



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

BALANCES DE ENERGIA Y EXERGIA EN UN  
DESTILADOR SOLAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO

P R E S E N T A

JUAN CRISTOBAL TORCHIA NUÑEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JAIME GONZALO CERVANTES DE GORTARI

MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## AGRADECIMIENTOS

*A mis ídolos: mis papás.*

*A mi madre por estar siempre ahí, por su presencia firme y tierna, su talentosa tenacidad y su fantástica e incansable vocación por enseñar a vivir.*

*A mi padre por su solidaridad silenciosa, su palabra nostálgica y oportuna, sus añejas memorias con aroma a puerto y el idealismo convertido en lírica.*

*A mis hermanos por nuestras risas y llantos, por empeñarse involuntariamente y no dejar nunca de enseñarme cómo vivir la vida.*

*A Liliana Irene, por su cara linda, su terquedad generosa, belleza y picardía.*

*A María Paz, por su madurez e inquebrantable fortaleza y a su esposo, Francisco Palencia por comportarse siempre como un tipo diez puntos.*

*A Emiliano por ser mi mejor amigo, su carcajada que no necesita de razones y por ser retrato maravilloso de la juventud.*

*A la recién llegada Sofía, por ser tan pequeña y provocar cosas tan grandes.*

*A mi tía Eliana en Santiago, por soportar tantos años de inmerecida ingratitud con la generosidad intacta, por sus cacerolazos durante la dictadura y por tantos cuentitos en la infancia.*

*A mi familia en Buenos Aires: Nancy, por ser lo más dulce en este mundo; Néstor, por su introspección mesurada y la voluntad del fuego; Marcos, por su sabiduría campesina y su sentido del humor y viveza años luz del de los demás; María Elena, por su carácter imbatible y la puerta siempre abierta en San Martín; Melina: ¿Dónde estás? ¿Qué sitio del mundo se está volviendo tibio con tu presencia? (Vicente Huidobro), por ser eterna fuente inspiradora; David, por esa dulce mirada erudita, Nicolás, por arrancarme la sonrisa en cada recuerdo, ¿te hacés el aguante?; Claudia, Joaquín, Julieta, Valentín, por hacerme sentir que pertenecía.*

*A mi asesor de tesis, Jaime Gonzalo Cervantes de Gortari, por toda su comprensión, su humor inteligente y su gran paciencia. A cada uno de mis sinodales: Eduardo Medina, Augusto Sánchez, Francisco Solorio y Felipe Muñoz, por sus atentos comentarios, su disponibilidad y, por supuesto, su enorme paciencia.*

*A todos mis maestros en todos mis años de educación, desde los muy malos hasta los muy buenos, por su empeño y dedicación tantas veces inapreciado.*

*Al Dr. Arturo Barba, por su apoyo, buen humor y todas las pláticas que llevaban hacia cualquier parte.*

*Al profesor Alejandro Cadaval, por sus palabras, su apoyo y esa loca rebeldía estimulante.*

*A todos en el Departamento de Transporte de la CONAE por su apoyo, especialmente al Ing. Javier García Osorio y al Ing. Armando Maldonado Susano, por estar siempre disponibles y dispuestos a escuchar.*

*A la gente de Negocios Calderas en Selmech, por el recibimiento cálido y todo el aprendizaje; en especial al Ing. Teseo Santamaría por su gentileza, amabilidad y confianza.*

*A Elena Jalikova, por toda la linda experiencia.*

*A Dominique, por sus palabras noctívgas y la ternura escondida entre tanta inteligencia.*

*A Doménica Saenz, por su lindura, que no pertenecía a este mundo y ese cuadernito lleno de vida.*

*A mis amigos de la Facultad: Eduardo, por su pausada reflexión y su eterna disposición al encuentro; Carlos, por todas las charlas, los recuerdos caribeños con tintes de road movie y la nobleza intacta detrás del carácter tenaz; Cuerna, por las alegrías estúpidas de los veinte años; Andy, por ser generosidad y sensibilidad disfrazadas de peso completo; a todos los demás, las caras sin voz o viceversa, aquéllos que solo fueron rostros en la madrugada escolar o muchedumbre sin descanso.*

*A los amigos de casa: Andrés, Pablo, Michel, Loïc, Rafa y Casta, Huevo, Ramón, Juan Carlos y Martín, Doble y muchísimos más, por soportarme en mis momentos más oscuros y por luchar incansablemente para impedir que nuestras vidas se metieran en el camino del fútbol y las despreocupaciones bohemias.*

*A toda la gente que nunca tuvo, ni tiene, ni tendrá toda la fortuna y oportunidades que yo tuve para cumplir esta meta. Para todos aquellos que nunca consiguieron nada, los eternos perdedores, incomprendidos, locos, soñadores e inadaptados.*

*Finalmente, a las almas libres de todas las naciones que sufren, que luchan y que vencerán (Romain Rolland, Jean-Christophe), gracias.*

# ÍNDICE

Página

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| I. NOMENCLATURA                                  | 3  |
| 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA     | 5  |
| 1.1 Descripción del contenido                    | 5  |
| 1.2 Antecedente del problema                     | 5  |
| 1.3 Premisas                                     | 6  |
| 1.4 Hipótesis                                    | 6  |
| 1.5 Justificación                                | 7  |
| 2. OBJETIVOS Y ALCANCES                          | 13 |
| 2.1 Objetivos                                    | 13 |
| 2.2 Alcances                                     | 13 |
| 2.3 Límites                                      | 13 |
| 3. ANTECEDENTES EN EL MODELADO DEL PROBLEMA      | 14 |
| 3.1 Convección natural                           | 14 |
| 3.2 Evaporación                                  | 21 |
| 3.3 Radiación solar                              | 25 |
| 3.4 Radiación interna                            | 27 |
| 3.5 Convección forzada                           | 33 |
| 3.6 Radiación externa                            | 34 |
| 3.7 Pérdidas por conducción                      | 34 |
| 3.8 Convección natural en la masa de agua        | 35 |
| 3.9 Suposiciones generales                       | 36 |
| 4. PARÁMETROS EN UN DESTILADOR SOLAR             | 38 |
| 4.1 Convección natural de la mezcla aire-vapor   | 38 |
| 4.2 Evaporación                                  | 41 |
| 4.3 Radiación interna                            | 41 |
| 4.4 Radiación externa                            | 41 |
| 4.5 Convección forzada                           | 42 |
| 4.6 Convección natural en la masa de agua        | 44 |
| 4.7 Conducción de calor a través del aislamiento | 44 |
| 4.8 Parámetros climáticos                        | 45 |
| 4.9 Parámetros ópticos                           | 45 |
| 5. ANÁLISIS ENERGÉTICO                           | 48 |
| 5.1.1 Régimen permanente                         | 49 |
| 5.1.2 Resultados, Gráficas y Tablas              | 52 |
| 5.2.1 Régimen transitorio                        | 59 |
| 5.2.2 Resultados, Gráficas, Tablas               | 62 |
| 6. ANÁLISIS EXÉRGICO                             | 64 |
| 6.1.1 Régimen permanente                         | 70 |
| 6.1.2 Resultados, Gráficas y Tablas              | 72 |
| 6.2.1 Régimen transitorio                        | 80 |
| 6.2.2 Resultados, Gráficas, Tablas               | 82 |

|    |                                      |     |
|----|--------------------------------------|-----|
| 7  | ANÁLISIS DE RESULTADOS               | 86  |
|    | 7.1 Comentarios sobre los resultados | 86  |
|    | 7.2 Comparación con otros resultados | 95  |
|    | 7.3 Discusión de resultados          | 100 |
| 8  | CONCLUSIONES                         | 101 |
|    | 8.1 Investigación a desarrollar      | 102 |
|    | 8.2 Sugerencias para el diseño       | 103 |
|    | 8.3 Recomendaciones sobre la teoría  | 103 |
| 9  | REFERENCIAS                          | 104 |
| 10 | APÉNDICE Y FORMULARIO                | 107 |

## I. NOMENCLATURA

Letras griegas:

|               |   |                                                                |                                         |
|---------------|---|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $\Delta T$    | = | diferencia entre temperatura del agua y temperatura del vidrio | $^{\circ}\text{C}$                      |
| $\sigma$      | = | constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8}$          | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ |
| $\rho$        | = | densidad                                                       | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$          |
| $\mu$         | = | viscosidad                                                     | $\text{Pa} \times \text{s}$             |
| $\beta$       | = | Coefficiente de expansión volumétrica                          | $\frac{1}{\text{K}}$                    |
| $\tau$        | = | transmisividad                                                 | 1                                       |
| $\alpha$      | = | absortividad                                                   | 1                                       |
| $\zeta$       | = | reflexividad                                                   | 1                                       |
| $\varepsilon$ | = | emisividad                                                     | 1                                       |
| $\theta$      | = | Ángulo de incidencia de los rayos del Sol respecto a la normal | $^{\circ}$                              |

Letras latinas:

|                       |   |                                                  |                                          |
|-----------------------|---|--------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <i>long</i>           | = | longitud del destilador                          | <i>m</i>                                 |
| <i>ancho</i>          | = | ancho del destilador                             | <i>m</i>                                 |
| <i>x</i>              | = | altura del destilador                            | <i>m</i>                                 |
| <i>T</i>              | = | temperatura                                      | $^{\circ}\text{C}$                       |
| <i>M</i>              | = | masa molecular                                   | $\frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}$         |
| <i>P</i>              | = | presión                                          | <i>kPa</i>                               |
| <i>F</i>              | = | factor de forma                                  | 1                                        |
| <i>V</i>              | = | velocidad                                        | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$              |
| <i>q</i>              | = | Flujo de calor                                   | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$            |
| <i>h</i>              | = | coeficiente convectivo de transferencia de calor | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$    |
| <i>B</i>              | = | exergia                                          | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$            |
| <i>t</i>              | = | tiempo                                           | <i>hr</i>                                |
| <i>m</i>              | = | Producción de destilado                          | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{dia}}$ |
| <i>Ra</i>             | = | número de Rayleigh                               | 1                                        |
| <i>Le</i>             | = | número de Lewis                                  | 1                                        |
| <i>Nu</i>             | = | número de Nusselt                                | 1                                        |
| <i>Gr</i>             | = | número de Grashof                                | 1                                        |
| <i>Gr</i>             | = | número de Prandtl                                | 1                                        |
| <i>h<sub>lg</sub></i> | = | calor latente del agua                           | $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$            |

|                  |   |                            |                  |
|------------------|---|----------------------------|------------------|
| $K$              | = | conductividad térmica      | $\frac{W}{mK}$   |
| $C$              | = | calor específico           | $\frac{kJ}{kgK}$ |
| $z$              | = | altura del nivel de agua   | $m$              |
| $g$              | = | aceleración de la gravedad | $\frac{m}{s^2}$  |
| $R$              | = | constante de los gases     | $\frac{kJ}{kgK}$ |
| <i>nubosidad</i> | = | parámetro meteorológico    | $^{\circ}C$      |
| $Ld$             | = | duración del día solar     | $hr$             |
| $A$              | = | área                       | $m^2$            |

#### Subíndices

|         |   |                                           |          |   |                     |
|---------|---|-------------------------------------------|----------|---|---------------------|
| $rw$    | = | Radiación del agua al vidrio              | $mezcla$ | = | Mezcla vapor-agua   |
| $cw$    | = | Convección natural                        | $u$      | = | Universal           |
| $ca$    | = | Convección forzada                        | $p$      | = | Presión constante   |
| $ra$    | = | Radiación al exterior                     | $a$      | = | Ambiente            |
| $ev$    | = | Evaporación                               | $ins$    | = | Aislamiento térmico |
| $w$     | = | Vapor/agua/colector al agua               | $ex$     | = | Exérgico            |
| $g$     | = | Vidrio                                    | $sky$    | = | Cielo               |
| $col$   | = | Colector                                  | $suelo$  | = | Tierra              |
| $wg$    | = | Del agua hacia el vidrio                  | $aire$   | = | Aire                |
| $f$     | = | Genérico para fluido                      | $prom$   | = | promedio            |
| $total$ | = | Cantidad neta que llega al colector solar | $s$      | = | Sol                 |
| $en$    | = | energía                                   | $tot$    | = | Presión Total       |
| $turb$  | = | Régimen turbulento                        |          |   |                     |

## 1 INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción del contenido

Se presentan los resultados de dos tipos de análisis teóricos: energético y exérgico sobre destiladores solares de batea simple. Primeramente se revisaron los modelos matemáticos de cada uno de los procesos de transferencia de calor que ocurren en un destilador solar y se caracterizaron con respecto a parámetros geométricos y físicos, de tal forma que se definen cuatro modelos distintos para la presentación de los resultados: *Malik, Efectivo, Hongfei y Cavidad*.

Con cada uno de los coeficientes convectivos de transferencia de calor revisados se efectuó el balance de energía según un análisis de parámetros concentrados para tres subsistemas de un destilador solar tanto en régimen permanente como en régimen transitorio:

- 1) *la cubierta de vidrio*
- 2) *el volumen de agua destinada a la destilación, y*
- 3) *el colector solar*

Se encontraron diferencias importantes con respecto a los modelos tradicionales empleados sobre destiladores solares.

Como segunda parte, se realizó un análisis exérgico para conocer cuáles eran aquellos parámetros físicos y geométricos que producen mayor entropía y posibilitar su minimización. Igualmente el análisis exérgico se efectuó para parámetros concentrados tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.

Los resultados obtenidos pueden permitir una optimización de los parámetros involucrados en un destilador solar. Algunos parámetros son fácilmente manipulables, como la cubierta de vidrio y la altura del destilador. Otros parámetros no pueden manipularse como la irradiación solar o temperatura ambiente, sin embargo el conocimiento del comportamiento físico del destilador con respecto a estos parámetros facilita el establecer medidas de operación que apunten a un óptimo funcionamiento de estos equipos.

Para cada análisis se reportan correlaciones teóricas que proponen un mejoramiento a los modelos tradicionales, así como se proponen medidas para la optimización de los destiladores solares.

Para la resolución numérica de los análisis de energía y de exergía se construyó un programa de computadora y se emplearon hojas de cálculo para el cálculo de los términos que constituyeron los sistemas de ecuaciones.

### 1.2 Antecedentes del problema

La descripción tradicional más aceptada de lo que ocurre en el interior de un destilador solar y que más extensamente se ha utilizado, fue presentada por Dunkle (1961) según reporta extensamente **Malik et al. [29]**<sup>1</sup>. En su trabajo se reportan expresiones que permiten calcular los coeficientes de transferencia de calor como función de una diferencia de temperaturas modificada por la transmisión simultánea de calor y masa, así como de una expresión para el número de Nusselt como parámetros obtenidos a partir de datos de placas paralelas de Mull y Reiher correlacionados por Jakob (1957, 1959)

---

<sup>1</sup> Según el estilo tipográfico de este trabajo todos los nombres escritos con letra oscura y cursiva pertenecen a las referencias leídas para el desarrollo del mismo. Aquellos nombres escritos que no sigan este mismo estilo son autores cuyos trabajos no fueron revisados para esta tesis ya que dentro de las referencias se mencionan con precisión para ser localizados.

