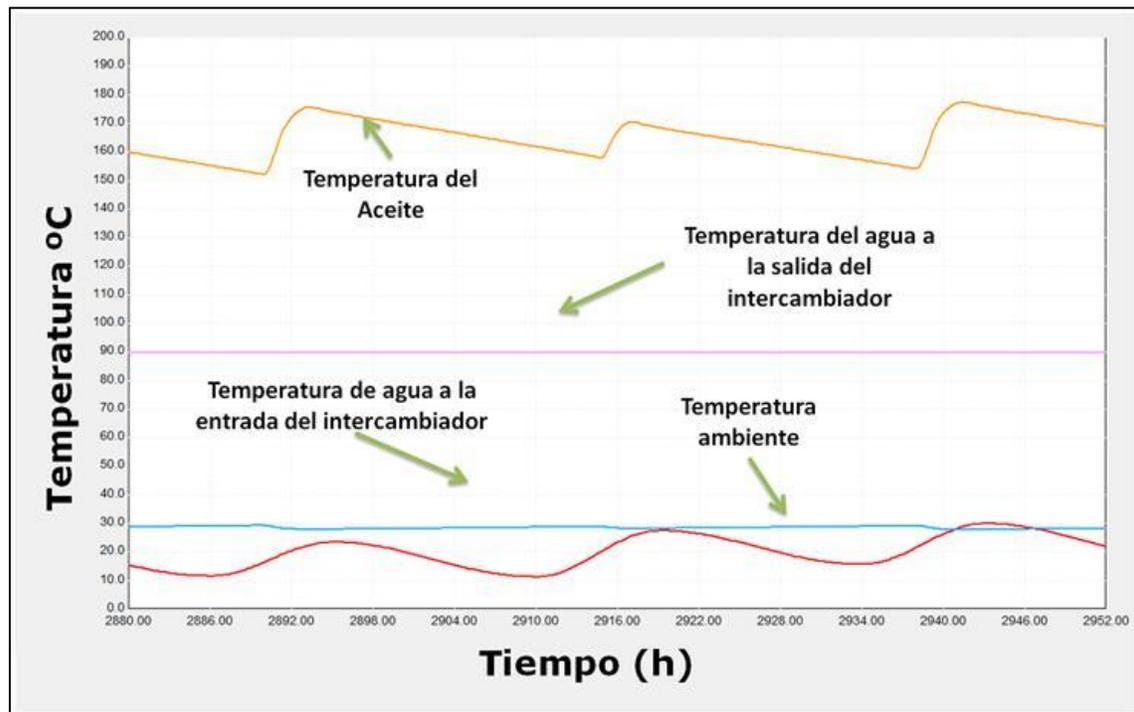


*Figura 8-5 Temperaturas de aceite y agua en el intercambiador de calor en todo un año de operación.*

En esta figura se puede ver que la única temperatura que se ve afectada por el efecto cíclico de la radiación solar es la del aceite térmico. Pero debido al uso de colectores solares de tubos de vacío se alcanzan temperaturas cercanas a los 180°C en el aceite térmico, y gracias a estas temperaturas la cantidad de energía que se almacena es suficiente para mantener al sistema en condiciones adecuadas de operación incluso cuando no hay radiación solar.

En cuanto a la temperatura del agua que entra a la torre de evaporación, esta se mantiene fija a 90°C debido al uso del control de flujo que permite mantener al sistema en condiciones controladas de operación.

Por lo tanto la adición del control de flujo y la utilización de los colectores solares de tubos de vacío, permiten obtener las mejores condiciones de operación del sistema de destilación, esto quiere decir que la energía almacenada es la suficiente como para mantener funcionando al sistema continuamente durante las 24 horas del día, y mediante control de flujo se tiene la posibilidad de mantener la estabilidad de la temperatura del agua a la entrada del evaporador haciendo al sistema muy eficiente, como puede verse en la Figura 8-6 que muestra el comportamiento del sistema en los tres primeros días del mes de Mayo.



*Figura 8-6 Temperaturas de aceite y agua en el intercambiador de calor para el 1, 2 y 3 de mayo.*

La cantidad de agua que se suministra al sistema de destilación depende de la señal de control para que se pueda mantener la temperatura del agua a 90°C. Es decir, que la estabilidad térmica del agua es función de

la cantidad de flujo, por lo tanto, para mantener fija la temperatura del agua se necesita que el flujo de agua vaya variando según las necesidades de la señal de control, como se puede ver en la Figura 8-7.

