



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**MODELO TEÓRICO EN ESTADO TRANSITORIO DE UN  
DESTILADOR SOLAR**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**ELYN MELANY MARTÍNEZ VÁZQUEZ**



**Ciudad Universitaria. MÉXICO, D.F. 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**                   **Profesor: Bertha Lilia Amenityro Flores**

**VOCAL:**                           **Profesor: Bernardo Carreón Calderón**

**SECRETARIO:**               **Profesor: Felipe Muñoz Gutiérrez**

**1er. SUPLENTE:**               **Profesor: José Luis López Cervantes**

**2° SUPLENTE:**               **Profesor: Simón López Ramírez**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**EDIF. 12 BERNARDO QUINTANA, PISO 2, COORDINACIÓN DE MECÁNICA Y ENERGÍA,  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM**

**ASESOR DEL TEMA:**

**Felipe Muñoz Gutiérrez**

**SUSTENTANTE (S):**

**ELYN MELANY MARTÍNEZ VÁZQUEZ**

## Contenido

<b>Índice de figuras</b>	1
<b>Índice de tablas</b>	3
<b>Nomenclatura</b>	4
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	7
1.1 Energía Solar	7
1.2 Energía Solar en México	9
1.3 Distribución del agua en el planeta	13
1.4 Agua en México	19
1.5 Antecedentes de la destilación solar	22
1.6 Conceptos básicos	23
1.7 Objetivo	25
1.8 Hipótesis	25
1.9 Justificación	25
<b>Capítulo 2. Destiladores solares</b>	27
2.1 Clasificación de los sistemas de destilación solar	28
2.2 Tipos de destiladores solares pasivos	29
2.2.1 Destilador solar de caseta de una sola vertiente	29
2.2.2 Destilador solar de caseta de dos vertientes	30
2.2.3 Destilador solar de cascada	30
2.2.4 Destilador solar de invernadero	31
2.3 Características técnicas de un destilador solar	32
2.4 Diseño de un destilador solar	32

2.5 Eficiencia térmica y productividad	33
2.6 Mecanismos de transferencia de calor	34
2.6.1 Convección natural	34
2.6.2 Convección forzada	35
2.6.3 Conducción	35
2.6.4 Radiación	36
2.7 Mecanismos de transferencia de masa	38
2.7.1 Evaporación	38
2.7.2 Condensación	38
<b>Capítulo 3. Modelo teórico en estado estable</b>	<b>39</b>
3.1 Modelo del destilador solar en estado estable	40
3.2 Ecuaciones de transferencia de calor	41
3.2.1 Irradiancia solar global	41
3.2.2 Convección vidrio-aire	41
3.2.3 Radiación vidrio-cielo	42
3.2.4 Convección agua-vidrio	42
3.2.5 Radiación agua-vidrio	46
3.2.6 Conducción-convección fondo-aire	46
3.2.7 Evaporación	46
3.2.8 Convección fondo-agua	47
3.3 Balances de energía en estado estable	47
3.3.1 Balance sobre el vidrio	47
3.3.2 Balance sobre el agua	49

3.3.3 Balance sobre el fondo	50
3.4 Destilado	52
3.5 Simplificación del modelo	53
3.6 Primera modificación al modelo	54
3.7 Segunda modificación al modelo	55
3.8 Solución del modelo del destilador solar en estado estable utilizando EES (Engineering Equation Solver)	58
3.8.1 Solución del modelo original	58
3.8.2 Solución del modelo con la primera modificación en $h_{cfw}$	63
3.8.3 Solución del modelo estable con la segunda modificación en $h_{cww}$ y $h_{cfa}$	65
3.9 Simulación de datos teóricos de destilado con EES	67

**Capítulo 4. Modelo teórico en estado transitorio** 71

4.1 Modelo del destilador solar en estado transitorio	71
4.2 Balances de energía en estado transitorio	71
4.2.1 Balance sobre el vidrio	71
4.2.2 Balance sobre el agua	72
4.2.3 Balance sobre el fondo	73
4.3 Solución del modelo del destilador en estado transitorio utilizando EES	73
4.4 Mediciones experimentales	80
4.4.1 Equipos	80
4.4.2 Experimentación	83
4.5 Análisis comparativo de datos experimentales contra datos teóricos obtenido mediante el programa EES	83

**Capítulo 5. Conclusiones**

93

**Bibliografía**

95

## Índice de figuras

Figura 1-1	Promedio anual de la radiación solar normal directa	10
Figura 1-2	Atlas de irradiación solar global anual en la República Mexicana	12
Figura 1-3	Disponibilidad natural media per cápita de agua en algunos países (m <sup>3</sup> /hab/año)	15
Figura 1-4	Procesos dentro del ciclo del agua	16
Figura 1-5	Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México	20
Figura 1-6	Distribución espacial de la precipitación media anual en el país	21
Figura 2-1	Destilador solar de caseta de una vertiente	29
Figura 2-2	Destilador solar de caseta de dos vertientes	30
Figura 2-3	Destilador solar de cascada	31
Figura 2-4	Destilador solar de invernadero	31
Figura 2-5	Principales flujos de calor en un destilador solar	37
Figura 3-1	Mecanismos de intercambio de calor en un destilador solar	41
Figura 3-2	Esquema del balance de energía en el vidrio	47
Figura 3-3	Esquema del balance de energía en el agua	49
Figura 3-4	Esquema del balance de energía en el fondo	50
Figura 3-5	Algoritmo para resolver el modelo teórico en estado estable en EES	58
Figura 3-6	Diagrama de flujo para introducir ecuaciones en EES del estado estable	59
Figura 3-7	Ventana para añadir propiedades termofísicas al modelo	61
Figura 3-8	Ventana de residuos de cálculo de EES	61

Figura 3-9	Ventana de resultados	62
Figura 3-10	Información de la variable	62
Figura 3-11	Unidades disponibles en EES	63
Figura 3-12	Algoritmo del modelo estable con primera modificación	64
Figura 3-13	Ventana de resultados del modelo estable con primera modificación	65
Figura 3-14	Algoritmo del modelo estable con segunda modificación	66
Figura 3-15	Ventana de resultados del modelo estable con segunda modificación	66
Figura 4-1	Diagrama de flujo para introducir ecuaciones en EES del estado transitorio	74
Figura 4-2	Algoritmo para resolver el modelo en estado transitorio en EES	75
Figura 4-3	Cambio del límite inferior de la variable $x$	77
Figura 4-4	Ecuaciones formateadas	78
Figura 4-5	Resultados de la tabla de integración	79
Figura 4-6	Cambio de número de corridas de integración	80
Figura 4-7	Acomodo de los destiladores solares	82
Figura 4-8	Destiladores solares reales utilizados para las mediciones	82
Figura 4-9	Funciones del tiempo para $I_{rr}$	86
Figura 4-10	Funciones del tiempo para $T_a$	86
Figura 4-11	Comparación para destilado	89
Figura 4-12	Comparación para $T_w$	90
Figura 4-13	Comparación para $T_v$	90
Figura 4-14	Comportamiento de la variable $x$	92

## Índice de tablas

Tabla 3-1	Estimados de producción de destilado para Islandia	67
Tabla 3-2	Estimados de producción de destilado para Filipinas	68
Tabla 3-3	Estimados de producción de destilado para Aguascalientes	68
Tabla 3.4	Análisis del modelo en estado estable	70
Tabla 4-1	Disponibilidad de datos de $T_a$	84
Tabla 4-2	Datos experimentales de destiladores para el 16 de marzo de 2018	85
Tabla 4-3	Resultados teóricos del modelo en estado transitorio	87
Tabla 4-4	Porcentaje de error datos teóricos con experimentales	88
Tabla 4-5	Destilado total	89
Tabla 4-6	Comparación de $x$	91

## Nomenclatura

$A$	Área del destilador, $m^2$
$C_{pa}$	Calor específico del aire a presión constante, $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
$C_f$	Calor específico del fondo a $T_f$ , $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
$C_v$	Calor específico del vidrio a $T_v$ , $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
$C_w$	Calor específico del agua a $T_w$ , $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
$f_n$	Coefficiente de atenuación
$g$	Aceleración de la gravedad
$Gr$	Número de Grashof
$h_{cfa}$	Coefficiente de transferencia de calor por conducción-convección fondo-aire, $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$
$h_{cfw}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección fondo-agua, $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$
$h_{cva}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección vidrio-aire, $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$
$h_{cww}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección agua-vidrio, $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$
$h_e$	Coefficiente de transferencia de masa por evaporación
$h_{evap}$	Coefficiente de transferencia de calor por evaporación, $\text{W/m}^2 \text{ Pa}$
$h_g$	Entalpía de vapor de agua saturado a $T_w$ , $\text{kJ/kg}$
$h_f$	Entalpía del líquido saturado a $T_w$ , $\text{kJ/kg}$
$h_{rwv}$	Coefficiente de transferencia de calor por radiación agua-vidrio, $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$
$I_{rr}$	Irradiancia solar global, $\text{W/m}^2$
$M_a$	Peso molecular del aire, $\text{kg/kgmol}$
$M_d$	Masa de producto o de destilado, $\text{kg/m}^2\text{h}$
$M_w$	Masa molecular del agua, $\text{kg/kgmol}$

$m_f$	Masa del fondo, kg/m <sup>2</sup>
$m_v$	Masa del vidrio, kg/m <sup>2</sup>
$m_w$	Masa del agua, kg/m <sup>2</sup>
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$P_v$	Presión parcial del vapor de agua a $T_v$ , Pa
$P_w$	Presión parcial del vapor de agua a $T_w$ , Pa
$P_T$	Presión total, Pa
$Q_{cfa}$	Flujo de calor combinado de conducción-convección fondo-aire, W/m <sup>2</sup>
$Q_{cfw}$	Flujo de calor por convección fondo-agua, W/m <sup>2</sup>
$Q_{cva}$	Flujo de calor por convección vidrio-aire, W/m <sup>2</sup>
$Q_{cww}$	Flujo de calor por convección agua-vidrio, W/m <sup>2</sup>
$Q_{evap}$	Flujo de calor por evaporación, W/m <sup>2</sup>
$Q_{rvs}$	Flujo de calor por radiación vidrio-cielo, W/m <sup>2</sup>
$Q_{rww}$	Flujo de calor por radiación agua-vidrio, W/m <sup>2</sup>
$R_f$	Reflejancia del fondo
$R_v$	Reflejancia del vidrio
$R_w$	Reflejancia del agua
$T_a$	Temperatura del aire, °C
$T_f$	Temperatura del fondo, °C
$T_s$	Temperatura del cielo, K
$T_v$	Temperatura del vidrio, °C
$T_w$	Temperatura del agua, °C

$V$	Volumen de agua, m <sup>3</sup>
$v_a$	Velocidad del aire, m/s
$x_1$	Espacio entre el agua y el vidrio, m

### Letras griegas

$\alpha_f$	Absortancia del fondo
$\alpha_v$	Absortancia del vidrio
$\alpha_w$	Absortancia del agua
$\varepsilon_m$	Espesor del material del fondo
$\varepsilon_v$	Emisividad del vidrio
$\varepsilon_w$	Emisividad del agua
$\eta$	Eficiencia
$\kappa_m$	Conductividad térmica del material del fondo
$\lambda_{fg}$	Calor latente de evaporación, kJ/kg
$\rho_f$	Densidad del aire, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup>
$u_f$	Viscosidad del aire, m <sup>2</sup> /s
$\xi$	Espesor del agua en el destilador, m
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>

### Subíndices

$d$	Acercamiento por la derecha
$i$	Acercamiento por la izquierda
$0$	En la superficie donde se origina la evaporación
$\infty$	En un punto lejano a la superficie donde se origina la evaporación

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Energía Solar

Uno de los problemas que enfrenta el mundo en la actualidad es el uso y la necesidad de energía. Lo que se haga o deje de hacerse con los recursos disponibles para generarla determinará si es posible satisfacer la demanda energética que se presenta alrededor del mundo.

La demanda energética mundial está en continuo aumento a un ritmo de crecimiento anual del 2%. A medida que crece la población y las economías, millones de personas en todo el mundo disfrutan de los beneficios de un estilo de vida que requiere cantidades de energía cada vez mayores. Para los expertos petroleros del mundo es claro que este recurso está declinando rápidamente con relación en la escala temporal humana. Adicionalmente la producción de gases de efecto invernadero, principalmente el bióxido de carbono, debido al uso intensivo de los hidrocarburos, son los precursores del incremento de la temperatura media global y consecuentemente del llamado cambio climático. Es urgente una utilización más racional de la energía y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía (Arancibia y Estrada, 2010).

Las fuentes renovables de energía (FRE) son aquellas que, por su cantidad con relación en los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas, son inagotables y su consumo no afecta el medio ambiente. Ellas son la energía solar, la eólica, la biomasa, la geotérmica, las mini, micros y pequeñas centrales hidroeléctricas y la oceánica. Las energías renovables podrían satisfacer la demanda. La energía solar es la fuente energética que por sí sola podría con todo el requerimiento (Arancibia y Estrada, 2010).

Las energías de que disponemos en nuestro planeta, exceptuando quizá la energía nuclear de fisión, provienen del Sol. Éste calienta el aire de la Tierra para hacerlo ascender, así se crean corrientes de aire y viento.  $6 \times 10^{21}$  J de energía se producen en un año. El Sol produce energía calorífica y luminosa que las plantas utilizan para sintetizar sus minerales y realizar el proceso de fotosíntesis. Esas plantas crecen y

pueden quemarse para obtener calor, o bien, quedar cubiertas de lodo, para experimentar durante siglos transformaciones metamórficas que las conviertan en carbón o, gracias a las bacterias, en gas y petróleo. Los combustibles fósiles podrían darnos unos  $3 \times 10^{22}$  J. El Sol calienta el mar y da lugar a gradientes térmicos de  $6 \times 10^{18}$  J al año, evapora el agua para transformarla en energía mecánica o hidráulica en  $35 \times 10^{28}$  J al año. Las mareas, resultado de la atracción que ejercen el Sol y la Luna sobre la Tierra y el mar, ofrecen  $10^{18}$  J al año. El Sol es la base de la vida en nuestro planeta, por lo que es importante intentar utilizar de algún modo la energía que provee (Mendieta, 2002).

A pesar de que fuera de la atmósfera la cantidad de energía que proviene del Sol es muy grande, ésta se reduce un 30% por pérdidas en la atmósfera por absorción, reflexión y dispersión.

La energía solar es el resultado de reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en el Sol y constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, considerando que la Tierra está a una distancia promedio del Sol, está descrita por la constante solar que tiene un valor de  $1366 \text{ W/m}^2$  (aproximadamente  $2 \text{ cal/min/cm}^2$ ). De toda la energía que emite el Sol, nuestro planeta anualmente recibe  $5.4 \times 10^{24}$  J, lo que representa 4500 veces el consumo de energía mundial. La radiación solar, está condicionada por tres aspectos: la intensidad de radiación solar recibida por la Tierra, los ciclos diarios y anuales y las condiciones climatológicas (Mendieta, 2002).

La radiación solar está distribuida desigualmente alrededor del mundo. Varía en intensidad de una ubicación geográfica a otra dependiendo de la latitud, temporada y tiempo del día. En años recientes, ha estado creciendo la demanda por identificar las áreas geográficas con condiciones favorables para el desarrollo de la energía solar. Este mapeo es de gran importancia para el desarrollo de países que han empezado proyectos con energía solar para producción y distribución de energía (Duarte *et. al*, 2012).

Por conveniencia y simplicidad, se ha establecido que la distribución geográfica de la radiación solar total está dividida en términos de intensidad en cuatro grandes zonas alrededor del mundo. La zona más favorable se encuentra entre 15°N y 35°N como se muestra en la Figura 1-1. Esto incluye las regiones que están actualmente dotadas con las más favorables condiciones para la aplicación de la energía solar. Estas regiones son semiáridas y están caracterizadas por tener la mayor cantidad de radiación solar, el 90% de ésta viene en forma de radiación solar directa debido a la limitada nubosidad y precipitación (menos de 250 mm por año). Además, están usualmente cubiertas por la luz del sol alrededor de 3,000 horas por año (Duarte *et. al*, 2012).

La mayoría de los países en desarrollo se sitúa en las regiones más favorables, entre 35°N y 35°S. Por esta razón, ellos pueden depender de la radiación solar como un recurso firme de energía que puede fácilmente y a un costo bajo ser explotado por hogares urbanos y rurales para múltiples propósitos (Duarte *et. al*, 2012).

## **1.2 Energía Solar en México**

Utilizando la figura 1-1, se observa que México cuenta con zonas de alta radiación solar, lo que significa que es posible aprovecharla para impulsar y desarrollar nuevos proyectos que incluyan el empleo de la energía solar.

De hecho, México es un país privilegiado en cuanto a fuentes renovables de energía (FRE), éstas podrían coadyuvar a resolver otros problemas como el deterioro ambiental, el desempleo y la fuga de divisas. Existe la apremiante necesidad de multiplicar los esfuerzos y recursos dedicados a su investigación y desarrollo tecnológico, así como su industrialización y comercialización para poder satisfacer las necesidades energéticas. También se deben crear nuevos esquemas de participación social y privada en la generación de energía y desarrollar pequeños sistemas autónomos y descentralizados basados en estas fuentes renovables. Sin embargo, añadido a lo anterior, se deben también cambiar drásticamente nuestros patrones de consumo energético, fomentar el ahorro y eliminar el dispendio (Mejía, 1999).

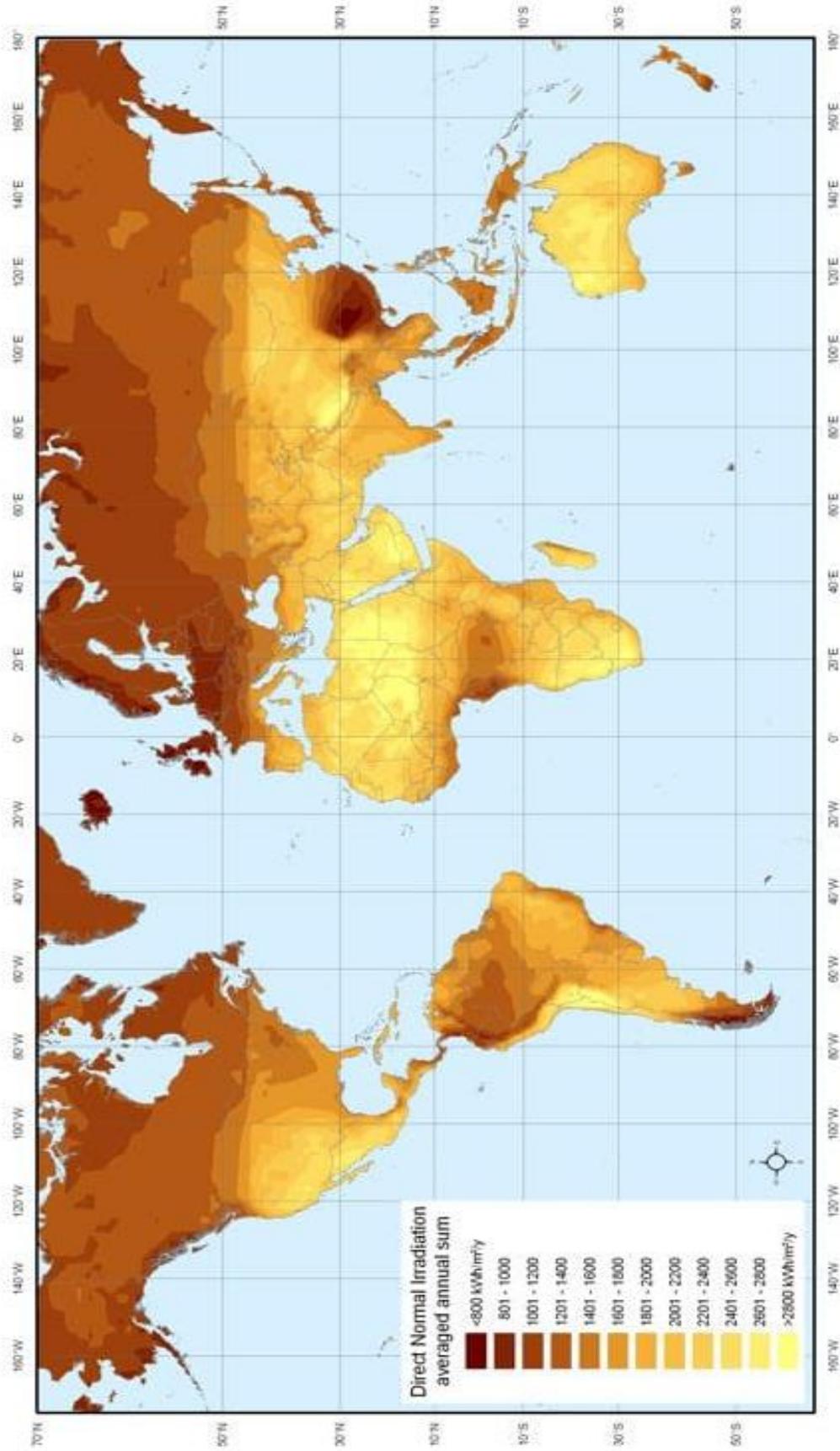


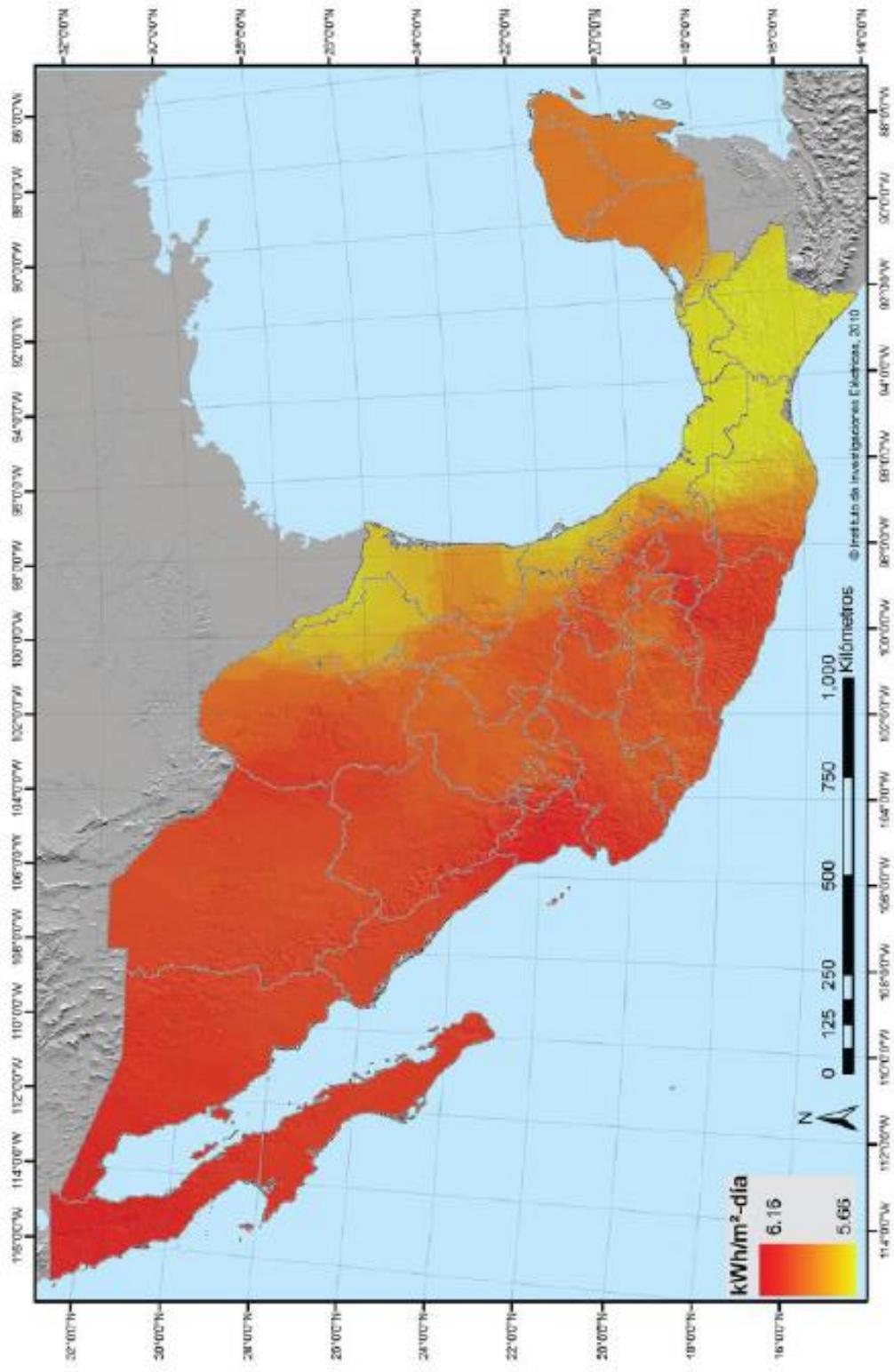
Figura 1-1 Promedio anual de la radiación solar normal directa (DLR, 2008).

Actualmente ya se cuenta con un buen número de investigadores que laboran en instituciones como la UNAM, la UAM, el CINVESTAV, la UAEMéx, etc., la mayoría miembros de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES).

La energía es requerida para todas nuestras actividades cotidianas y para producir mediante procesos industriales los satisfactores que a diario consumimos se requieren de grandes suministros de energía. México enfrenta diversos problemas, el número de habitantes desnutridos se cuenta por decenas de millones, la contaminación, el deterioro ambiental, el agua que es cada vez más escasa, entre muchos otros, casi todos ellos están relacionados directa o indirectamente con la disponibilidad de energía que se encuentra mal distribuida y depende en exceso de los combustibles fósiles para la producción de la misma. Se deben buscar opciones novedosas, las más viables en el mediano y largo plazo son basar el sistema energético nacional en las fuentes renovables de energía que en nuestro país son muy abundantes.

Después de revisar el potencial de las FRE en México, debe advertirse que quizá el principal inconveniente de casi todas ellas es su naturaleza fluctuante o no estacionaria. Debido a lo anterior, los sistemas basados en FRE han sido casi siempre concebidos como meros auxiliares de los “tradicionales” que se basan en combustibles fósiles, y se les ha destinado a ahorrar éstos cuando el recurso renovable esté disponible (Mejía, 1999).