En la literatura especializada sobre destilación solar predomina el uso de estas correlaciones sobre destiladores solares de un solo efecto de dos tipos: con cubierta condensadora de una pendiente (batea simple o destiladores someros) y de sección triangular (doble pendiente o gran sección).

Los del tipo somero, por lo general, tienen cubiertas con inclinaciones de alrededor de  $6^\circ$ , lo que es una aproximación a un par de placas paralelas. La configuración que utiliza Dunkle en su modelo es un destilador somero.

Existen otros trabajos recientes como el realizado por **Hongfei et al. [20]** que, mediante métodos experimentales, obtiene una correlación para números de Nusselt menores que los propuestos por Dunkle. Los números de Nusselt propuestos por **Hongfei et al. [20]** se encuentran en un rango de número de Rayleigh tal que el régimen de flujo puede suponerse laminar y es casi idéntico a los resultados arrojados por el modelo de Dunkle para régimen laminar.

Por el lado del análisis exérgico, se tiene solamente conocimiento de un trabajo realizado por **Kwatra [8]**, que plantea una eficiencia exérgica para el funcionamiento de un destilador de multiefecto, es decir, aquél con varias cubiertas de vidrio superpuestas para aprovechar el calor latente del agua cuando se condensa. El desarrollo de su análisis es un tanto confuso y está destinado casi totalmente al estudio de la pérdida exérgica del calor latente del agua cuando se condensa a medida que atraviesa las distintas cubiertas de vidrio superpuestas una encima de la otra.

El análisis exérgico en el ámbito de los destiladores solares aún no está muy desarrollado.

### 1.3 Premisas

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 contenido en él y producir, mediante un proceso de evaporación-condensación, agua destilada. El mayor problema que tienen estos equipos es que poseen una baja producción de agua destilada por unidad de área. Esta producción, dependiendo de muchas variables y del tipo de destilador, es aproximadamente de 4 a 8 litros de agua por metro cuadrado de superficie al día, aunque estas producciones se mencionan como sobreestimadas por algunos investigadores **[4], [42]**.

Las premisas que contempla este trabajo son que todos los procesos de transferencia de calor son generadores inherentes de entropía. El calor es una forma de menor calidad en energía que el trabajo. Este empobrecimiento de la calidad energética de un sistema debido a la transferencia de calor nos permite estudiar qué tanta calidad para producir un fin deseado se pierde durante los procesos de transferencia de calor en un destilador solar.

Además la generación de entropía no se limita a la transferencia de calor sino que, también aparece en los efectos ópticos de la radiación solar. Existe generación de entropía cuando un haz radiado es dispersado (*scattered*). Los medios participantes en la recepción de la radiación solar y sus características materiales y de forma afectan en el estudio de generación de entropía en un destilador solar.

### 1.4 Hipótesis

La exergía asociada a un flujo de calor es la calidad que posee la energía en un sistema, relacionada directamente con dos temperaturas: la temperatura a la que se encuentra el sistema y una temperatura de referencia que comúnmente es la temperatura del medio ambiente.

Siempre que no sean idénticas estas dos temperaturas habrá posibilidad de extraer de ese sistema una cantidad de trabajo. Recientemente, la exergía o disponibilidad (*availability*) se ha convertido en

una herramienta de análisis cada vez más utilizada ya que produce resultados más acertados sobre cómo emplear la energía en un sistema o proceso determinado.

Esta herramienta puede ser utilizada en el análisis de un destilador solar, con resultados más generales que den a los diseñadores de destiladores solares y usuarios de una serie de guías para su mejor desempeño.

### 1.5 Justificación

La relación entre la energía y la economía fue una preocupación primaria en la década de los 70's. En esa época, la relación entre energía y medio ambiente no recibía mucha atención. La lluvia ácida, la destrucción del ozono y el cambio climático global se convirtieron en problemas mayores en los 80s, de tal forma que el nexo entre el uso de la energía y el medio ambiente se hizo más evidente.

Desde entonces, ha existido una atención creciente en esta conexión, a la vez que se ha vuelto más claro que la producción, transformación, transporte y uso de la energía impactan el medio ambiente, y que estos impactos ambientales están asociados con las emisiones térmicas, químicas y nucleares que son una consecuencia necesaria de los procesos que proveen beneficios a la humanidad. El impacto ambiental de las emisiones puede disminuirse mediante el incremento de la eficiencia en el uso de los recursos. Como esta medida ayuda a preservar los recursos energéticos, es conocida como "conservación de la energía".

Sin embargo, el incremento en la eficiencia tiene implicaciones de sustentabilidad, ya que alarga la vida de las reservas de los recursos existentes, pero generalmente significa un mayor uso de materiales, trabajo y equipos más complejos. Muchos sugieren que el impacto de la utilización de los recursos energéticos en el ambiente y el logro de un incremento en la eficiencia recurso-uso se miden mejor considerando la exergía. Por extensión, la exergía también parece proveer el fundamento para desarrollar metodologías comprensibles para la sustentabilidad [35].

La exergía de una forma de energía o de una sustancia es una medida de su utilidad o potencial para causar un cambio. Lo último sugiere que la exergía puede ser una medida efectiva del potencial que tiene una sustancia o energía para provocar un impacto en el medio ambiente. A pesar de los muchos estudios que aparecieron en la década de los 70's y 80's sobre la cercana relación entre energía y medio ambiente, existe un escaso número de trabajos recientes sobre la relación entre exergía y medio ambiente.



**Fig. 1** El triángulo interdisciplinario cubierto por el campo del análisis de exergía. [35]

## Exergía y Energía

La exergía es definida como la máxima cantidad de trabajo que puede ser producida por un sistema o un flujo de materia o energía a medida que logra el equilibrio con un ambiente de referencia.

Al contrario de la energía, no está sujeta a una ley de conservación (excepto para procesos ideales o reversibles). En vez de conservarse, la exergía se consume o se destruye, debido a irreversibilidades en cualquier proceso real. El consumo de exergía durante un proceso es proporcional a la entropía generada por las irreversibilidades asociadas al proceso. Para el análisis de exergía, el estado de referencia ambiental debe ser especificado completamente. Esto, comúnmente se logra especificando la temperatura, presión y composición química del ambiente de referencia.

La exergía B contenida en un sistema puede ser escrita como:

$$B = S(T - T_o) - V(p - p_o) + N_k(\mu_k - \mu_{k_o})$$

donde las propiedades intensivas son la temperatura T, presión p, y el potencial químico de la sustancia k,  $N_k$ . El subíndice "0" denota las condiciones del ambiente de referencia.

Es evidente de esta ecuación que la exergía de un sistema es cero cuando está en equilibrio con el ambiente de referencia. Es decir cuando:

$$T = T_o, p = p_o, \text{ y } \mu_k = \mu_{k_o} \text{ para toda } k$$

El análisis de exergía es un método que usa los principios de conservación de masa y energía junto con la segunda ley de la termodinámica para el análisis, diseño y mejoramiento de la energía y otros sistemas. El método de la exergía es una herramienta útil para alcanzar el objetivo de utilizar la relación recurso-efecto útil con mayor eficiencia, porque posibilita la detección de los lugares, tipos y verdaderas dimensiones de los desperdicios y pérdidas para ser determinados.

Tres relaciones entre la exergía e impacto ambiental [35]:

- i. **Destrucción del orden y creación de caos.** Es la forma del daño ambiental. La entropía es fundamentalmente una medida del caos, y la exergía una medida del orden. Un sistema altamente entrópico es más caótico o más desordenado que uno de baja entropía, y relativo al mismo medio ambiente. En cambio, la exergía de un sistema ordenado es mayor que la exergía de un sistema caótico. Por ejemplo, un lugar con papeles desordenados por todos lados tiene mayor entropía y menor exergía que un lugar con los papeles apilados ordenadamente. La diferencia de exergía de dos sistemas es una medida de (i) la exergía (y el orden) destruida cuando el viento vuela la pila de hojas, y (ii) el trabajo mínimo necesario para convertir el sistema caótico en un sistema ordenado. En realidad, más de este mínimo trabajo es necesario, ya que solamente de tratarse de un proceso de limpieza reversible se habrá hecho el mínimo trabajo posible.
- ii. **Degradación de los recursos.** La degradación de los recursos encontrados en la naturaleza es una forma de daño ambiental. *Kestin [23]* define un recurso como un material, encontrado en la naturaleza o creado artificialmente, el cual está en un estado de desequilibrio con el medio ambiente, y hace notar que los recursos poseen exergía como consecuencia de este desequilibrio. Dos características principales de recursos se evalúan:
  - a) **Composición.** Muchos procesos existen para incrementar el valor de dichos recursos mediante su purificación, lo cual incrementa su exergía. Nótese que la purificación se logra con el consumo de al menos una cantidad equivalente de exergía en cualquier parte.

b) Reactividad. El potencial para producir un cambio o llevar a cabo un proceso.

Dos acercamientos generales principales existen para la reducción del impacto ambiental asociado con la degradación:

- a. Incremento en la eficiencia. El incremento en la eficiencia preserva la exergía reduciendo la exergía necesaria para realizar un proceso, y por tanto, reduce el impacto ambiental.
  - b. Utilizando fuentes externas de exergía, como la exergía solar. La Tierra es un sistema abierto sujeto a un flujo neto de exergía proveniente del Sol. Es esta exergía (o estados ordenados) entregada con la radiación solar que es evaluado; toda la energía recibida del Sol es finalmente radiada hacia el universo. El daño ambiental puede ser reducido tomando ventaja de la "apertura" de la Tierra (como sistema abierto) y utilizando la radiación solar, en vez de degradar los recursos existentes en la Tierra para satisfacer las demandas exérgicas. Esto no sería posible si el planeta fuera un sistema cerrado, ya que eventualmente se convertiría cada vez más degradado o entrópico.
- iii. **Emisiones de la exergía de desperdicio.** La exergía asociada con las emisiones de desperdicio pueden verse como un potencial para el daño ambiental en que la exergía de los desperdicios, como una consecuencia de no estar en equilibrio con el ambiente, representa un potencial para producir cambio. Cuando se emite al ambiente, esta exergía representa un potencial para cambiar el medio ambiente. Más aún, las emisiones de exergía pueden interferir con la exergía neta de entrada de la radiación solar a la Tierra (las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de invernadero de muchos procesos causan cambios en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, afectando la recepción y re-radiación de la radiación solar).

#### *Exergía en un destilador solar*

Se sabe que la producción de los destiladores solares es un proceso dependiente de varias y complejas variables. Entre éstas se encuentran las condiciones del clima, las propiedades de los materiales y las características geométricas del destilador. Las relaciones que se establecen entre ellas son las que definen las tasas de transferencia de calor y masa, así como las condiciones del flujo propias de cada destilador. La orientación física de los equipos ha demostrado ser un factor importante para incrementar su productividad.

La gran mayoría de los modelos matemáticos que actualmente se utilizan para estudiar la destilación solar se fundamentan en un análisis de parámetros concentrados que incluye tres elementos en el balance de energía:

1. la base, que es a un tiempo el recipiente de agua a destilar y la superficie receptora de energía radiante del Sol,
2. el cuerpo de agua a evaporar, y
3. la cubierta condensadora.

El resultado matemático de realizar el balance de energía en cada uno de estos tres sistemas es un sistema de tres ecuaciones cuya solución describe su comportamiento térmico. El resultado de resolver este sistema de ecuaciones para un balance de energía es obtener las variables del destilador que son, finalmente, las temperaturas de cada uno de los sistemas antes descritos: colector solar, agua salada y cubierta de vidrio. Con estas temperaturas pueden obtenerse la producción de destilado teórico, los coeficientes de transferencia de calor, la eficiencia energética, entre otros resultados. La mayoría de los trabajos teóricos sobre destiladores solares se avoca a la solución de

un balance de energía, cuyo fin es encontrar las temperaturas de alguno de los sistemas de un destilador solar [40,41].

Sin embargo, hasta ahora no se ha establecido con profundidad una relación del funcionamiento del destilador con la exergía de los sistemas que lo conforman. Salvo el trabajo mencionado realizado por **Kwatra [27]**, no existe propiamente un análisis de segunda ley de un destilador solar.

Probablemente las optimizaciones geométricas ya se han propuesto por completo basadas en experimentos, pero no existe ningún análisis exérgico formal en un destilador solar que tenga el fin de encontrar aquellos parámetros que generen mayor entropía en el proceso completo:

La entrada de calor por radiación desde el Sol hasta la cubierta de vidrio, donde una parte es reflejada, otra absorbida y la más importante transmitida a través del vidrio. La radiación llega a la masa de agua donde, al igual que en el caso del vidrio, una parte pequeña se refleja, otra se absorbe y la fracción más importante que se transmite hacia el fondo del destilador, llegando finalmente al colector donde una parte de esta energía radiante es absorbida. Después existe un proceso de transferencia de calor por convección natural entre el colector y el lecho de agua sobre él. El agua aumenta su temperatura y se evapora. Al llegar a una superficie más fría que es la cubierta de vidrio se condensa y produce el destilado.

El análisis exérgico sirve para hacer un seguimiento de la exergía total del sistema que entra con la energía radiante del sistema. Aquella finalmente aprovechada se traduce en la exergía del agua. Al ser una propiedad extensiva de un sistema, la producción de agua destilada es directamente proporcional a la cantidad de exergía que tiene el agua.

Cabe mencionar que es difícil traducir la exergía en términos que no se traduzcan en trabajo útil, es decir que si la masa de agua destilada fuera utilizada para generar trabajo, su exergía nos sería de mucho interés. Pero no es así. Recordemos que la definición de la eficiencia exérgica depende de lo que se considere como efecto útil, así como el recurso para lograrlo. Esto da lugar a distintas definiciones de eficiencia exérgica según se requiera.

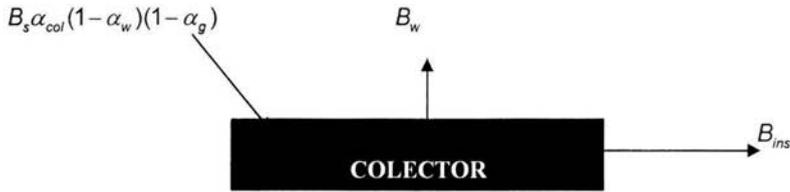
El objetivo de un destilador solar es producir agua destilada, aprovechando la energía solar. Si pensamos que nuestro efecto útil es el agua destilada misma (su masa) y nuestro recurso la exergía del agua, estamos hablando de variables que no poseen las mismas unidades, por lo que directamente no podemos establecer una definición de eficiencia exérgica para un destilador solar.