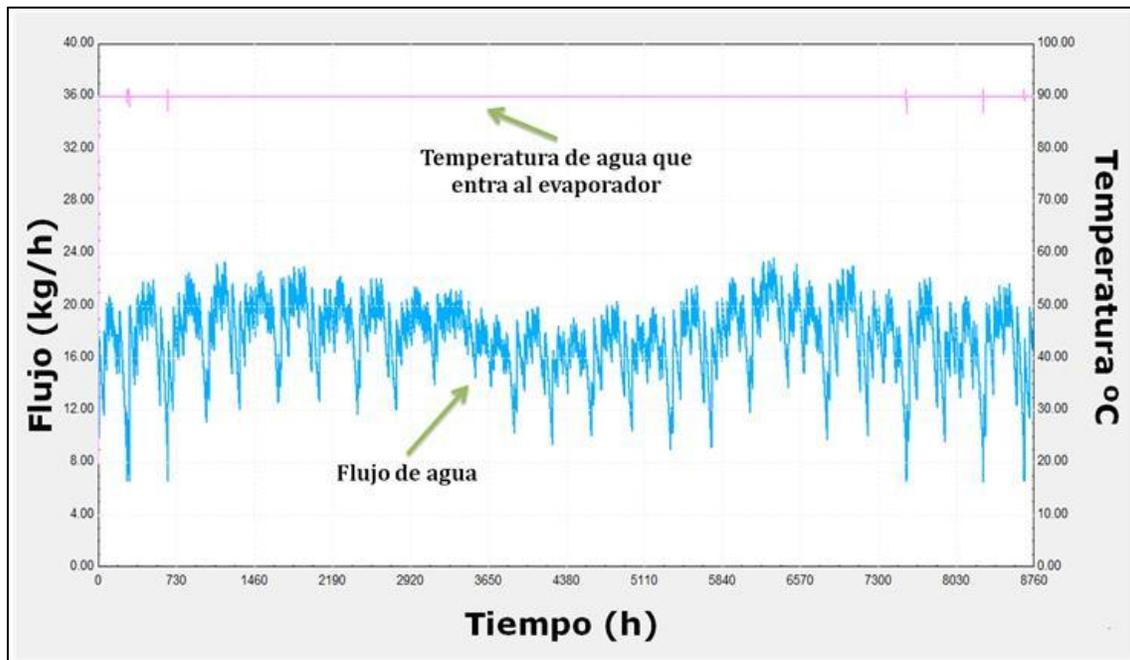


Figura 8-7 Temperatura y flujo de alimentación de agua al sistema.

## 8.4 Producción de destilado

La temperatura alcanzada por el agua en el intercambiador de calor tiene un efecto determinante en la capacidad de producción de destilado del sistema. Es la temperatura la variable que gobierna, y no la cantidad de energía colectada, es por ello, que al mantener la temperatura del agua que llega a la torre de evaporación cercana al punto de ebullición se tendrá la máxima tasa de destilado. Por lo tanto, mientras se tenga la temperatura del agua lo mas alta posible y controlada, la tasa de producción de destilado se mantiene constante en el más alto valor como se muestra en la Figura 8-8.

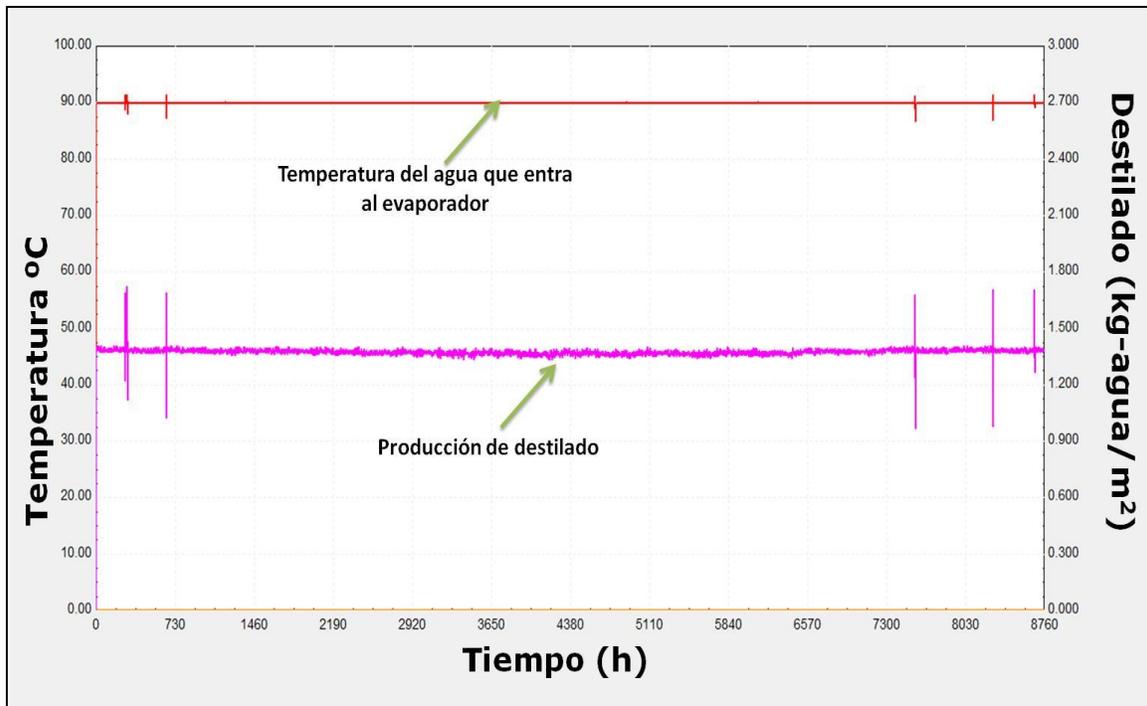


Figura 8-8 Producción de destilado

## 8.5 Análisis paramétrico

Los resultados del análisis paramétricos muestran que la producción anual máxima de destilado está directamente relacionada con la cantidad de energía recolectada durante los días.