Nuestro país recibe una cantidad inmensa de radiación solar; en casi el 40% de su extensión territorial de aproximadamente 2 millones de kilómetros cuadrados, se reciben unos 21 MJ/m<sup>2</sup>día. Recibe, por ejemplo, dos veces la radiación solar de Alemania. En un día despejado en las horas de mayor insolación, incide cerca de 1kW térmico sobre cada metro cuadrado de superficie. Sobre una azotea de 100 m<sup>2</sup> de planta, se reciben unos 550 kWh/día (Mejía, 1999). En la figura 1-2 se muestra la distribución de la irradiación solar global anual en la República Mexicana. Se puede observar que hay mayor concentración de la irradiación en los estados del norte.



Fuente: Secretaría de Energía. SENER. Instituto de Investigaciones Eléctricas

Figura 1-2 Atlas de irradiación solar global anual en la República Mexicana

A lo largo del territorio nacional, la radiación diaria varía entre 4.4 kWh/m<sup>2</sup>día y 6.3 kWh/m<sup>2</sup>día de energía solar, la cual es comparable con regiones en África, los Andes y partes de Oceanía. Esto significa que los paneles cristalinos fotovoltaicos requieren un área de 100,000 hectáreas aproximadamente, o 1,000 km<sup>2</sup> para satisfacer todas las necesidades energéticas de México. En Alemania o Canadá, la misma tecnología requeriría el doble del área y el doble de la inversión para conseguir la misma cantidad de energía (Duarte *et. al*, 2012).

La Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) ha desempeñado un gran papel en los más importantes proyectos. Realiza anualmente la llamada “Semana Nacional de Energía Solar” que se celebra durante la primera semana de octubre.

Las actividades de investigación y desarrollo de las fuentes renovables de energía, así como la difusión de sus resultados, se ha realizado en su mayoría gracias al esfuerzo de investigadores universitarios con el auxilio de sus estudiantes y tesis casi todos organizados por la ANES.

La energía solar es imprescindible para lograr un desarrollo sostenible y que las empresas que industrialicen los sistemas para el aprovechamiento de las fuentes limpias de energía tengan un futuro sumamente prometedor.

### **1.3 Distribución del agua en el planeta**

Como se mencionó anteriormente, la energía solar podría satisfacer por sí sola los requerimientos energéticos, los cuales no sólo se limitan a la producción de energía eléctrica como suele pensarse, sino también, por ejemplo, a la producción y abastecimiento de agua potable, un problema que actualmente afecta a millones de habitantes en el mundo.

La presión sobre los recursos hídricos está aumentando, principalmente como resultado de actividades humanas tales como la urbanización, el crecimiento demográfico, la elevación del nivel de vida, la creciente competencia por el agua y la contaminación, cuyas consecuencias se ven agravadas por el cambio climático y las variaciones en las condiciones naturales (GreenFacts, 2009).

Todos los organismos, incluyendo los humanos, requieren agua para sobrevivir y aunque nuestro planeta es frecuentemente llamado el “Planeta Azul”, los riesgos del incremento en la escasez del agua en el mundo son comunes (Shinjiro y Taikan, 2006). Sin embargo, a diferencia del petróleo, el agua circula formando ciclos hidrológicos cerrados en los cuales la energía solar juega un papel importante.

El agua de la tierra se encuentra naturalmente en varias formas y lugares: en la atmósfera, en la superficie, bajo tierra y en los océanos. El 97.5% se encuentra en los océanos y mares de agua salada, únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, 69% se encuentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y se encuentra en un estado sólido (Greenpeace Colombia, 2010).

El 30% del agua dulce mundial se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos (Jumapam, 2017)..

Solo el 1% del agua dulce en el mundo, escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos y se depositan en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos. Ésta es agua que se repone regularmente a través del ciclo hidrológico (Jumapam, 2017).

La cantidad de agua almacenada en todos los ríos del mundo es solamente 2,000 km<sup>3</sup>, mucho menos que el retiro de agua anual de 3,800 km<sup>3</sup>/año. Una medida más adecuada de la disponibilidad del agua son los 45,500 km<sup>3</sup>/año de la descarga anual, la cual fluye principalmente a través de los ríos de los continentes hacia el mar (DOF, 2014).

En la figura 1-3 se muestra la disponibilidad natural media per cápita de agua en algunos países en m<sup>3</sup>/hab/año. Existen países como Canadá, Perú o Liberia que cuentan con más de 50,000 m<sup>3</sup>/hab/año y países como Egipto, Arabia Saudita e Israel que tienen una disponibilidad realmente baja, menor a los 1,000 m<sup>3</sup>/hab/año.

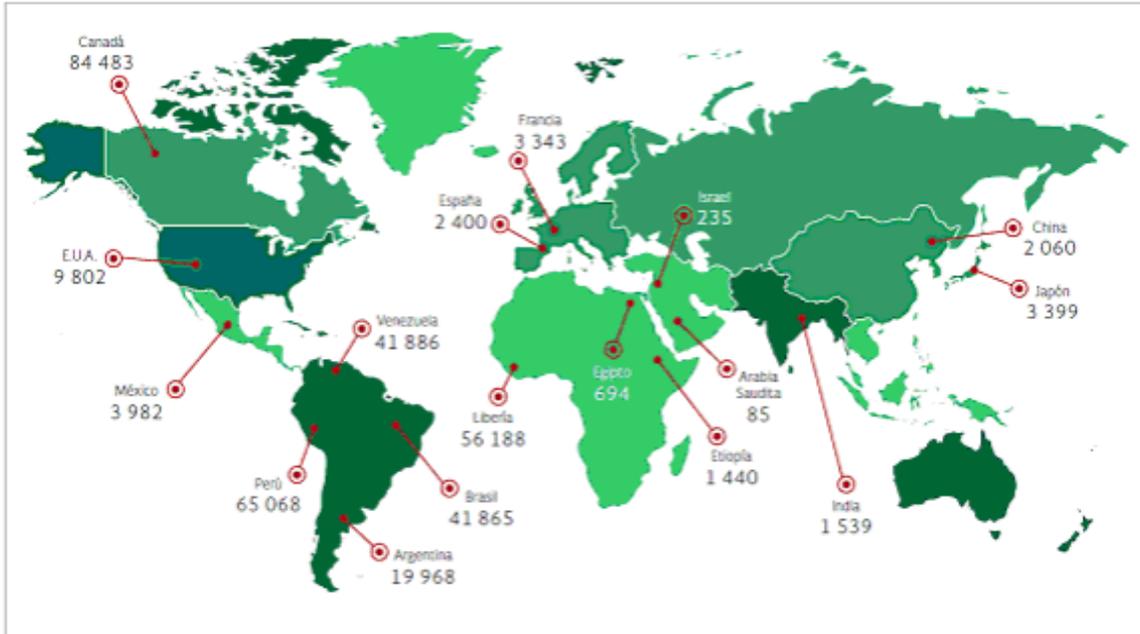


Figura 1-3 Disponibilidad natural media per cápita de agua en algunos países (m³/hab/año) (DOF, 2014).

A diferencia de la mayoría de los recursos naturales, el agua circula naturalmente. Por ejemplo, cuando se evapora, cambia de líquido a gas y eventualmente se condensa como líquido de nuevo. A esto se le llama ciclo del agua. Observando el ciclo del agua en la Tierra podemos comprender mejor cómo interactúa con el medio ambiente y evaluar qué cantidad está disponible para el consumo humano. En la figura 1-4 se muestran los diferentes procesos dentro del ciclo hidrológico.

Cuando se usa, el agua pierde propiedades como pureza, capacidad calorífica y energía gravitacional potencial, pero eventualmente, más recursos hídricos degradados son renovados por procesos naturales en el ciclo hidrológico, el cual está principalmente impulsado por energía solar.



Figura 1-4 Procesos dentro del ciclo del agua (Cotler *et. al*, 2006)

Las precipitaciones (lluvia, nieve, rocío, etc.) son imprescindibles para renovar los recursos hídricos, pueden alimentar ríos o lagos, recargar los suministros de aguas subterráneas o volver a la atmósfera por evaporación. Los glaciares almacenan agua en forma de nieve y hielo, alimentando los arroyos locales. Las cuencas fluviales son útiles como unidad natural de gestión de los recursos hídricos. Los lagos almacenan grandes cantidades de agua que pueden mitigar las variaciones estacionales en el caudal de los ríos y los arroyos. Los humedales (como pantanos, turberas, ciénagas y lagunas) cubren el 6% de la superficie terrestre emergida y desempeñan un papel fundamental para los ecosistemas locales y los recursos hídricos. Las aguas subterráneas se están extrayendo principalmente para obtener agua potable y ayudar a la agricultura en los climas áridos. Este recurso se considera renovable siempre que las aguas subterráneas no se extraigan a una velocidad que no dé tiempo a que la naturaleza la renueve (GreenFacts, 2009).

Para tener una mejor visión de la disponibilidad de agua, se utiliza un término llamado “Recursos de agua dulce renovable” o RFWR por sus siglas en inglés (Renewable Freshwater Resources) el cual toma en cuenta los procesos que se llevan a cabo dentro del ciclo del agua para medir la cantidad de agua dulce renovable disponible.

Aunque los RFWR son naturalmente reciclados, la velocidad de circulación está determinada por el clima y existe un límite para la cantidad de RFWR disponibles para uso humano. En la escala global, el retiro actual está por debajo de este límite y si el ciclo del agua es manejado sabiamente, los RFWR pueden cubrir la demanda humana por mucho tiempo en el futuro (Shinjiro y Taikan, 2006).

Se define que la precipitación menos la evapotranspiración sobre la tierra es una medida de los RFWR máximos disponibles. La mayor parte de éstos son agua superficial, particularmente descarga de ríos. Sin embargo, la evapotranspiración de tierras de cultivo no irrigadas también es una fuente de agua que es benéfica para la sociedad (Shinjiro y Taikan, 2006).

Por convención, la evapotranspiración ha sido llamada “agua verde” y las salidas de los ríos y agua subterránea ha sido llamada “agua azul”.

Cerca de 3,800 km<sup>3</sup>/año de agua azul son retirados por los seres humanos y eso representa menos del 10% de los RFWR máximos disponibles en el mundo. La evapotranspiración está estimada como 7,600 km<sup>3</sup>/año de tierras de cultivo y 14,400 km<sup>3</sup>/año de glaciares (Shinjiro y Taikan, 2006).

Existe una alta variabilidad en la disponibilidad del agua en el tiempo y el espacio. La descarga de ríos es más variable que la de pequeñas cuencas acuíferas en general y la descarga diaria de ríos es más variable que la descarga mensual de ríos. El flujo durante inundaciones y temporadas húmedas no puede ser usado durante las temporadas de bajos flujos a menos que exista un sistema de almacenamiento en el lugar. Eso es debido a que existen millones de reservas artificiales, lagos y estanques en el mundo y porque la mayoría de los ríos están

regulados. Otra razón por la que los RFWR pueden ser insuficientes es su distribución espacial desigual.

Con una gestión inadecuada, actividades como la agricultura, el desmonte, la construcción de carreteras o la minería pueden provocar una acumulación excesiva de tierra y partículas en suspensión en los ríos (sedimentación), lo que causa daños en los ecosistemas acuáticos, deteriora la calidad de agua y dificulta la navegación interior. La contaminación puede dañar los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos. Los principales contaminantes son, por ejemplo, la materia orgánica y los organismos patógenos contenidos en las aguas residuales, los fertilizantes y pesticidas procedentes de las tierras agrícolas, la lluvia ácida provocada por la contaminación del aire, y los metales pesados liberados por las actividades mineras e industriales. La extracción excesiva de agua, tanto superficial como subterránea, ha tenido efectos catastróficos. Los beneficios de la extracción de aguas subterráneas suelen ser efímeros, mientras que las consecuencias negativas, como la reducción de los niveles de agua y el agotamiento de los recursos, puede durar mucho tiempo (GreenFacts, 2009).

Se requieren de grandes esfuerzos para compensar la variabilidad natural y mejorar tanto la calidad como aumentar la cantidad del agua disponible.

El agua de lluvia se recoge desde hace miles de años en muchas partes del mundo. Reconducir las aguas superficiales bajo la tierra puede ayudar a reducir las pérdidas por evaporación, compensar las variaciones en el caudal y mejorar la calidad de agua. Las presas y los embalses se construyen a fin de almacenar agua para el riego y el consumo. Además, las presas pueden proporcionar electricidad. El trasvase de agua entre cuencas fluviales también puede ayudar a mitigar los problemas de escasez de agua. Reutilizar las aguas residuales para diferentes propósitos, por ejemplo, el agua no potable se utiliza para el riego y la refrigeración industrial. El agua desalada (agua de mar o salobre transformada en agua dulce) se usa en las ciudades y en la industria. Existen diversas maneras de ayudar a mitigar los riesgos de la escasez de agua en el mundo (GreenFacts, 2009).

Hay países que tienen programas para reducir la demanda de agua y las pérdidas de los sistemas urbanos de distribución, pero todavía queda mucho por hacer. Sin embargo, esto conllevará cambios de comportamiento que necesitarán una mejora de la información al público y un mayor compromiso político. Estos esfuerzos para conservar el agua y reducir la demanda no sólo son útiles en las regiones donde escasea el agua, también pueden generar beneficios económicos en regiones más húmedas (GreenFacts, 2009).

#### **1.4 Agua en México**

El agua es un recurso finito indispensable para la salud pública, los ecosistemas, la biodiversidad, la producción de alimentos, la industria, la energía y el desarrollo económico, principalmente. Por ello se le considera un factor estratégico de seguridad nacional, así como de estabilidad social y política (DOF, 2014).

Si bien en algunas regiones del país el agua es suficiente para satisfacer las demandas sin conflicto de por medio, en dos tercios del territorio, donde ocurre el mayor desarrollo económico y la concentración demográfica más importante, existe una gran presión sobre el vital líquido, de por sí escaso, al encontrarse comprometido para usos previamente establecidos (DOF, 2014).

Anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.3% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país cuenta anualmente con 446,777 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2016).

En la figura 1-5 se muestran los componentes del ciclo hidrológico en México.

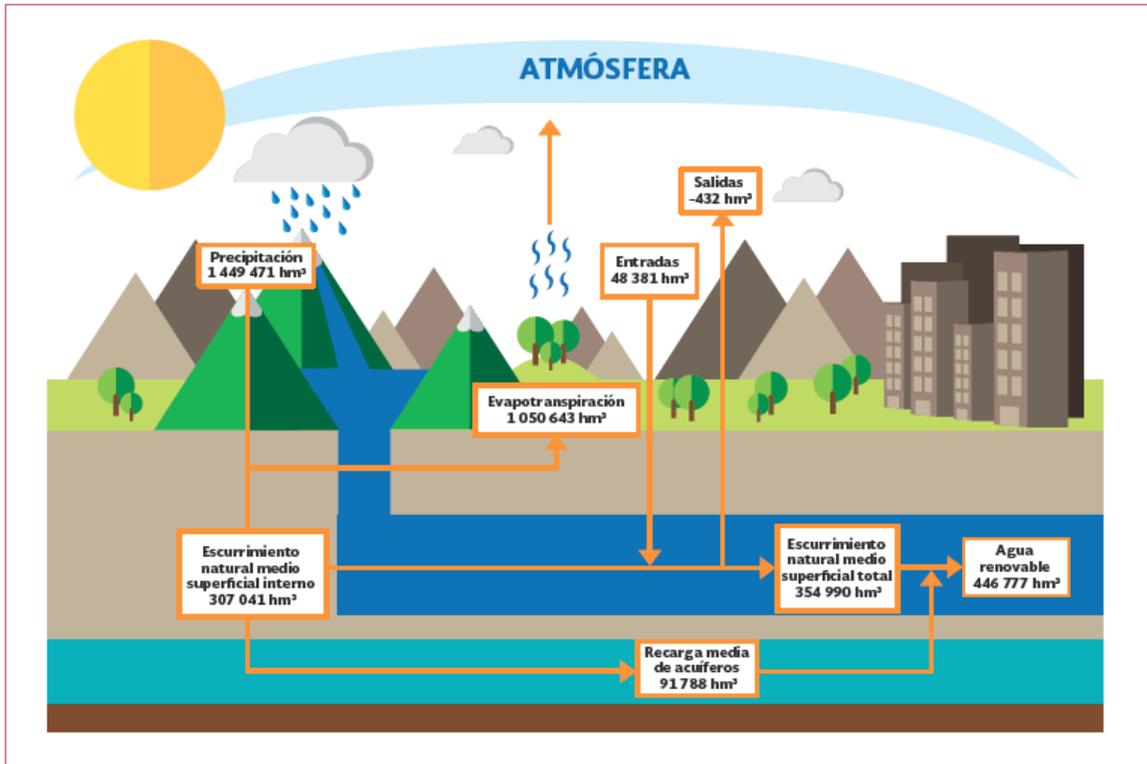


Figura 1-5 Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México (CONAGUA, 2016).

Los flujos de entrada representan el volumen de agua que escurre hacia nuestro país, generado en las cuencas fronterizas que comparte México con sus países vecinos (Estados Unidos de América, Guatemala y Belice). Los flujos de salida representan el volumen de agua que México debe entregar a Estados Unidos de América conforme al “Tratado de Aguas” de 1944 (CONAGUA, 2016).

La precipitación normal del país en el periodo de 1981-2010 fue de 740 milímetros. La mayor parte de la lluvia ocurre en el verano, entre los meses de junio y septiembre, mientras que el resto del año es relativamente seco. Además, en algunas regiones del país ocurre precipitación abundante y existe una baja densidad de población, mientras que en otras sucede lo contrario. En la figura 1-6 se muestra la distribución espacial de la precipitación media anual en el país. Se observa que la mayor cantidad de precipitación se concentra en la región del sureste del país y en las vertientes del Golfo de México y del pacífico, y que es escasa en el norte y noroeste del país y la península de Baja California.

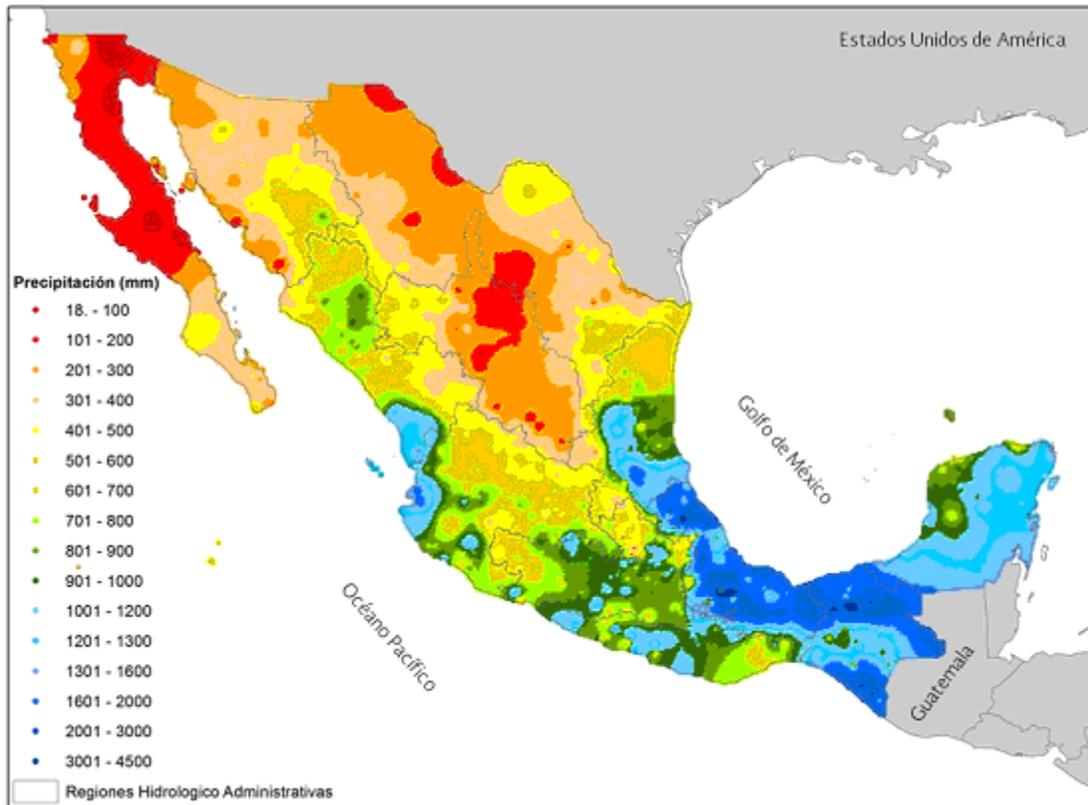


Figura 1-6 Distribución espacial de la precipitación media anual en el país (DOF, 2014).

Se considera que el 50% del escurrimiento anual total se concentra en los ríos más caudalosos ubicados en el sureste del país, cuya región hidrológica comprende sólo el 20% de la superficie total del territorio. De esta forma, el agua se encuentra disponible en escurrimientos superficiales, cuyo volumen se estima en 410,164 millones de m<sup>3</sup> anuales (Quintero y Reyes, 2009).

Para aprovechar este recurso, en México se cuenta con un sistema de obras hidráulicas para almacenamiento de 125,000 millones de m<sup>3</sup>, y los lagos y lagunas tienen una capacidad de almacenamiento de 14,000 millones de m<sup>3</sup> que en total corresponde al 34% del escurrimiento anual. De la capacidad total de almacenamiento de agua en presas, el 33% se utiliza para riego principalmente en las regiones semiáridas del norte y el 37% se usa en la generación de energía eléctrica, principalmente en el sur del país; y el resto para otros usos (Quintero y Reyes, 2009).

Es necesario recalcar la importancia de conocer la disponibilidad y distribución de la energía solar, así como de los recursos hídricos que posee México, ya que esta información puede ayudar a desarrollar programas y proyectos que logren maximizar el aprovechamiento de los recursos renovables nacionales y de esa forma mejorar la calidad de vida de los habitantes.

### **1.5 Antecedentes de la destilación solar**

La utilización de la energía solar para destilar agua se conoce desde hace mucho tiempo. Su aplicación se inició en 1872, con la instalación en las salinas del norte de Chile de destiladores solares. Se instalaron directamente en la tierra, sin aislar el fondo, contruidos con madera y vidrio, con una superficie de captación de alrededor de 5000 m<sup>2</sup>. La productividad total era de unos 19 m<sup>3</sup>/d. No se realizaron experimentos especiales ni investigaciones teóricas. Este destilador demostró la posibilidad práctica de destilar agua con energía solar. Se conoce que estos destiladores estuvieron funcionando durante treinta años (Fonseca *et. al*, 2005).

Durante la segunda guerra mundial se diseñaron destiladores plegables para uso en balsas salvavidas, estos consistían en unidades circulares de plástico, con un fondo cónico y una parte superior hemisférica que, una vez infladas, flotaban en el mar; bajo el casquete de plástico se colocaba una lámina de fieltro que se saturaba de agua de mar antes de inflar el conjunto de plástico. El vapor que se formaba dentro del casquete se condensaba, parte en el interior de la cubierta de plástico y parte en el cono inferior que estaba en contacto con el agua fría del mar. El destilado se acumulaba en el fondo del cono (Ruiz, 2012).

A partir de la década del 50 se comenzó a estudiar sistemáticamente los destiladores solares, ensayando distintos tipos de geometrías y materiales. En numerosos trabajos se ha determinado la influencia de varios factores sobre la productividad del destilador y se han desarrollado modelos matemáticos que describen el comportamiento del sistema (Fonseca *et. al*, 2005).

En la década del 80 se continúan realizando investigaciones donde se determinan valores adecuados de los parámetros constructivos de los destiladores solares, así como el uso de diferentes materiales para su construcción (Fonseca *et. al*, 2005).

A finales del siglo pasado se empleó en algunos lugares aislados y se comenzaron a realizar estudios acerca de este proceso, los cuales continúan desarrollándose en la actualidad. 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.

Una de las plantas desalinizadoras, que funcionó con destilación solar, más grande que se ha construido se encuentra en la isla Patmos. Esta planta ocupaba un área de 8 600 m<sup>2</sup> y tenía una producción promedio anual de 26 m<sup>3</sup>/d (Pocaterra, 2002). Desafortunadamente, debido a que sólo operaba durante el verano cuando la demanda de agua era alta y a la falta de mantenimiento, la planta en la Isla Patmos fue desmantelada (EOLSS, 2010).

Desde el comienzo de la década de los setenta, el gobierno mexicano ha estimulado el desarrollo de las unidades de destilación solar. De 1972 a 1976, la oficina de aguas salinas de la secretaría de recursos hidráulicos construyó un gran número de pequeños destiladores de caseta (0.8 m<sup>2</sup> cada uno) para varios lugares remotos, aunque estos solo duraron algunos años debido a la carencia local de comprensión de esta tecnología (Ruiz, 2012)

En general, el uso a nivel mundial de sistemas de destilación a pequeña escala se ha centrado en los equipos de tipo invernadero, dada su sencillez de construcción y operación (Fonseca *et. al*, 2005).

## **1.6 Conceptos básicos**

Para un mejor entendimiento de capítulos posteriores se enlista una serie de conceptos y sus definiciones.

- Absortancia: Propiedad de un medio en el que se determina qué fracción de energía radiante que viaja a lo largo de una trayectoria, será absorbida dentro de una distancia dada en dicho medio.

- Absortividad: Propiedad que tiene un material para absorber una fracción de la energía incidente sobre él.
- Albedo: Fracción de la irradiancia incidente que se refleja principalmente de la Tierra a la atmósfera.
- Ángulo de incidencia: Ángulo formado por un rayo y la línea perpendicular a la superficie de incidencia.
- Calor latente de vaporización: Cantidad de energía necesaria para la transformación de un líquido en vapor. Sinónimo de calor de vaporización.
- Calor sensible: Calor absorbido o producido por una sustancia durante un cambio de temperatura y que no es acompañado por un cambio de estado
- Cuerpo negro: Cuerpo ideal que absorbería toda radiación incidente y no reflejaría nada.
- Cuerpo gris: Es un tipo de superficie no negra en el que el poder de emisión es independiente de la longitud de onda de la radiación.
- Emisividad o emitancia: Propiedad de un cuerpo que describe su habilidad para emitir radiación cuando se compara con la emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura.
- Irradiancia solar difusa: Irradiancia solar dispersada por la atmósfera que llega a la superficie terrestre.
- Irradiancia solar directa: Irradiancia que no se dispersa por la atmósfera terrestre. Más precisamente es la densidad de flujo radiante proveniente del disco solar, tomado desde una pequeña región circunsolar en el cielo, que está dentro de un ángulo subtendido de 5 grados.
- Irradiancia solar global: Irradiancia directa más difusa sobre una superficie horizontal que se localiza en la superficie terrestre.
- Langley (ly): Unidad utilizada hace varios años para medir la irradiación solar. Equivale a 1 cal/cm<sup>2</sup>.
- Reflectividad: Propiedad de una superficie que describe qué fracción de energía incidente es reflejada por la superficie.