En su trabajo, **Kwatra [27]** define la eficiencia global exérgica de un destilador solar como el producto de dos eficiencias: la eficiencia del colector y la eficiencia del condensador. La eficiencia del colector está definida de tal forma cuyas unidades son kJ/kg, mientras que la eficiencia del condensador tiene unidades de kg/kJ. Así, el producto de estas dos "eficiencias" es un número adimensional que se interpreta como eficiencia global del destilador.

En este trabajo, definimos dos eficiencias también. La eficiencia del colector está definida como:

$$\eta_{ex,col} = \frac{B_w}{B_s \alpha_w (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g)}$$

que representa el cociente de la exergía de la energía que cede el colector a la masa de agua,  $B_w$  dividido por la exergía total que llega desde el Sol,  $B_{total}$ . El subíndice total se refiere a la cantidad neta que llega al colector, habiendo pasado la cubierta de vidrio, la masa de vapor-aire y la masa de agua.

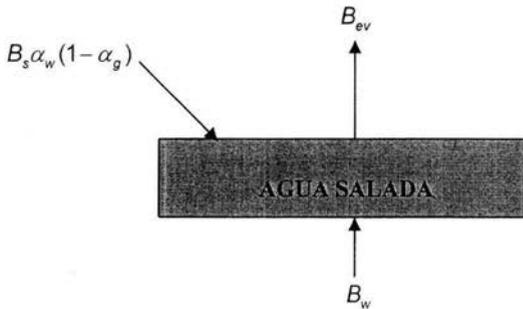


Donde el flujo de exergía que representa el efecto útil para el colector es  $B_w$  y el recurso el flujo de exergía asociado a la energía radiante del Sol neta que llega al colector.

Por otra parte, también definimos la eficiencia del agua evaporada o del evaporador como:

$$\eta_{ex,agua} = \frac{B_{ev}}{B_w + B_s \alpha_w (1 - \alpha_g)}$$

donde el término  $B_{ev}$  es la exergía del calor de evaporación, que finalmente es lo que queremos producir (efecto útil).



El efecto útil para el cálculo de la eficiencia exérgica es el flujo de exergía asociado al calor de evaporación  $B_{ev}$  y el recurso son los flujos de exergía que entran a la masa de agua tanto desde el colector  $B_w$  como la cantidad de energía radiante del Sol que logra absorber.

Al producto de estas dos eficiencias le llamamos eficiencia global:

$$\eta_{global} = (\eta_{ex,col}) (\eta_{ex,agua})$$

Nuestro recurso es la exergía proveniente del Sol y nuestro efecto útil es la exergía contenida en el calor de evaporación. Lo que ocurra después en el proceso de destrucción de exergía no nos importa. Esto, por supuesto constituye una limitación del modelo, ya que uno de los procesos claves en la destilación solar es la condensación en la cubierta del vidrio. En este trabajo lo omitimos ya que la mayoría de los trabajos sobre destilación solar hacen muy poco énfasis en la condensación en comparación con la evaporación. Se puede suponer que toda la masa de agua evaporada llega a condensarse, sin embargo, esto no ocurre. En realidad existe una cantidad de mezcla vapor-aire que no se ve afectada por las estructuras del flujo de convección natural y que parece quedar estanca entre la masa de agua salada y la cubierta de vidrio [6]. Nótese que el seguimiento de la exergía proveniente del Sol se realiza a través de la atmósfera, la cubierta de vidrio, la masa de agua, el colector, la masa de agua en forma de exergía en el calor por convección natural y finalmente la evaporación.

En este trayecto, la exergía se destruye. Nuestra tarea está en hacer ver qué sistema es el que produce mayores irreversibilidades y maximizar la exergía para los parámetros de un destilador solar. El fin es la utilización de la exergía y la segunda ley como herramienta para la optimización de los parámetros físicos y geométricos, de tal forma que se maximice la producción de agua destilada en un destilador solar con la premisa de que cualquier proceso de transferencia de calor es intrínsecamente irreversible.

## 2 OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA TESIS

### 2.1 Objetivos

Este trabajo se plantea revisar y generalizar los modelos tradicionales empleados en destiladores solares. Proponer correlaciones distintas y más útiles que involucren parámetros físicos y geométricos de operación basados en otros modelos que describen los fenómenos físicos en un destilador. Además plantear una optimización en el funcionamiento del destilador basada en la segunda ley de la termodinámica, utilizando a la exergía del sistema como maximizador de la producción de agua destilada y minimización de la entropía.

### 2.2 Alcances

Como alcances de la tesis, este trabajo propone una optimización de los parámetros que conforman a un destilador solar con el uso del análisis de exergía. Se compararon correlaciones distintas de convección natural, evaporación y radiación interna propuestas por varios investigadores en relación con los parámetros físicos y geométricos, como el espesor del vidrio, el nivel del agua y la altura del destilador, como variables de optimización, mediante la segunda ley de la termodinámica como herramienta de análisis.

### 2.3 Límites

Este trabajo carece de experimentación, por lo que los resultados teóricos no pueden ser corroborados en la práctica. Sin embargo, son comparados con algunos resultados de otras investigaciones con el fin de establecer deficiencias en el modelo teórico empleado. El trabajo consiste en dos análisis teóricos.

El análisis energético está fundamentado en los modelos tradicionales termodinámicos de un destilador solar, mientras que el análisis exérgico es propuesto por este trabajo sin comprobar sus resultados en un destilador real ya que no existen trabajos experimentales sobre la exergía en un destilador solar.

### 3 ANTECEDENTES EN EL MODELADO DEL PROBLEMA

#### 3.1 Convección natural

La convección natural es una forma de transferencia de calor producido por el movimiento de un fluido sujeto a fuerzas de cuerpo (gravitacional, centrífuga, de Coriolis o electromagnética inducida).

La convección natural se produce cuando una fuerza de cuerpo ejerce su acción en un fluido donde existe un gradiente de densidad. El efecto global es una fuerza de flotación que provoca corrientes convectivas, siendo el caso más común cuando el gradiente de densidad se debe a un gradiente de temperatura y la fuerza de cuerpo proveniente de un campo gravitacional.

El modelo convencional de convección natural involucra el conocimiento de los parámetros físicos del fluido, el régimen del flujo y la geometría del fenómeno. Estos parámetros físicos son la densidad, la viscosidad dinámica, conductividad térmica entre otros. Para simplificar estos cálculos y lograr establecer modelos, existen números adimensionales que representan las relaciones entre las fuerzas que se encuentran involucradas en los fenómenos y ofrecen mucha información sobre la naturaleza de éstos. En este trabajo todas las propiedades de la mezcla de vapor-aire se calculan basándose en la temperatura media  $T_{prom}$  entre las dos superficies o puntos donde quiere medirse, es decir,

$T_{prom} = \frac{T_w + T_g}{2}$ . Para la convección natural el parámetro adimensional de mayor relevancia es el número de Grashof. Este número es la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas.

$$Gr_{mezcla}' = \frac{x^3 \rho_{mezcla}^2 g \beta_{mezcla} \Delta T_{mezcla}'}{\mu_{mezcla}^2}$$

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 momento y difusividad térmica.

$$Pr = \frac{\mu_{mezcla} C_{p,mezcla}}{K_f}$$

El producto del número de Prandtl y el número de Grashof resulta en otro parámetro adimensional conocido como el número de Rayleigh.

$$Ra = Gr' \times Pr$$

El número de Rayleigh elevado a una potencia específica y multiplicado por una constante que depende del régimen del flujo, resulta en una expresión del número de Nusselt que se ha utilizado para modelar la convección natural. El número de Nusselt es un parámetro adimensional utilizado en los procesos de transferencia de calor mediante fluidos y representa un gradiente de temperatura adimensional en la superficie [12], [22]:

$$Nu = \frac{hL}{K_f}$$

donde L es una distancia característica que depende de la configuración del sistema bajo análisis. En destiladores solares, esta distancia característica es la altura del destilador, es decir, la distancia entre el cuerpo de agua salada y la cubierta de vidrio condensadora, x.

Esta definición del número de Nusselt involucra al coeficiente de transferencia de calor por convección natural,  $h$ , de tal forma que es posible conocerlo si se conocen los parámetros físicos y geométricos del régimen de flujo dentro de un destilador solar.

Siendo las velocidades del fluido en convección natural generalmente mucho más pequeñas que las velocidades en un flujo convectivo forzado, los correspondientes coeficientes de convección también resultan menores en el primer caso. Podría entonces pensarse que los procesos de convección natural son poco relevantes. Lo anterior no es así. Basta pensar que en numerosos sistemas donde se presentan los tres modos de transferencia de calor la resistencia térmica ocasionada por la convección natural es la más grande y juega, por lo tanto, un papel muy importante en el comportamiento de todo el sistema.

La convección natural en un destilador solar es una de las formas en que se transfiere calor desde la superficie de agua hasta la cubierta de vidrio. Su papel es fundamental ya que de no existir convección natural, el proceso mediante el cual el agua evaporada se transportaría hasta la cubierta sería por difusión pura. Si fuera este el caso, el tiempo que llevaría producir una cantidad determinada de agua destilada sería muchas veces mayor al tiempo que en realidad toma.

El modelo más aceptado de convección natural en un destilador solar es el que presenta Dunkle, y reportan **Malik et al. [29]**. Estos autores proponen que el número de Nusselt para la convección natural puede ser calculado según:

$$Nu = C(Pr \times Gr)^n$$

donde  $Pr$  : número de Prandtl,  
 $Gr$ : número de Grashof  
 y a una temperatura  $T_{prom}$  de las propiedades del fluido.

Es decir que el número de Nusselt es proporcional a un factor  $C$  obtenido por correlaciones experimentales, y al número de Rayleigh elevado a un exponente  $n$ , que también es obtenido de observaciones experimentales.

Proponen para diferentes rangos del número de Grashof, un régimen de flujo según:

|                            |                                    |                    |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------|
| a) $C = 1$ , $n = 0$       | para $Gr < 10^3$                   |                    |
| b) $C = 0.21$ , $n = 1/4$  | para $10^4 < Gr < 3.2 \times 10^5$ | régimen laminar    |
| c) $C = 0.075$ , $n = 1/3$ | para $3.2 \times 10^5 < Gr < 10^7$ | régimen turbulento |

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:

$$Nu = 1$$

Existen resultados contradictorios sobre la naturaleza del régimen mediante el cual el vapor de agua fluye hacia la cubierta de vidrio, donde se condensa. **Malik et al. [29]** proponen que se trata de un régimen turbulento con lo cual  $h_{cw}$  es independiente de la altura del destilador. **Hongfei et al. [20]**, según sus observaciones experimentales proponen que el régimen de flujo por convección natural es laminar. Por su parte, **Rubio [36]** basado en la visualización, propone que se trata de un régimen transitorio.

**Malik**

Para **Malik et al. [29]**, el número de Nusselt se encuentra haciendo  $C = 0.075$  y  $n = 1/3$ , tratándose de un régimen turbulento según el modelo. Esta aseveración de que se trata de un régimen turbulento es discutible, como refutan otros modelos de convección natural en destiladores solares más recientes. **Malik et al. [29]** suponen un rango de temperaturas limitado para el cual los valores de los

parámetros físicos del fluido permanecen constantes respecto de la temperatura. A este modelo le llamamos *Malik*.

Según los autores, el régimen de flujo de la mezcla vapor-aire es turbulento y suponen c) para la expresar el número de Nusselt.

$$Nu_{Malik,turb} = 0.075Ra^{1/3}$$

**Malik et al. [29]** obtienen una diferencia de temperaturas para el número de Grashof en función de las presiones parciales del vapor de agua, tanto en la superficie del agua como en la parte interior de la cubierta de vidrio con el fin de incluir el efecto de la evaporación del agua en la convección natural. Además de existir un mecanismo de transporte de calor, existe un transporte de masa, y un cambio de fase que deben ser considerados.

A continuación se detalla el desarrollo en el modelo de Malik en comparación con los demás propuestos en este trabajo. Los números adimensionales para el proceso de convección natural se expresan como:

$$Ra = Gr \times Pr \quad \text{donde} \quad Gr = \frac{x^3 \rho^2 g \beta \Delta T'}{\mu^2} \quad \text{y} \quad Pr = \frac{\mu C_p}{K_f}$$

Como se dijo anteriormente, las propiedades del fluido (mezcla vapor-aire) se calculan para la temperatura promedio entre la cubierta de vidrio y la masa de agua salada.

$$T_{prom} = \frac{T_w + T_g}{2}$$

De manera que el número de Rayleigh queda expresado, en general, de la siguiente forma:

$$Ra = \left( \frac{x^3 \rho^2 g \beta \Delta T'}{\mu^2} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_f} \right)$$

De acuerdo a la expresión para Nu en el régimen turbulento, como lo proponen **Malik et al. [29]**, el número de Nusselt queda como:

$$Nu_{Malik,turb} = 0.075Ra^{1/3} = 0.075 \left[ \left( \frac{x^3 \rho^2 g \beta \Delta T'}{\mu^2} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_f} \right) \right]^{1/3}$$

Recordando la definición del número de Nusselt en función del coeficiente convectivo de transferencia de calor, y despejando, tenemos que:

$$h = \frac{Nu K_f}{x}$$

Por lo que, utilizando la forma que proponen **Malik et al. [29]** para el número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor por convección natural queda expresado como:

$$h_{cw} = \frac{\left\{ 0.075 \left[ \left( \frac{x^3 \rho^2 g \beta \Delta T'}{\mu^2} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_f} \right) \right]^{1/3} \right\} \{K_f\}}{x}$$

Ahora, como el flujo de calor para problemas de convección de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre dos puntos, siendo ese factor de proporcionalidad el coeficiente convectivo de transferencia de calor, es decir:

$$q = h_{cw}(T_w - T_{gi}) = \frac{\left\{ 0.075 \left[ \left( \frac{x^3 \rho^2 g \beta \Delta T'}{\mu^2} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_f} \right) \right]^{1/3} \right\} \{K_f(T_w - T_{gi})\}}{x}$$

Hasta el momento no hemos hecho ninguna suposición sobre ninguno de los términos en esta relación. Las únicas constantes que aparecen son debidas a la proposición de expresar el número de Nusselt en el régimen turbulento como una constante ( $C = 0.075$ ) que multiplica al número de Rayleigh elevado a un exponente ( $n = 1/3$ ). Ahora, en su análisis, **Malik et al. [29]** proponen que el coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_{cw}$  sea expresado como una constante, debido al rango de las temperaturas en un destilador solar. Este rango, argumentan, es lo suficientemente estrecho como para que las propiedades del fluido (mezcla aire-vapor) se mantengan constantes a lo largo de un día solar. Matemáticamente, esto significa que:

$$0.075 \left[ \left( \frac{\rho^2 g \beta}{\mu} \right) (C_p K_f^2) \right]^{1/3} = 0.884$$

Además, debido al transporte de masa producido por la evaporación la diferencia de temperaturas que aparece en la definición del número de Rayleigh, se expresa  $\Delta T'$  como una diferencia de temperaturas más una relación de las presiones parciales de cada uno de las sustancias que conforman la mezcla. Es decir:

$$\Delta T' = T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273)}{268.9 \times 10^{-3} - P_w}$$

donde la temperatura está en grados centígrados y las presiones en MPa para que sea congruente la expresión de la diferencia de temperaturas con transferencia de masa. Debe ponerse atención a la constante 268.9 kPa que obtienen en su análisis **Malik et al. [29]**. Esta constante depende las masas moleculares del agua y del aire así como de la presión total en el sistema, que suele ser la presión atmosférica. Si uno efectúa las operaciones correspondientes con los valores que utilizan en **[29]** notará que este número no resulta de los valores que ahí se mencionan como los utilizados para los cálculos posteriores.