En la Figura 8-9, se puede ver que conforme aumenta el volumen del almacenamiento térmico y el número de colectores, solares la cantidad de destilado anual aumenta significativamente. También puede notarse que para pocos colectores solares ( 2, 4 y 6 ), al aumentar el volumen de termo-tanque, la producción de destilado baja, esto debido a que entre más grande sea el termo-tanque se necesita más energía térmica para mantener caliente el aceite y con poco colectores la energía recolectada es insuficiente. Por otra parte para mayor cantidad de colectores solares (8, 10 y 12), y volúmenes de termo-tanques grandes la producción de agua destilada aumenta. Pero a partir de un volumen

de termo-tanque de  $4\text{m}^3$  la cantidad de destilado se mantiene casi constante, para el caso de 8, 10 y 12 colectores solares da lo mismo usar un termo-tanque de  $4\text{m}^3$  o de  $6\text{m}^3$ .

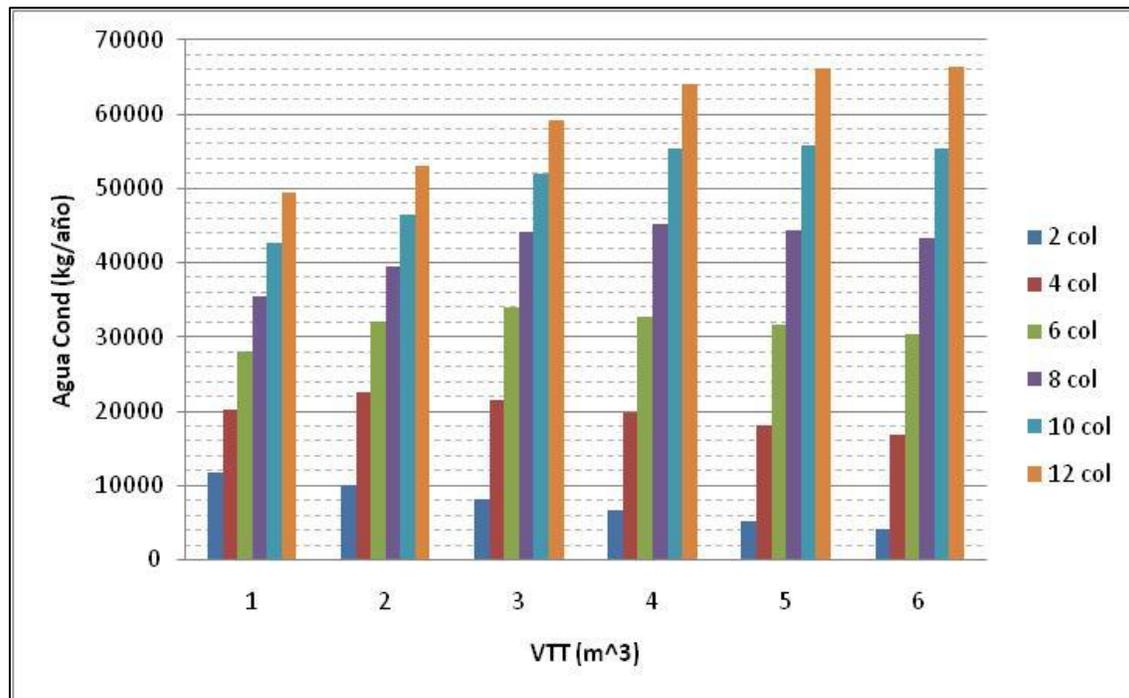


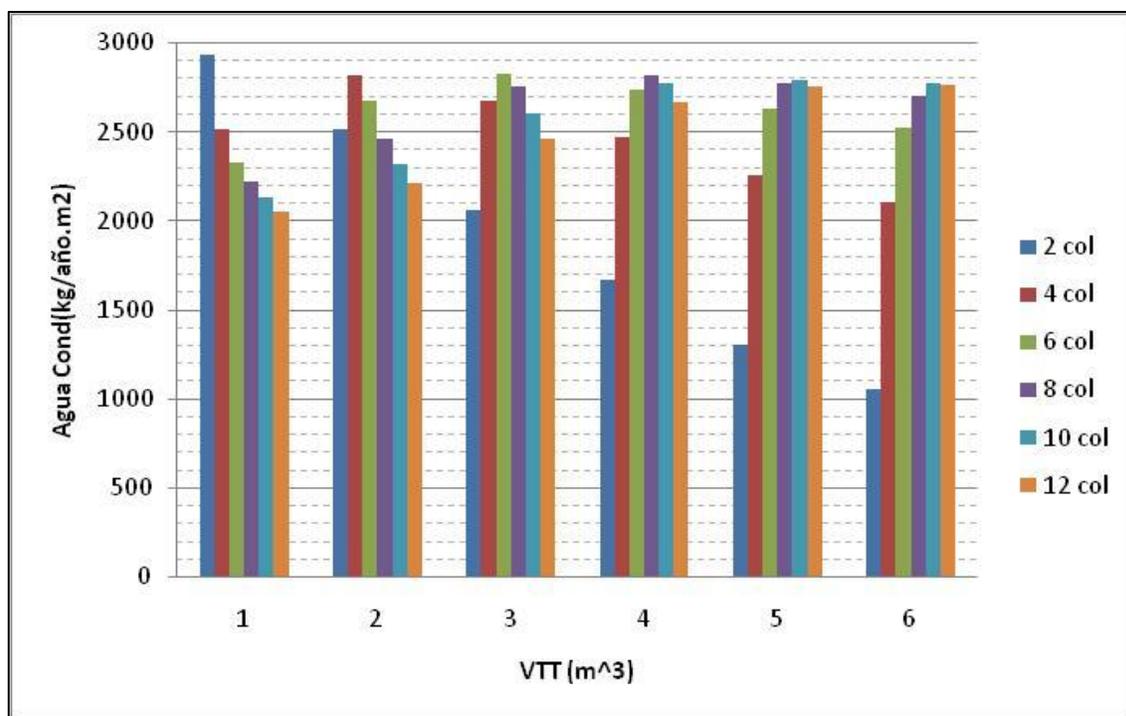
Figura 8-9 Producción anual de destilado

Un dato importante es la relación que se tiene entre la cantidad de destilado por metro cuadrado de colector solar utilizado, ya que la máxima eficiencia del sistema se tiene cuando la cantidad de destilado en un metro cuadrado de colector solar sea la más alta.