- Transmitancia ( $\tau$ ): Propiedad de un material que determina la fracción de energía que en el origen de su trayectoria sería transmitida a través de un espesor dado.

### **1.7 Objetivo**

Esta tesis pretende desarrollar un modelo matemático en estado transitorio de un destilador solar de invernadero.

### **1.8 Hipótesis**

Mediante el ajuste de algunos parámetros incluidos en las ecuaciones de los coeficientes individuales de transferencia de calor, es posible desarrollar un modelo matemático que describa el comportamiento de los fenómenos físicos que se presentan en los dispositivos de estudio.

### **1.9 Justificación**

En su diseño más simple el destilador solar es una caja construida de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio y cerrado por una cubierta de vidrio inclinada; también se pueden construir de concreto e inclusive de madera. En su interior se colocan canales laterales para coleccionar el agua producto. En el fondo del destilador se coloca el agua salada o salobre. La radiación solar global que incide sobre el destilador atraviesa el vidrio y calienta el agua salada que produce vapor; éste es llevado por el aire interior hacia la superficie interna del vidrio donde condensa. Existe gran cantidad de diseños con distintas geometrías y materiales. Sin embargo, el diseño más avanzado es de múltiple efecto, que consiste en aprovechar repetidamente el calor latente del agua produciendo a su vez sucesivas evaporaciones. No existe a la fecha alguna instalación a escala comercial de dicho diseño.

En muchas partes del mundo se han desarrollado diversas variantes en los diseños del destilador solar pasivo, así como en los modelos del tipo activo. Para el primer caso, en México diversas instituciones como el I. de I. de la UNAM, la UAM Iztapalapa, la UAM-Azcapotzalco y otras diversas instituciones han realizado trabajo de diversos tipos en aras de lograr un diseño de destilador solar al más bajo precio posible, pero de la mayor eficiencia alcanzable.

A pesar de los esfuerzos realizados a todos niveles por mejorar esta tecnología, se puede concluir que los modelos existentes adolecen de una, dos o más debilidades que permiten apreciar que aún hoy día, existen diversas posibilidades de mejora en los diseños sobre todo en la propuesta de mejores materiales involucrados en la construcción del sistema con base en los cuales se debe poder mejorar aún más la vida útil del equipo, produciendo durante ese tiempo la mayor cantidad posible de agua destilada sin deterioro aparente en la eficiencia del dispositivo.

El estudio teórico de estos dispositivos se ha basado en el establecimiento de modelos matemáticos que describan el comportamiento de su funcionamiento. En 1982, Malik *et. al* presentaron su trabajo *Solar distillation* en el cual definieron las ecuaciones de los mecanismos de transferencia de calor y masa en las diferentes partes de los destiladores (vidrio, agua y fondo) tanto para el estado estable como el estado transitorio. Asimismo, Torchia en 2004, presentó los balances de energía para destiladores solares de caseta en estado transitorio comparando los valores de su modelo con los que se obtendrían resolviendo el de Malik y Tiwari, sin embargo, ambos modelos matemáticos sugieren una complejidad alta en su resolución ya que incluyen funciones trigonométricas para describir el comportamiento de la irradiancia solar y la temperatura del aire.

El modelo presentado en esta tesis simplifica las expresiones de los datos climatológicos (irradiancia solar y temperatura del aire) con funciones polinómicas características del lugar en el que se realiza el estudio, facilitando así la resolución del estado transitorio. Además, se añaden modificaciones a los parámetros de los coeficientes individuales de transferencia de calor lo que hace que el modelo se ajuste mejor al comportamiento real de los destiladores solares.

## Capítulo 2. Destiladores solares

La destilación solar es el sistema de desalinización de agua de mar de menor costo energético, aprovecha la energía limpia y renovable del sol, pero es el sistema que mayor área superficial ocupa, aunque hay que reconocer que, debido a la lentitud del proceso, se evapora agua con mejor calidad que cualquiera de los otros sistemas de desalinización de agua de mar (Silva, 2012).

Un destilador solar es un dispositivo que utiliza los rayos del sol para elevar la temperatura de un lecho de agua de mar o salobre. Mediante la captación de energía solar, purifican el agua con base en la reproducción acelerada de los ciclos naturales de evaporación y condensación. El agua producto de destilado, queda libre de sales, se eliminan bacterias, hongos, virus y otros tipos de contaminantes. Dependerá de factores como la radiación solar, velocidad del viento, temperatura interior y exterior del sistema (Lucio, 2015).

Un destilador solar convencional usualmente se construye de una lámina galvanizada rectangular, dentro de una caseta con una cubierta hecha de cualquier material transparente, la lámina que forma la base se ennegrece para lograr la máxima absorción de la energía solar. El agua salada se coloca dentro del destilador llenando parcialmente la base y se expone a la radiación solar (Estrada, 1993).

El principio de funcionamiento del destilador solar es muy sencillo, se agrega agua (salobre o residual) en la bandeja de color negro, de modo que se forme una delgada lámina de agua y se tapa con un vidrio liso transparente (Castillo, 2008).

La radiación solar pasa a través del vidrio y calienta el agua; debido al fondo de color negro, el agua alcanza más altas temperaturas que el vidrio, lo que origina que el vapor de agua del aire interior sea elevado y al tener contacto con la superficie del vidrio que tiene menor temperatura, se produce la condensación del agua. Finalmente, el agua prácticamente libre de sales o de residuos peligrosos (no volátiles) se desliza por la cubierta de vidrio hasta el recipiente para su almacenamiento (Castillo, 2008).

El parámetro más importante que interviene en la destilación solar es la intensidad de la radiación solar que incide sobre el destilador. Una parte de la energía incidente se absorbe y se refleja en la cubierta y luego se transmite por convección y radiación. Otra porción de esta energía es absorbida por la base del equipo y se transfiere al agua parcialmente, esto debido a pérdidas de calor hacia los alrededores por conducción. La energía absorbida por el agua se transfiere hacia la cubierta transparente principalmente por la evaporación de agua que al condensarse en la cubierta transmite esa energía. (Estrada, 1993).

Existen dos fenómenos físicos que tienen lugar en un destilador solar:

1. Transferencia de masa entre el agua en la bandeja de color negro y la superficie interior del techo de vidrio donde condensa.
2. Transferencia de calor a través del exterior, del vidrio, del agua y del fondo del destilador solar.

Los diferentes procedimientos para incrementar la eficiencia de los destiladores solares se remiten, en general, a los parámetros de diseño: profundidad del agua, espesor de la cubierta de vidrio y material de cubierta para condensación, (Silva, 2012).

## **2.1 Clasificación de los sistemas de destilación solar**

Los sistemas de destilación solar son comúnmente clasificados como directos o pasivos e indirectos o activos.

En los destiladores pasivos, la radiación solar incide en el vidrio, lo atraviesa y se absorbe en el agua. La energía que alimenta al sistema es solamente la que incide directamente por la cubierta y por las paredes del destilador sin un alimentador externo de energía; consecuentemente la evaporación deja una baja productividad reportando eficiencias entre 30 y 45% (Kabeel, 2011). Con el fin de superar este problema, fueron desarrollando los destiladores activos donde incrementan la cantidad de energía disponible para el sistema en comparación con los destiladores pasivos. La destilación indirecta incluye colectores solares, energía eléctrica,

turbinas o celdas fotovoltaicas que si bien incrementan la eficiencia de los destiladores vuelven más elevados los costos (López, 2014).

Este trabajo se centra en el estudio de destiladores solares pasivos.

## 2.2 Tipos de destiladores solares pasivos

Se distinguen cinco tipos: caseta de una sola vertiente, caseta de dos vertientes, de invernadero, cascada y multietapa.

### 2.2.1 Destilador solar de caseta de una sola vertiente

Este es modelo más común y más sencillo de estructura. Tiene una caja como marco externo con un aislante en las paredes, dos fondos, uno negro en el que se coloca el agua sin destilar y otro fondo donde se recolecta el agua destilada, cuenta también con una cubierta cuadrangular o triangular transparente normalmente de vidrio o de plástico con un grosor de 3 a 5 mm y una inclinación que permita fluir hasta el colector la totalidad del condensado, generalmente es de  $15^\circ$  a  $30^\circ$  (figura 2-1).

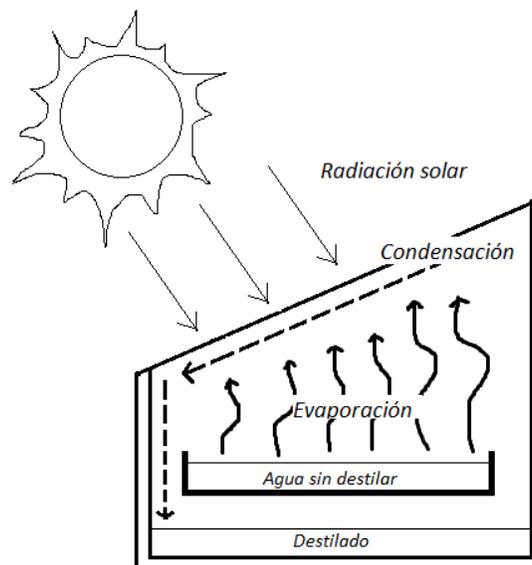


Figura 2-1 Destilador solar de caseta de una vertiente

### 2.2.2 Destilador solar de caseta de dos vertientes

El destilador solar de caseta de dos vertientes cuenta también con un fondo negro y una lámina o bandeja donde se coloca el agua sin destilar. El condensado se desliza ahora por dos lados recolectándose a los costados de la caja aislada y almacenándose en un depósito debajo de la bandeja del agua sin destilar (figura 2-2).

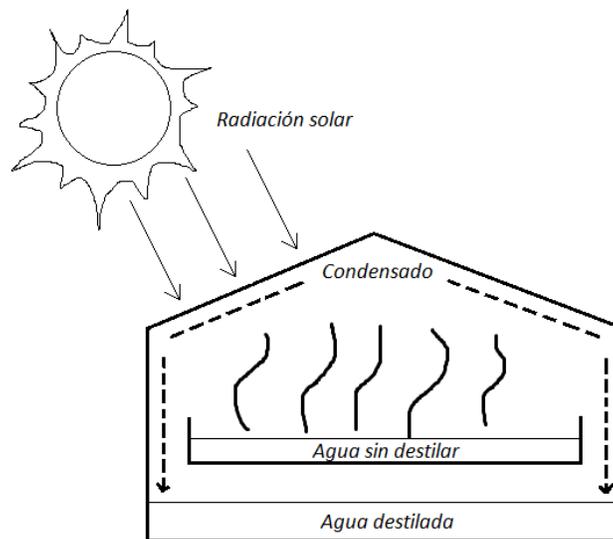


Figura 2-2 Destilador solar de caseta de dos vertientes

### 2.2.3 Destilador solar de cascada

Tiene forma de escalera y en cada escalón se encuentra un depósito con fondo negro de agua sin destilar la cual se evapora y el condensado se escurre por la cubierta de vidrio inclinada hasta un depósito de agua destilada. Debajo de los escalones se encuentra el aislamiento de la estructura principal, como se muestra en la figura 2-3 (Ruiz, 2012).

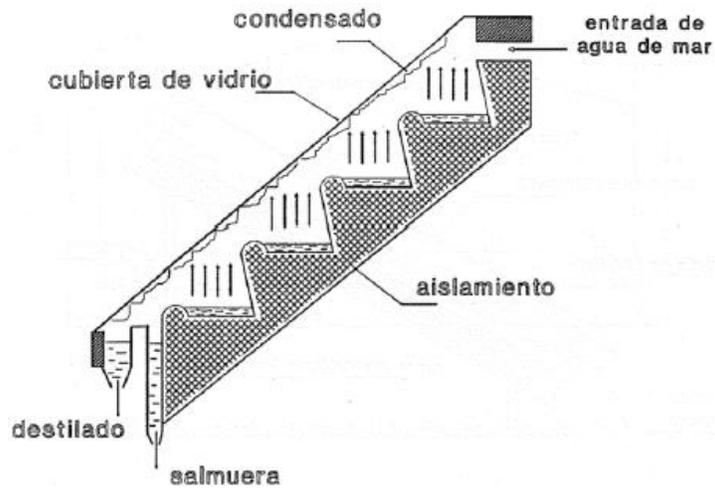


Figura 2-3. Destilador solar de cascada (Castillo, 2008).

### 2.2.4 Destilador solar de invernadero

Este tipo de destiladores es parecido a los de caseta de dos vertientes con la diferencia de que el destilado se recolecta en los costados de la caja aislada mediante unas canaletas en lugar del depósito debajo del absorbedor (figura 2-4).

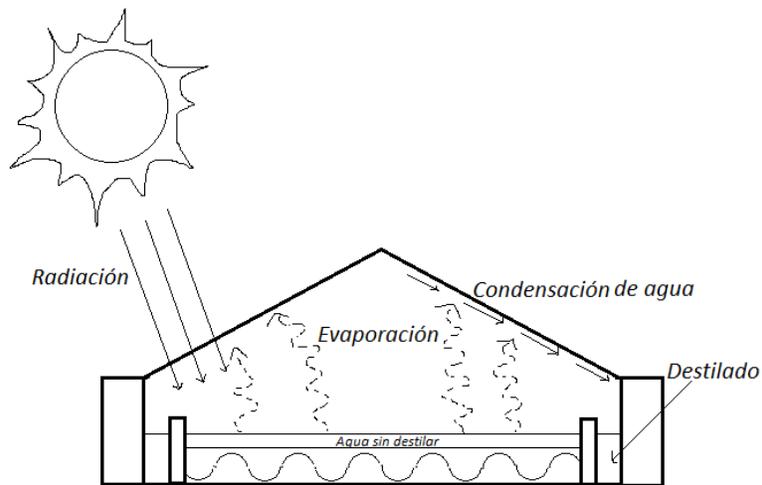


Figura 2-4. Destilador solar de invernadero

### **2.3 Características técnicas de un destilador solar.**

El agua evaporada se recolecta mediante una cubierta de vidrio.

Absorbedor solar: Recipiente de color negro localizado en la parte inferior del destilador solar donde se almacena el agua que se va a tratar, debe tener buena absorción térmica y evitar corrosión y óxido. Se requiere de un aislante térmico en la base.

Evaporador: La superficie del agua actúa como evaporador, aumentando la presión de vapor de agua debido al calentamiento.

Cámara de aire: entre la superficie del agua y la superficie interna de la cubierta de vidrio. Se transfiere agua al aire para convertirlo en aire saturado.

Condensador o cubierta: Debe ser de un material transparente que pueda mantener una temperatura menor que el resto del destilador. La diferencia de temperatura entre las partes produce un cambio de fase de vapor a líquido consiguiendo el condensado.

Recolección del condensado: se utilizan canales independientes colocadas en la parte baja del condensador. Dependiendo del modelo que se seleccione será el tipo de colector para el agua destilada.

### **2.4 Diseño de un destilador solar**

Para comenzar a diseñar un destilador solar es necesario,

1. Escoger el tipo de destilador solar: con base en la intensidad de la energía solar, ángulos de inclinación, coordenadas donde se realizan las pruebas, valores de radiación tanto en la superficie horizontal como en la superficie inclinada y las condiciones ambientales del lugar donde se planea su instalación, temperatura ambiente, velocidad del viento, entre otras.
2. Realizar un balance de energía en las partes principales del destilador (cubierta, agua y absorbedor): esta es la parte del modelo matemático que ayudará a calcular la cantidad de destilado que puede producir el equipo, así como la eficiencia de éste.

## 2.5 Eficiencia térmica y productividad

Ambos son parámetros útiles para comparar el funcionamiento de dos destiladores diferentes o para saber qué tan efectiva es una modificación que se haga, por ejemplo, al cambiar flujos de calor. La eficiencia térmica de un destilador se define como el cociente entre el calor necesario para evaporar el volumen de agua que se obtiene como destilado y el calor que recibe del Sol, ambos tomados en un periodo de tiempo dado que suele ser un día. Así, la eficiencia térmica es una medida de la fracción de calor que se emplea realmente en el proceso evaporación-condensación. Una eficiencia de 1.00 significaría que toda la energía solar se emplea en dicho proceso, 0.5 significaría que sólo la mitad se emplea para destilar y la demás se pierde en el ambiente (Hermosillo, 1989).

Otra forma de comparar los funcionamientos de los destiladores es mediante su productividad, que suele ser una medida más práctica y desde luego, está relacionada con la eficiencia térmica. La productividad es el volumen de destilado que puede producir un destilador por cada metro cuadrado de absorbedor-evaporador y por cada día de operación. Suele tomarse como dato característico de un destilador su productividad promediada durante un mes o más. La productividad de los destiladores solares de caseta suele ser de alrededor de 3 L/m<sup>2</sup>día. En otras variantes simples puede ser de unos 5 L/m<sup>2</sup>día y en los más sofisticados, hasta alrededor de 15 ó 20 (Hermosillo, 1989).

Una baja eficiencia térmica o baja productividad pueden deberse no sólo a pérdidas de calor como tal, sino a pérdidas de agua en forma líquida o de vapor. Una fuga de vapor, por ejemplo, implica la salida de agua que ya utilizó energía solar para evaporarse y que no se manifestará como volumen de agua destilada. Una pérdida de destilado conlleva por lo general una disminución en la eficiencia porque si la fuga se produce durante el día, el agua salobre o salada se llevará consigo parte del calor solar que el absorbedor había captado y transformado en un incremento de temperatura del mismo. De lo anterior se sigue que es muy necesario que todo el sistema se encuentre perfectamente sellado, excepto por la entrada de agua salobre

o salada y la salida del destilado, que deben estar bien controladas (Hermosillo, 1989).

## **2.6 Mecanismos de transferencia de calor**

La transferencia de calor que se lleva a cabo en las diferentes partes de un destilador solar puede suceder debido a tres mecanismos: convección natural, convección forzada, conducción y radiación.

### **2.6.1 Convección natural**

La transferencia de calor por convección natural o libre es el resultado del movimiento del fluido debido a cambios de densidad que provienen del proceso de calentamiento. El movimiento del fluido en convección libre, es el resultado de las fuerzas de flotación cuando su densidad cerca de la superficie de transferencia de calor disminuye debido al calentamiento. El fluido que se calienta tiene menor densidad y tiende a moverse hacia arriba, el fluido frío tiene mayor densidad y tiende a moverse hacia abajo dando origen a la corriente de convección (Estrada, 1993).

Para describir este proceso, se utilizan números adimensionales tales como el número de Grashof, el número de Prandtl y el número de Nusselt. El número de Grashof es la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas. Si para un flujo cualquiera el número de Grashof es alto, se está en presencia de convección natural predominante, ya que la característica principal de este movimiento es la flotación como resultado de gradientes de densidad. El número de Prandtl es la relación entre la difusividad de momentum y difusividad térmica y el número de Nusselt es un parámetro adimensional que se ha utilizado en los procesos de transferencia de calor mediante fluidos y representa un gradiente de temperatura adimensional en la superficie (Torchia, 2004).

Este mecanismo tiene lugar en la interacción agua-vidrio y fondo-agua.

### **2.6.2 Convección forzada**

Es el modo de transferencia de calor en donde un flujo en contacto con una superficie le proporciona o le quita calor dependiendo de la temperatura de ambos cuerpos, la velocidad a la que fluye en fluido, entre otras variables. Fundamentalmente, la convección forzada aparece en un destilador solar en la parte exterior de la cubierta de vidrio, donde el aire del medio ambiente fluye por la cubierta y le extrae una cantidad de calor. Generalmente, un coeficiente convectivo de transferencia de calor se encuentra en función de la velocidad que posee el flujo en contacto con la superficie. Entre mayor sea la velocidad del flujo, mayor será la transferencia de calor de la cubierta exterior (Torchia, 2004).

Las fórmulas para el coeficiente de transferencia por convección forzada son empíricas por lo que dependen mucho de las condiciones, el tipo de material, los instrumentos de medición y la época en la que fueron efectuados los experimentos.

Se presenta en la interacción agua-vidrio y fondo-aire.

### **2.6.3 Conducción**

Cuando en un medio ya sea sólido, líquido o gaseoso existe un gradiente de temperatura y el calor se transmite desde la región de mayor temperatura a la región de menor temperatura ocurre una transferencia de calor por conducción. Ésta se presenta en la interacción fondo-aire del destilador solar.

La diferencia de temperatura del fondo y la temperatura ambiente del suelo, dependiendo donde se encuentre el destilador solar, es directamente proporcional a la cantidad de energía que se pierde hacia el exterior mediante conducción, y el calor por conducción es inversamente proporcional al espesor del medio por el cual fluye el calor; lo que significa que a mayor espesor la diferencia de temperaturas entre dos sistemas disminuye (Torchia, 2004).

#### 2.6.4 Radiación

La transferencia de calor por radiación en un destilador es proporcionada por la radiación solar y su intensidad depende en gran parte de las condiciones atmosféricas, la estación del año y el ángulo de incidencia de los rayos solares. Cuando la radiación interna choca contra la superficie de un cuerpo es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y, si el cuerpo es transparente, parcialmente transmitida.

Para cualquier cuerpo la suma de las propiedades ópticas, reflexividad, transmisividad y absorptividad es igual a 1. La reflexividad es igual a cero para simplificar el modelo y se asume un valor constante de la transmisividad ya que los espesores de la cubierta de vidrio y la masa de agua se mantienen dentro de un rango práctico que no tiene mayor influencia en esta propiedad (Torchia, 2004).

La transferencia de calor por radiación se describe por la ley de Stefan-Boltzmann, la cual dice que la cantidad de calor emitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie de un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.

Es decir:  $Q = \sigma T^4$

donde  $\sigma$  corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann.

Este mecanismo de transferencia se presenta en la interacción vidrio-cielo y en la interacción agua-vidrio.

Existen variaciones de la ley de Stefan-Boltzmann, es necesario utilizar una modificación para describir la transferencia de calor por radiación vidrio-cielo donde el calor radiante neto transferido por unidad de tiempo por un cuerpo gris (vidrio) a la temperatura  $T_1$  a un cuerpo negro (cielo) que le rodea a temperatura  $T_2$  es igual a

$$Q = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Otra variación de la ley de Stefan-Boltzmann corresponde al caso donde se tienen dos placas paralelas infinitas, poco separadas entre sí, de diferente emisividad entre ellas y a distinta temperatura. Para ello se tiene

$$Q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Es importante recordar que, para el modelo matemático del destilador solar, se consideran al vidrio y al agua como dos placas paralelas infinitas sin considerar el ángulo de inclinación que la cubierta de vidrio pueda tener.

En la figura 2-5 se muestran los principales flujos de calor en un destilador solar.

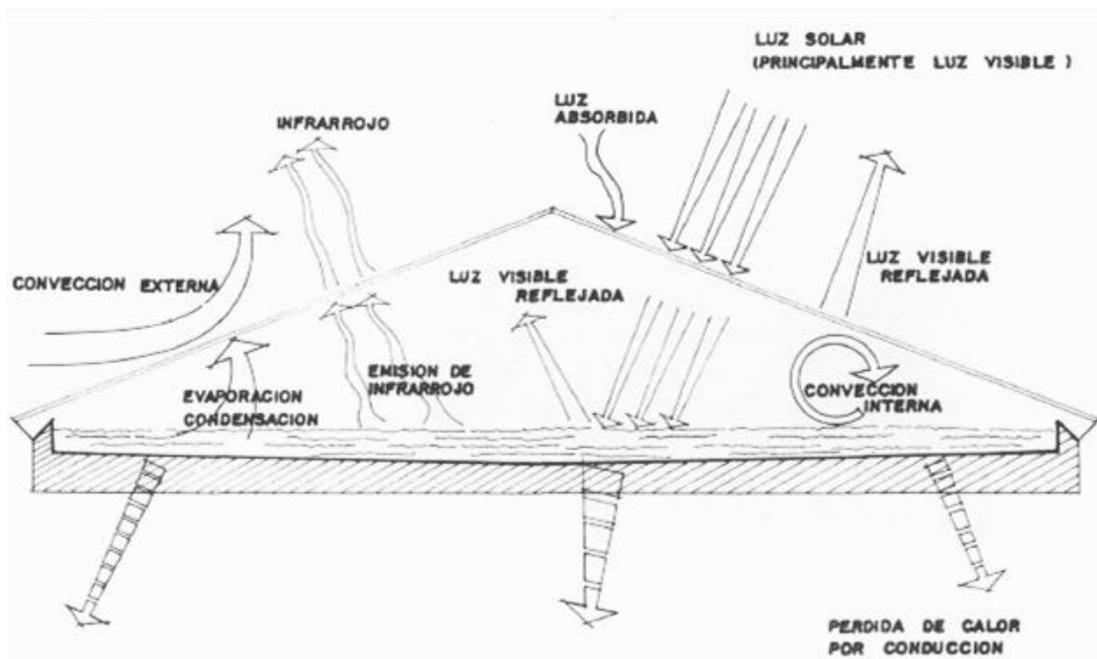


Figura 2-5 Principales flujos de calor en un destilador solar (Hermosillo, 1989)

## **2.7 Mecanismos de transferencia de masa**

La transferencia de masa es debida a la evaporación del agua en la charola; el vapor de agua es arrastrado por el aire y condensa sobre el techo del destilador. La descripción de ambos procesos deberá incluir además la descripción de la transferencia de calor.

### **2.7.1 Evaporación**

La evaporación ocurre cuando a una superficie de agua se le pone en contacto con una corriente de aire. Las moléculas de la superficie adquieren energía suficiente para abandonar el resto del cuerpo de agua, esta energía la obtienen por el calentamiento del líquido.

En un proceso de vaporización en ausencia de aire, el vapor y la superficie del líquido se encuentran bajo la misma presión, presión de saturación del vapor. La presión en el interior del líquido es relativamente despreciable, ya que solamente se incrementa con la altura de la columna de líquido (Torchia, 2004).