Finalmente, para **Malik et al. [29]** el calor por convección natural queda expresado como:

$$q_{cw, Malik} = 0.884 \left[ T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)}{268.9 \times 10^{-3} - P_w} (T_w + 273) \right]^{1/3} (T_w - T_{gi})$$

$$h_{cw, Malik} = 0.884 \Delta T'^{1/3}$$

donde  $T_{gi}$  es la temperatura del interior de la cubierta del vidrio.

Este resultado es tal cual aparece en la referencia [29], de ahí que en adelante llamaremos a los resultados obtenidos por **Malik et al. [29]** como *Malik*.

Así, la simplificación del desarrollo matemático del modelo *Malik* proviene de suponer que algunas de las propiedades del fluido pueden ser consideradas como una constante. En los demás modelos, no se realiza esta suposición, sino que se evalúa cada una de las propiedades según la temperatura promedio del sistema. Esta es la gran diferencia que existe entre este trabajo y el desarrollo propuesto por **Malik et al. [29]**. Sin embargo aún no hemos dicho que el modelo *Malik* presente linealidad sobre los otros modelos que desarrollaremos en este trabajo.

### Efectivo

En este trabajo nos separamos del modelo original *Malik* construyendo un modelo que en adelante llamaremos *efectivo*. La diferencia entre los modelos *Malik* y *efectivo* reside en suponer que las propiedades físicas del fluido no son constantes. Para el modelo *efectivo*, estas propiedades físicas (viscosidad, densidad, coeficiente de expansión volumétrica, etc.) quedan expresadas en función de la temperatura promedio  $T_{prom}$ , la temperatura de agua  $T_w$  o la temperatura del vidrio  $T_g$ . Así, intentamos que el sistema refleje con mayor sensibilidad su funcionamiento en el rango de temperaturas.

Si no asignamos valores a las propiedades del fluido que conforman la definición del número de Grashof y Prandtl, y dejamos a todas las propiedades del fluido en términos de la temperatura del vidrio y de la masa de agua,  $T_g$  y  $T_w$ , respectivamente, proponemos las siguientes definiciones que llamamos modelo *efectivo*. Es decir que:

$$h_{cw,efectivo} = \frac{Nu_{efectivo} K_f}{X}$$

$$q_{cw,efectivo} = h_{cw,efectivo} (T_w - T_g)$$

En realidad no hemos expresado nuevo aún, solamente queremos hacer ver que existirá un coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_{cw,efectivo}$  que diferirá del propuesto por [29]. Y la diferencia consiste precisamente en no suponer que  $h_{cw} = 0.884 \Delta T^{1/3}$ .

El objetivo de hacer esta nueva y más general definición del coeficiente de transferencia de calor para la convección natural  $h_{cw}$ , es comparar las diferencias de los resultados de ambas definiciones y saber qué tan alejado de la realidad se encuentran las suposiciones hechas por **Malik et al. [29]** al asignar valores a las propiedades físicas del fluido sin que dependan explícitamente de la temperatura.

### Laminar

Según las observaciones de los autores **Malik et al. [29]**, el régimen de flujo por convección natural dentro de un destilador solar es turbulento. Esta declaración es conveniente ya que resulta que el calor transferido por convección natural es independiente de la distancia característica (en este caso, la altura del destilador).

Según esta definición de  $h_{cw}$ , no importa qué tan cercana o lejana se encuentre la cubierta de vidrio del fondo del colector, el régimen es invariablemente turbulento, y el calor transferido el mismo para cualquier altura. Esto limita al modelo y supone un error ya que, según las correlaciones, no importan las características geométricas del destilador y la convección natural resulta independiente de la distancia entre los puntos donde se quieren medir sus efectos [44].

En este trabajo llamamos *laminar* a la definición de  $Nu$  tal que  $C = 0.21$  y  $n = 0.25$ , y que produce un coeficiente de transferencia de calor  $y$ , por lo tanto un calor transferido, dependiente de la distancia característica,  $x$ .

$$h_{cw,laminar} = 0.21Ra^{0.25} \left( \frac{K_f}{x} \right)$$

$$q_{cw,laminar} = h_{cw,laminar} (T_w - T_g)$$

#### Hongfei

**Hongfei et al. [20]**, por otra parte, obtienen relaciones para el coeficiente convectivo de transferencia de calor mediante trabajo experimental y propone un número de Nusselt tal que:

$$Nu = 0.2 Ra^{0.26}$$

en un rango de números de Rayleigh ligeramente más amplio que los que maneja el modelo *Malik* final. Cabe mencionar que el número de Nusselt propuesto por **Hongfei et al. [20]** es casi idéntico al número de Nusselt para régimen laminar expresado por **Malik et al. [29]**.

Una característica importante del número de Nusselt de **Hongfei et al. [20]** es que el coeficiente convectivo de transferencia de calor depende de las dimensiones físicas del destilador, concretamente, la altura del destilador.

$$h_{cw,Hongfei} = 0.2Ra^{0.26} \left( \frac{K_f}{x} \right)$$

$$q_{cw,Hongfei} = h_{cw,Hongfei} (T_w - T_g)$$

#### Globe y Dropkin

También comparamos un resultado obtenido por *Globe y Dropkin* al que **Incropera et al. [22]** hacen referencia en el capítulo de convección natural en cavidades. En este modelo sugieren el siguiente número de Nusselt:

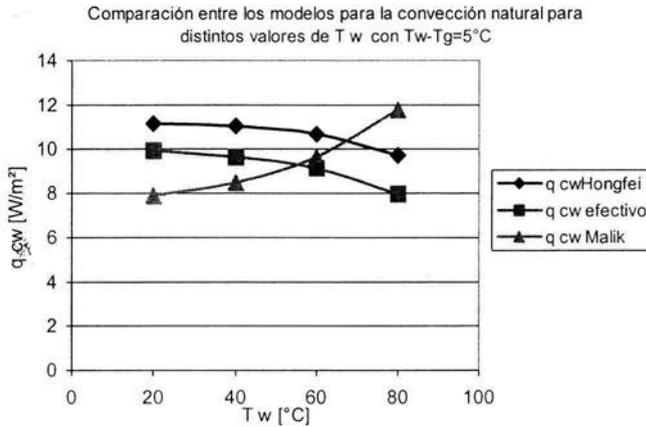
$$Nu = 0.069Ra^{1/3} Pr^{0.074} \quad \text{para } 3 \times 10^5 < Ra < 7 \times 10^9$$

$$h_{cw,GlobeyDropkin} = 0.069Ra^{1/3} Pr^{0.074} \left( \frac{K_f}{x} \right)$$

$$q_{cw,GlobeyDropkin} = h_{cw,GlobeyDropkin} (T_w - T_g)$$

Este modelo supone, al igual que el modelo de **Malik et al. [29]**, un Rayleigh crítico, debajo del cual, el proceso de transporte de calor se debe enteramente a un fenómeno de difusión.

Este modelo de *Globe y Dropkin* comparte con el modelo *Malik*, además, la particularidad de que el coeficiente de transferencia de calor no depende de las características geométricas del destilador solar, como sí lo considera el modelo de *Hongfei* y el *laminar*. Es decir, están expresados de tal manera que el coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_{cw}$  es independiente de la altura del destilador,  $x$ .



**Fig. 2** Cantidad de calor a diferentes temperaturas del agua para varios modelos de convección natural.

En esta gráfica observamos que para temperaturas del agua  $T_w$  bajas, tanto el modelo *Hongfei* como el *efectivo* arrojan valores mayores de calor por convección natural al que propone el modelo de *Malik*. La situación se invierte a medida que  $T_w$  se incrementa. El modelo *Malik* arroja valores de calor por convección natural mayor a los calores producidos por los modelos de *Hongfei* y *efectivo*.

La razón de este comportamiento es el coeficiente de expansión volumétrica que aparece como  $\beta$  en la definición del número de Grashof. Propiamente la definición del coeficiente  $\beta$  es

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p$$

donde  $\nu$  es el volumen específico de la sustancia.

Para muchos procesos se puede suponer que  $\beta$  es constante [46]. Este coeficiente de expansión volumétrica para la mezcla vapor-aire queda como una constante cuando *Malik et al.* [29] proponen

que el término  $0.075 \left[ \frac{K_f C_{p,mezcla} \rho_{mezcla}^2 g \beta_{mezcla}}{\mu_{mezcla}} \right]^{1/3}$  sea igual a 0.884.

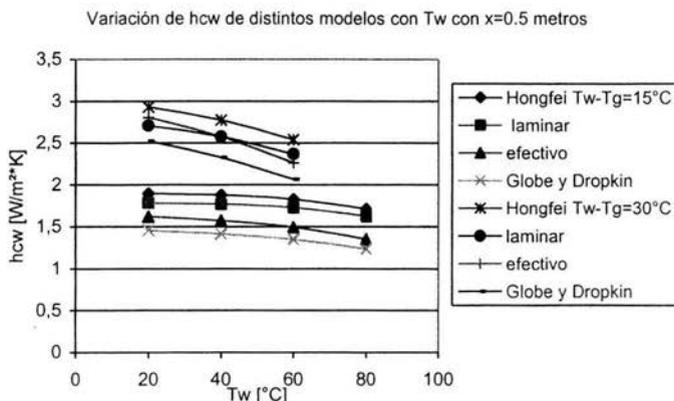
Esta suposición implica que  $\beta$  es constante para el rango de temperaturas que suponen los autores que existirán en un destilador solar. Por otra parte, si proponemos sencillamente que para los

modelos de *Hongfei* y el de *efectivo*  $\beta = \frac{1}{(T_{prom} + 273)}$  donde  $T_{prom} = \frac{T_w + T_g}{2}$ , entonces el coeficiente

de expansión volumétrica queda como una variable dependiente de las temperaturas del vidrio y del agua.

Como  $\beta$  es inversamente proporcional a la temperatura, a medida que crece ésta,  $\beta$  disminuye.

Esta disminución afecta los valores decrecientes del calor por convección natural de los modelos de *Hongfei* y el de *efectivo*.



**Fig. 3** Coeficiente de transferencia de calor por convección natural a distintas temperaturas del agua para varios modelos.

Esta gráfica muestra la poca dependencia de la temperatura del agua sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección natural para la mezcla de vapor-aire. Esto significa que es razonable dejar  $h_{cw}$  como una constante para simplificar los cálculos en los balances de energía, tal y como lo hacen **Malik et al. [29]** para la linearización en su balance de energía.

### 3.2 Evaporación

La evaporación ocurre cuando a una superficie de agua se le pone en contacto con una corriente de aire. 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  $P_g$ , 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 [10].

En el proceso de evaporación en la presencia de un gas neutral, el líquido se encuentra bajo una presión total  $P$ , la cual es mayor a la presión parcial del gas neutral por una cantidad igual a  $(P - P_g)$  que la presión parcial  $P_g$  del vapor saturado. Aquí no se forman burbujas de vapor en tanto la presión total  $P$  sea esencialmente mayor que  $P_g$ , y el líquido se vaporiza solamente en la superficie (evaporación).

En un destilador solar, la evaporación es el proceso de transferencia de calor de mayor contenido energético, más que la convección natural y la radiación en la mayoría del rango de temperaturas del destilador [29].

Esto se debe a que la cantidad de energía necesaria para evaporar agua por unidad de masa es muy alta, por varios órdenes de magnitud, comparada con la cantidad de energía necesaria para elevar un grado centígrado un kilogramo de agua.

Algunos diseños de destiladores aprovechan esta gran cantidad de energía en destiladores solares compuestos o de multiefecto, cuando en cada efecto, al condensarse el vapor de agua, transfiere el calor latente a una cubierta de vidrio superpuesta encima del lecho de agua.

#### Malik

Para modelar la evaporación en un destilador solar, **Malik et al. [29]** proponen 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. La diferencia de presiones es el desequilibrio que ocasiona la evaporación desde la superficie. La definición para el coeficiente de transferencia de calor es una relación que involucra a la cantidad de masa de aire que desplaza el vapor de la superficie del agua, las presiones parciales y la masa molecular de las sustancias involucradas.

$$h_{ev} = \left( \frac{M_w}{M_a} \right) \left( \frac{h_{fg}}{C_{p,aire}} \right) \left( \frac{1}{P_{tot}} \right) h_{cw} \quad \text{ó} \quad h_{ev} = 0.013 h_{cw}$$

Después de desarrollar los términos de las presiones parciales tanto del vapor como del aire, en las cercanías de la masa de agua y en la cubierta de vidrio, llegan a:

$$q_{ev, Malik} = 16.273 h_{cw, Malik} (P_w - P_g)$$

Así como se hizo ver en la convección natural que el modelo de Malik supone constantes algunas de las propiedades de la mezcla aire-vapor. Igualmente se puede ver que para la evaporación, proponen que el coeficiente de evaporación de transferencia de calor,  $h_{ev}$  puede ser expresado en términos del coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_{cw}$  y una constante igual a 0.013.

### Efectivo

De igual manera que en el caso de la convección natural, para la evaporación dejamos los términos en función de las temperaturas del vidrio y del agua. Con excepción de los calores específicos del vapor, el aire y la mezcla aire-vapor, las demás propiedades físicas quedan definidas en función de la temperatura. Consecuentemente, el coeficiente de transferencia de calor por convección natural  $h_{cw}$  utilizado en el modelo de evaporación *Malik*, estará expresado según el trabajo de *Malik et al. [29]*; por otra parte, el  $h_{cw}$  que se usa para la definición del coeficiente de transferencia de calor por evaporación  $h_{ev}$  para el modelo de evaporación *efectivo* será el correspondiente a como está escrito en el modelo de convección natural *efectivo*.