En la Figura 8-10, se puede ver que para un volumen de termo-tanque utilizado hay un número óptimo de colectores solares. Puede notarse que para un sistema dotado con un termo-tanque de  $1\text{m}^3$  de almacenamiento térmico, la máxima producción de agua destilada por metro cuadrado se obtiene con 2 colectores solares. Y al ir aumentando el volumen del termo-tanque el arreglo óptimo de colectores solares también aumenta, como por ejemplo, para un volumen de

almacenamiento de  $6\text{m}^3$  el número de colectores óptimos es de diez a doce.

Un aspecto importante, es que la producción máxima de destilado por metro cuadrado es similar para cualquier arreglo de volumen de termo-tanque y colectores solares. Como por ejemplo para volúmenes de termo-tanques de 3, 4 y  $5\text{m}^3$  los colectores óptimos son 6, 8 y 10 respectivamente, pero la producción de destilado por metro cuadrado es la misma para los tres casos, aproximadamente  $2800\text{ kg/año.m}^2$ .



*Figura 8-10 Producción anual de destilado por metro cuadrado de colector solar utilizado.*

Otro factor que influye en la producción del destilado, es la cantidad de agua que se introduce a la torre de evaporación. Podría decirse que entre más agua se alimente al sistema, se obtendrá más agua destilada, pero no es así. Demasiada agua produciría que el sistema se enfriara y la producción de destilado bajara.