Malik (1982), propone un coeficiente de transferencia de calor que parte de un balance de masa entre la superficie de agua y la cubierta de vidrio. Este coeficiente considera las presiones parciales del vapor en la superficie del agua y en el vidrio. Más adelante se expresará matemáticamente este coeficiente.

### **2.7.2 Condensación**

Este fenómeno se realiza cuando un vapor hace contacto con una superficie que está a una temperatura inferior a la temperatura de saturación de vapor. El líquido moja la superficie, se esparce y forma una película, a este proceso se le llama condensación en película, si forma gotas que escurren uniéndose al hacer contacto con otras gotas, la condensación se llama por gotas (Estrada, 1993).

Al tratarse de un trabajo teórico no se incluyen parámetros de la destilación solar como salinidad del agua destilada, tensión superficial, etc.

### **Capítulo 3. Modelo teórico en estado estable**

El estado permanente de un sistema es aquél que no posee variables que dependan del tiempo. La solución de los sistemas que se comportan independientemente del tiempo es generalmente más sencilla, debido a que los términos que dependen del tiempo conforman ecuaciones diferenciales, la mayoría de las veces, no lineales. En general, es posible obtener soluciones analíticas para los sistemas en régimen permanente (Torchia, 2004).

Un régimen transitorio existe cuando las variables de las ecuaciones que modelan al fenómeno cambian con el tiempo. Es evidente que el fenómeno de la destilación solar depende del tiempo, ya que la irradiancia solar es una variable que varía con la hora en que se mide. Sin embargo, para periodos cortos de tiempo, por lo general una hora o incluso más, según Almanza y Muñoz (1994), es posible suponer que la irradiancia solar se mantiene en un valor constante. Esto da pie a que se pueda plantear un sistema en régimen permanente sin serlo, obteniendo soluciones aproximadas.

En este capítulo se presenta el modelo matemático en estado permanente o estable.

Para ello, se hacen balances de energía para cada subsistema de un destilador, en los cuales se supone que las propiedades físicas y termodinámicas son uniformes en cualquier punto, es decir que no dependen de la posición en la cual se tome la medición de tal propiedad. Cada sistema es considerado como un medio continuo.

La aplicación del modelo dependerá del intervalo de temperaturas que se alcancen con los materiales utilizados. Los destiladores solares pasivos (sólo utilizan la energía solar sin ningún sistema de apoyo externo) funcionan muy bien con el modelo de Dunkle.

Se reconoce a Dunkle, en 1961, como el primero en publicar una teoría fundamental para predecir el transporte de calor y masa en un destilador solar cerrado para un típico intervalo de temperaturas que alcanza superar los 50°C (Silva, 2012).

A temperaturas próximas a los 50°C, la presión parcial de vapor en la salmuera y la temperatura del vidrio son pequeñas en comparación con la presión barométrica total y bajo la consideración de que a estas temperaturas las propiedades termofísicas de la mezcla de vapor saturado no difieren sustancialmente de las propiedades del aire seco (Silva, 2012).

### 3.1 Modelo del destilador solar en estado estable

El parámetro más importante que afecta la producción de un destilador solar es la irradiancia solar incidente. Si  $I_{rr}$  es la irradiancia solar global incidente sobre la cubierta del destilador y  $Q_{evap}$  es la energía utilizada en la evaporación del agua, entonces el destilado de agua es dado por

$$M_d = \frac{Q_{evap}}{\lambda_{fg}} \quad (1)$$

Donde  $\lambda_{fg}$  es el calor latente de evaporación del agua.

La eficiencia del destilador está dada por

$$\eta = \frac{Q_{evap}}{I_{rr}} \quad (2)$$

La eficiencia típica de un destilador solar es de 35%.

El siguiente tratamiento aborda únicamente los principales mecanismos de intercambio de energía en un destilador solar los cuales se muestran en la figura 3-1.

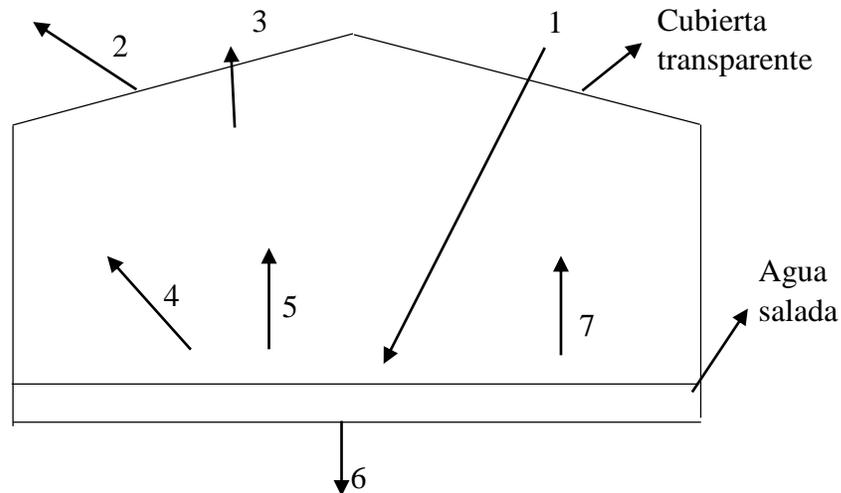


Figura 3-1 Mecanismos de intercambio de calor en un destilador solar

- (1) Irradiancia solar global,  $I_{rr}$ : Reflejada por la cubierta transparente y por la superficie del agua; absorbida por el vidrio, agua y el fondo.
- (2) Convección de la cubierta de vidrio transparente hacia el aire.
- (3) Radiación de la cubierta de vidrio transparente hacia el cielo.
- (4) Convección agua- vidrio
- (5) Radiación agua- vidrio.
- (6) Convección fondo-aire (destilador solar elevado); conducción fondo-suelo (destilador solar enterrado).
- (7) Evaporación

### 3.2 Ecuaciones de transferencia de calor

#### 3.2.1 Irradiancia solar global

Originalmente se mide como potencia/área o  $W/m^2$  y es la suma de las irradiancias directa más la difusa; es medida con un piranómetro. También se usa la irradiancia solar global como energía/área por día o  $MJ/m^2$  por día.

#### 3.2.2 Convección vidrio-aire

El flujo de calor se calcula como

$$Q_{cva} = h_{cva}(T_v - T_a) \quad (3)$$

El coeficiente de transferencia de calor se considera como una función de la velocidad del aire, según lo reportado por McAdams (1954):

$$h_{cva} = 5.7 + 3.8v_a \quad (4)$$

Donde  $v_a$  es la velocidad del aire, m/s y  $h_{cva}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección vidrio-aire en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ .

### 3.2.3 Radiación vidrio-cielo.

Como se mencionó en el capítulo anterior, incluyendo ahora las variables correspondientes, la ecuación que modela esta transferencia es

$$Q_{rns} = \varepsilon_v \sigma \left[ (T_v + 273)^4 - (T_s)^4 \right] \quad (5)$$

Donde  $\varepsilon_v$  es la emisividad del vidrio y  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.  $T_v$  es la temperatura del vidrio y  $T_s$  es la temperatura del cielo que se toma como  $T_s = 0.0552 \cdot (T_a + 273)^{1.5}$  siendo  $T_a$  la temperatura del aire. Esta expresión de la temperatura del cielo fue expresada por Swinbank (1963). Se añade a la expresión la suma de 273, para hacer la conversión correspondiente de grados Celsius a grados Kelvin. Es decir,  $T_v$  y  $T_a$  deben estar en  $^\circ C$ .

### 3.2.4 Convección agua- vidrio

El calor es transportado por el aire húmedo en el interior del destilador. El coeficiente de transferencia de calor es incorporado en el número de Nusselt. En el caso de la transferencia de calor por convección libre, el Nusselt se relaciona con los números de Grashof y Prandtl.

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (6)$$

Para un flujo de calor desde una superficie horizontal, Jakob (1949) propuso la siguiente relación del número de Nusselt:

$$Nu = C(Gr, Pr)^n \quad (7)$$

Dunkle y Malik propusieron los siguientes valores de C y n:

$$Gr < 10^3, \quad C = 1, \quad n = 0$$

$$10^4 < Gr < 3.2 * 10^5, \quad C = 0.21, \quad n = \frac{1}{4}$$

$$3.2 * 10^5 < Gr < 10^7, \quad C = 0.075, \quad n = \frac{1}{3}$$

Si existe un caso en el cual C=1 y n=0, el número de Nusselt queda, para cualquier valor de Gr y Pr como:  $Nu = 1$ .

En el primer caso la magnitud de la convección es despreciable, en el segundo el flujo de aire es laminar y en el último caso el flujo de aire es turbulento.

Para la transferencia de calor por aire húmedo con transferencia simultánea de masa de un fluido con menor peso molecular (vapor de agua) se requiere un número especial de Grashof\*. Sharpley y Boelter (1938) mostraron para evaporación no isotérmica

$$Gr^* = \frac{x_1^3 \rho_f^2 g}{\nu_f^2} \left[ \frac{M_\infty T_0'}{M_0 T_\infty'} - 1 \right] \quad (8)$$

Donde los suscriptos 0 y  $\infty$  se refieren a las condiciones en la superficie en la que se origina la evaporación y un punto lejano a ella. El suscripto *f* se refiere a aire saturado con vapor de agua. Para  $M_\infty = M_0$ :

$$Gr^* = \frac{x_1^3 \rho_f^2 g}{\nu_f^2} \left[ \frac{T_0'}{T_\infty'} - 1 \right] = \frac{x_1^3 \rho_f^2 g}{\nu_f^2} \left[ \frac{T_0' - T_\infty'}{T_\infty'} \right]$$

El término entre paréntesis se reduce a  $\beta' \Delta T$ ;  $\beta' \approx T_\infty'^{-1}$ . Entonces

$$Gr^* = \frac{x_1^3 \rho_f^2 g \beta' \Delta T}{\nu_f^2}$$

A esta expresión, se debe incluir una relación de las presiones parciales de cada una de las sustancias. Sean los suscriptos w y a referidos al vapor de agua que se difunde y al aire inerte. Suponiendo que son gases ideales y recordando que  $P_{w\infty} + P_{a\infty} = P_{w0} + P_{a0} = P_T$ , con  $P_T$  igual a presión total, se obtiene

$$\begin{aligned}
\frac{M_w T_0'}{M_0 T_\infty'} - 1 &= \frac{M_w P_{w\infty} T_0' + M_a P_{a\infty} T_0'}{M_w P_{w0} T_\infty' + M_a P_{a0} T_\infty'} - 1 \\
&= \frac{M_w (P_{w\infty} T_0' - P_{w0} T_\infty') + M_a (P_{a\infty} T_0' - P_{a0} T_\infty')}{T_\infty' (M_w P_{w0} + M_a P_{a0})} \\
&= \frac{M_w P_{w\infty} T_0' - M_w P_{w0} T_\infty' + M_a P_{a\infty} T_0' - M_a P_{a0} T_\infty' + M_w P_{w0} T_0' - M_w P_{w0} T_0' + M_a P_{a0} T_0' - M_a P_{a0} T_0'}{T_\infty' [M_w P_{w0} + M_a (P_T - P_{w0})]} \\
&= \frac{M_w P_{w0} T_0' - M_w P_{w0} T_\infty' + M_a (P_T - P_{w0}) T_0' - M_a (P_T - P_{w0}) T_\infty' + M_w P_{w\infty} T_0' - M_w P_{w0} T_0' + M_a P_{a\infty} T_0' - M_a P_{a0} T_0' + M_a P_T T_0' - M_a P_T T_0'}{T_\infty' [M_w P_{w0} + M_a (P_T - P_{w0})]} \\
&= \frac{M_w P_{w0} T_0' - M_w P_{w0} T_\infty' + M_a (P_T - P_{w0}) T_0' - M_a (P_T - P_{w0}) T_\infty' + M_w P_{w\infty} T_0' - M_w P_{w0} T_0' - M_a (P_T - P_{a\infty}) T_0' + M_a (P_T - P_{a0}) T_0'}{T_\infty' [M_w P_{w0} + M_a (P_T - P_{w0})]} \\
&= \frac{M_w P_{w0} T_0' - M_w P_{w0} T_\infty' + M_a (P_T - P_{w0}) T_0' - M_a (P_T - P_{w0}) T_\infty' + M_w P_{w\infty} T_0' - M_w P_{w0} T_0' - M_a P_{w\infty} T_0' + M_a P_{w0} T_0'}{T_\infty' [M_w P_{w0} + M_a (P_T - P_{w0})]} \\
&= \frac{[M_w P_{w0} + M_a (P_T - P_{w0})] (T_0' - T_\infty') + (M_w - M_a) (P_{w\infty} - P_{w0}) T_0'}{T_\infty' [M_w P_{w0} + M_a (P_T - P_{w0})]} \\
&= \frac{(T_0' - T_\infty')}{T_\infty'} + \frac{(M_w - M_a) (P_{w\infty} - P_{w0}) T_0'}{T_\infty' (M_a P_T + (M_w - M_a) P_{w0})} \tag{9}
\end{aligned}$$

Para un sistema aire-vapor de agua a presión atmosférica normal:  $M_w = 18$  kg/kmol,  $M_a = 28.96$  kg/kmol y  $P_T = 101325$  Pa; sustituyendo los valores en la ecuación 9 se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{M_{\infty} T_0'}{M_0 T_{\infty}'} - 1 &= \frac{(T_0' - T_{\infty}')}{T_{\infty}'} + \frac{(P_{w0} - P_{w\infty}) T_0'}{T_{\infty}' (267.734 \times 10^3 - P_{w0})} \\ &= \beta' \left[ \Delta T + \frac{(P_{w0} - P_{w\infty}) T_0'}{(267.734 \times 10^3 - P_{w0})} \right] \\ &= \beta' \Delta T' \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $\Delta T'$  es la diferencia de temperatura equivalente.

Entonces

$$Gr' = \frac{x_1^3 \rho_f^2 g \beta'}{\nu_f^2} \Delta T' \quad (11)$$

Esta es la misma relación que usó Dunkle.

Para una temperatura media del aire de 50°C, una diferencia de temperatura de 17°C y asumiendo aire saturado, el número de Grashof dado por la ecuación 11 es  $2.81 \times 10^7 \times x_1^3$ . Sobre el rango de temperaturas normales y para valores no muy pequeños de la distancia entre la superficie del agua y el vidrio  $x_1$ , el número de Grashof se encuentra en un rango para el cual  $c=0.075$  y  $n=1/3$ . Por tanto, el coeficiente de  $x_1$  se cancela. Dunkle (1961) propuso entonces que

$$Q_{cww} = 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} (T_w - T_v) \quad (12)$$

$$Q_{cww} = h_{cww} (T_w - T_v) \quad (13)$$

$P_w$  y  $P_v$  son las presiones del vapor de agua en Pa a  $T_w$  y  $T_v$  respectivamente y  $h_{cww}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección agua-vidrio en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ .

### 3.2.5 Radiación agua- vidrio

Se modela de acuerdo con la siguiente ecuación

$$Q_{rwv} = \frac{\sigma \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \quad (14)$$

Donde  $T_w$  y  $\varepsilon_w$  son la temperatura y la emisividad del agua en el colector.

### 3.2.6 Conducción-convección fondo-aire

Se modela con una ecuación similar a la de vidrio-aire:

$$Q_{cfa} = h_{cfa} (T_f - T_a) \quad (15)$$

Donde  $h_{cfa}$  es el coeficiente de transferencia de calor por conducción-convección fondo-aire en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  y  $T_f$  es la temperatura del fondo del destilador en  $^\circ C$ .

### 3.2.7 Evaporación

Baum (1964) estableció que el calor transferido desde la superficie del agua hacia la cubierta de vidrio debido a la transferencia del vapor de agua es

$$Q_{evap} = \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{P_w - P_v}{Cp_a} \right) \lambda_{fg} h_{cww} \frac{P_T}{(P_T - P_w)(P_T - P_v)} \quad (16)$$

En situaciones prácticas  $P_w$  y  $P_v$  son más pequeñas que  $P_T$  y por eso se justifica que  $(P_T - P_w)(P_T - P_v)$  es  $P_T^2$ , por lo que,

$$Q_{evap} = h_e (P_w - P_v) \quad (17)$$

De esta manera, el coeficiente de transferencia de masa  $h_e$  puede escribirse como

$$\frac{h_e}{h_{cww}} = \frac{\lambda_{fg}}{Cp_a} \frac{M_w}{M_a} \frac{1}{P_T} \quad (18)$$

Malik (1982) expresa el coeficiente de transferencia de masa de la siguiente manera

$$h_e = 0.013h_{cww}$$

Sin embargo, para el caso donde no se hace la aproximación de que  $P_w$  y  $P_v$  son más pequeñas que  $P_T$ , se ha visto que la mejor representación del calor transferido por evaporación es

$$Q_{evap} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cww} (P_w - P_v) \quad (19)$$

Donde  $Q_{evap}$  está en  $W/m^2$ .

### 3.2.8 Convección fondo-agua

Se describe por la siguiente ecuación:

$$Q_{cfw} = h_{cfw} (T_f - T_w) \quad (20)$$

Donde  $h_{cfw}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección fondo-agua en  $W/m^2\text{°C}$ .

## 3.3 Balances de energía en estado estable

### 3.3.1 Balance sobre el vidrio

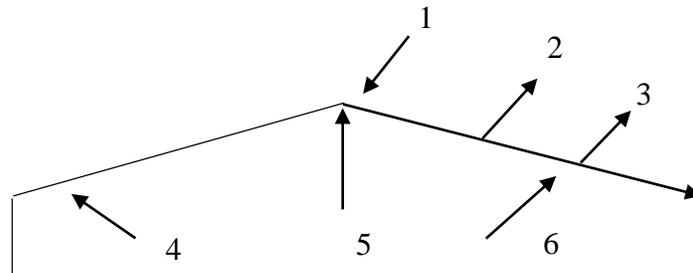


Figura 3-2 Esquema del balance de energía en el vidrio

- (1) Radiación solar global,  $I_{rr}$ : Reflejada y absorbida por la cubierta transparente
- (2) Radiación de la cubierta de vidrio transparente hacia el cielo.
- (3) Convección de la cubierta de vidrio transparente hacia el aire.
- (4) Convección agua-vidrio.

(5) Evaporación.

(6) Radiación de la superficie del agua hacia el vidrio.

El balance general sobre la cubierta de vidrio descrito en la figura 3-2 está definido por:

Almacenamiento = absorción de radiación solar + convección agua-vidrio + radiación agua-vidrio + evaporación – radiación vidrio-cielo – convección vidrio-aire.

$$m_v C_v \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v (1 - R_v) I_{rr} + Q_{cww} + Q_{rww} + Q_{evap} - Q_{rvs} - Q_{cva} \quad (21)$$

Con la consideración de estado estable  $\left( \frac{dT_v}{dt} = 0 \right)$  y sustituyendo las ecuaciones

3, 5, 12, 14 y 19 se produce la ecuación:

$$\begin{aligned} & \alpha_v (1 - R_v) I_{rr} + 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (T_w - T_v) \\ & + \frac{\sigma \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} + 16.273 \times 10^{-3} h_{cww} (P_w - P_v) \\ & - \varepsilon_v \sigma \left[ (T_v + 273)^4 - T_s^4 \right] - h_{cva} (T_v - T_a) = 0 \end{aligned}$$

Donde  $\alpha_v$  = absortancia del vidrio,  $R_v$  = reflejancia del vidrio,  $m_v$  = masa del vidrio,  $C_v$  = calor específico del vidrio. Para  $Q_{rww}$  y  $Q_{rvs}$  se han utilizado los valores  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ,  $\varepsilon_v = 0.94$  y  $\varepsilon_w = 0.95$  (Sartori, 1996).

Sustituyendo las expresiones para  $T_s$  y  $h_{cww}$ :

$$\alpha_v (1 - R_v) I_{rr} + 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (T_w - T_v)$$

$$+ \frac{\sigma [(T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4]}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} + \left\{ 16.273 \times 10^{-3} \left[ 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (T_w - T_v) \right] (P_w - P_v) \right\}$$

$$- \varepsilon_v \sigma \left\{ (T_v + 273)^4 - \left[ 0.0552 (T_a + 273)^4 \right] \right\} - (5.7 + 3.8v_a)(T_v - T_a) = 0$$

Sustituyendo valores y reacomodando, el balance en el vidrio queda de la siguiente forma:

$$\alpha_v (1 - R_v) I_{rr} + 5.08 \times 10^{-8} [(T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4]$$

$$+ 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} [T_w - T_v + 16.273 \times 10^{-3} (P_w - P_v)]$$

$$- 5.33 \times 10^{-8} \left\{ (T_v + 273)^4 - \left[ 0.0552 (T_a + 273)^{1.5} \right]^4 \right\} - (5.7 + 3.8v_a)(T_v - T_a) = 0 \quad (22)$$

### 3.3.2 Balance sobre el agua

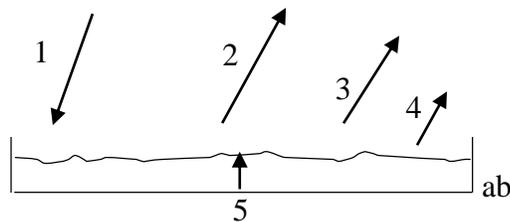


Figura 3-3 Esquema del balance de energía en el agua

- (1) Radiación solar global,  $I_{rr}$ : Reflejada y absorbida por el agua
- (2) Radiación de la superficie del agua hacia el vidrio.
- (3) Convección agua-vidrio
- (4) Evaporación.
- (5) Convección fondo-agua

El balance global sobre el agua descrito en la figura 3-3 está definido por:

Almacenamiento = absorción de radiación solar + Convección fondo-agua – convección agua-vidrio – radiación agua-vidrio – evaporación

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \alpha_v) (1 - R_v) (1 - R_w) I_{rr} + Q_{cfw} - Q_{rww} - Q_{cww} - Q_{evap} \quad (23)$$

Sustituyendo se tiene:

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \alpha_v) (1 - R_v) (1 - R_w) I_{rr} + h_{cfw} (T_f - T_w) - h_{rww} (T_w - T_v) - h_{cww} (T_w - T_v) - h_{evap} (T_w - T_v) \quad (24)$$

Combinando y considerando estado estable  $\left( \frac{dT_w}{dt} = 0 \right)$ :

$$\alpha_w (1 - \alpha_v) (1 - R_v) (1 - R_w) I_{rr} + h_{cfw} (T_f - T_w) - h_1 (T_w - T_v) = 0 \quad (25)$$

Donde  $h_1 = h_{rww} + h_{cww} + h_{evap}$ .

### 3.3.3 Balance en el fondo

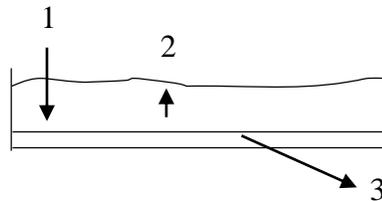


Figura 3-4 Esquema del balance de energía en el fondo I

- (1) Radiación solar global,  $I_{rr}$ : reflejada y absorbida por el fondo
- (2) Convección fondo-agua
- (3) Conducción-convección fondo-aire

El balance global en el fondo descrito en la figura 3-4 está definido por:

Almacenamiento = absorción de radiación solar – Convección fondo-agua – conducción-convección fondo-aire.

$$m_f C_f \frac{dT_f}{dt} = \alpha_f (1 - \alpha_v) (1 - \alpha_w) (1 - R_v) (1 - R_w) (1 - R_f) I_{rr} - Q_{cfw} - Q_{cfa} \quad (26)$$

En estado estable  $\left(\frac{dT_f}{dt} = 0\right)$

$$\alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr} - Q_{cfw} - Q_{cfa} = 0 \quad (27)$$

$$\alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr} - h_{cfw}(T_f - T_w) - h_{cfa}(T_f - T_a) = 0 \quad (28)$$

De la ecuación 28 se despeja  $T_f$

$$h_{cfw}(T_f - T_w) + h_{cfa}(T_f - T_a) = \alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr}$$

$$h_{cfw}T_f - h_{cfw}T_w + h_{cfa}T_f - h_{cfa}T_a = \alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr}$$

$$T_f(h_{cfw} + h_{cfa}) = \alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr} + h_{cfw}T_w + h_{cfa}T_a$$

$$T_f = \frac{\alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr} + h_{cfw}T_w + h_{cfa}T_a}{h_{cfw} + h_{cfa}}$$

Sustituyendo  $T_f$  en la ecuación 25, se obtiene:

$$\alpha_w (1 - \alpha_v)(1 - R_v)(1 - R_w)I_{rr} + \frac{h_{cfw}}{h_{cfw} + h_{cfa}} \left[ \alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr} + h_{cfa}(T_a - T_w) \right] - h_1(T_w - T_v) = 0 \quad (29)$$

Definiendo  $h_3 = h_{cfw}/h_{cfw} + h_b$  y sustituyendo en (29) los términos originales de los calores en lugar de  $h_1$  se obtiene:

$$\alpha_w (1 - \alpha_v)(1 - R_v)(1 - R_w)I_{rr} + \alpha_f (1 - \alpha_v)(1 - \alpha_w)(1 - R_v)(1 - R_w)(1 - R_f)I_{rr}h_3 + h_3 h_{cfa}(T_a - T_w) - Q_{rww} - Q_{cww} - Q_{evap} = 0 \quad (30)$$

De acuerdo con McAdams (1954),  $h_{cfw} = 137.373 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Para un espesor de aislante de 2.54 cm y una conductividad térmica del mismo de  $0.05 \text{ W/m}^2$

$\text{°C}$ , se calcula  $h_{cfa} = 2 \text{ W/ m}^2\text{°C}$ . Entonces

$$h_3 = \frac{137.373 \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}{(137.373 + 2) \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.986$$

Sustituyendo términos y las ecuaciones 12, 14 y 19 en la ecuación 30 se obtiene:

$$\begin{aligned} & (1 - \alpha_v)(1 - R_v)(1 - R_w) I_{rr} [\alpha_w + \alpha_f(1 - \alpha_w)(1 - R_f) * 0.986] + 1.972 * (T_a - T_w) \\ & - \frac{\sigma [(T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4]}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1} - 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (T_w - T_v) \\ & - 16.273 \times 10^{-3} * 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (P_w - P_v) = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

Modificando la ecuación 31 se obtiene:

$$\begin{aligned} & (1 - \alpha_v)(1 - R_v)(1 - R_w) I_{rr} [\alpha_w + \alpha_f(1 - \alpha_w)(1 - R_f) * 0.986] + 1.972 * (T_a - T_w) \\ & - 5.08 \times 10^{-8} * [(T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4] - 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \\ & [(T_w - T_v) - 16.273 \times 10^{-3} * (P_w - P_v)] = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

### 3.4 Destilado

Se calcula como:

$$M_d = \frac{Q_{evap}}{\lambda_{fg}}$$

Sustituyendo la ecuación 19:

$$M_d = \frac{16.273 \times 10^{-3} h_{cww} (P_w - P_v)}{\lambda_{fg}}$$

Es necesario hacer una conversión de unidades, ya que  $Q_{evap}$  tiene unidades de  $\text{W/m}^2$  y  $\lambda_{fg}$   $\text{kJ/kg}$ . De esta manera, la ecuación para el destilado es:

$$M_d = \frac{0.0586 h_{cwv} (P_w - P_v)}{\lambda_{fg}} \quad (33)$$

Donde  $\lambda_{fg}$  es el calor latente de evaporación del agua a  $T_w$  en kJ/kg y  $M_d$  es la cantidad de destilado en kg/h m<sup>2</sup>.