Así, los términos para el modelo efectivo son:

$$q_{ev, efectivo} = h_{fg} \left( \frac{M_{vapor}}{M_{aire}} \right) \left( \frac{h_{cw, efectivo}}{C_{p,aire}} \right) (P_w - P_g) \left( \frac{P_{tot}}{(P_{tot} - P_w)(P_{tot} - P_g)} \right)$$

### Hongfei

*Hongfei et al. [20]*, por su parte, llega a otra relación para el coeficiente de evaporación según la analogía entre la transferencia de calor y masa en la frontera donde incluye al número de Lewis, que es la relación entre la difusividad de masa y difusividad térmica. Así, proponen que:

$$m_{ev, Hongfei} = (3.6)(24) \left( \frac{h_{cw, Hongfei} M_{mezcla}}{R_u \rho_{mezcla} C_{p,aire} Le^{(1-1/3)}} \right) \left( \frac{P_w}{T_w + 273} - \frac{P_g}{T_g + 273} \right) \text{ en } \frac{kg}{m^2 dia}$$

$$q_{ev, Hongfei} = \frac{m_{ev, Hongfei} h_{fg}}{24} \left( \frac{1000}{3600} \right) \text{ en } \frac{W}{m^2}$$

$$\text{donde } Le = \left( \frac{K_f}{\rho_{mezcla} C_{p,mezcla} D_{wa}} \right)$$

Cabe destacar que también para el modelo *Hongfei*, así como para todos los modelos excepto el modelo *Malik*, las propiedades físicas están en función de la temperatura del vidrio y del agua. De tal manera que la difusividad del agua en el aire  $D_{wa}$ , la densidad de la mezcla vapor-aire  $\rho_{mezcla}$ , por consiguiente, el número de Lewis son función de la temperatura.

#### Chilton y Colburn

Este modelo para la evaporación proviene del estudio de Chilton-Colburn sobre la analogía entre la transferencia de calor y masa. La forma de esta analogía es presentada por Coulson y Richardson (1977) según indican **Shawaqfeh et al. [18]**.

$$q_{ev,ChiltonyColburn} = h_{cw,Malik} \left( \frac{M_w}{M_{mezcla}} \right) \left( \frac{h_{fg}}{C_{p,mezcla}} \right) \left( \frac{Le^{-2/3}}{Pa_{LM}} \right) (P_w - P_g)$$

Estos autores reportan que esta expresión del calor de evaporación no ha sido utilizada en destiladores solares. La forma aproximada del modelo de Chilton-Colburn consiste en asumir que  $Le = 1$  y  $(Pa)_{LM} = P_{total}$ . Sin embargo,  $(Pa)_{LM}$  puede ser aproximada como:

$$(Pa)_{LM} = \frac{1}{0.5 [(P_{tot} - P_w)^{-1} + (P_{tot} - P_g)^{-1}]}$$

De esta manera, la definición de la producción de destilado es:

$$m_{ev,ChiltonyColburn} = \left( \frac{q_{ev,ChiltonyColburn}}{h_{fg}} \right) \left( \frac{24 \times 3600}{1000} \right) \quad \text{en} \quad \frac{kg}{m^2 dia}$$

#### Clark

La relación de **Clark [13]** está basada en resultados experimentales bajo condiciones de estado permanente.

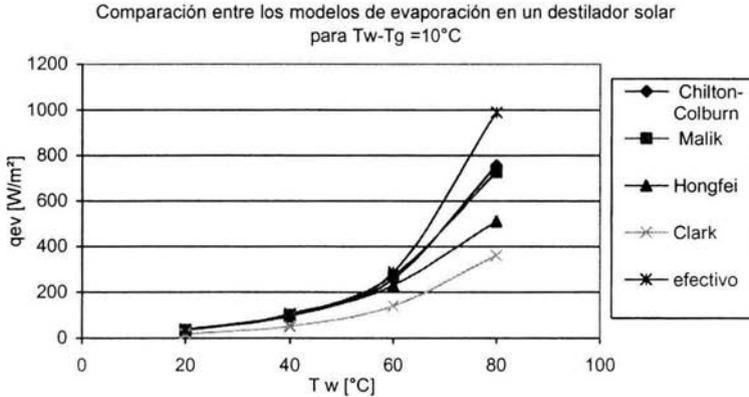
La forma para el calor por evaporación es:

$$q_{ev,Clark} = \left( \frac{0.35}{100} \right) h_{cw,Malik} h_{fg} (P_w - P_g)$$

Y la producción de destilado es:

$$m_{ev,Clark} = \left( \frac{q_{ev,Clark}}{h_{fg}} \right) \left( \frac{24 \times 3600}{1000} \right) \quad \text{en} \quad \frac{kg}{m^2 dia}$$

Debido a que los trabajos de Clark y Chilton-Colburn no desarrollan una expresión propia del coeficiente de transferencia de calor  $h_{cw}$ , en este trabajo les asignamos, para ambos modelos, la correlación según *Malik*. Se les pudo haber asignado un coeficiente  $h_{cw}$  según el modelo *Hongfei* o haber supuesto que los términos son dependientes de la temperatura (*efectivo*), pero quisimos mantener la línea convencional del estudio de **Malik et al. [29]**, para los modelos de evaporación que no poseen una definición propia de  $h_{cw}$ .

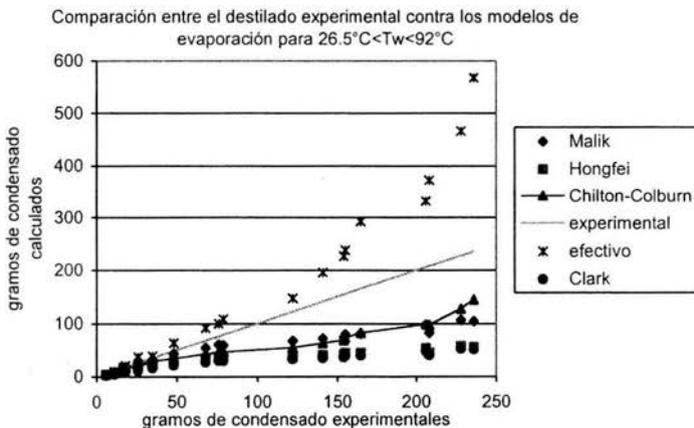


**Fig. 4** Cantidad de calor por evaporación a distintas temperaturas del agua para varios modelos de evaporación en destiladores.

Esta figura muestra la variación entre los valores que resultan de los distintos modelos de evaporación en un destilador solar. En general, la mayoría de los modelos se encuentra en un rango de valores de calor de evaporación definido.

El modelo *efectivo*, es decir,  $h_{ev} = \left(\frac{M_w}{M_a}\right) \left(\frac{h_{fg}}{C_{p,aire}}\right) \left(\frac{1}{P_{tot}}\right) h_{cw}$  y  $q_{ev} = h_{ev} (P_w - P_g)$  produce valores de calor por evaporación sumamente elevados a temperaturas del agua mayores a  $60^\circ\text{C}$ .

La conclusión más importante que podemos obtener de esta figura es que el calor de evaporación es altamente dependiente de la temperatura del agua. A altas temperaturas del agua, el calor de evaporación tiende a comportarse exponencialmente para todos los modelos de evaporación. Este comportamiento se debe a la definición de las presiones parciales de la mezcla aire-vapor cerca del agua  $P_w$  y cerca del vidrio  $P_g$ .



**Fig. 5** Cantidad de agua destilada obtenida experimentalmente contra cantidad de agua destilada calculada con los distintos modelos de evaporación en un destilador solar.

En la fig. 5 observamos la comparación entre los modelos de evaporación con los valores experimentales de producción de destilado reportados por **Adhikari et al. [2]**. Sencillamente

queremos mostrar cualitativamente la diferencia de valores producidos en relación a valores extraídos de un experimento y que, según las circunstancias y condiciones del mismo, reflejan la realidad.

### 3.3 Radiación solar

Un colector solar trabaja con la energía radiante solar, la cual está disponible, parcialmente como una radiación directa o primaria  $q_s$  y parcialmente como una radiación indirecta o difusa  $q_2$ , la cual es dispersada por la atmósfera en todas direcciones, [11].

El disco solar, como una primera aproximación, actúa como un cuerpo negro con una temperatura efectiva  $T'_s = 5780$  K.

Si el firmamento estuviera completamente cubierto con discos solares, una superficie horizontal expuesta recibiría, según la ley de Stefan-Boltzmann, una cantidad de energía por radiación  $H'_s$ :

$$H'_s = \sigma T'^4_s \frac{kW}{m^2} \quad \text{con } \sigma = 56.7 \times 10^{-12} \frac{kW}{m^2 K^4}$$

con un ángulo de incidencia  $\theta = 0^\circ$  a la superficie normal, un solo disco solar irradia a la superficie una radiación igual a

$$q'_s = \left(\frac{\omega}{\pi}\right) H'_s$$

donde  $\omega$  es el ángulo sólido de apertura con el cual el disco solar es visto desde la Tierra. Esto es:

$$\left(\frac{\omega}{\pi}\right) = \left(\frac{d_s}{2l_s}\right)^2$$

donde  $d_s$  es el diámetro del sol y  $l_s$  es la distancia de la Tierra al Sol.

$$d_s = 1.4 \times 10^6 \text{ km} \quad \text{y } l_s = 150 \times 10^6 \text{ km}$$

De tal forma que, insertando estos valores numéricos en la ecuación del ángulo sólido, la constante extraterrestre solar resulta

$$q'_s = 1.38 \frac{kW}{m^2}$$

Este valor es la cantidad de energía radiante que llega a la atmósfera terrestre, no a la superficie de la Tierra. De esta energía, solamente  $q_s = (1 - \alpha_{atm})q'_s$  alcanza la superficie de la Tierra como radiación directa.

El llamado coeficiente de extinción  $\alpha_{atm}$  es la fracción de la radiación solar que es absorbida y difundida por la atmósfera. Incluso en un día despejado, el valor de este coeficiente se encuentra entre  $0.2 < \alpha_{atm} < 0.35$ , dependiendo de la altura del Sol y la claridad del aire. Si pensamos en un valor promedio para  $\alpha_{atm} = 0.275$ , entonces la cantidad de energía que llega directamente a la superficie terrestre es

$$q_s = 1.0 \frac{kW}{m^2}$$

**Falta página**

**N° 26**

matemáticas que considere el modelo. Para un régimen transitorio, la irradiación solar depende del ángulo que forma el Sol con una normal o perpendicular a un área plana colocada en la superficie de la Tierra, es decir, que depende de la hora solar en la que se mida.

Estrictamente la irradiación solar no puede ser controlada, ya que el Sol emite una cantidad constante de radiación solar cada instante, y una pequeña parte de esa radiación solar, también constante, llega a la superficie de la Tierra en todo momento. Sin embargo, existen fenómenos climáticos, situaciones geográficas y temporadas del año, además de la naturaleza periódica de la radiación solar, que permiten jugar con los valores de irradiación solar para los análisis teóricos y experimentales, dentro de un rango amplio de valores.

De tal manera, es posible tanto teórica como experimentalmente reproducir los efectos de la irradiación solar, sin embargo, la experimentación en campo y la fidelidad de sus resultados no debe ser sustituida.

En este trabajo, la irradiación solar es tomada dentro de un rango de 0 a 1000 [W/m<sup>2</sup>] en intervalos de 250 W/m<sup>2</sup>, y además se supone que este valor es la suma de la radiación solar más la difusa para el régimen permanente. La razón de tomar este intervalo es reducir el tiempo de cálculo, [41]. Para el régimen transitorio, el valor de la irradiación solar depende de las horas solares (tiempo) y sus valores se encuentran según las fórmulas modificadas basadas en las propuestas por *Porta et al.* [34], en este análisis transitorio de la irradiación solar, sí se hace distinción entre la radiación solar directa y difusa.

### 3.4 Radiación interna

La transmisión del calor por radiación es sólo uno de los numerosos fenómenos electromagnéticos.

El término radiación se aplica generalmente a toda clase de procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas. La gama total de esas ondas se subdivide en grupos de acuerdo con la longitud de onda o frecuencia y también con la aplicación. Algunos fenómenos de radiación pueden describirse en términos de la teoría ondular y otros por la teoría cuántica, pero ninguna de ellas explica todas las observaciones experimentales. Sin embargo, se sabe que la radiación viaja en el espacio libre con la velocidad de la luz y no requiere para su propagación un medio interpuesto.

La transferencia de energía se efectúa en forma de unidades de energía pequeñas, pero finitas, conocida como quanta (plural de quantum). La frecuencia de la radiación  $\nu$  depende del todo de la naturaleza de la fuente, o sea, que un cuerpo de cualquier clase emite radiación térmica a cualquier temperatura.

Una explicación cualitativa del mecanismo mediante el cual se transmite energía radiante puede darse en términos de la teoría ondular. En el proceso de emitir radiación, un cuerpo convierte parte de su energía interna en ondas electromagnéticas que son una forma de energía. Estas ondas se mueven a través del espacio hasta que chocan sobre otro cuerpo, donde parte de su energía es absorbida y convertida en energía interna. La emisión de radiación produce un descenso de la energía interna del cuerpo emisor, y, a menos que se genere calor dentro de ese cuerpo, o reciba calor de otra fuente, su temperatura decrecerá. Sólo cuando la velocidad a que el cuerpo genera o recibe el calor es igual a la velocidad de emisión de energía, permanecerá constante la temperatura del mismo.

Las características de la radiación emitida por un cuerpo dependen de su estado físico. La gran proximidad de las moléculas vecinas en sólidos y líquidos, perturba los niveles de energía de una molécula emite o absorbente, a tal grado que las líneas espectrales se funden una con otra, para producir un espectro continuo. Así pues, los líquidos y sólidos emiten y absorben radiación en un intervalo continuo de longitudes de onda, pero con intensidades que varían con ésta.

### Absorción, Reflexión y Transmisión

Cuando la radiación choca contra la superficie de un cuerpo es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y, si el cuerpo es transparente, parcialmente transmitida. La relación entre las fracciones de energía absorbida, la reflejada y la transmitida respectivamente es de acuerdo con la ley de conservación de la energía:

$$\alpha + \tau + \zeta = 1$$

donde  $\alpha$  es la absorptividad,  
 $\tau$  es la transmisividad, y  
 $\zeta$  es la reflexividad del material en cada caso.

Las magnitudes relativas de  $\alpha$ ,  $\tau$  y  $\zeta$  no sólo dependen de la temperatura, las características de la superficie, las propiedades geométricas del cuerpo y el material, sino que también varían con la longitud de onda y el ángulo de incidencia.