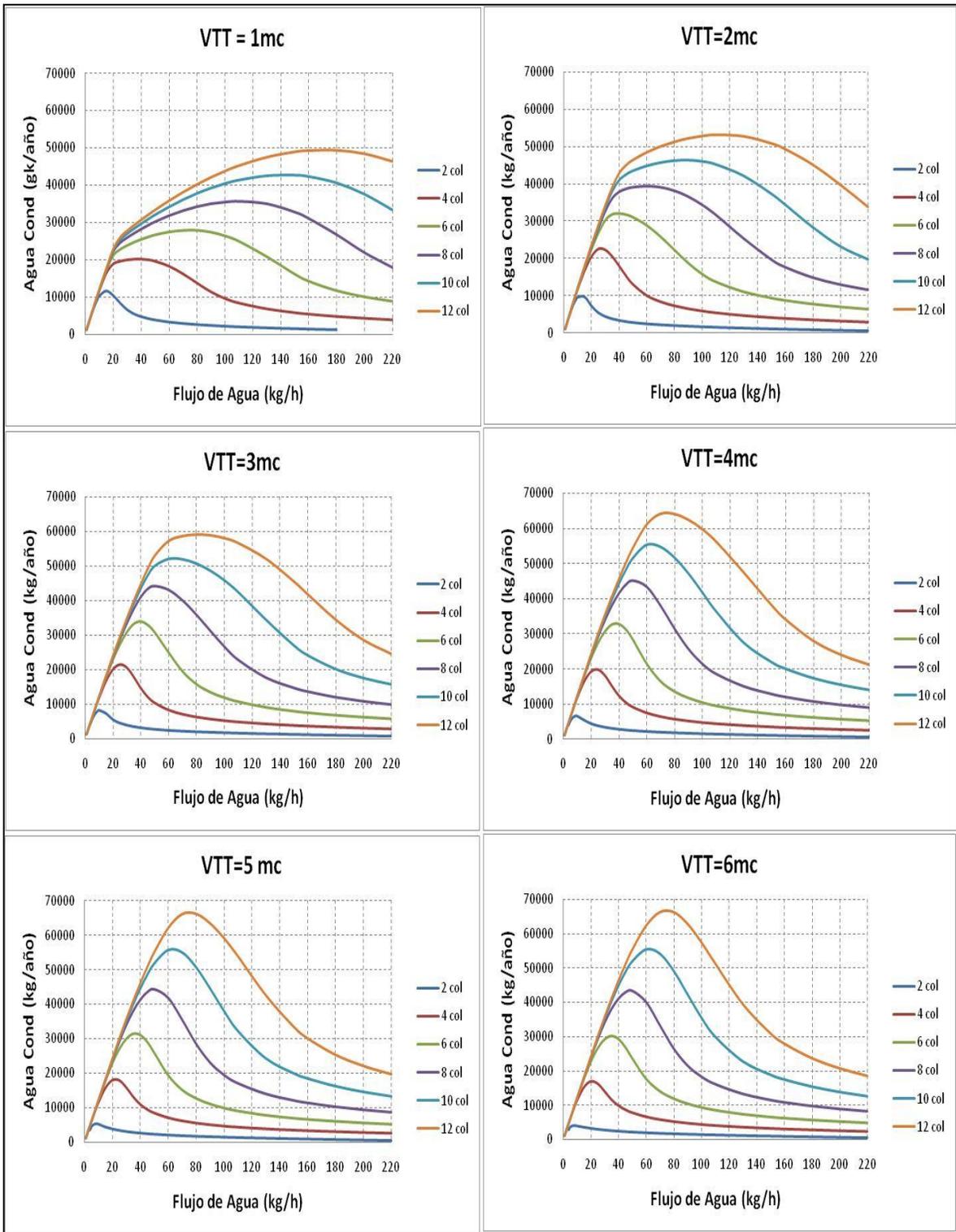
Para obtener grandes cantidades de agua destilada, se necesita tener sistemas apropiados, que tengan la capacidad de almacenar la energía suficiente para poder trabajar eficientemente. Es por ello que el análisis paramétrico permite conocer las mejores condiciones en que el sistema de destilación puede funcionar.

Para sistemas pequeños se necesita pocos colectores solares, volúmenes de termo-tanques pequeños y poco flujo de agua, pero si se desea incrementar la cantidad de flujo que se introduce al sistema, se tiene que buscar el arreglo adecuado de colectores solares y volumen de termo-tanque.

En la Figura 8-11 puede verse que para determinado número de colectores y volumen de termo-tanque, hay un flujo de agua óptimo que se representan por los máximos en las graficas.

Al ir aumentando el volumen de termo-tanque y el número de colectores solares, la cantidad de agua que se necesita también debe ser mayor. Pero la producción de destilado anual aumenta cuando el tamaño del sistema es grande, como por ejemplo para un sistema dotado de un volumen de termo-tanque de  $2\text{m}^3$  y 12 colectores solares la producción máxima de destilado se alcanza con un flujo de agua  $110\text{kg/h}$ , pero la producción muy apenas supera los 50,000 kilogramos de agua por año, mientras que para un sistema dotado con un termo-tanque de  $6\text{m}^3$ , 12 colectores solares y un flujo de agua de  $70\text{kg/h}$ , la producción anual de destilado está por encima de los 65,000 kilogramos de agua por año.

En esta figura (Figura 8-11 Producción anual de destilado por cantidad de agua suministrada al sistema para diferente numero de colectores solares y volúmenes de termo-tanques. puede verse que a partir de un volumen de termo-tanque de  $4\text{m}^3$  la producción anual de destilado se mantiene casi contante, por lo que el tamaño de termo-tanque no influye mucho en la producción del sistema.



*Figura 8-11 Producción anual de destilado por cantidad de agua suministrada al sistema para diferente número de colectores solares y volúmenes de termo-tanques.*

La Figura 8-12 muestra la producción de destilado por metro cuadrado en 6 diferentes graficas que dan la relación en utilizar diferente números de colectores solares y volúmenes de termo-tanque, donde la producción máxima de destilado se representa en los máximos de las curvas. Puede notarse que a mayor número de colectores solares se necesitan termo-tanques más grandes y la cantidad de flujo óptimo aumenta.