La tarea por realizar consiste en la solución de las ecuaciones 22, 32 y 33 para obtener  $T_w$ ,  $T_v$  y  $M_d$ .

### 3.5 Simplificación del modelo

Tomando algunas propiedades de la literatura según Malik (1982), Sartori (1996) y Tiwari (2007), se tiene:  $R_v = R_w = R_f = 0.05$ ,  $\alpha_v = 0.05$ ,  $\alpha_w = 0.3$ ,  $\alpha_f = 0.95$  y sustituyéndolas en las ecuaciones 21 y 31 se obtiene lo siguiente:

De la ecuación 22:

$$\begin{aligned} & 0.0475 * I_{rr} + 5.08 \times 10^{-8} \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right] \\ & + 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \left[ T_w - T_v + 16.273 \times 10^{-3} (P_w - P_v) \right] \\ & - 5.33 \times 10^{-8} \left\{ (T_v + 273)^4 - \left[ 0.0552 (T_a + 273)^{1.5} \right]^4 \right\} - (5.7 + 3.8 v_a) (T_v - T_a) = 0 \quad (34) \end{aligned}$$

De la ecuación 32:

$$\begin{aligned} & 0.791 * I_{rr} + 1.972 * (T_a - T_w) - \frac{\sigma \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} - 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (T_w - T_v) \\ & - 16.273 \times 10^{-3} * 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} (P_w - P_v) = 0 \quad (35) \end{aligned}$$

Para facilitar la solución de las ecuaciones 33, 34 y 35 se hacen las siguientes modificaciones:

$$A = 5.08 \times 10^{-8} \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right]$$

$$B = 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$C = T_w - T_v + 16.273 \times 10^{-3} (P_w - P_v)$$

$$D = 5.33 \times 10^{-8} \left\{ (T_v + 273)^4 - \left[ 0.0552 (T_a + 273)^{1.5} \right]^4 \right\}$$

De esta manera las ecuaciones quedan como:

$$0.791 * I_{rr} + 1.972 * (T_a - T_w) - A - B * C = 0 \quad (36)$$

$$0.0475 * I_{rr} + A + B * C - D - (5.7 + 3.8v_a)(T_v - T_a) = 0 \quad (37)$$

### 3.6 Primera modificación al modelo

Un factor que influye considerablemente en la producción de un destilador solar es la etapa del año en la que se realizan las mediciones. Para añadir este parámetro al modelo y lograr un mejor ajuste de los resultados teóricos con los experimentales, se hace una primera modificación en el coeficiente de transferencia de calor por convección fondo-agua  $h_{cfw}$  el cual tendrá un valor dependiendo de la estación del año en la que se haga el estudio. Según Tiwari (2007) para cálculos en verano  $h_{cfw} = 612 \text{ W/m}^2\text{°C}$  y para invierno  $h_{cfw} = 496 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Para primavera y otoño se usa un promedio entre esos dos valores,  $554 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

También se hace un ajuste a los valores de absorción y reflexión del agua y del fondo. Se sustituye  $\alpha_w$  por el término  $(1 - f_n)$  donde  $f_n$  representa un factor de atenuación de la irradiancia que recibe el agua, y para el balance en el fondo se asume que este factor describe que la energía radiante que pasa por el agua hasta el fondo ya no se refleja, por ello el término  $(1 - R_f)$  del balance en el fondo ya no aparece.

$$(1 - \alpha_v)(1 - f_n)(1 - R_v)(1 - R_w)I_{rr} + Q_{cfw} - Q_{rww} - Q_{cww} - Q_{evap} = 0$$

$$\alpha_f(1 - \alpha_v)f_n(1 - R_v)(1 - R_w)I_{rr} - Q_{cfw} - Q_{cfa} = 0$$

Donde  $\alpha_v = 0.05$ ,  $\alpha_f = 0.5$ ,  $R_v = R_w = 0.05$  y  $f_n = 0.6756$ , de acuerdo con Malik, 1982.

Considerando esto, el balance en el agua y el balance en el fondo se ven alterados por lo que ahora las ecuaciones a resolver simultáneamente en el modelo teórico son:

$$0.0475 * I_{rr} + A + B * C - D - (5.7 + 3.8v_a)(T_v - T_a) = 0$$

$$0.2781 * I_{rr} + h_{cfw}(T_f - T_w) - A - B * C = 0 \quad (38)$$

$$0.2896 * I_{rr} - h_{cfw}(T_f - T_w) - 2(T_f - T_a) = 0 \quad (39)$$

Es importante notar la aparición de una tercera ecuación al sistema de ecuaciones, en el modelo original se definieron dos para los balances y en este caso resultan tres ecuaciones. Esto es porque ya no se hace la sustitución de  $T_f$  del balance en el fondo al balance en el agua así que se sustituyen todos los valores correspondientes a dichos balances en sus ecuaciones originales en estado estable (ecuaciones 25 y 28) considerando también los términos A, B y C definidos anteriormente.

De esta manera, la primera ecuación corresponde al balance en el vidrio el cual se obtiene de la ecuación 37 y no tiene ninguna modificación. Las ecuaciones 38 y 39 corresponden al balance en el agua y al balance en el fondo respectivamente. Nótese que se modificó el valor del coeficiente que multiplica a la irradiancia solar  $I_{rr}$  y el coeficiente  $h_{cfw}$  se dejó expresado como tal en lugar de asignarle un valor fijo.

### 3.7 Segunda modificación al modelo

La siguiente modificación que se hace al modelo está expresada en el coeficiente de transferencia de calor por convección agua-vidrio  $h_{cww}$  ya que describe la manera en que el calor del agua evaporada es transportado de manera natural a la cubierta de vidrio del destilador. Toma en cuenta el tipo de flujo que se tiene, así como las presiones parciales de los sistemas involucrados (agua y vidrio).

La expresión modificada para  $h_{cww}$  se muestra a continuación:

$$h_{c_{wv}} = 0.2013 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{0.3914}$$

Para seleccionar los nuevos valores de C y n se toma de nuevo la definición del destilado dada por  $M_d = \frac{Q_{evap}}{\lambda_{fg}}$ , recordando que  $Q_{evap}$  está en función del coeficiente  $h_{c_{wv}}$  y éste a su vez de los números adimensionales Nusselt, Grashof y Prandtl, por lo que  $M_d$  puede expresarse de la siguiente manera:

$$M_d = \frac{0.016273(P_w - P_v) \cdot \frac{k_f}{d_f} \cdot C(Ra)^n}{\lambda_{fg}}$$

donde  $k_f$  es la conductividad térmica del aire húmedo igual a 0.2386 W/mK,  $d_f$  la distancia agua-vidrio con un valor de 0.12 m y  $Ra$  es el número de Rayleigh dado por  $Ra = Gr \cdot Pr$ .

C y n son las variables a obtener, por lo que es necesario realizar un despeje. De lo anterior se define

$$R = \frac{0.016273(P_w - P_v) \cdot \frac{k_f}{d_f}}{\lambda_{fg}}$$

Despejando 
$$\frac{M_d}{R} = C(Ra)^n$$

De los datos experimentales es posible obtener  $M_d$ ,  $R$  y  $Ra$ , y para realizar un mejor análisis se toma la forma lineal de la expresión anterior

$$\log \frac{M_d}{R} = \log C + n \log Ra$$

De esta forma, tomando valores experimentales de  $T_w$ ,  $T_v$  y volumen de destilado para diferentes días de medición es posible obtener mediante una regresión lineal en Excel los valores de C y n para los que se realiza de nuevo la solución del modelo teórico con la modificación en  $h_{c_{wv}}$  y se seleccionan aquellos que se ajusten mejor al comportamiento experimental.

Este cambio afectará al término B definido en la simplificación del modelo teórico para los tres balances de energía, en el vidrio, en el agua y en el fondo. La expresión anterior era de la forma

$$B = 0.884 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Se conserva la nomenclatura para facilitar la solución del modelo que se presenta más adelante.

Una modificación adicional se añade al coeficiente de transferencia de calor fondo-agua  $h_{cfa}$  el cual se expresa como una serie de resistencias entre el agua y el fondo. Está en función del espesor del material del fondo (poliestireno), de la conductividad térmica del mismo y del coeficiente de transferencia de calor por convección vidrio-aire que recordando se expresó como:

$$h_{cva} = 5.7 + 3.8v_a$$

El coeficiente  $h_{cfa}$  queda expresado como

$$\frac{1}{h_{cfa}} = \frac{\varepsilon_m}{\kappa_m} + \frac{1}{h_{cva}}$$

Y la ecuación del balance en el fondo se ve nuevamente modificada

$$0.2896 * I_{rr} - h_{cfw}(T_f - T_w) - h_{cfa}(T_f - T_a) = 0 \quad (40)$$

El coeficiente de convección fondo-agua  $h_{cfa}$  se deja expresado como una variable a definir al igual que  $h_{cfw}$ .

### 3.8 Solución del modelo del destilador solar en estado estable utilizando EES (Engineering Equation Solver).

#### 3.8.1 Solución del modelo original

Para la solución del modelo en estado estable se empleó el programa EES (Engineering Equation Solver), un software desarrollado por la empresa *F-Chart Software* bajo licencia del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este programa permite resolver los balances de energía en el destilador solar de una manera rápida ya que incluye en su base de datos propiedades termofísicas de distintas sustancias, así como comandos que pueden resolver sistemas de ecuaciones diferenciales, generar gráficos entre otras funciones útiles para la ingeniería.

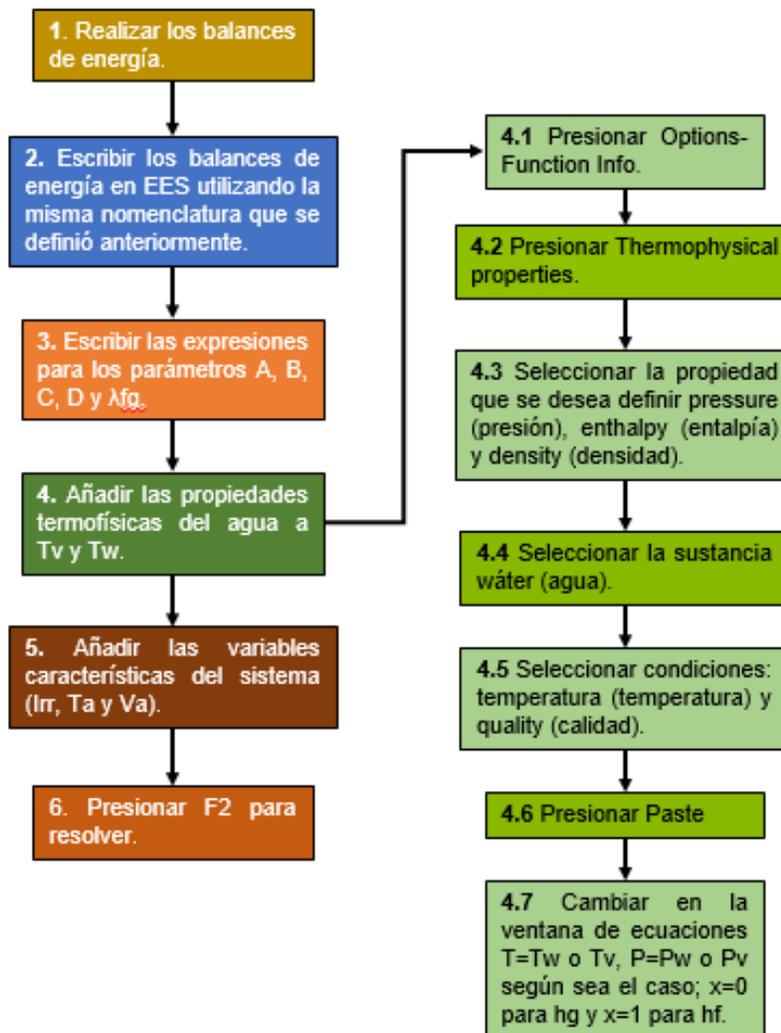


Figura 3-5 Diagrama de flujo para introducir ecuaciones en EES del estado estable

En la figura 3-5 se muestra el diagrama de flujo que describe los pasos para introducir las ecuaciones de los balances de energía con el formato que requiere EES y todas las condiciones necesarias para resolver el modelo matemático

Se introdujeron en primera instancia, los datos de irradiancia, temperatura del aire y velocidad del aire de tres diferentes localizaciones en el mundo para mostrar que el modelo es efectivo para cualquier localidad siempre y cuando se tengan las condiciones climáticas de dicho lugar. Como ejemplo se utilizaron datos de Aguascalientes en el mes de abril. En la figura 3-6, se muestra el algoritmo para resolver el sistema de ecuaciones descrito en 3.5 que corresponde al modelo teórico original en estado estable.

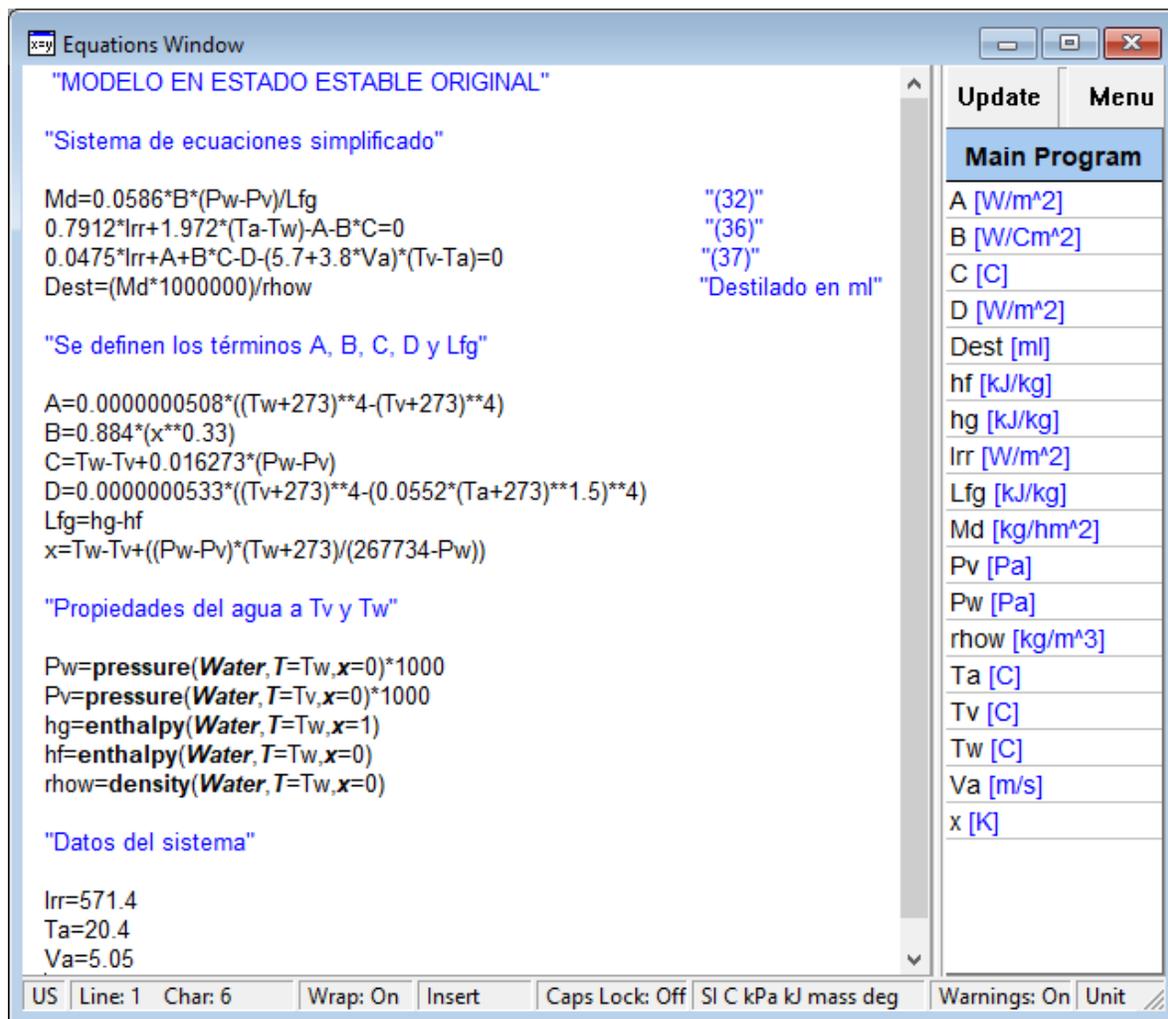


Figura 3-6. Algoritmo para resolver el modelo teórico en estado estable en EES

Del lado izquierdo se muestra el algoritmo. Primero se enlistan las ecuaciones a resolver que se definieron en 3.5, las ecuaciones 32, 36 y 37. Después se definen los parámetros A, B, C, D y  $\lambda_{fg}$  que aparecen en dichas ecuaciones.

Es importante notar que la variable B en este algoritmo está definida en función de otra variable  $x$  para hacer una simplificación en la escritura. Así mismo,  $\lambda_{fg}$  que es el calor latente de vaporización del agua, está en función de las entalpías del agua en estado líquido y la entalpía del vapor saturado, propiedades que se definen más adelante al igual que la densidad del agua  $\rho_{\text{how}}$  la cual se añade para convertir la masa de destilado  $M_d$  en  $[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}]$  a un volumen de destilado  $Dest$  en  $[\text{ml}]$ , asumiendo un área de  $1 \text{ m}^2$  por destilador y una hora de operación del equipo. Esta nueva variable se añade para hacer una mejor comparación de los datos teóricos con los experimentales los cuales están reportados en  $[\text{ml}]$ .

Las propiedades físicas del agua a  $T_v$  (temperatura del vidrio) y  $T_w$  (temperatura del agua), están dadas por un comando perteneciente al programa EES. El cual se encuentra en el menú *Options - Function Info* o simplemente presionando las teclas *Ctrl + Alt + F*. Este comando despliega una ventana como la que se observa en la figura 3-7.

Dentro de esta ventana se encuentran varias funciones para realizar simulaciones. Para los fines de este trabajo se utilizó la función *Thermophysical properties*. EES despliega del lado izquierdo una lista de propiedades termofísicas disponibles para las diferentes sustancias que se encuentran en el lado derecho. En la parte baja hay dos casillas que enuncian las condiciones para las que se quiere dicha propiedad. Para todas las propiedades, presión, entalpía y densidad, se especifican la temperatura y la calidad de la sustancia en este caso agua. Basta con señalar la propiedad, el fluido, las condiciones y oprimir “paste” para que EES pegue dichos comandos en la ventana de ecuaciones. Sólo queda escribir dentro de las ecuaciones el nombre de las variables correspondientes ( $T_w$  y  $T_v$ ).

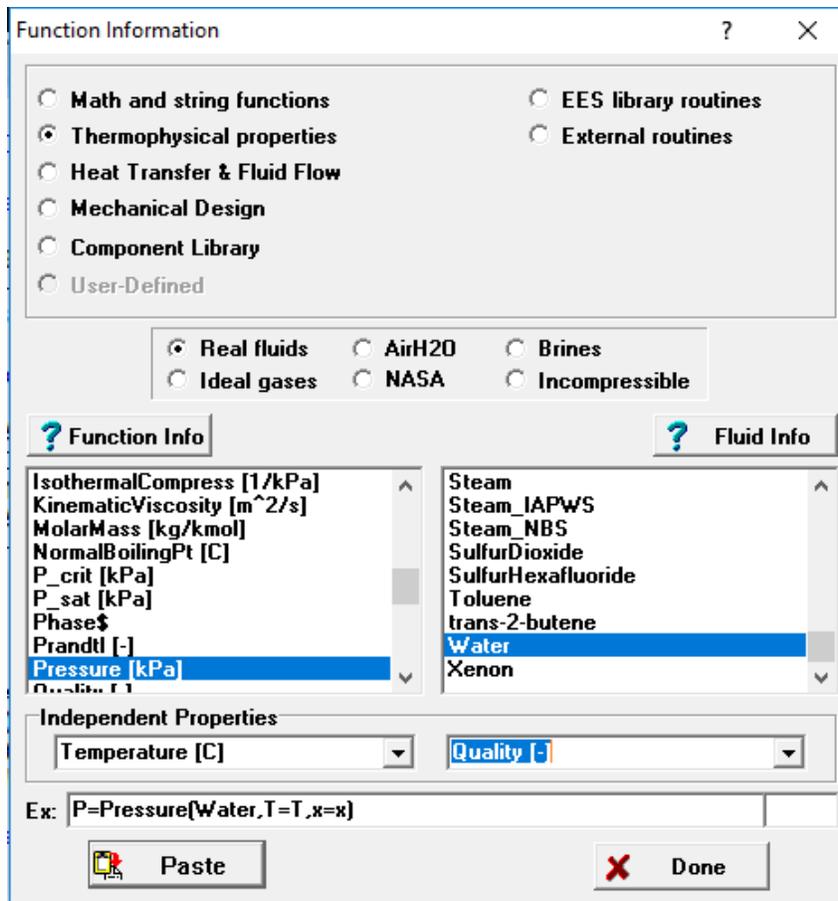


Figura 3-7. Ventana para añadir propiedades termofísicas al modelo

Por último, se añade al algoritmo de la figura 3-6 las condiciones de irradiancia, temperatura del aire y velocidad del aire a las que debe ser resuelto el sistema de ecuaciones. Una vez escrito el algoritmo, basta con presionar F2 o ir al menú *Calculate – Solve*. EES abrirá una ventana como la de la figura 3-8 y al presionar *Continue* abrirá la ventana de resultados como se muestra en la figura 3-9.

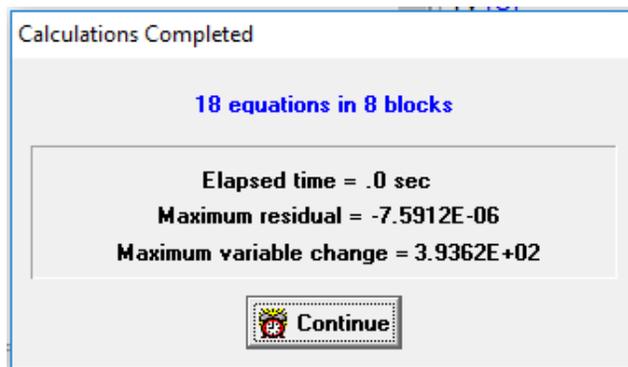


Figura 3-8 Ventana de residuos de cálculo de EES

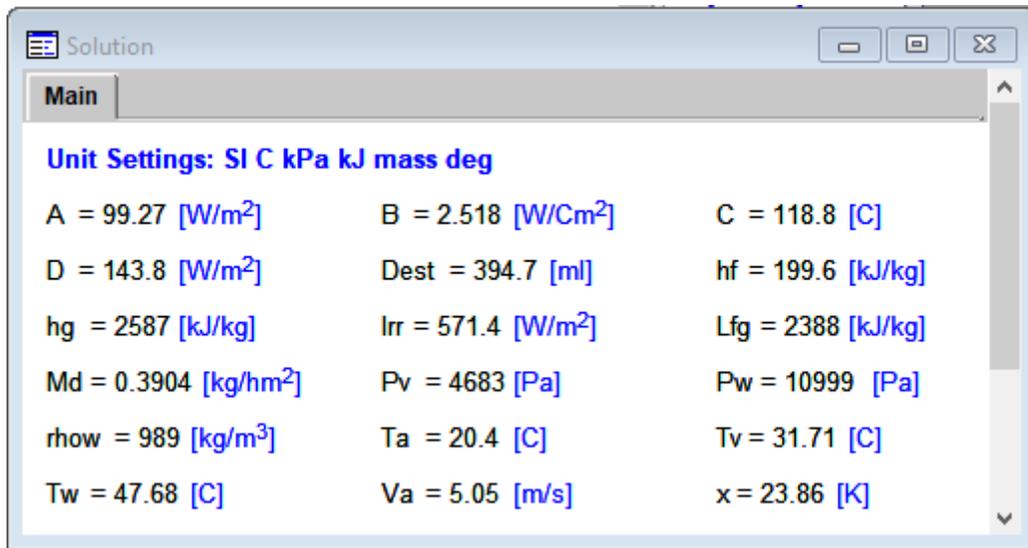


Figura 3-9 Ventana de resultados

Es importante notar que la ventana de resultados muestra todas las variables escritas en el algoritmo con sus respectivas unidades. Para ello, en la ventana de ecuaciones de la figura 3-6 del lado derecho se halla una lista de todas las variables en orden alfabético. Al dar click sobre cualquiera de las variables EES despliega una ventana como la de la figura 3-10 donde se muestra el ejemplo para la variable  $T_a$ . Ahí se encuentra una casilla llamada *Units*. Al darle click derecho, EES abre una lista con las unidades disponibles (figura 3-11). Se escogen las unidades necesarias y se oprime *Paste*, o bien se puede escribir directamente sobre la casilla *Units*.