Los sólidos y líquidos son, generalmente, opacos en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería, y los gases reflejan muy poco. La reflexión de la radiación desde una superficie puede ser difusa o regular. En la reflexión regular el ángulo de incidencia de un rayo de radiación es igual al ángulo de reflexión, y en la reflexión difusa (que es casi isotropa) un haz incidente de rayos es distribuido uniformemente en todas direcciones al ser reflejado.

El análisis de los problemas de radiación se simplifica cuando se limita a la radiación difusa, con lo que se supondrá siempre, a menos que se indique otra cosa (como en revestimientos metálicos pulimentados utilizados en reflectores solares y en algunas superficies satelitales), que la reflexión y la emisión son difusas.

### *Propiedades de la radiación*

Un gran número de sugerencias se han hecho en un empeño por estandarizar la nomenclatura en radiación. La National Bureau Standards está intentando estandarizar la nomenclatura, y en sus publicaciones reserva la terminación *ividad* para las propiedades de una superficie ópticamente lisa sin contaminantes (emisividad, reflexividad, etc.), mientras que la terminación *ancia* (emitancia, reflectancia, etc.) se usa en propiedades donde hay necesidad de especificar las condiciones de la superficie, [43]. En la práctica, la terminación *ividad* se asigna a propiedades intensivas de materiales (resistividad eléctrica, conductividad térmica, difusividad, etc.) y la terminación *ancia* se reserva por lo tanto a propiedades extensivas de materiales (resistencia eléctrica, conductancia, etc.). El uso del término emitancia definido anteriormente no sigue esta convención, ya que la emitancia supuestamente es una propiedad intensiva cuando se consideran materiales opacos.

En este trabajo utilizamos el sufijo *ividad* para las propiedades de los materiales con respecto a la radiación solar, porque suponemos que estas propiedades son superficiales, es decir, no dependen de la cantidad de material (propiedades intensivas). Otros autores [33, 34], utilizan los términos emitancia, absorptancia y transmitancia para nombrar las propiedades de la radiación del colector, el agua y la cubierta de vidrio.

Cabe decir que correctamente, deberíamos utilizar el término de transmitancia, al menos para la masa de agua, si vamos a considerar que la cantidad de agua variará esta propiedad de transmitir la radiación a través de ella en el modelado del fenómeno. Sin embargo, no existen muchos datos sobre cómo está relacionada la transmitancia con la profundidad del agua. **Aboul-Enein et al. [1]**, proporcionan una fórmula para el cálculo de la transmitancia respecto a la profundidad del agua perteneciente a Yeh y Ma (1990), pero no especifican las unidades que deben tener las variables para su uso.

### Radiación en Destiladores Solares

Se puede pensar que el proceso de transferencia de calor por radiación es aquél con la menor fracción de energía en comparación con el calor por evaporación o aquél producido por la convección natural, debido a que las temperaturas en un destilador solar son generalmente bajas. Tenemos la idea frecuente de que los fenómenos de transferencia de calor por radiación son solamente importantes a altas temperaturas como ocurre en los hornos, motores de combustión, etc. Sin embargo, se sabe que en un destilador solar el proceso de transferencia de calor más débil es el de la convección natural y la radiación se convierte en el fenómeno de mayor importancia a bajas temperaturas.

#### Malik

Para **Malik et al. [29]** el análisis de radiación como proceso de transferencia de calor interno, sigue el análisis usual para destiladores solares, donde la superficie del agua y la cubierta de vidrio son consideradas como dos superficies paralelas infinitas. Esta es una aproximación válida para destiladores con pequeña inclinación y grandes dimensiones en ambas direcciones horizontales. Esto podría no ser válido para destiladores que consisten esencialmente en tiras o rectángulos alargados.

De esta forma, proponen:

$$q_{rw, Malik} = \sigma \left( \frac{(T_w + 273)^4 - (T_g + 273)^4}{\left(\frac{1}{\varepsilon_w}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_g}\right) - 1} \right) \quad \text{para el caso infinito}$$

#### Cavidad

El segundo modelo es el de la transferencia de calor por radiación en una cavidad bidimensional. En este caso, la cavidad está compuesta por las paredes, la superficie de agua y la cubierta de vidrio. Nos referimos a este modelo como *cavidad*. El calor transferido por radiación entre la masa de agua y el vidrio está dado por:

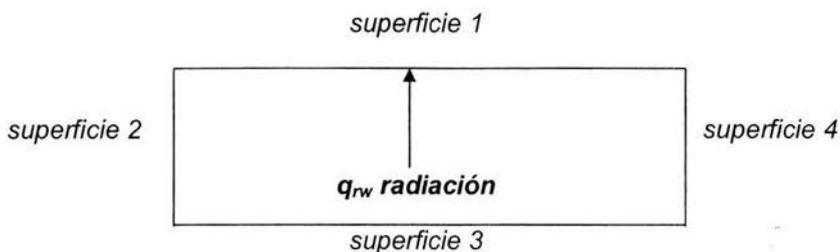
$$q_{rw, cavidad} = \sigma \varepsilon_w F_{31} [(T_w + 273)^4 - (T_g + 273)^4]$$

donde  $F_{31}$  es el factor de forma entre dos superficies paralelas separadas por una distancia  $x$ , que es la altura del destilador. Suponemos que la cavidad está formada por las paredes, el colector y la cubierta de vidrio. Obsérvese que el término de la emisividad se encuentra ausente, es decir, que se trata de dos cuerpos negros intercambiando radiación electromagnética. Esta es una mera simplificación, ya que los valores de emisividad tanto para la masa de agua como para la cubierta de vidrio son muy cercanos a la unidad.

El cálculo de los factores de forma se realizó suponiendo que no existe inclinación del vidrio, de manera que se trata de una cavidad rectangular [12,22].

$$F_{32} = \frac{1 + \left(\frac{x}{long}\right) - \left[1 + \left(\frac{x}{long}\right)^2\right]^{0.5}}{2}$$

$$F_{21} = F_{32} \quad F_{31} = 1 - F_{32} - F_{21}$$

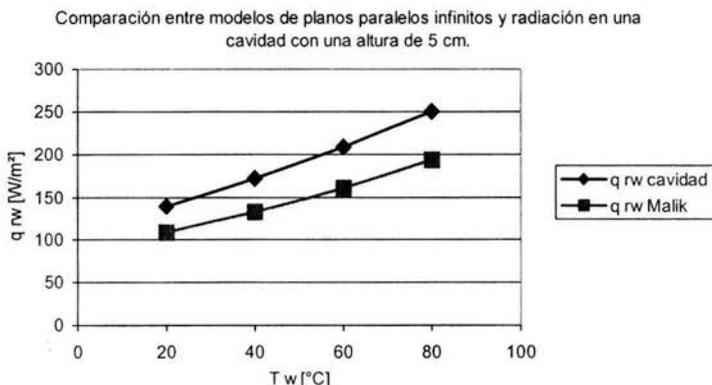


$$F_{3-1} + F_{3-2} + F_{3-4} = 1$$

**Fig. 6** Esquema básico bidimensional de la configuración de un destilador solar para la obtención de los factores de forma en el modelado de la radiación interna.

Resulta curioso que no existan otros modelos para la radiación interna en un destilador solar. El modelo de placas paralelas infinitas se ha aceptado sin discusión por investigadores posteriores a **Malik et al. [29]**.

Como se dijo anteriormente, el fenómeno de radiación interna entre el cuerpo de agua y la cubierta de vidrio parece ser menospreciado por los investigadores de destiladores solares. La mayoría de éstos desarrollan mucha más investigación sobre la convección natural y la evaporación, aunque esté demostrado que para cualquier temperatura el efecto de la convección natural posee la fracción de energía más baja. En ningún trabajo sobre destiladores solares se plantea la idea de que las reflexiones internas contribuyan a un efecto energético de los sistemas que conforman un destilador solar, por ejemplo, un aumento de temperatura en la cubierta de vidrio o en la mezcla vapor-aire.

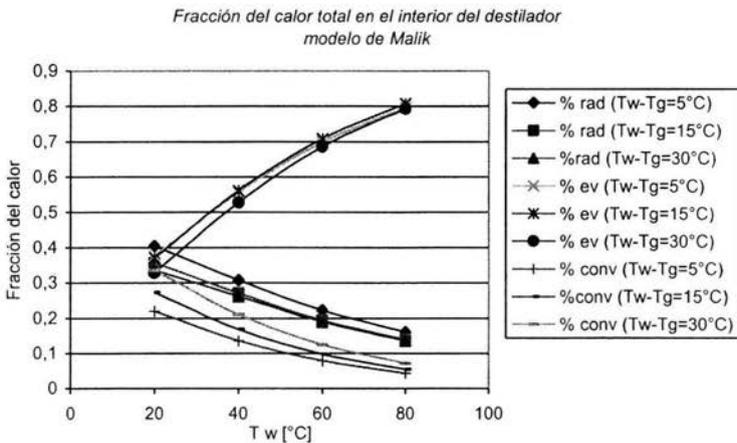


**Fig. 7** Cantidad de calor por radiación entre la masa de agua y la cubierta de vidrio a distintas temperaturas del agua para los dos modelos de radiación interna en destiladores solares.

La fig. 7 compara el calor transferido por radiación desde la masa de agua hasta la cubierta del vidrio, para dos modelos. El modelo tradicional de los planos paralelos infinitos es propuesto por **Malik et al. [29]** y supone que esta geometría modela con suficiente precisión el fenómeno de radiación en el interior del destilador solar. Consideran que la longitud del destilador comparado con su altura es

mucho mayor, de ahí que este modelo sencillo de placas planas paralelas e infinitas sea utilizado. Sin embargo, esta configuración sería correcta si se estuvieran modelando varios destiladores colocados en hileras como para considerarlo infinito.

En realidad un destilador solar tomado individualmente está muy lejos de ser dos planos paralelos infinitos. Este trabajo plantea la radiación interna en una cavidad como un modelo más preciso de lo que ocurre internamente. De la gráfica podemos notar que el calor transferido por radiación en una cavidad es, en todo el rango de temperaturas del agua, mayor al calor transferido por radiación entre dos planos paralelos e infinitos. Esto se debe a que una menor área radia una mayor cantidad de calor que un área infinita.



**Fig. 8** Análisis de sensibilidad de los flujos de energía para el modelo Malik

Este es el conocido análisis de sensibilidad en las transferencias internas de calor en un destilador solar, según el modelo presentado por **Malik et al. [29]**; **Sharma et al. [39]** y **Sartori [37]** también obtienen una gráfica muy parecida a este comportamiento a partir de su propio desarrollo. La fracción de energía predominante en temperaturas bajas del agua es la radiación y la menos predominante para cualquier temperatura es la convección natural. A partir de los 40 °C, la transferencia de calor por evaporación predomina.

Esto sugiere que la menor temperatura de operación para un destilador solar debe ser, al menos, el punto en el cual la fracción de energía por evaporación supere a las demás fracciones de energía. Tanto el calor por radiación del agua hacia el vidrio  $q_{rw}$ , como la convección natural no producen destilado, en cambio, producen un incremento de temperatura del vidrio. Este incremento de temperatura del vidrio disminuye la diferencia de temperaturas  $T_w - T_g$  que es directamente proporcional a la producción de destilado. Idealmente, se quisiera que la fracción de energía por evaporación se acercara al 100% para cualquier temperatura del agua. Sin embargo, se necesita el mecanismo de transporte de masa producido por la convección natural y la radiación no puede ser no considerada, menos a bajas temperaturas.

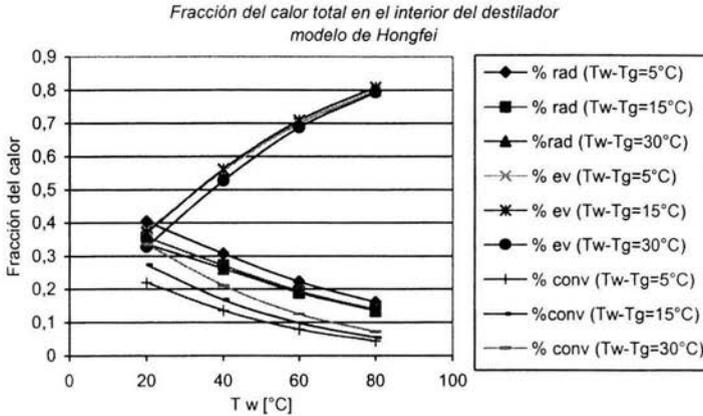


Fig. 9 Análisis de sensibilidad de los flujos de energía para el modelo Hongfei

El análisis de sensibilidad para el modelo de *Hongfei et al. [20]* no difiere mucho del análisis de sensibilidad presentado por *Malik et al. [29]*. Recordemos que *Hongfei et al. [20]* define su propio coeficiente de transferencia de calor para convección natural de acuerdo con sus observaciones experimentales. Para construir este análisis de sensibilidad, este trabajo propuso que el modelo de radiación para *Hongfei* es el mismo que el propuesto por *Malik*. La diferencia con el análisis de sensibilidad es que la evaporación se vuelve el fenómeno de transferencia de calor predominante a una menor temperatura (aproximadamente  $T_w = 25^\circ\text{C}$ ), lo cual se traduce en una mayor producción de destilado.

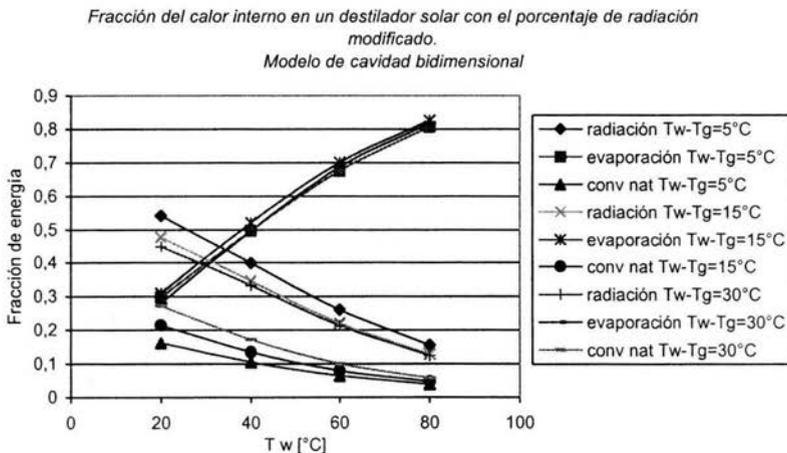


Fig. 10 Análisis de sensibilidad de los flujos de energía para el modelo cavidad

Este análisis de sensibilidad es el mismo propuesto por *Malik et al. [29]* con la diferencia de que el modelo tradicional de radiación entre la masa de agua salada y el vidrio de planos paralelos infinitos es sustituido por el modelo de radiación en una cavidad rectangular.