Se puede deducir que para un sistema dotado con un termo-tanque de  $6\text{m}^3$  y 10 colectores solares, el flujo de agua de entrada óptimo es de  $60\text{kg/h}$ , obteniendo una producción de agua destilada de  $2770\text{kg/año.m}^2$ . Con este tipo de relación se pueden determinar sistemas óptimos de diseño que trabajen a la máxima eficacia.

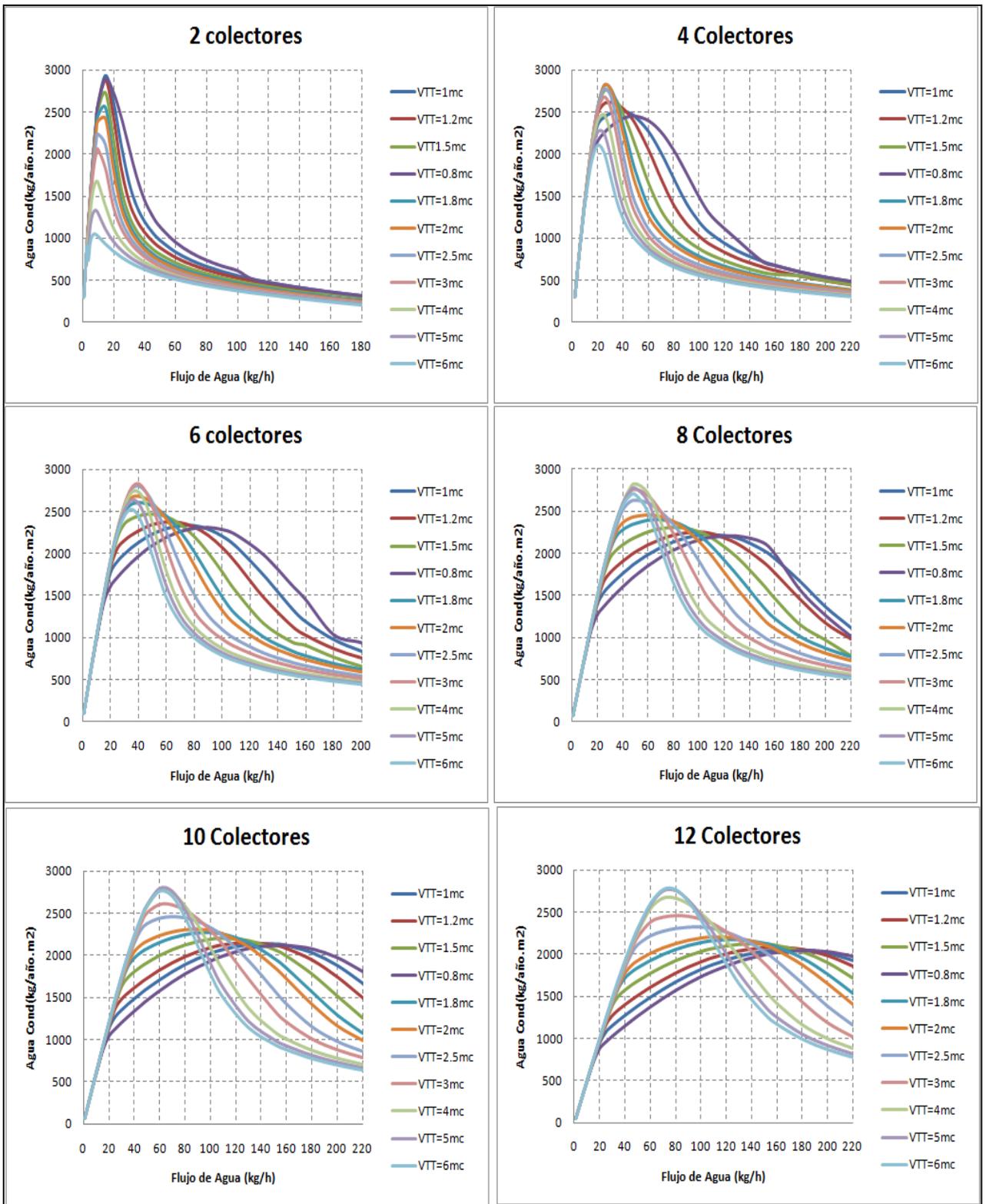


Figura 8-12 Producción de destilado por metro cuadrado a diferente número de colectores solares, termo-tanques y flujos de gua.

Con todo esto se pueden determinar los sistemas más adecuados de destilación, dando a conocer los datos precisos de diseño para lograr sistemas adecuados al momento de su construcción. La Tabla 8-2 muestra una relación de parámetros adecuados para diferentes sistemas.