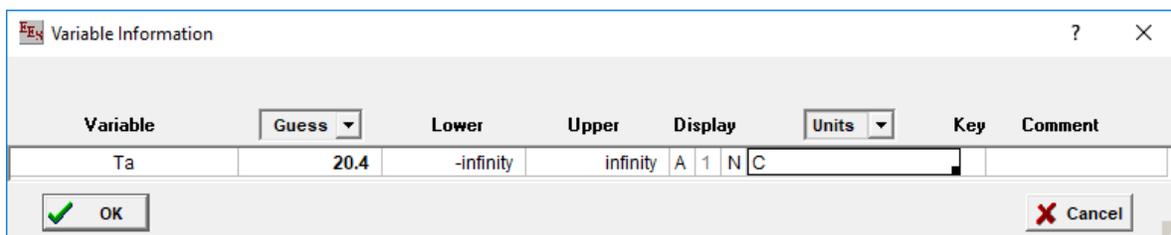


Figura 3-10 Información de la variable

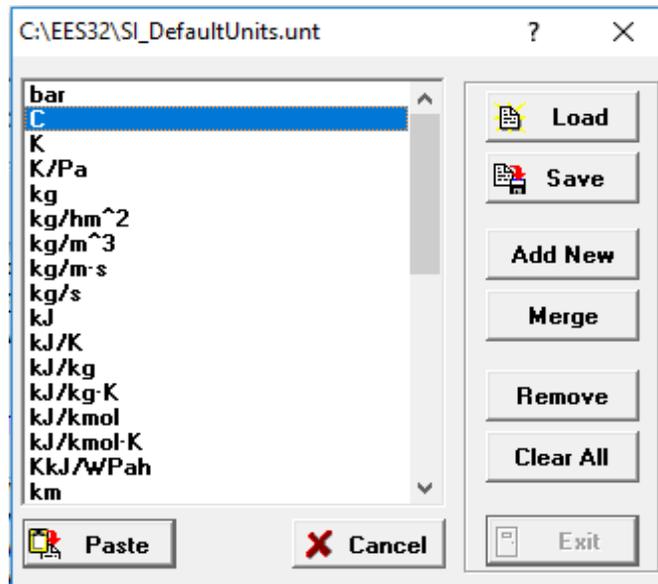


Figura 3-11 Unidades disponibles en EES

Otra observación importante es que EES probablemente no reconozca algunas de las unidades que se especifican manualmente y que el programa no tiene añadidas por defecto, por lo que en la ventana de resultados puede aparecer una leyenda que señale errores de unidades. Sin embargo, un análisis dimensional manual puede disipar cualquier duda generada por esa leyenda.

### 3.8.2 Solución del modelo con la primera modificación en $h_{cfw}$

La solución de este nuevo modelo no tiene mayor diferencia a la solución que se presenta en 3.8.1. En la figura 3-12 se muestra el algoritmo modificado donde se elimina la ecuación 36 y se añaden la 38 y 39. Además en la sección *Datos del sistema* se añade  $h_{cfw}$  como variable. La figura 3-13 presenta la solución a este modelo.

Equations Window

"MODELO EN ESTADO ESTABLE PRIMERA MODIFICACIÓN"

"Sistema de ecuaciones simplificado"

$$Md=0.0586*B*(Pw-Pv)/Lfg \quad "(32)"$$

$$0.0475*Irr+A+B*C-D-(5.7+3.8*Va)*(Tv-Ta)=0 \quad "(37)"$$

$$0.2781*Irr+hcfw*(Tf-Tw)-A-B*C=0 \quad "(38)"$$

$$0.2896*Irr-hcfw*(Tf-Tw)-2*(Tf-Ta)=0 \quad "(39)"$$

$$Dest=(Md*1000000)/rhow \quad "Destilado en ml"$$

"Se definen los términos A, B, C, D y Lfg"

$$A=0.0000000508*((Tw+273)**4-(Tv+273)**4)$$

$$B=0.884*(x**0.33)$$

$$C=Tw-Tv+0.016273*(Pw-Pv)$$

$$D=0.0000000533*((Tv+273)**4-(0.0552*(Ta+273)**1.5)**4)$$

$$Lfg=hg-hf$$

$$x=Tw-Tv+((Pw-Pv)*(Tw+273)/(267734-Pw))$$

"Propiedades del agua a Tv y Tw"

$$Pw=pressure(Water, T=Tw, x=0)*1000$$

$$Pv=pressure(Water, T=Tv, x=0)*1000$$

$$hg=enthalpy(Water, T=Tw, x=1)$$

$$hf=enthalpy(Water, T=Tw, x=0)$$

$$rhow=density(Water, T=Tw, x=0)$$

"Datos del sistema"

$$Irr=571.4$$

$$Ta=20.4$$

$$Va=5.05$$

$$hcfw=554$$

Update Menu

Main Program

- A [W/m^2]
- B [W/Cm^2]
- C [C]
- D [W/m^2]
- Dest [ml]
- hcfw [W/Cm^2]
- hf [kJ/kg]
- hg [kJ/kg]
- Irr [W/m^2]
- Lfg [kJ/kg]
- Md [kg/hm^2]
- Pv [Pa]
- Pw [Pa]
- rhow [kg/m^3]
- Ta [C]
- Tf [C]
- Tv [C]
- Tw [C]
- Va [m/s]
- x [K]

US Line: 1 Char: 6 Wrap: On Insert Caps Lock: Off SI C kPa kJ mass deg Warnings: On Unit C

Figura 3-12 Algoritmo del modelo estable con primera modificación

Nótese que se usa el valor de 554 W/m<sup>2</sup>°C para  $h_{cfw}$  ya que los datos utilizados para la medición corresponden al mes de abril que pertenece a la primavera.

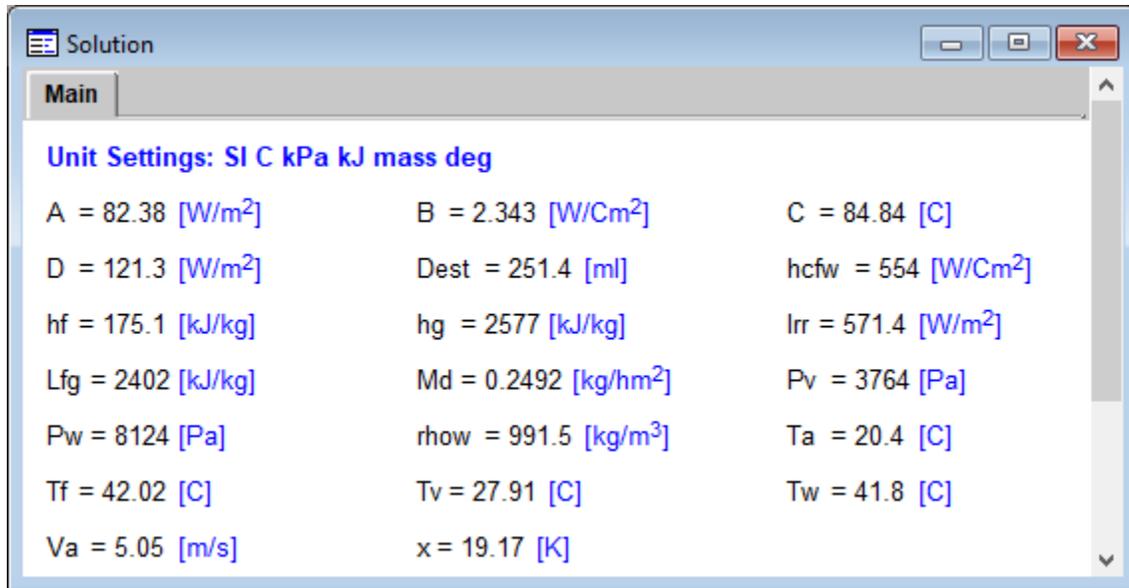


Figura 3-13 Ventana de resultados del modelo estable con primera modificación

Es importante notar que con esta modificación el destilado disminuyó casi en un 40% de su valor en el modelo original. De 394.2 ml a 251.4 ml. También las temperaturas  $T_w$  y  $T_v$  disminuyeron en un par de grados Celsius. Posteriormente se verá con mayor detalle la importancia de este resultado.

### 3.8.3 Solución del modelo estable con la segunda modificación en $h_{cww}$ y $h_{cfa}$

En la figura 3-14 se muestra el algoritmo para la solución del modelo en estado estable con la segunda modificación donde se mantienen las ecuaciones 32, 37, 38 y 39, así como las definiciones de los términos A, C, D y  $\lambda_{fg}$ . También se conserva la primera modificación en  $h_{cfw}$  añadiéndola como variable.

Se ha añadido al algoritmo la modificación en B correspondiente al coeficiente de transferencia de calor por convección agua-vidrio  $h_{cww}$  y  $h_{cfa}$  se modifica de  $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$  a  $1.2612 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Los resultados se muestran en la figura 3-15.

Nuevamente, el volumen de destilado disminuye con la última modificación, de 251.4 ml a 188 ml.

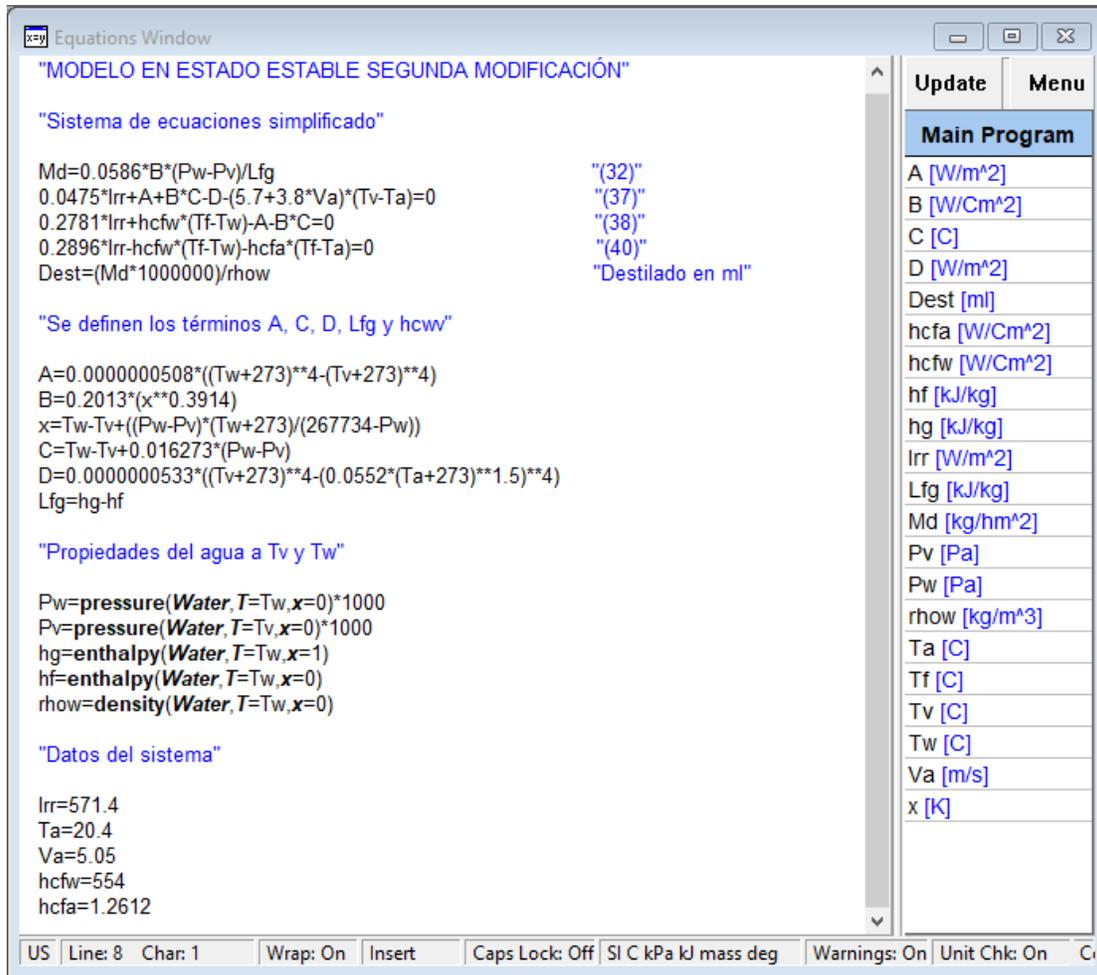


Figura 3-14 Algoritmo del modelo estable con segunda modificación

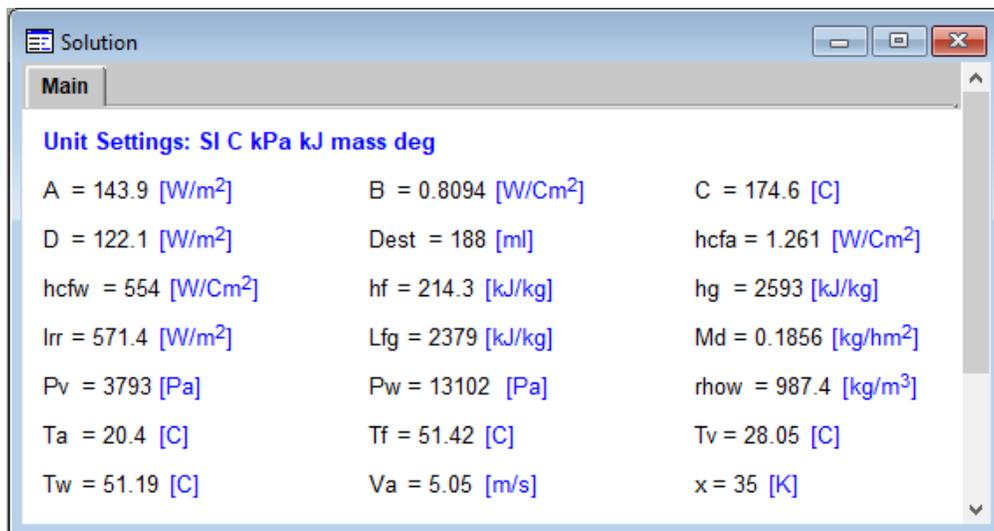


Figura 3-15 Ventana de resultados del modelo estable con segunda modificación

### 3.9 Simulación de datos teóricos de destilado con EES

Como se mencionó anteriormente, el modelo teórico en estado estable es capaz de simular la producción de destilado y las temperaturas del agua y del vidrio para cualquier lugar que se desee solamente introduciendo los datos de irradiancia, temperatura del aire y velocidad del aire. En las tablas 3-1, 3-2 y 3-3 se muestran ejemplos para diferentes partes del planeta, Islandia, Filipinas y Aguascalientes, lugares que se han elegido al azar solamente bajo el criterio de tener localizaciones muy diferentes en el globo terráqueo. Se ha utilizado el modelo resuelto con la segunda modificación para la simulación.

Los datos de irradiancia solar, temperatura del aire y velocidad del aire fueron tomados de la base de datos SSE (Surface meteorology and Solar Energy) de la NASA.

Tabla 3-1 Estimados de producción de destilado para Islandia

Mes	Islandia			
	Irr	Ta	Va	Dest
	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	ml
Enero	23.0	-4.83	8.91	1
Febrero	65.4	-4.84	9.09	2
Marzo	116.2	-3.75	8.58	6
Abril	172.2	-0.67	7.44	13
Mayo	209.1	3.31	6.43	22
Junio	213.0	6.84	5.92	25
Julio	212.0	8.74	5.72	27
Agosto	204.2	8	5.88	25
Septiembre	162.6	4.63	6.81	15
Octubre	93.8	0.84	7.71	5
Noviembre	40.4	-2.19	7.79	1
Diciembre	7.5	-4.18	9.19	0

Tabla 3-2 Estimados de producción de destilado para Filipinas

Mes	Filipinas			
	Irr	Ta	Va	Dest
	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	ml
Enero	402.6	25.3	7.09	119
Febrero	452.1	25.6	6.27	143
Marzo	496.7	26.4	5.84	168
Abril	516.1	27	4.5	183
Mayo	452.0	27	3.5	151
Junio	378.1	26.6	4.78	113
Julio	352.3	26.3	4.56	101
Agosto	352.0	26.5	5.94	100
Septiembre	371.3	26.3	4.57	109
Octubre	366.1	26.2	4.72	107
Noviembre	357.4	26	5.96	101
Diciembre	360.5	25.5	7.27	101

Tabla 3-3 Estimados de producción de destilado para Aguascalientes

Mes	Aguascalientes			
	Irr	Ta	Va	Dest
	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	ml
Enero	433.9	13.7	5.01	104
Febrero	501.8	15.4	5.15	138
Marzo	570.8	17.8	5.45	178
Abril	571.4	20.4	5.05	188
Mayo	548.1	22	4.25	183
Junio	478.4	20.1	3.52	144
Julio	456.4	18.6	3.5	129
Agosto	468.8	18.5	3.19	135
Septiembre	447.2	17.8	3.72	122
Octubre	473.3	16.5	4.03	130
Noviembre	467.6	14.9	4.5	122
Diciembre	426.9	14	4.7	102

Se observa que, para Islandia, el cual es un lugar muy frío con temperaturas muy bajas durante el año, la producción de destilado es mucho menor que para Filipinas y Aguascalientes. En todos los casos, se observa un comportamiento periódico, es decir que va creciendo durante el año, tiene un máximo y de nuevo comienza a decrecer. Esto sucede para los meses de abril y mayo en Filipinas y Aguascalientes debido a que estos meses suelen ser los de mayor irradiación solar, conforme aumenta ésta, se tiene un mayor volumen de destilado. Esto se muestra mejor en los datos para Filipinas, ya que a pesar de que las temperaturas del aire son bastante parecidas durante todo el año, los cambios en la irradiación solar hacen que se produzca destilado en menor o mayor cantidad y esto se refleja también en la segunda mitad del año donde las irradiaciones no tienen valores tan diferentes entre sí, por lo que la producción de destilado oscila en valores similares para esos meses. Lo mismo ocurre en Aguascalientes. La velocidad del aire también es un factor importante que influye en la destilación, sin embargo, es mucho más complicado encontrar un patrón para estos valores.

Con estos tres ejemplos, se puede ver que el modelo teórico propuesto depende totalmente de las condiciones ambientales del lugar de medición, pero que es posible simular el comportamiento de un destilador solar ubicado en cualquier parte del mundo ya que los datos proporcionados ( $I_{rr}$ ,  $T_a$  y  $V_a$ ) ajustarán el modelo para obtener resultados adecuados.

A continuación, se realiza un análisis del modelo teórico en estado estable utilizando datos experimentales de irradiación solar, temperatura del aire y velocidad del viento obtenidos de destiladores solares en operación y de la base de datos meteorológica y solar de la NASA. El SSE despliega datos promedio mensuales como se vio en las tablas 3-1, 3-2 y 3-3. De los todos los datos experimentales disponibles se eligieron las mediciones del día 16 de marzo asumiendo que son representativas de todo ese mes por lo que el análisis se hace también con los valores promedio del mes de marzo que proporciona la NASA. El procedimiento para la toma de los datos experimentales se muestra en el capítulo 4.

Las coordenadas utilizadas para la NASA fueron 20.1861783, -99.2480233 correspondientes al municipio de Mangas, Hidalgo, México.

En la tabla 3-4 se muestran primero los datos experimentales y en seguida los calculados con el programa EES con los datos del SSE.

Tabla 3-4 Análisis del modelo en estado estable

	Irr [W/m <sup>2</sup> ]	Ta [°C]	Va [m/s]	Tw [°C]	Tv [°C]	Dest [ml]	
Experimentales	534.1	23.2	0.48	45.53	38.76	46	
Original	534.1	23.2	0.48	56.15	45.56	401	
Primera modificación	534.1	23.2	0.48	48.25	38.16	253	
Segunda modificación	534.1	23.2	0.48	56.60	38.74	197	
<b>NASA</b> (Tw, Tv y Md calculados con EES)	Modelo original	540	16.7	4.99	44.17	27.18	347
	Primera modificación	540	16.7	4.99	38.21	23.55	218
	Segunda modificación	540	16.7	4.99	47.64	23.69	160

Es importante notar que el valor de la irradiancia experimental (534.1 W/m<sup>2</sup>) no es muy diferente del valor teórico promedio (540 W/m<sup>2</sup>), lo que quiere decir que la suposición de que los datos experimentales son representativos del mes de marzo puede ser válida, sin embargo, al tratarse de un modelo en estado estable, los resultados teóricos calculados no representan a la realidad, aunque se busca, por supuesto, que presenten un comportamiento acorde a lo que se esperaría experimentalmente.

La temperatura del aire y la velocidad del viento teóricas muestran una diferencia mayor a los valores experimentales, esto puede ocurrir por el hecho de que los datos proporcionados por la NASA para la temperatura del aire son medidos a 10 m de la superficie y los de velocidad del viento a 50 m de la superficie y sus valores influyen también en que la temperatura del vidrio teórica sea mucho menor que la experimental.

Se hace notar también el hecho de que el modelo teórico se fue ajustando con las diferentes modificaciones, sobre todo con el destilado, el cual con el algoritmo original resulta ser muy grande en comparación al obtenido experimentalmente. Las siguientes dos modificaciones disminuyen el valor de *Dest* dando una buena base para continuar con el modelo en estado transitorio.

## Capítulo 4. Modelo teórico en estado transitorio

### 4.1 Modelo del destilador solar en estado transitorio

Para el modelo en estado transitorio se hacen las siguientes suposiciones:

- No existen fugas de vapor en el equipo.
- Las superficies del agua y el vidrio se consideran paralelas. Es decir, que no se toma en cuenta el ángulo de la cubierta de vidrio.
- La viscosidad, conductividad y calor de vaporización se consideran constantes.
- Se considera que no existen gradientes de temperatura en las direcciones vertical ni horizontal en el fondo, el agua y el vidrio.
- Las temperaturas del vidrio, tanto externa como interna, son aproximadamente las mismas.
- Las características ópticas de transmitancia, reflejancia, absortancia y emisividad se suponen constantes. Esto se considera válido, ya que, aunque dichas características varían de acuerdo con el ángulo de incidencia del Sol, lo hacen de una manera insignificante para los fines de este trabajo.
- La irradiancia solar y la temperatura del aire se pueden expresar como una función del tiempo.
- Solamente existe almacenamiento de energía en el agua.

De esta manera, se retoman los balances de energía para el vidrio, el agua y el fondo, así como la ecuación 32 que describe la producción de destilado por hora.

### 4.2 Balances de energía en estado transitorio

#### 4.2.1 Balance sobre el vidrio

Para el balance en el vidrio se retoma la ecuación 37 definida en el capítulo 3

$$0.0475 * Irr + A + B * C - D - (5.7 + 3.8v_a)(T_v - T_a) = 0$$

## 4.2.2 Balance sobre el agua

Considerando las modificaciones al modelo teórico que se hicieron en el capítulo anterior, se tiene que para el balance en el agua:

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = (1 - \alpha_v)(1 - f_n)(1 - R_v)(1 - R_w) I_{rr} + Q_{cfw} - Q_{rww} - Q_{cww} - Q_{evap}$$

Sustituyendo las ecuaciones 13, 14, 19 y 20

$$Q_{cww} = h_{cww} (T_w - T_v)$$

$$Q_{rww} = \frac{\sigma \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1}$$

$$Q_{evap} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cww} (P_w - P_v)$$

$$Q_{cfw} = h_{cfw} (T_f - T_w)$$

Donde  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ,  $\varepsilon_v = 0.94$  y  $\varepsilon_w = 0.95$  (Sartori, 1996),  $R_v = R_w = 0.05$ ,  $\alpha_v = 0.05$ ,  $\alpha_f = 0.5$  y  $f_n = 0.6756$  (Tiwari, 2003). Además, considerando los términos A, B, C y D y las modificaciones en  $h_{cfw}$  y  $h_{cww}$

$$A = 5.08 \times 10^{-8} \left[ (T_w + 273)^4 - (T_v + 273)^4 \right]$$

$$B = 0.2013 \left[ T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w} \right]^{0.3914}$$

$$C = T_w - T_v + 16.273 \times 10^{-3} (P_w - P_v)$$

$$D = 5.33 \times 10^{-8} \left\{ (T_v + 273)^4 - \left[ 0.0552 (T_a + 273)^{1.5} \right]^4 \right\}$$

El balance queda de la forma siguiente recordando que el agua es el único elemento del sistema en el que hay almacenamiento de calor.

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = 0.2781 * Irr + h_{cfw} (T_f - T_w) - A - B * C$$

Por último, resulta más fácil medir la densidad del agua conforme cambia la temperatura de ésta, además es necesario hacer una conversión de unidades de kJ/h a W/m<sup>2</sup>, por lo que el balance final sobre el agua es el siguiente:

$$0.2778 * \rho_w C_w \xi_w \frac{dT_w}{dt} = 0.2781 * Irr + h_{cfw} (T_f - T_w) - A - B * C \quad (41)$$

Donde  $\xi_w$  es el espesor del agua sobre el fondo del destilador definido por  $\xi_w = \frac{V}{A}$  siendo  $V=0.015 \text{ m}^3$  y  $A=1 \text{ m}^2$ , por lo tanto,  $\xi_w=0.015 \text{ m}$ .

#### 4.2.3 Balance sobre el fondo

Para el balance en el fondo se retoma la ecuación 40 definida en el capítulo 3

$$0.2781 * Irr - h_{cfw} (T_f - T_w) - h_{cfa} (T_f - T_a) = 0$$

Los parámetros que se introducirán al modelo como una función del tiempo serán la irradiancia solar  $Irr$  y temperatura del aire  $T_a$ .

El modelo teórico en estado transitorio consiste en la resolución de las ecuaciones 32, 37, 40 y 41.

#### 4.3 Solución del modelo en estado transitorio utilizando EES

Para resolver el modelo teórico en estado transitorio se sigue el algoritmo mostrado en las figura 4-1 y 4-2. (Los valores que se muestran corresponden al análisis que se presenta más adelante de los datos del día 16 de marzo de 2018). Los subíndices  $i$  (izquierda) y  $d$  (derecha) se refieren a los acercamientos de las ecuaciones de irradiancia y temperatura del aire por dichos lados, debido a que se decidió obtener dos ecuaciones que describan los datos experimentales acercándose por la izquierda y por la derecha.

En la expresión del espesor  $\xi_w$  en este caso llamado  $e_w$  para el algoritmo en EES, se prefiere utilizar las unidades de  $m^3/m^2$  para cumplir con el análisis dimensional correcto en ambos lados de la ecuación del balance en el agua. Las unidades finales deben ser  $[W/m^2]$ .