Evidentemente, la radiación es la fracción de energía predominante hasta pasados los 35°C en la temperatura del agua. Esta consideración de tomar al destilador como una cavidad tiene un cambio sensible en la fracción de energía dentro del destilador. Debido a que la radiación no produce destilado, este modelo predecirá producciones de destilado menores que el modelo tradicional de dos placas paralelas infinitas. Si pensamos que por las noches no existe irradiación solar, sino emisión de radiación del destilador hacia la bóveda celeste, el fenómeno de radiación a bajas temperaturas se vuelve importante, ya que existe una disminución de temperatura del agua debido a la transferencia de calor por radiación hacia la bóveda celeste.

En general, no existe mucho que pueda hacerse para disminuir esta transferencia de calor por radiación entre la masa de agua salada y la cubierta de vidrio. Los parámetros que la afectan son la emisividad y el factor de forma. La emisividad y el factor de forma dependen de los materiales empleados, su temperatura y la configuración geométrica del destilador. De tal manera que cualquier cambio en los valores de estos parámetros no afectarán sensiblemente el calor transferido por radiación ya que los valores de emisividad de los materiales empleados y las dimensiones geométricas de un destilador solar, se encuentran dentro de un rango práctico que no varía mucho.

### 3.5 Convección forzada

La 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 el 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 al exterior.

Si pensamos que el desequilibrio en un destilador ocurre principalmente por una diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio, es fácil suponer que entre mayor sea la cantidad de calor que extrae el aire del medio ambiente de la superficie exterior de la cubierta de vidrio, mayor será el efecto de evaporación dentro del destilador, ya que la extracción de calor del vidrio implica una disminución de su temperatura  $T_g$  en comparación con la creciente  $T_w$ .

Sparrow et al. (1979), según Duffie y Beckman (1991), desarrollaron estudios en túneles de viento sobre placas rectangulares a diferentes orientaciones y encontraron la correlación para un número de Reynolds de  $2 \times 10^4$  a  $9 \times 10^4$ . Watmuff (1977), encuentra la expresión  $h = 2.8 + 3V$  para una placa de 0.5 m<sup>2</sup> de superficie.

Generalmente se ha aceptado la fórmula propuesta por McAdams (1954), [1]:

$$q_{ca,UP} = h_{ca,UP}(T_g - T_a) \quad \text{donde } h_{ca,UP} = 5.7 + 3.8V \quad \text{y } V \text{ es la velocidad del viento.}$$

aunque se piensa que esta ecuación está sobredimensionada. En este trabajo, utilizamos otra expresión propuesta por McAdams igualmente para modelar la influencia de la velocidad del aire en un destilador solar

$$q_{ca,DOWN} = h_{ca,DOWN}(T_g - T_a) \quad \text{donde } h_{ca,DOWN} = 2.8 + 3V \quad \text{y } V \text{ es la velocidad del viento.}$$

Los subíndices UP y DOWN, en este trabajo, indican la definición utilizada para la influencia del viento en un destilador solar

### 3.6 Radiación externa

La transferencia de calor por radiación al exterior ocurre principalmente cuando la cubierta de vidrio emite radiación de vuelta al sol. Como no es posible transferir calor de un depósito a menor temperatura a otro a mayor temperatura conforme a la segunda ley de la termodinámica, la cubierta de vidrio devuelve radiación con otra longitud de onda (infrarroja). De esta forma, para **Malik et al. [29]** la ecuación en esta transferencia de energía resulta:

$$q_{ra} = \varepsilon_g \sigma \left[ (T_g + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right]$$

donde  $T_{sky} = T_a - 12 \text{ }^\circ\text{C}$  que es la temperatura del cielo aparente para longitudes de onda grandes. La temperatura del cielo es función tanto de la temperatura ambiente como de las condiciones del clima en el lugar. En este trabajo llamamos nubosidad al número que se le resta a la temperatura ambiente para definir la temperatura del cielo.

Nubosidad es un parámetro climático que implica a la nubosidad, la latitud entre otras variables geográficas y astronómicas. Los  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  del valor de nubosidad para **Malik et al. [29]** es resultado de su propia investigación y análisis experimental, aunque hacen referencia a Duffie y Beckman para justificar este valor.

En este trabajo, nubosidad es un parámetro que contribuye al estudio del comportamiento de los destiladores. No existe otro modelo para representar la radiación al exterior. La expresión anterior es utilizada indiscutidamente en todos los trabajos sobre destiladores solares.

### 3.7 Pérdidas por conducción

La transferencia de calor por conducción ocurre principalmente entre el colector solar y el aislamiento (en caso de que haya) entre éste y la tierra donde se encuentra montado, o bien, entre el colector y el medio ambiente exterior. También encontramos conducción de calor a través de las paredes del destilador y la cubierta de vidrio hacia el medio ambiente.

La conducción de calor a través de la cubierta de vidrio se puede considerar despreciable en comparación con la transferencia de calor por medio de la convección forzada y la radiación hacia el exterior. La cubierta de vidrio no representa una resistencia térmica importante de calor debido a que su espesor en cualquier caso es el mínimo posible. El objetivo de una cubierta de vidrio es impedir que la mezcla vapor-aire dentro del destilador escape hacia el medio ambiente, que los rayos del Sol encuentren un cuerpo transparente hasta llegar al colector donde pueda aprovecharse su energía, y que posea poca absorptividad en el rango de longitudes de onda que comprende la radiación solar.

Por otra parte, la conducción de calor a través de las paredes del destilador solar puede despreciarse si consideramos que solamente existen pérdidas de calor desde el colector hacia el medio ambiente. Esta suposición es razonable si pensamos en las áreas de transmisión de calor.

El área que abarca el colector solar, al fondo del destilador, es significativamente mayor a la suma de las áreas del agua en contacto con las paredes del destilador. En todos los casos prácticos, la configuración de un destilador solar es extenso en anchura y longitud comparado con la altura del equipo. De esta forma, la conducción de calor en un destilador solar es más significativa entre el colector y el exterior.

La ecuación que modela este tipo de transferencia es la usual para conducción de calor unidireccional a través de un medio conductor.

$$q_{ins} = \frac{K_{ins}}{X_{ins}} (T_{col} - T_a)$$

donde  $K_{ins}$  es la conductividad térmica del aislamiento y donde  $x_{ins}$  es el espesor de éste.

Obviamente, lo deseable es que exista la menor cantidad de pérdidas de calor a través de las paredes del destilador hacia el ambiente porque significa una disminución en la cantidad de calor que el colector puede cederle al agua. Por tanto, el espesor del aislamiento representa una de las variables importantes en el modelado de un destilador solar, así como los materiales utilizados para este fin, ya que deben cumplir con una muy baja conductividad térmica, buena resistencia mecánica y durabilidad.

La diferencia de temperaturas entre la temperatura del colector  $T_{col}$  y la temperatura ambiente  $T_a$  (o la temperatura del suelo  $T_{suelo}$ ) se representa como  $dT$ . Dependiendo de dónde se ubique el destilador solar, ya sea en un hueco en la tierra ( $T_{suelo}$ ) o en un banco ( $T_a$ ),  $dT$  adquirirá valores distintos. Es lógico pensar que donde sea que se coloque el destilador, en la tierra o en un soporte al aire libre,  $T_{suelo}$  y  $T_a$  serán similares, aunque depende del tipo de suelo, la zona geográfica, etc.

### 3.8 Convección natural en la masa de agua

Casi no existen trabajos sobre el fenómeno de la transferencia de calor del colector hacia la masa de agua. En la mayoría de las investigaciones se asume que la energía de la radiación solar es absorbida por la masa de agua y no por el colector. Esta suposición puede ser válida para un destilador que contenga una masa de agua con tinte oscuro y que aumente la producción de destilado. Existen algunos reportes [1], sobre el empleo de sustancias colorantes que aumenten la absorptividad de la masa de agua, con el objetivo de eliminar del diseño al colector y propiciar así una transferencia de calor más directa al agua [18, 26, 29].

Sin embargo, no son pocos los trabajos que consideran que la entrada de energía al agua es solamente debido a la fracción de radiación solar absorbida por la misma sin especificar si ésta contiene una sustancia colorante o no. Esta suposición es incorrecta porque la absorptividad de una masa de agua salada tiene valores relativamente bajos ( $0.1 < \alpha_w < 0.2$ ) con lo cual implicaría una captación de radiación solar muy baja para los fines deseados. Precisamente, la finalidad del colector es ayudar a la captación de una mayor cantidad de energía radiante y cederla a la masa de agua.

**Malik et al. [29]** proponen que el mecanismo de transferencia de calor del colector a la masa de agua es la convección natural del agua. Al igual que para describir el fenómeno de convección natural en la mezcla aire-vapor, **Malik et al. [29]** utilizan una definición para el número de Nusselt tal que:

$$Nu_w = 0.54(Gr_w Pr_w)^{0.25} \quad \text{donde:}$$

$$Gr_w = \frac{z^3 \rho_w^2 g \beta_w (T_{col} - T_w)}{\mu_w^2} \quad \text{y} \quad Pr_w = \frac{\mu_w C_{p,w}}{K_w}$$

Esta expresión se la atribuyen a McAdams según [29]. De esta forma, el calor transferido del colector a la masa de agua en  $W/m^2$  resulta:

$$q_w = h_w (T_{col} - T_w) \quad \text{donde} \quad h_w = \frac{Nu_w K_w}{z}$$

### 3.9 Suposiciones generales

Ningún estudio formal sobre análisis en destiladores solares estaría completo sin hacer las suposiciones correspondientes. Debido a la complejidad de los fenómenos físicos que ocurren en el destilador resulta casi imposible modelarlos matemáticamente con absoluta exactitud.

La mayoría de las suposiciones son generales y muchos de los investigadores las adoptan para simplificar sus desarrollos matemáticos. Este trabajo no es la excepción y las siguientes suposiciones se realizaron en algunos casos para eliminar una carga excesiva de cálculos, y en otros casos por que no pertenecían a los objetos de estudio del mismo.

- a) La mezcla aire-vapor no es un sistema de estudio del destilador solar, es decir que no está sujeta al balance de energía ni al análisis de exergía. Sin embargo, esto no significa que su existencia no ejerza influencia en los demás sistemas del destilador. Pensamos que un análisis más formal tanto energético como exérgico en destiladores solares, debería tomar en cuenta a la masa de aire-vapor, la influencia de su volumen, patrón de flujo, vorticidad, grado de humedad en función de la altura del destilador, etc.
- b) La masa de aire-vapor no se considera medio participante en la radiación solar que atraviesa la cubierta y llega hasta el agua. No absorbe, ni refleja. En este sentido, es como si existiera un vacío dentro del destilador.
- c) La temperatura de referencia para el cálculo de las exergías de cada uno de los sistemas es  $T_o = 25^{\circ}\text{C}$ . La presión y la humedad no son necesarias para definir el estado de referencia ya que, para los fines del trabajo, el estado muerto se define perfectamente con la temperatura de referencia.
- d) El análisis matemático de este trabajo contempla solamente a los destiladores someros de batea simple.
- e) El ángulo de inclinación de la cubierta del vidrio para los modelos de radiación interna en este trabajo no interviene en ninguna correlación. Pensamos que esta omisión no entra en contradicción con una cubierta de vidrio lo suficientemente inclinada para que el destilado fluya hacia los canales de recolección. El modelo matemático no hace seguimiento del destilado hasta la condensación en el vidrio, sino que asume que a partir de la evaporación, es posible encontrar resultados útiles para un destilador solar. Es por eso que el ángulo de inclinación del vidrio no constituye un parámetro en el análisis del destilador.
- f) La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una cantidad de agua desde un depósito hasta la temperatura de estudio  $T_w$  es muy pequeña en comparación con la cantidad de calor necesaria para evaporar una misma cantidad de agua. Para cualquier caso, el calor transferido del colector al agua, se utiliza solamente para evaporar el agua (además de las pérdidas de calor del colector).
- g) La temperatura interior del vidrio es igual a la temperatura exterior del vidrio. Es decir, la cubierta de vidrio no representa una resistencia térmica, por lo que no existe calor transferido desde el vidrio hacia el ambiente por conducción.
- h) Aunque la reflexión de la radiación solar en el interior de un destilador existe y cada cuerpo tiene un valor de reflexividad, en este trabajo no se considera la transferencia de calor del agua o del colector hacia el vidrio debido a la reflexión de los rayos del Sol. Solamente la emisividad del agua a la temperatura del agua, produce una transferencia de calor por radiación hacia la cubierta de vidrio,  $q_{rw}$ . La razón es la complejidad matemática que supone la consideración de este fenómeno de la radiación.

- i) La masa de agua permanece constante en cualquier caso. La masa evaporada se repone al mismo ritmo con el cual se evapora.
- j) Para el estudio energético del destilador solar en régimen permanente, la irradiación solar tiene una sola componente, es decir, que el valor numérico es a fin de cuentas la irradiación solar total. Mientras que para el análisis exérgico, tanto en régimen permanente como transitorio, la irradiación solar está compuesta por la irradiación solar directa y la irradiación difusa. Esto puede limitar en un pequeño grado la comparación de ambos análisis, sin embargo, como ser verá, la irradiación difusa representa una fracción pequeña en relación a la irradiación solar total.
- k) Todos los flujos de exergía se refieren a la exergía que existe en una transferencia de calor entre una diferencia finita de temperaturas. No se considera la exergía cinética, potencial, por presión o química.

#### 4 PARÁMETROS EN UN DESTILADOR SOLAR

Este trabajo hace diferencia entre las variables y los parámetros.

Las variables son aquellas magnitudes cuyos valores dependen de los parámetros del destilador. Ejemplo de variables: la temperatura del vidrio, del agua y del colector ( $T_g$ ,  $T_w$  y  $T_{col}$ ).

Los parámetros son las constantes de valor indeterminado y que manejamos a nuestra conveniencia para reflejar una condición geométrica, física o termodinámica en el destilador y sus alrededores. Ejemplo de parámetros: altura del destilador, presión atmosférica, absorptividad del vidrio, temperatura ambiente, etc. Los parámetros utilizados en este trabajo y que, de alguna forma, representan las magnitudes modificables en un destilador solar son:

**TABLA 1.** Valores estándares de los parámetros en un destilador solar

| Parámetros del medio ambiente | Parámetros físicos del destilador | Parámetros ópticos del material |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $P_{atm}$ = 101.1325 kPa      | $x$ = 0.1 m                       | $\varepsilon_g$ = 0.88          |
| $T_a$ = 20 °C                 | $z$ = 0.01 m                      | $\varepsilon_w$ = 0.88          |
| $H_s$ = 500 W/m <sup>2</sup>  | long = 1 m                        | $\alpha_g$ = 0.1                |
| $T_{sky}$ = 8 °C              | ancho = 1 m                       | $\alpha_w$ = 0.1                |
| nubosidad = 12°C              | $x_{ins}$ = 0.02 m                | $\alpha_{col}$ = 0.8            |
| $g$ = 9.81 m/s <sup>2</sup>   | $K_{ins}$ = 0.04 W/mK             | $\zeta_w$ = 0                   |
| $V$ = 0 m/s                   |                                   | $\zeta_{col}$ = 0               |
|                               |                                   | $\tau_w$ = 0.9                  |
|                               |                                   | $\tau_g$ = 0.9                  |

Los valores anteriores para cada parámetro son los que se utilizaron para la evaluación del comportamiento de las variables con respecto a los demás parámetros. En general, los valores de cada parámetro reflejan condiciones estándares del medio ambiente, geométricas y de propiedades de los materiales.