*Tabla 8-2 Relación de parámetros adecuados para sistemas de destilación óptimos.*

<b>Colectores solares</b>	<b>Termo-tanque (m3)</b>	<b>Flujo de agua (kg/h)</b>	<b>Producción de agua (kg-agua/m2.año)</b>	<b>Producción de Agua anual (kg-agua/año)</b>
2	1	15	2932.898	11731.592
4	2	25	2814.23	22513.843
6	3	40	2826.269	33915.237
8	4	50	2818.447	45095.165
10	5, 6	60	2793.135	55862.706
12	5, 6	70	2762.923	66310.166

## **9. CONCLUSIONES**

Un sistema de desalinización solar de agua sólo puede ser estudiado por medio de simulación. Debido a la variabilidad intrínseca de los parámetros que influyen en el comportamiento de un sistema de desalinización solar, tales como la temperatura ambiente y radiación solar disponible, hacen necesaria la utilización de herramientas de cómputo especializadas para simular el comportamiento térmico de los sistemas sobre periodos extensos de tiempo.

Se muestra objetivamente que la simulación dinámica permite conocer el comportamiento detallado de cualquier sistema térmico, y en base a ese conocimiento es posible tomar decisiones de diseño que permitan optimizar el funcionamiento del mismo.

Se muestra que en el proceso de diseño de sistemas térmicos, el comportamiento de la sustancia de trabajo debe ser el objetivo principal de atención, y los dispositivos físicos se deben de seleccionar y dimensionar para que permitan a la sustancia de trabajo comportarse como se desea, y no proceder al revés, seleccionando primero los dispositivos.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que el uso de colectores solares de tubos de vacío y el control de flujo permitió tener al sistema en las condiciones deseadas. Se logro alcanzar mayores temperaturas en el aceite térmico y se logro mantener estable la temperatura del agua, permitiendo así obtener la máxima producción de destilado posible. Y en base a estos resultados se es posible tomar decisiones de diseño y construcción.

El uso de la energía solar ofrece una perspectiva prometedora para la cobertura de las necesidades fundamentales de agua potable en regiones remotas, donde la conexión a la red eléctrica no es factible y donde la escasez de agua potable es grave.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Amara M., Houcine I., Guizani A. and Mfialej M., Experimental study of a multiple-effect humidification solar desalination technique, *Desalination*, 170 (2004) 209–221.
- Al-Enezi, G. ; Ettouney, H. ; Fawzy, N. Low temperatura humidification dehumidification desalination prosess. *Energy Conversion and Management*, (2006). V 48 pp. 470-484.
- Belessiotis V., Delyannis E., Water shortage and renewable energies (RE) desalination possible technological applications, *Desalination*, 139 (2001) 133–138.
- Ben-Amara M., Houcine I., Guizani A. and Maalej M., Efficiency investigation of a new-design air solar plate collector used in a humidification-dehumidification desalination process, *Renewable Energy*, 30 (2005) 1309–1327.
- Bermudez C. A., Thomson M., Infield D. G., Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination*, Volume 220, Issues 1-3, (2008) Pages 431-440.
- Bouchekima B., A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria *Desalination*, (2003) Volume 159, Issue 2, Pages 197-204.
- Bruggen B. and Carlo V, Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination, *Desalination*, 143 (2002) 207–218.
- Buross O. K. . *The ABCs of Desalting*. 2a Edition. Publisher by the International Desalination Association. Topsfield, Massachusetts, USA. (2000) Disponible en línea: (<http://www.idadesal.org/pdf/ABCs1.pdf>).
- Delyannis, E. (2003). Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*. V 75 pp.357-366.
- Escobedo-Bretado, J.A. Desalinización solar de agua por humidificación-dehumidificación de aire simulado en TRNSYS,

(2010). Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

- Fuentes Díaz M. (2002). Desalación de agua, una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la república mexicana. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 27 al 31 de Octubre.
- Gerofi J., The Sydney University solar desalination pilot plant design, *Desalination*, 45 (1983) 375–382.
- Gracia-Rodriguez L., Palmero-Marrero A. and Comez-Camacho C., Comparison of solar thermal technologies for applications in seawater desalination, *Desalination*, 142 (2002) 135–142.
- Hermosillo Villalobos J. J. y Estrada Gasca C. A. (2008). Modelo matemático y prototipo experimental de un sistema desalinizador mediante humidificación de aire. Memorias de la XXXII Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Oct. 20-24, 2008. Mérida, Yucatán. México.
- Jiang H. J., Promotional policy for renewable energy development in Taiwán, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2010) ,Volume 14, Issue 3,Pages 1079-1087.
- Juarez Cortez V., Encuesta Sobre Plantas Desaladoras en Baja California Sur, SEMARNAT-BCS, Personal communication (E-mail), 04/December/2006.
- Kalogirou S., Seawater desalination using renewable energy sources, *Progr. Energy Combust. Sci.*, 31 (2005) 242–281.
- Martín, Domínguez I. R.; Pérez, Galindo J. A.; Martín, Domínguez A. y Hasen-Ridríquez M. P. (1998). Solar distillator using humid-air and heat pipes for rural areas in México. *Solar Engineering 1998*. ASME. Albuquerque, New Mexico.
- Müller-Holst H., Engelhardt M. and Scholkopf W., Small-scale thermal seawater desalination simulation and optimization of system design, *Desalination*, 122 (1999) 255–262.