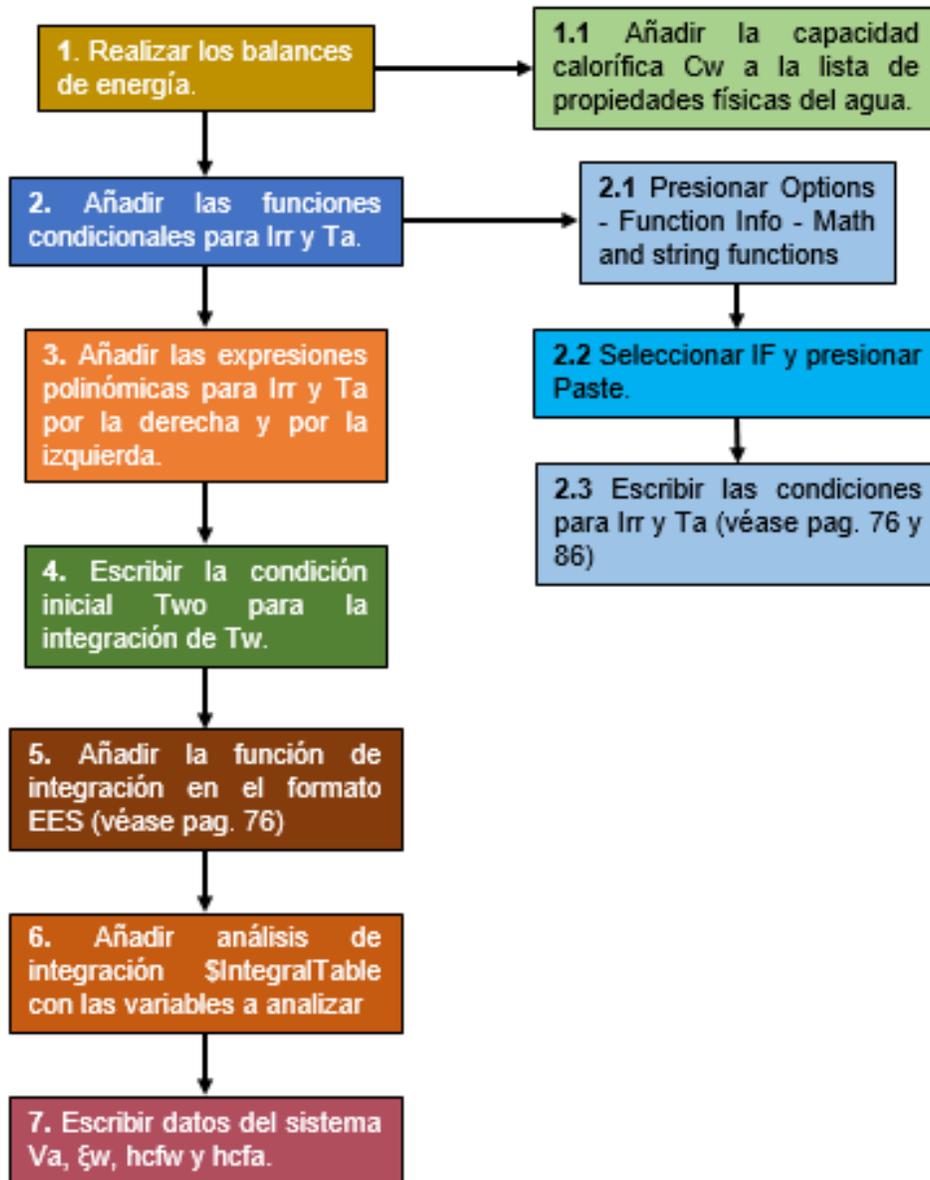


Figura 4-1 Diagrama de flujo para introducir ecuaciones en EES del estado transitorio

Equations Window

"MODELO EN ESTADO TRANSITORIO"

"Sistema de ecuaciones"

$$\begin{aligned} Md &= 0.0586 \cdot B \cdot (P_w - P_v) / Lfg && "(32)" \\ 0.0475 \cdot Irr + A + B \cdot C - D - (5.7 + 3.8 \cdot Va) \cdot (T_v - T_a) &= 0 && "(37)" \\ 0.2896 \cdot Irr - h_{cfw} \cdot (T_f - T_w) - h_{cfa} \cdot (T_f - T_a) &= 0 && "(40)" \\ 0.2778 \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot ew \cdot dTwdt &= 0.2781 \cdot Irr + h_{cfw} \cdot (T_f - T_w) - A - B \cdot C && "(41)" \\ Dest &= (Md \cdot 1000000) / \rho_{how} && "Destilado en ml" \end{aligned}$$

"Se definen los términos A, B, C, D y Lfg"

$$\begin{aligned} A &= 0.0000000508 \cdot (T_w + 273)^{**4} - (T_v + 273)^{**4} \\ B &= 0.2013 \cdot (x^{**0.3914}) \\ x &= T_w - T_v + ((P_w - P_v) \cdot (T_w + 273)) / (267734 - P_w) \\ C &= T_w - T_v + 0.016273 \cdot (P_w - P_v) \\ D &= 0.0000000533 \cdot (T_v + 273)^{**4} - (0.0552 \cdot (T_a + 273)^{**1.5})^{**4} \\ Lfg &= hg - hf \\ Irr &= \text{if}(t, 5, Irr_i, Irr_d) \\ Ta &= \text{if}(t, 5, Ta_i, Ta_d) \end{aligned}$$

"Funciones del tiempo izquierda"

$$\begin{aligned} Irr_i &= -35.579 \cdot t^{**2} + 194.23 \cdot t + 727.64 \\ Ta_i &= -0.0539 \cdot t^{**3} + 0.0084 \cdot t^{**2} + 3.1043 \cdot t + 19.983 \end{aligned}$$

"Funciones del tiempo derecha"

$$\begin{aligned} Irr_d &= 38.387 \cdot t^{**3} - 788.56 \cdot t^{**2} + 5042.2 \cdot t - 9490.5 \\ Ta_d &= 0.125 \cdot t^{**3} - 3 \cdot t^{**2} + 21.875 \cdot t - 21 \end{aligned}$$

"Propiedades del agua a  $T_v$  y  $T_w$ "

$$\begin{aligned} P_w &= \text{pressure}(\text{Water}, T=T_w, x=0) \cdot 1000 \\ P_v &= \text{pressure}(\text{Water}, T=T_v, x=0) \cdot 1000 \\ hg &= \text{enthalpy}(\text{Water}, T=T_w, x=1) \\ hf &= \text{enthalpy}(\text{Water}, T=T_w, x=0) \\ \rho_{how} &= \text{density}(\text{Water}, T=T_w, x=0) \\ C_w &= \text{cp}(\text{Water}, T=T_w, x=0) \end{aligned}$$

"Condiciones iniciales"

$$Two = 36.86$$

"Funciones integradas"

$$Tw = Two + \text{integral}(dTwdt, t, 0, 9)$$

\$IntegralTable t, Irr, Ta, Tw, Tv, Dest, x

"Datos del sistema"

$$\begin{aligned} Va &= 0.47 \\ ew &= 0.015 \\ h_{cfw} &= 496 \\ h_{cfa} &= 1.2612 \end{aligned}$$

Update Menu

Main Program

- A [W/m^2]
- B [W/m^2C]
- C [C]
- Cw [kJ/kgC]
- D [W/m^2]
- Dest [ml]
- dTwdt
- ew [m^3/m^2]
- h<sub>cfa</sub> [W/Cm^2]
- h<sub>cfw</sub> [W/Cm^2]
- hf [kJ/kg]
- hg [kJ/kg]
- Irr [W/m^2]
- Irr\_d [W/m^2]
- Irr\_i [W/m^2]
- Lfg [kJ/kg]
- Md [kg/hm^2]
- Pv [Pa]
- Pw [Pa]
- rho<sub>w</sub> [kg/m^3]
- t [h]
- Ta [C]
- Ta\_d [C]
- Ta\_i [C]
- Tf [C]
- Tv [C]
- Tw [C]
- Two [C]
- Va [m/s]
- x [K]

US | Line: 55 | Char: 12 | Wrap: On | Insert | Caps Lock: Off | SI C kPa kJ mass deg | Warnings: On | Unit Chk: On | C

Figura 4-2 Algoritmo para resolver el modelo en estado transitorio en EES

Se hace notar que se debe añadir una expresión para el calor específico del agua ya que esta propiedad no aparece en el estado estable. Para ello, de nuevo se hace uso de la herramienta *Function Info* del menú *Options*, se selecciona  $C_p$  [kJ/kgK] de la lista de *Thermophysical Functions* y se especifica la temperatura  $T = T_w$  y la calidad  $x = 0$ .

También se añaden las ecuaciones de  $Irr$  y  $T_a$  en función del tiempo que se obtuvieron por medio de líneas de tendencia utilizando el programa Excel como se verá más adelante. Para poder hacer buen uso de esas expresiones es necesario añadir funciones condicionales *IF* al algoritmo. Éstas dependerán del valor de  $t$  en el que fueron divididos los datos experimentales para crear las líneas de tendencia y funcionan de la siguiente manera:

$$x = \text{if}(A, B, X, Y, Z)$$

Si  $A < B$  la función  $x$  devolverá el valor igual al valor puesto en la posición de  $X$ , si  $A = B$  la función devolverá el valor de asignado en  $Y$ , y si  $A > B$  la función devolverá el valor en  $Z$ . Se encuentra en el menú *Options-Function info*.

A pesar de que la velocidad del aire también varía considerablemente respecto del tiempo, los valores resultan ser muy dispersos y encontrar una ecuación que describa el comportamiento de dichos datos resulta muy complicado y poco preciso, por lo tanto, se utilizó un promedio por día de los valores experimentales de la velocidad del aire y se consideró constante.

Para resolver el sistema de ecuaciones, EES puede considerar la diferencial  $\frac{dT_w}{dt}$  como una variable por lo que se puede hacer uso de la función *integral*. Es necesario indicar un valor inicial de la variable a integrar, en este caso  $T_w$ . La función se escribe como  $T_{w0}$  más la integral de la diferencial expresada en el balance del agua, entre paréntesis se debe poner la variable a integrar ( $dt$ ), la variable sobre la que se integrará ( $t$ ), el límite inferior y el límite superior de integración. Es decir

$$\%Error = \left| \frac{Valor_{exp} - Valor_{calc}}{Valor_{exp}} \right| \times 100$$

Un mejor análisis en función del tiempo puede realizarse creando una tabla con el comando  $\$IntegralTable$  donde seguido de esta leyenda se indiquen las variables que quieren mostrarse en dicha tabla tal y como fueron escritas en la ventana de ecuaciones. Ésta dará valores a  $t$  desde el límite inferior hasta el límite superior especificados anteriormente y resolverá para las demás variables.

Otro aspecto importante a considerar es que debe establecerse que el término

$$x = T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w}$$

correspondiente al  $\Delta T$  de la expresión del flujo de

calor por convección no pueda ser menor a cero, ya que dentro de la iteración para resolver el modelo teórico  $x$  puede llegar a tener valores negativos y EES no puede elevar un número negativo a una potencia no entera. Esto se especifica dando clic en la letra  $x$  que se encuentra en la lista de variables del lado derecho en la ventana de ecuaciones. El cambio de los límites de iteración se muestra en la figura 4-3.

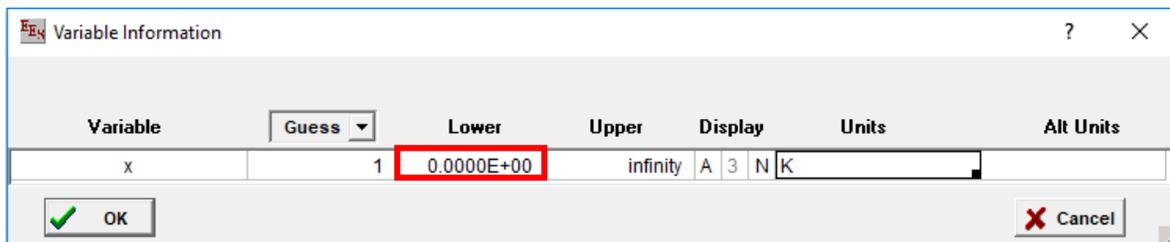


Figura 4-3 Cambio del límite inferior de la variable  $x$

Una mejor visión de las ecuaciones se puede obtener en la ventana *Formatted equations* del menú *Windows* como se observa en la figura 4-4.

Formatted Equations

**MODELO EN ESTADO TRANSITORIO**

**Sistema de ecuaciones**

$$Md = 0.0586 \cdot B \cdot \left[ \frac{Pw - Pv}{Lfg} \right] \quad (32)$$

$$0.0475 \cdot Irr + A + B \cdot C - D - ((5.7 + 3.8 \cdot Va) \cdot (Tv - Ta)) = 0 \quad (37)$$

$$0.2896 \cdot Irr - hcfw \cdot (Tf - Tw) - hcfa \cdot (Tf - Ta) = 0 \quad (40)$$

$$0.2778 \cdot rhow \cdot Cw \cdot ew \cdot dTwdt = 0.2781 \cdot Irr + hcfw \cdot (Tf - Tw) - A - B \cdot C \quad (41)$$

$$Dest = \frac{Md \cdot 1000000}{rhow} \quad \text{Destilado en ml}$$

Se definen los términos A, B, C, D y Lfg

$$A = 5.08 \times 10^{-8} \cdot ((Tw + 273)^4 - (Tv + 273)^4)$$

$$B = 0.2013 \cdot x^{0.3914}$$

$$x = Tw - Tv + (Pw - Pv) \cdot \left[ \frac{Tw + 273}{267734 - Pw} \right]$$

$$C = Tw - Tv + 0.016273 \cdot (Pw - Pv)$$

$$D = 5.33 \times 10^{-8} \cdot ((Tv + 273)^4 - (0.0552 \cdot (Ta + 273)^{1.5})^4)$$

$$Lfg = hg - hf$$

$$Irr = If(t, 5, Irr_i, Irr_j, Irr_d)$$

$$Ta = If(t, 5, Ta_i, Ta_j, Ta_d)$$

**Funciones del tiempo izquierda**

$$Irr_i = -35.579 \cdot t^2 + 194.23 \cdot t + 727.64$$

$$Ta_i = -0.0539 \cdot t^3 + 0.0084 \cdot t^2 + 3.1043 \cdot t + 19.983$$

**Funciones del tiempo derecha**

$$Irr_d = 38.387 \cdot t^3 - 788.56 \cdot t^2 + 5042.2 \cdot t - 9490.5$$

$$Ta_d = 0.125 \cdot t^3 - 3 \cdot t^2 + 21.875 \cdot t - 21$$

**Propiedades del agua a Tv y Tw**

$$Pw = P(\text{water}, T = Tw, x = 0) \cdot 1000$$

$$Pv = P(\text{water}, T = Tv, x = 0) \cdot 1000$$

$$hg = h(\text{water}, T = Tw, x = 1)$$

$$hf = h(\text{water}, T = Tw, x = 0)$$

$$rhow = \rho(\text{water}, T = Tw, x = 0)$$

$$Cw = Cp(\text{water}, T = Tw, x = 0)$$

Figura 4-4 Ecuaciones formateadas

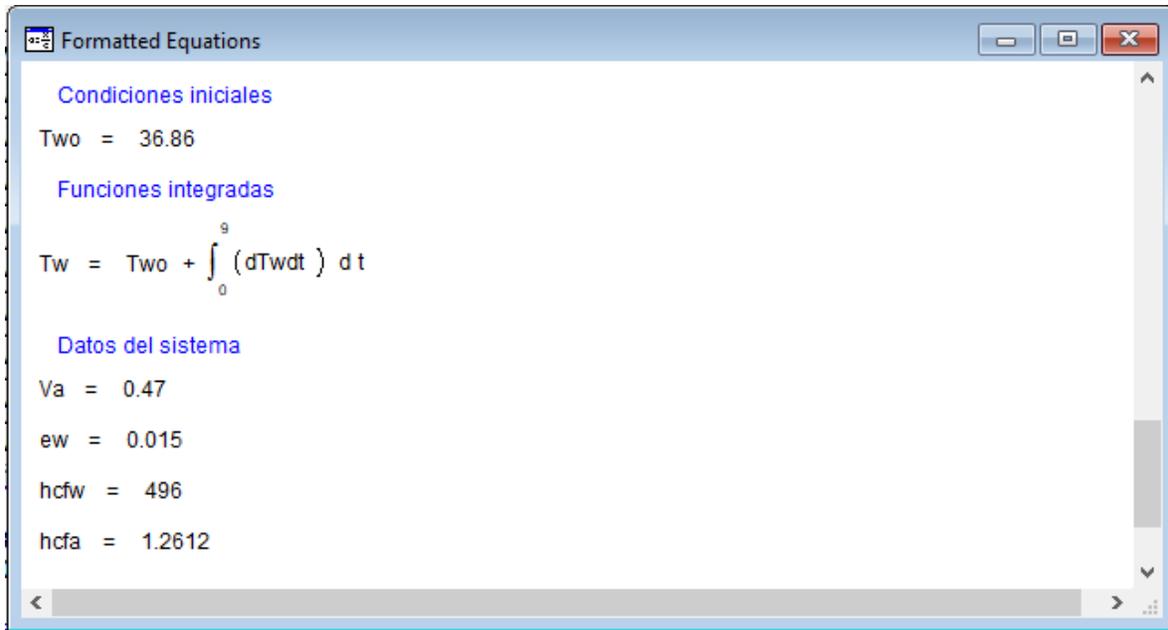


Figura 4-4 Ecuaciones formateadas (continuación)

La tabla de integración que muestra EES después de presionar F2 en la ventana de ecuaciones se muestra en la figura 4-5.

Integral Table

Main

	1	2	3	4	5	6
	t	Irr	Ta	Tw	Tv	Dist
	[h]	[W/m <sup>2</sup> ]	[C]	[C]	[C]	[m]
Row 1	0	727.6	19.98	36.86	24.71	45.25
Row 2	1	886.3	23.04	52.49	36.24	143.8
Row 3	2	973.8	25.79	64.97	47.65	295.3
Row 4	3	990.1	27.92	72.66	55.75	427.7
Row 5	4	935.3	29.09	75.75	59.23	489
Row 6	5	809.3	28.98	74.92	58.2	474.5
Row 7	6	666.1	29.25	71.48	54.71	399.3
Row 8	7	332.2	28	64.25	47.07	281.9
Row 9	8	33.4	26	52.57	36.38	143.9
Row 10	9	0.063	24	41.59	28.23	65.14

Figura 4-5 Resultados de la tabla de integración

EES por defecto calcula una tabla con 250 corridas, pero si se desea un número diferente de ellas puede modificarse desde el menú *Options-Preferences-Integration* como se muestra en la figura 4-6.

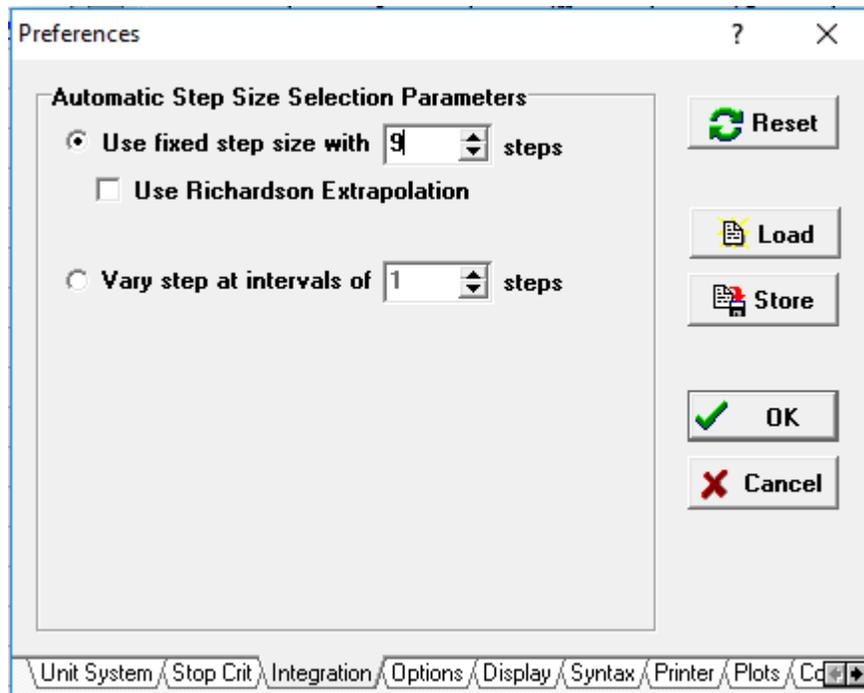


Figura 4-6 Cambio de número de corridas de integración

Una vez resueltos ambos modelos teóricos, el estable y el transitorio, es posible realizar un análisis comparativo más completo con datos experimentales.

## 4.4 Mediciones experimentales

### 4.4.1 Equipos

Cada destilador solar es de 1 m<sup>2</sup> de área y tiene las siguientes características:

Destilador A

Caja: Ferrocemento de 5 cm de espesor.

Cubierta: A una vertiente de cristal de 6 mm.

Sellos: Silicón para alta temperatura.

Tubo de alimentación: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de salida del destilado: Aluminio.

Tubo de drenaje de salmuera: Acero Galvanizado.

#### Destilador B

Caja: Fibra de vidrio de 4 mm de espesor.

Cubierta: A dos vertientes de cristal de 6 mm.

Sellos: CPVC amarillo, aditamento grande.

Tubo de alimentación: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de salida del destilado: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de drenaje de salmuera: Manguera de polietileno transparente.

#### Destilador C

Caja: Fibra de vidrio de 4 mm de espesor.

Cubierta: A dos vertientes de cristal de 6 mm.

Sellos: CPVC amarillo, aditamento pequeño.

Tubo de alimentación: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de salida del destilado: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de drenaje de salmuera: Manguera de polietileno transparente.

#### Destilador D

Caja: Fibra de vidrio de 4 mm de espesor con absorbedor de pigmento negro en silicón.

Cubierta: A dos vertientes de cristal de 6 mm.

Sellos: CPVC amarillo, aditamento grande.

Tubo de alimentación: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de salida del destilado: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de drenaje de salmuera: Manguera de polietileno transparente.

#### Destilador E

Caja: Fibra de vidrio de 4 mm de espesor.

Cubierta: A dos vertientes de cristal de 6 mm.

Sellos: Plastiacero, aditamento grande.

Tubo de alimentación: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de salida del destilado: Manguera de polietileno transparente.

Tubo de drenaje de salmuera: Manguera de polietileno transparente.

El acomodo de dichos destiladores solares se muestra en las figuras 4-7 y 4-8.

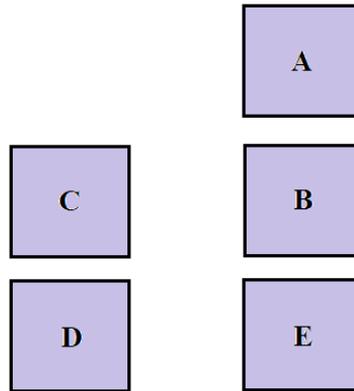


Figura 4-7 Acomodo de los destiladores solares



Figura 4-8 Destiladores solares reales de invernadero utilizados para las mediciones

Para los datos de temperatura del fondo, del agua, del vidrio y del aire se utilizaron sensores de la marca ONSET, *Data Loggers HOBO's* de uno y cuatro canales para registrar, mediante termopares de sonda tipo T

Los sensores y temporares tienen las siguientes características:

- 5 registradores *Data Loggers HOBO* modelo *UX120* de cuatro canales.
- 3 registradores *Data Loggers HOBO* modelo *UX100-14M* de un solo canal.
- 1 registrador *Data Loggers HOBO* modelo *UX100-003* *Temperatura/Humedad Relativa*.
- 23 termopares de sonda Tipo T 6ft (Cobre/Constantán) de teflón con aislamiento y sensible sobre un rango de -200 a 100 °C.

Se utilizaron también 5 vasos de precipitado de 1000 mL marca Pyrex, una probeta de 100 mL marca Pyrex y una probeta de 1000 mL marca Pyrex para la recolección del destilado.

Para la medición de la velocidad del viento y la temperatura del aire se utilizó un anemómetro de sonda recta y para la irradiancia solar se utilizó un piranómetro.

#### **4.4.2 Experimentación**

1. Colocar los vasos de precipitados en las salidas del destilado de cada equipo.
2. Cargar cada destilador con 15 litros de salmuera (NaCl 3.5%).
3. Medir valores de  $I_{rr}$ ,  $T_a$  y  $V_a$  al momento de la carga de los destiladores ( $t = 0$ ).
4. Después de una hora de operación medir el destilado recolectado en los vasos de precipitado para cada destilador y registrar nuevamente los valores de  $I_{rr}$ ,  $T_a$  y  $V_a$ .
5. Repetir mediciones cada hora hasta que  $I_{rr} = 0 \text{ W/m}^2$ .
6. Los valores de  $T_f$ ,  $T_v$  y  $T_w$  serán vaciados de la base de datos de los sensores de temperatura instalados en cada destilador.

#### **4.5 Análisis comparativo de datos experimentales contra datos teóricos obtenidos mediante el programa EES.**

Se planearon dos mediciones del destilado dos veces por mes a partir del 18 de febrero de 2017. En algunos meses no fue posible realizar las mediciones debido a mantenimiento de los destiladores o fallas en los equipos de medición.

Días que se realizaron mediciones para el año 2017: 18 y 26 de febrero, 4, 8 y 11 de marzo, 1 y 19 de abril, 6 de mayo, 27 de octubre y 21 de diciembre. Y para el año 2018: 17 de enero, 1, 2, 15 y 16 de marzo. En algunos días no se tienen valores de temperatura del aire  $T_a$ . En la tabla 4-1 se enlistan los días de medición y la disponibilidad de los datos de temperatura del aire.

Tabla 4-1 Disponibilidad de datos de  $T_a$

Días de medición	Valores de $T_a$
18/Feb/2017	No disponibles
26/Feb/2017	No disponibles
04/Mar/2017	No disponibles
08/Mar/2017	No disponibles
11/Mar/2017	No disponibles
01/Abr/2017	No disponibles
19/Abr/2017	No disponibles
06/May/2017	No disponibles
27/Oct/2017	Disponibles
21/Dic/2017	Disponibles
17/Ene/2018	Disponibles
01/Mar/2018	Disponibles
02/Mar/2018	Disponibles
15/Mar/2018	Disponibles
16/Mar/2018	Disponibles

Para los fines de este trabajo se realizó el análisis solamente para el 16 de marzo tomando en cuenta que fue uno de los días donde se mantuvieron mejor controladas las mediciones además de que es el día que presentó los valores más altos para  $I_{rr}$  y  $T_a$ . De los cinco destiladores disponibles solamente se presenta la comparación con el destilador D para simplificar el análisis de los datos.

El modelo en estado transitorio requiere describir una función del tiempo para la irradiancia solar y otra para la temperatura del aire. Las funciones se obtuvieron mediante la herramienta *Línea de tendencia* en Excel como se muestra en las figuras 4-9 y 4-10. Se hace notar que, para lograr un mejor acercamiento de los valores teóricos a los valores experimentales, se ha decidido utilizar dos funciones para una misma variable, de esta manera se describe el comportamiento de los datos por la izquierda y por la derecha.

Se hicieron mediciones de destilado, irradiancia solar, temperatura del aire y velocidad del viento desde las siete de la mañana hasta las siete de la noche (hasta que  $Irr = 0 \text{ W/m}^2$ ), sin embargo, sólo se tomaron en cuenta los datos a partir de las diez de la mañana debido a que aún no se ha encontrado una manera de describir específicamente qué es lo que sucede en el equipo en horarios anteriores a ese. Es un comportamiento que aún no se ha logrado describir pues incluye muchos factores medioambientales que siguen estudiándose.

En la tabla 4-2 se muestran los datos experimentales para el día 16 de marzo de 2018.

Tabla 4-2 Datos experimentales de destiladores para el 16 de marzo de 2018

Destilador D										
Hora	$Irr$ [W/m <sup>2</sup> ]	$T_a$ [°C]	$V_a$ [m/s]	$T_f$ [°C]	$T_w$ [°C]	$T_{v_1}$ [°C]	$T_{v_2}$ [°C]	$T_v$ [°C]	Dest [ml]	
10:00	732.6	20	0.75	35.32	36.83	40.11	30.36	35.235	0	
11:00	876.9	23	0.37	47.91	51.28	49.58	41.78	45.68	95	
12:00	976.8	26	0.66	58.99	63.42	57.48	51.26	54.37	210	
13:00	987.9	28	0.51	65.23	69.9	64.25	59.93	62.09	410	
14:00	943.5	29	0.51	66.97	71.31	58.35	56.63	57.49	555	
15:00	804.8	29	0.07	67.26	71.42	61.89	60.09	60.99	600	
16:00	666	30	0.73	59.4	62.93	54.81	53.92	54.365	370	
17:00	144.3	28	0.45	50.33	52.21	41.7	40.89	41.295	295	
18:00	33.3	26	0	42.84	43.94	33.81	33.28	33.545	155	
19:00	0	24	0.63	33.4	33.29	25.51	25.36	25.435	75	
<b>Destilado nocturno</b>									215	
									<b>TOTAL</b>	<b>2980</b>

En las figuras 4-9 y 4-10 se muestran las funciones del tiempo para  $Irr$  y  $T_a$ .

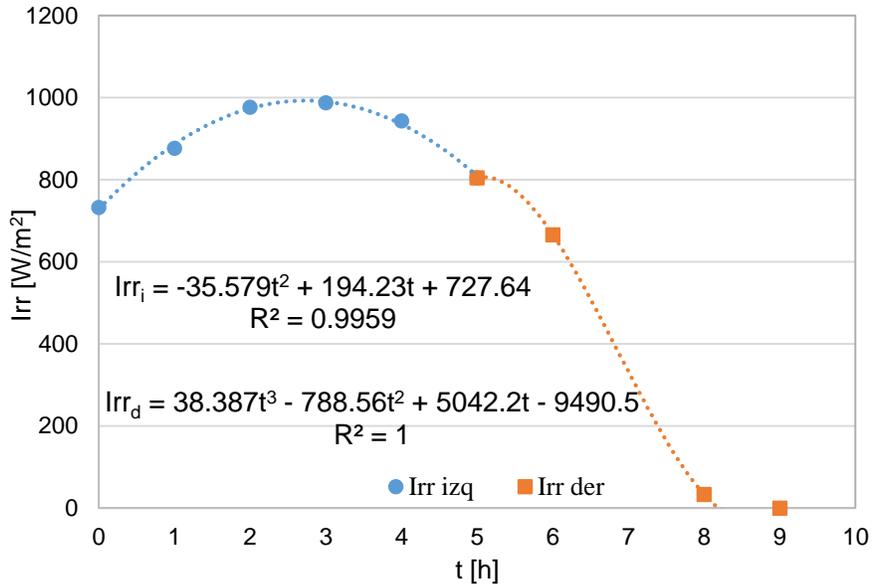


Figura 4-9 Funciones del tiempo para Irr

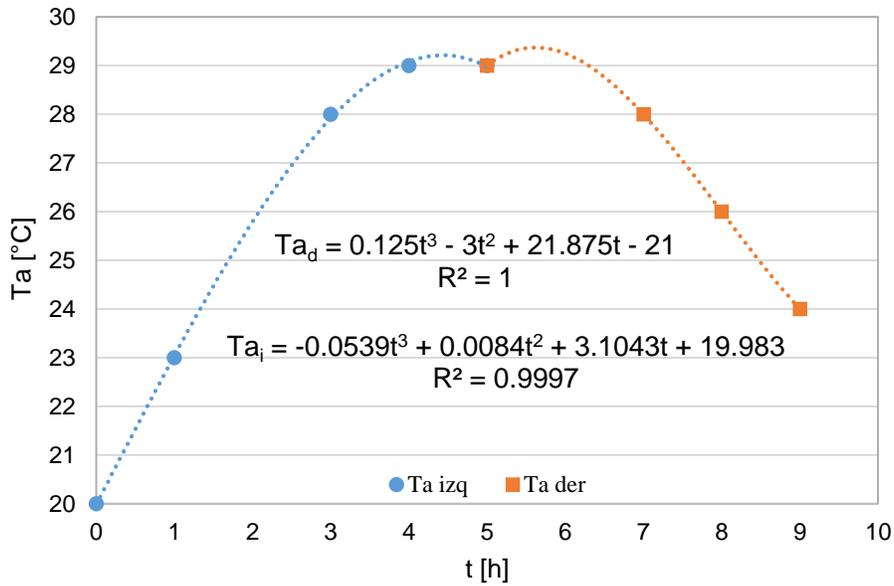


Figura 4-10 Funciones del tiempo para Ta

En la tabla 4-3 se muestran los resultados del modelo teórico en estado transitorio para los cuales  $V_a = 0.47$  m/s.

Tabla 4-3 Resultados teóricos del modelo en estado transitorio

DESTILADOR D						
Hora	t [h]	Irr [W/m <sup>2</sup> ]	Ta [°C]	Tw [°C]	Tv [°C]	Dest [ml]
10:00	0	727.6	19.98	36.86	24.71	0
11:00	1	886.3	23.04	52.49	36.24	144
12:00	2	973.8	25.79	64.97	47.65	295
13:00	3	990.1	27.92	72.66	55.75	428
14:00	4	935.3	29.09	75.75	59.23	489
15:00	5	809.3	28.98	74.92	58.2	475
16:00	6	666.1	29.25	71.48	54.71	399
17:00	7	332.2	28.00	64.25	47.07	282
18:00	8	33.4	26.00	52.57	36.38	144
19:00	9	0.06	24.00	41.59	28.23	65
<b>TOTAL</b>						<b>2721</b>

El destilado para la hora cero debe considerarse igual a cero.

Es importante notar que EES calcula siempre un destilado positivo cuando  $T_w > T_v$ , de lo contrario arrojaría valores negativos para  $M_d$ . Esto no se ve reflejado en los datos experimentales porque el que haya destilado puede deberse a que aún queda agua acumulada en las canaletas de horas de operación anteriores, pues éstas no se vacían por completo con cada medición, la evaporación y condensación siguen constantes. También puede deberse a otros factores desconocidos aun que pueden hacer que siga habiendo evaporación aun cuando  $T_w < T_v$  además de que  $T_v$  sólo es mayor por un par de grados Celsius.

Los resultados teóricos del modelo en estado transitorio continúan con el comportamiento descrito para el modelo en estado estable y corresponden con lo que sucede experimentalmente en referencia al hecho de que la tendencia es periódica, es decir, comienza en un nivel bajo, continúa subiendo durante el día hasta un máximo y comienza a decrecer. Eso se repite diariamente. Lo mismo sucede para las temperaturas lo que señala que el modelo en estado transitorio sí presenta un comportamiento parecido a la realidad que puede describir lo que sucede en el proceso de la destilación solar.

En cuanto a los resultados, en la tabla 4-4 se muestra el porcentaje de error entre los datos teóricos y los datos experimentales calculado mediante la ecuación:

$$\%Error = \left| \frac{Valor_{exp} - Valor_{calc}}{Valor_{exp}} \right| \times 100$$

Tabla 4-4 Porcentaje de error datos teóricos con experimentales

% ERROR					
t [h]	Irr	Ta	Tw	Tv	Dest
0	0.7	0.1	0.1	29.9	-
1	1.1	0.2	2.4	20.7	51.4
2	0.3	0.8	2.4	12.4	40.6
3	0.2	0.3	3.9	10.2	4.3
4	0.9	0.3	6.2	3.0	11.9
5	0.6	0.1	4.9	4.6	20.9
6	0.0	2.5	13.6	0.6	7.9
7	130.2	0	23.1	14.0	4.4
8	0.3	0	19.6	8.5	7.2
9	-	0	24.9	11.0	13.1

Para el caso de la irradiancia y la temperatura del aire los porcentajes de error son muy bajos o iguales a cero en la mayoría de los casos, solamente para  $t = 7$  Irr tiene un error muy grande, mayor al 100%, esto es porque el valor de irradiancia solar experimental para ese tiempo se ha omitido en el cálculo de la ecuación de  $Irr_d$  y de esta manera obtener el mejor coeficiente de correlación, pues si se toma en cuenta,  $R^2$  disminuye mucho alterando todos los demás datos teóricos alejándolos de los experimentales.

Las temperaturas  $T_v$  y  $T_w$  presentan errores menores al 30% y algunos menores al 1%. El destilado es el que tiene mayor diferencia con los valores experimentales, teniendo diferencias por hora de hasta 120 ml aproximadamente.

Tabla 4-5 Destilado total

	Dest [ml]	
	Experimental	Teórico
Total	2980	2721
Diferencia	259	

En la tabla 4-5 se muestra el destilado total experimental y teórico, éste último resulta ser menor por 259 ml.

Aun cuando los resultados teóricos muestran esa diferencia, el modelo presentado es de gran ayuda como base para continuar describiendo el comportamiento de los destiladores solares descritos en este trabajo.

En las figuras 4-11, 4-12 y 4-13 se muestran los comportamientos de ambos datos, experimentales y teóricos. Podemos observar que efectivamente los dos tienen la misma tendencia asemejada a una parábola lo que indica que el modelo teórico describe comportamientos reales de un destilador solar.

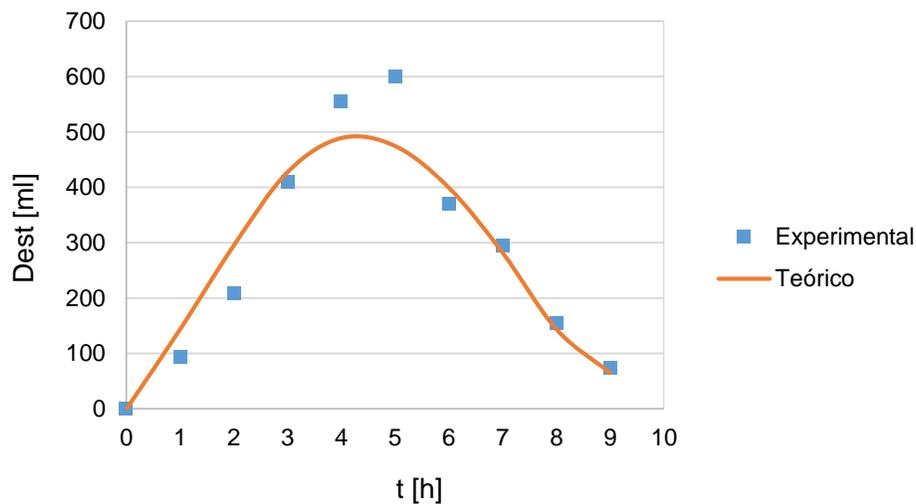


Figura 4-11 Comparación para destilado

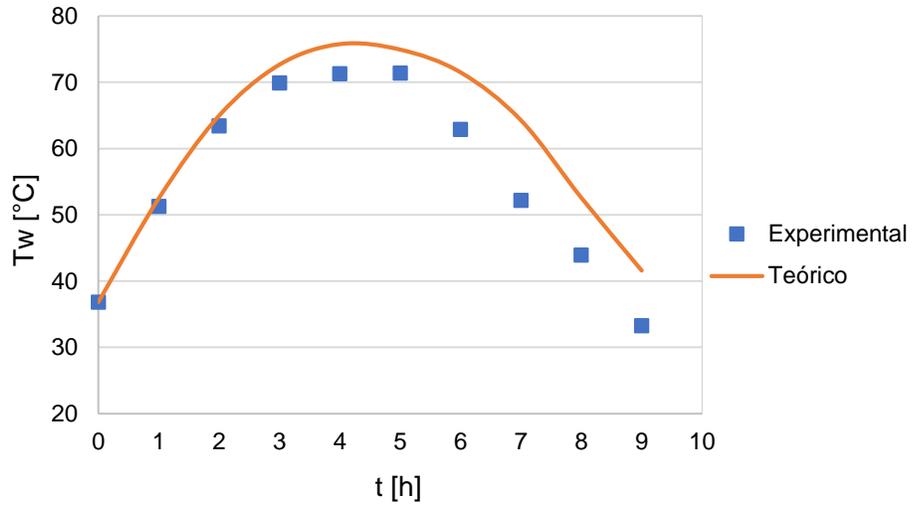


Figura 4-12 Comparación para  $T_w$

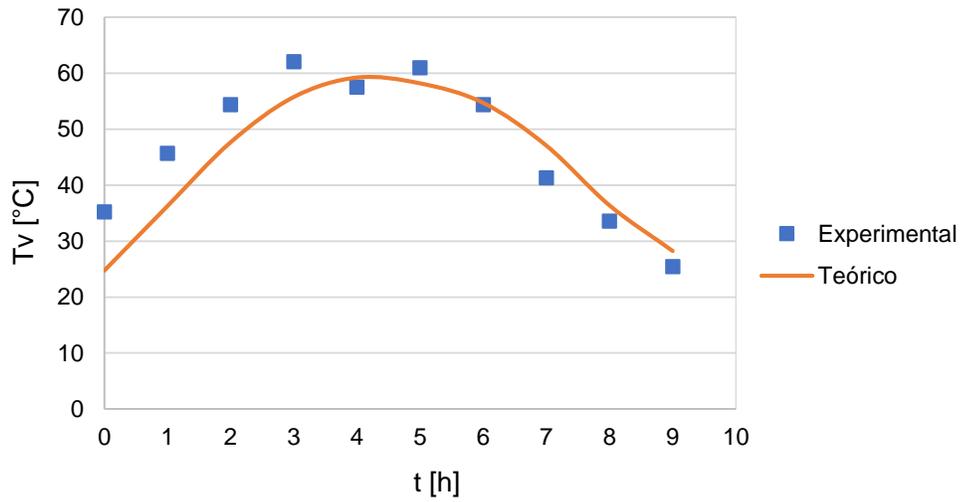


Figura 4-13 Comparación para  $T_v$

Para entender un poco más lo que el modelo teórico describe, se recurre al parámetro  $x$  que recordando se define como

$$x = T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273)}{267.734 \times 10^3 - P_w}$$

Este término influye considerablemente en la producción de destilado al estar incluido en la ecuación del coeficiente  $h_{cw}$  y, por consiguiente, en la definición de  $Md$  como se ha mencionado anteriormente. En la tabla 4-6 se muestran los resultados de  $x$  tanto experimentales como teóricos. Los valores de  $P_w$  y  $P_v$  se calcularon con la ayuda de EES utilizando  $T_w$  y  $T_v$  experimentales.

Tabla 4-6 Comparación de  $x$

$t$ [h]	Dest teo [ml]	Dest exp [ml]	$x$ EES [K]	$x$ exp [K]
0	0	0	15.84	2.213
1	144	95	26.42	9.705
2	295	210	36.86	20.11
3	428	410	44.57	21.01
4	489	555	48.02	36.22
5	475	600	47.26	28.48
6	399	370	42.78	18.88
7	282	295	35.93	18.42
8	144	155	26.39	15.17
9	65	75	18.46	10.03

De esta manera, se tiene el mismo comportamiento periódico que en las demás variables, donde comienza a crecer desde  $t=0$  para llegar a un máximo en el día y comenzar a decrecer como se observa en la figura 4-14. En ese máximo de  $x$  (señalado con rojo), se encuentra también el máximo de las demás variables calculadas  $Dest$ ,  $T_w$  y  $T_v$  para el modelo teórico. En los datos experimentales, aun cuando  $x = 36.22$  K es el valor más alto correspondiente a  $t = 4$ , el máximo para el destilado  $Dest$  está en  $t = 5$ .

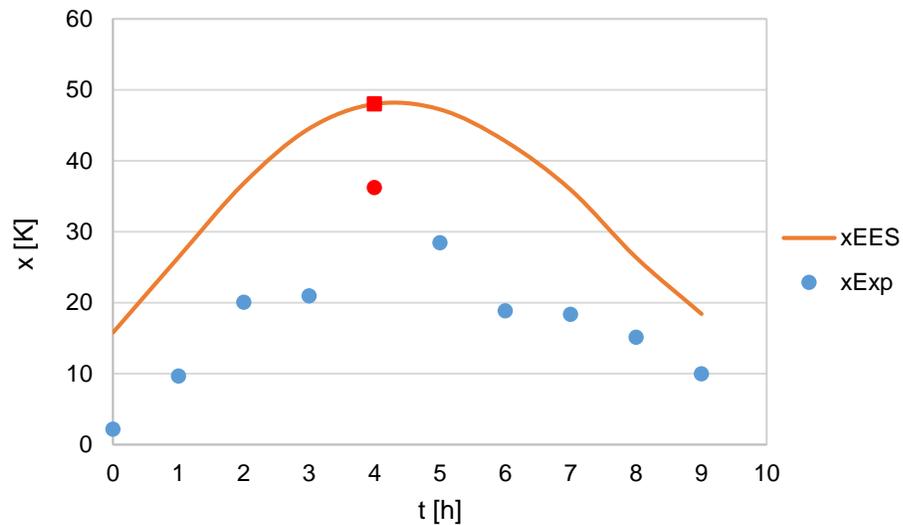


Figura 4-14 Comportamiento de la variable  $x$

En el capítulo 3, se mencionó que un factor determinante para el análisis de los destilados era la irradiancia solar, sin embargo, con el modelo teórico en estado transitorio resuelto, se puede ver que influye pero no determina si la producción será mayor sólo por tener el valor máximo de  $Irr$ . Esto se cumple tanto en los datos experimentales como en los resultados del modelo teórico, ya que en  $t = 3$  se encuentra el valor más alto de irradiancia y este tiempo no corresponde al destilado mayor.

De igual manera, aun cuando  $Irr$  y  $x$  sean mayores en los resultados teóricos, existen destilados experimentales que son mayores que los obtenidos teóricamente como se puede observar en  $t = 7$  donde aun cuando  $Irr$  calculada por la línea de tendencia es más del doble de la experimental ( $Irr_{exp} = 144 \text{ W/m}^2$  e  $Irr_{teo} = 332 \text{ W/m}^2$ ), el destilado  $Dest$  calculado es menor por 12 ml; lo que puede indicar que hay un factor que aún no se ha contemplado en el modelo que contribuye al comportamiento de esos resultados.

## Capítulo 5. Conclusiones

Se puede concluir que el modelo en estado estable resuelto puede calcular tanto el destilado como las temperaturas del agua y el vidrio para cualquier localización en el planeta simplemente proporcionando los datos de irradiancia solar, temperatura del aire y velocidad del viento.

El ajuste que se hizo al coeficiente de convección  $h_{cwv}$  resulta ser de gran importancia pues tiene un gran peso en la definición de la producción de destilado ya que está incluido en la expresión del flujo de calor de evaporación. Recordando que:

$$Q_{evap} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cwv} (P_w - P_v)$$

$$M_d = \frac{Q_{evap}}{\lambda_{fg}}$$

Este coeficiente describe toda la transferencia de calor agua-vidrio, por lo que es importante hacer los ajustes correspondientes que describan adecuadamente el comportamiento que hace que el vapor de agua suba hasta el vidrio y logre condensarse por la diferencia de temperaturas.

Con las modificaciones añadidas a los coeficientes de transferencia de calor, el modelo en estado transitorio presenta valores cercanos a los experimentales para las variables Dest y Tv en tiempos mayores a 5 h y para Tw en tiempos menores a 5 h, sin embargo, aun resultan insuficientes para que los porcentajes de error sean pequeños para todas las horas de operación de los equipos que se analizaron.

Los resultados presentados en este trabajo serán de gran ayuda para continuar con el desarrollo de un modelo teórico en estado transitorio que describa mejor el comportamiento de los destiladores solares mostrados en el capítulo 4. Podrían plantearse nuevas modificaciones en el coeficiente de transferencia de convección ya que con el ajuste de éste se acercaron mucho los valores teóricos a los experimentales. También podrían definirse ecuaciones más generales que describan la irradiancia solar y la temperatura del aire, mas no específicas de un

solo día o estar sujetas a describir la tendencia de un solo día. Incluir un factor para estas funciones que involucre la periodicidad de los datos, así como las condiciones climatológicas, puede ser primero por temporada del año y después ajustar para cada mes y al final buscar un modelo más completo que incluya también el ángulo de incidencia de los rayos del sol, el ángulo de las cubiertas de vidrio o el almacenamiento de energía también en el vidrio que podría explicar porqué hay o no destilado en ciertas horas del día cuando no hay irradiancia.

## Bibliografía

Alarcón, D; Blanco, M; López, T. (2001) Computing the solar vector. *Solar Energy*. **70**(5): 431-441.

Arancibia, C; Estrada, C. (2010). Las energías renovables: La energía solar y sus aplicaciones. *Revista Digital Universitaria*. **11**(8).

Baum, V.A; Bairamou, R. (1964). Heat and mass transfer processes in solar stills of hotbox type. *Solar Energy*. **8**(3): 62-78.

Beckman, W. A; Duffie, J. A. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. John Wiley and Sons. New York.

Boelter, B. F.; L. M. K; Sharpley, B. F. (1938). Evaporation of water into quiet air. *Ind. Eng. Chem.* **30**(10): 1125.

Castillo, M. (2008). Desarrollo y análisis energético de destiladores solares de agua con convección natural y convección forzada. Tesis de Maestría en Ingeniería. UNAM. Facultad de Ingeniería. México.

Cotler, P; Domínguez, E; Escolero, O; Martínez, S. (2006) Atlas de la Cuenca Lerma- Chapala Ciclo hidrológico, p. 16.

DLR. Institut für Technische Thermodynamik. (2008) Global Concentrating Solar Power Potentials. [http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422\\_read-16596/](http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422_read-16596/).

Dunkle, R. V. (1961). Solar water distillation; the roof type still and a multiple effect diffusion still. International Development in heat transfer. A. S. M. E. Proc. International heat transfer. Part V, University of Colorado. P. 895.

EOLSS. (2010). Desalination and water Resources. Renewable Energy Systems and Desalination. *EOLLSS Publishers Co. Ltd.* (3)

Escolero, O; Dominguez, E; Martínez, M; Pladeyra, S.C. Atlas de la Cuenca Lerma- Chapala. Ciclo hidrológico.

Estrada, R. (1993). Análisis teórico experimental de un destilador solar tipo caseta. Tesis de Licenciatura en Física. UNAM. Facultad de Ciencias. México.

Greenpeace Colombia. (2010) Colombia. Campañas. Disponibilidad del recurso.

<https://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua/>

Hermosillo-Villalobos, J. (1989). Destilación solar. Huella. Cuadernos de divulgación académica. ITESO. Tlaquepaque, Jalisco. 16: 19-20.

Jacob, M. (1949). Heat Transfer. John Wiley and Sons. New York. (1).

Jumapam. (2017). México. Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado

<http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>.

Kabeel, A., El-Agouz, S. (2011). Review of researches and developments on solar stills. Desalination 276: 1-12.

López, G. (2014). Evaluación de un destilador solar tipo invernadero asistido con telas de evapotranspiración para la obtención de agua potable a partir de agua de mar. Tesis de Maestría en Ingeniería. UNAM.

Lucio, A. (2015). Diseño de un destilador solar destinado a la potabilización de agua de lluvia. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica. ESIME. IPN. México.

Malik, M. A. S; Tiwari, G. N; A. Kumar; M. S. Sodha. (1982). Solar Distillation, Pergamon press, U.K.

McAdams, W. C. (1954). Heat Transmission, 3rd edition, Mcgraw Hill, New York.

Mendieta, E. (2002). Energía Solar y Arquitectura. *Revista Digital Universitaria*. 3(2).

NASA. (2018) SSE (Surface meteorology and Solar Energy).EE.UU. Atmospheric Science Data Center. <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

Pocaterra L. (2002). Diseño de planta experimental de desalinización solar para abastecer agua potable a zonas rurales. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Universidad Central deVenezuela. Caracas.

Ruiz, J. (2006). Desalinización de agua del mar mediante el uso de energía solar. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas. México.

Sartori, E. (1996). Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors, *Solar Energy*. **56**(2): 199-206.

Silva, A. (2012). Mejoramiento de la calidad de aguas salinas y salobres mediante un sistema de evapotranspiración y destilación solar. Tesis de Doctorado en Ingeniería. UNAM. Facultad de Ingeniería. México.

Tiwari, G. N (2003) *Solar Energy, Fundamentals, Design, Modelling and application*, CRC. Press. New York and Narosa Publishing House. New Delhi, India. 280-281

Tiwari, A. K; Tiwari, G. N. (2007). Thermal modelling based on solar fractions and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope pasive solar still: The effect of water depths, *Desalination* 207:184-204.

Torchia, J. (2004). Balances de energía y exergía en un destilador solar. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica. UNAM. Facultad de Ingeniería. México, D.F.