- Muñoz F., Barrera E. y Gallegos E. Experiencias de la Destilación Solar. Revista de Energías Renovables ANES. (2010). V 1, p.p 21-29.
- NRC. (2004). Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap. Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en línea: <http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309091578>.
- Orfi J., Laplante M., Marmouch H., Galanis N., Benhamou B., Nasrallah S. and Nguyen C., Experimental and theoretical study of a humidification– dehumidification water desalination system using solar energy, Desalination, 168 (2004) 151–159.
- Peidong Z., Yanli Y., Jin S., Yonghung Z., Lisheng W., Xinrong L., Opportunities and challenges for renewable energy policy in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (2009) 439–449.
- Qiblawey H., Banat F., Solar thermal desalination technologies. Desalination, Volume 220, Issues 1-3, (2008) Pages 633-644.
- Said Al-Hallaj , Mohammed Mehdi Farid , Abdul Rahman Tamimi (1998), Solar desalination with a humidification--dehumidification cycle: performance of the unit. Desalination 120 (1998) 273-280.
- Telkes, M (1945), Solar distiller for life rafts, US Office Technical Service, informe 5225, MIT, OSRD, informe final para National Defense Research Communication, 11.2, p 24.
- Thomas, K.E., Overview of village scale, renewable energy powered desalination. National Renewable Energy Technical Report NREL/TP-440-22083. (1997). UC Category: 1210. DE97000240.
- YamalI, C.; Solmus, I. Theoretical investigation of a humidification-dehumidification desalination system configured by a double-pass flat plat solar air heater. Desalination. (2007). V 205 pp.163-177.

## ANEXOS

Resultados de los valores máximos de producción de destilado del análisis paramétrico.

# colectores	Flujo (kg/h)	VTT (m <sup>3</sup> )	Agua Condensada (kg/año)	Agua Condensada (kg/año.m2)
2	15	0.8	11557.5	2889.38
4	50	0.8	19653.38	2456.67
6	90	0.8	27684	2307
8	130	0.8	35313.92	2207.12
10	160	0.8	42466.44	2123.32
12	200	0.8	48805.77	2033.57
2	15	1	11731.59	2932.90
4	40	1	20113.11	2514.14
6	80	1	27958.75	2329.90
8	110	1	35546.83	2221.68
10	150	1	42672.44	2133.62
12	180	1	49347.30	2056.14
2	15	1.2	11545.21	2886.30
4	30	1.2	20883.10	2610.39
6	60	1.2	28495.45	2374.62
8	100	1.2	36015.12	2250.94
10	130	1.2	43131.93	2156.60
12	160	1.2	49925.47	2080.23
2	15	1.5	10926.81	2731.70
4	30	1.5	21860.72	2732.59
6	50	1.5	29668.86	2472.40
8	80	1.5	36992.20	2312.01
10	110	1.5	44072.73	2203.64
12	150	1.5	50765.50	2115.23
2	15	1.8	10191.42	2547.86
4	25	1.8	22477.99	2809.75
6	40	1.8	31168.00	2597.33
8	70	1.8	38319.35	2394.96
10	100	1.8	45319.47	2265.97
12	130	1.8	52034.25	2168.09
2	12	2	10050.30	2512.58
4	25	2	22513.84	2814.23
6	40	2	32113.02	2676.08

8	60	2	39379.49	2461.22
10	90	2	46354.10	2317.71
12	110	2	53051.48	2210.48
2	10	2.5	8952.79	2238.20
4	25	2.5	22123.51	2765.44
6	40	2.5	33586.26	2798.86
8	50	2.5	42135.45	2633.47
10	70	2.5	49208.73	2460.44
12	100	2.5	55892.81	2328.87
2	10	3	8247.76	2061.94
4	25	3	21402.21	2675.28
6	40	3	33915.24	2826.27
8	50	3	44095.86	2755.99
10	60	3	52012.96	2600.65
12	80	3	59072.65	2461.36
2	10	4	6688.39	1672.10
4	25	4	19748.11	2468.51
6	40	4	32807.05	2733.92
8	50	4	45095.17	2818.45
10	60	4	55382.16	2769.11
12	70	4	64051.60	2668.82
2	7	5	5218.07	1304.52
4	20	5	18063.82	2257.98
6	35	5	31547.64	2628.97
8	50	5	44378.78	2773.67
10	60	5	55862.71	2793.14
12	70	5	66033.29	2751.39
2	8	6	4219.40	1054.85
4	20	6	16857.57	2107.20
6	35	6	30327.16	2527.26
8	50	6	43263.59	2703.97
10	60	6	55416.89	2770.84
12	70	6	66310.17	2762.92