##### 4.1 Parámetros de la convección natural

###### *Altura del destilador*

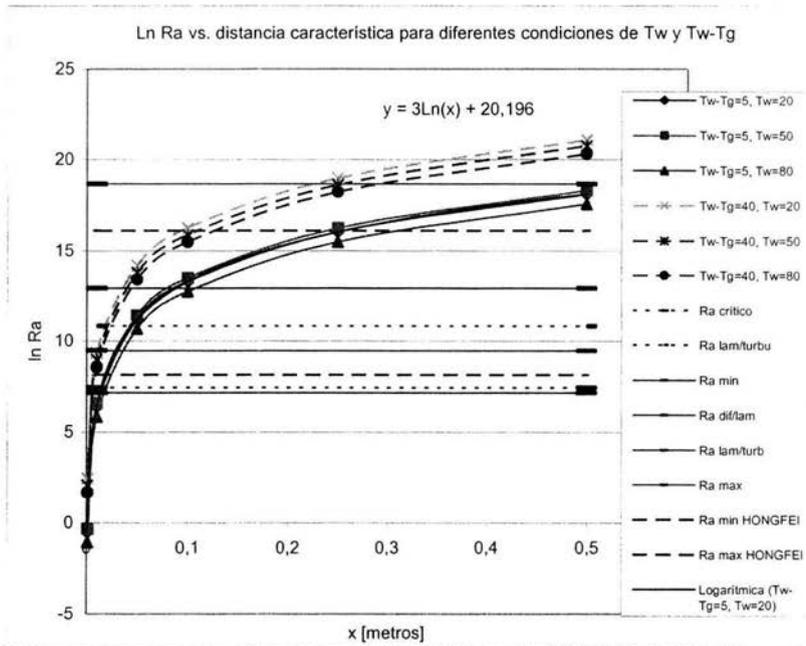
El modelo convencional de convección natural involucra el conocimiento de los parámetros físicos del fluido, el régimen del flujo y la geometría del fenómeno. Estos parámetros físicos son la densidad, la viscosidad dinámica, conductividad térmica entre otros. Para simplificar estos cálculos y lograr establecer modelos existen números adimensionales que representan las relaciones entre las fuerzas que se encuentran involucradas en los fenómenos y ofrecen mucha información sobre la naturaleza de estos. En este trabajo se presentan distintos modelos que pretenden simular correctamente la convección natural en un destilador solar.

También utilizamos como herramienta de análisis para la convección natural en un destilador solar el modelo de Dunkle que considera al movimiento de la mezcla vapor-aire dentro del destilador solar como régimen laminar, es decir, se propone  $C = 0.21$  y  $n = 1/4$ . A este modelo le llamamos *laminar*.

Si pensamos que las temperaturas del agua como la del vidrio no son parámetros de la convección natural, sino que son variables generales del sistema, el parámetro más importante dentro de la convección natural es la distancia entre los puntos donde se mide la diferencia de temperaturas, en este caso, *la altura del destilador*.

Revisando el número de Grashof, observamos que la distancia se encuentra elevada al cubo, y que multiplicada por el número de Prandtl sigue siendo una variable elevada al cubo. Siguiendo con el proceso de obtención del calor por convección natural, calculamos al número Nusselt según escojamos el modelo, es decir, propongamos valores para C y n.

Dependiendo del valor de n, la distancia se encontrará elevada a la 3n. Con esto queremos probar que la distancia es el parámetro más influyente para los valores numéricos de la convección natural debido a que se encuentra elevado a una potencia mayor y repercute sensiblemente en el calor por convección natural si variamos según queramos esta distancia. Así, contamos con un parámetro importante para el funcionamiento de un destilador solar.



**Fig. 12** Número de Rayleigh a distintos valores de altura del destilador, según los modelos de convección natural.

Esta gráfica resume la diferencia que existe entre alguno de los modelos de convección natural con respecto a la altura del destilador.

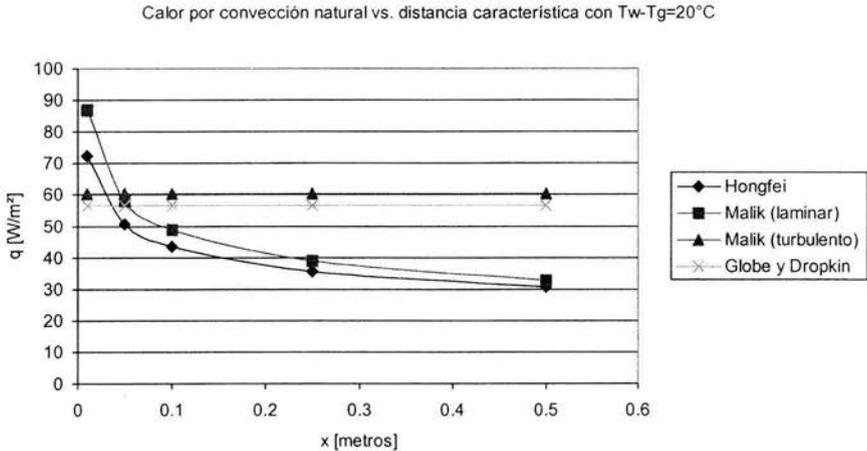
Las rectas horizontales significan los límites en términos del número de Rayleigh para cada uno de los modelos. Las líneas que tienen comportamiento logarítmico son los logaritmos naturales de los números de Rayleigh de cada modelo dependiendo de la diferencia de temperaturas  $T_w - T_g$  y la altura del destilador solar. Lo que se puede apreciar es el rango de alturas del destilador entre el cual se puede utilizar con certeza un modelo en vez de otro.

Por ejemplo, para el modelo de Hongfei, (línea negra discontinua) existen dos límites, dentro de los cuales el modelo arroja valores correctos según las condiciones del experimento realizado. Recordemos que los modelos provienen de datos experimentales. El rango del modelo de Hongfei está comprendido aproximadamente entre 8 y 17 del logaritmo natural del número de Rayleigh ( $\ln Ra$ ). Para este rango, las alturas del destilador permisibles (para el modelo) están aproximadamente entre los 2 y 31cm.

Obviamente, los valores del número de Rayleigh dependen fuertemente de la diferencia de temperaturas entre el agua y el vidrio. De ahí que para la mayoría de los modelos en sus límites superiores, la diferencia de temperaturas produce que las alturas del destilador varíen demasiado.

Finalmente, las gráficas de este tipo pueden utilizarse de dos maneras:

- 1) como guías para decidir qué modelo puede utilizarse en el estudio de la convección natural, dependiendo de la altura del destilador y
- 2) con la altura del destilador fija y la diferencia de temperaturas definida, se puede establecer qué modelos arrojarán valores correctos (estén dentro de sus límites) y en qué tipo de régimen se encuentra (laminar, turbulento o incluso difusión) para la convección natural.



**Fig. 13** Flujo de calor por convección natural a distintas alturas del destilador según modelos de convección natural

Esta gráfica muestra la diferencia entre los distintos valores que arrojan los modelos de convección natural para distintas alturas del destilador. Se puede ver que tanto el modelo *Malik* en el régimen turbulento ( $C = 0.075$ ,  $n = 1/3$ ) como el modelo *Globe y Dropkin* son independientes de las dimensiones del destilador. Para valores de altura del destilador pequeños (5 cm o menos), el calor transferido al vidrio por convección natural para los modelos que dependen de la altura es mucho mayor que aquellos valores de los modelos de *Malik* y *Globe y Dropkin*.

Sabemos que el calor por convección natural no participa directamente en la producción de destilado; en cambio, es el medio de transporte del vapor producido en la superficie del agua hacia la cubierta de vidrio. De no existir el fenómeno de la convección natural, difícilmente podría producirse destilado suficiente en un día solamente por difusión de masa. Podríamos suponer que una altura muy pequeña del destilador inhibiría las estructuras de flujo de la convección natural. De la misma manera, si colocáramos la cubierta de vidrio a una altura significativa, medio metro o más encima de la masa de

agua salada, el efecto de convección natural disminuiría sensiblemente tal como muestran los modelos. Estos modelos pueden estar limitados ya que a grandes alturas pueden existir estructuras de flujo importantes y de gran contenido energético debido a la convección natural, o puede ocurrir lo contrario. Sin embargo, no podemos asegurar nada hasta que se cuente con más datos experimentales sobre este fenómeno.

#### 4.2 Parámetros de la evaporación

La evaporación es el proceso de transferencia de calor que ocurre cuando el agua salada cambia de fase gracias al aumento de temperatura y se convierte en vapor que es desplazado hacia la cubierta de vidrio mediante el proceso de convección natural.

Los parámetros que modelan la evaporación en un destilador solar son las propiedades físicas y termodinámicas del fluido. Si se definen la temperatura del vidrio así como la del agua, entonces quedan fijos todos los demás parámetros para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por evaporación. No existe un parámetro que no dependa de la temperatura que podamos utilizar como variable de prueba para evaluar su influencia en el funcionamiento del destilador solar.

Es importante decir que el coeficiente de transferencia de calor por evaporación es congruente con el modelo que está siendo utilizado, es decir, que para el modelo de evaporación *Malik*, utilizamos el coeficiente de transferencia de calor por convección natural de *Malik*. Para el modelo de evaporación de *Hongfei*, utilizamos el coeficiente de transferencia de calor por convección natural propuesto por **Hongfei et al [20]**. Sin embargo, para los demás modelos de evaporación, como son los de *Chilton-Colburn* y *Clark*, utilizamos  $h_{cw}$  de *Malik*, por ser el modelo tradicional en destiladores solares.

#### 4.3 Parámetros de la radiación interna

##### *Altura del destilador*

Este parámetro aparece en la definición del factor de forma para el modelo de cavidad para la radiación interna entre la masa de agua y la cubierta de vidrio. Para usos prácticos, las dimensiones de longitud y ancho de un destilador son mucho más grandes que la altura del destilador, de ahí que el factor de forma no cambie sustancialmente su valor.

##### *Longitud y Ancho del destilador*

La longitud del destilador puede medirse desde cualquiera de las esquinas del fondo de un destilador hasta la otra, en dirección horizontal. Este trabajo no hace distinción especial entre cuál es el ancho y cuál es el largo del destilador, ya que estos parámetros son constantes e iguales a un metro, de tal forma que tengamos para cualquier caso, un área del colector y un área de cubierta de vidrio igual a un metro cuadrado.

#### 4.4 Parámetros de la radiación externa

##### *Temperatura Ambiente y Nubosidad*

La temperatura ambiente aparece en la definición de la cantidad de energía radiante emitida al exterior desde la cubierta de vidrio. Recordemos que  $T_{sky}$  queda definida como:

$$T_{sky} = T_a - 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

donde los 12 °C se refieren a otro parámetro que en este trabajo hemos llamado nubosidad.

En general:

$$T_{sky} = T_a - \text{nubosidad}$$

El parámetro nubosidad es una cantidad de grados centígrados que se le resta a la temperatura ambiente para definir una temperatura aparente de la bóveda celeste, a la cual la cubierta de vidrio le está emitiendo una cierta cantidad de energía. Para valores de nubosidad altos, ( $T_{sky} = 230$  K) se interpreta que se tienen condiciones climáticas de cielo claro y frío, mientras que para valores de nubosidad bajos ( $T_{sky} = 285$  K), se cuenta con un cielo cálido y nuboso.

Siendo congruentes, el término nubosidad es precisamente lo contrario de lo que significa el parámetro, es decir, debería llamarse "claridad" o "grado de despeje del cielo", ya que está directamente relacionado con la claridad del cielo e inversamente relacionado con el grado de nubosidad. Este trabajo le adoptó un nombre a este parámetro con el fin de ser más explícito al hablar de la temperatura aparente de la bóveda celeste  $T_{sky}$ . En todos los trabajos sobre destiladores solares, el parámetro nubosidad no tiene nombre, es solamente una cantidad de grados que se le restan a la temperatura ambiente según unas específicas condiciones climatológicas. Muchas veces se adopta el valor que proponen **Malik et al. [29]** igual a  $12$  °C, sin embargo, pensamos que se utiliza indiscriminadamente, además de que existe muy poca investigación sobre este parámetro para destiladores solares. Se conoce solamente la expresión de Swinbank (1963) para la temperatura del cielo en función de la temperatura ambiente, tal y como reportan **Sharma et al. [39]**.

$$T_{sky} = 0.0552T_a^{1.5}$$

El parámetro nubosidad es sobretodo una variable de campo, es decir, una magnitud que se mide o se supone de acuerdo con las condiciones climáticas de una cierta zona geográfica donde habrán de colocarse los destiladores solares. En este trabajo, nubosidad adopta un rango de valores que van desde los  $0$  hasta los  $30$  °C.

#### 4.5 Parámetros de la convección forzada

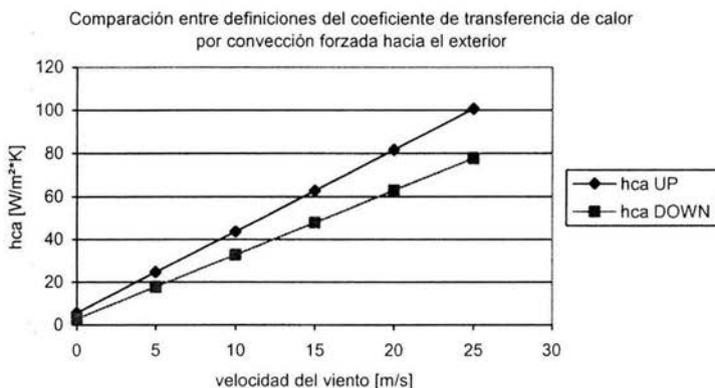
##### *Velocidad del viento*

Este parámetro aparece en el balance de energía de la cubierta de vidrio, debido a que está involucrado en la transferencia de calor hacia el exterior por convección forzada. Existen dos tipos de fórmulas muy similares que definen al coeficiente de transferencia de calor por convección forzada  $h_{ca}$  en el ámbito de destiladores. Se discute si una se encuentra sobre dimensionada y arroja valores significativamente mayores al de la otra fórmula. Estas fórmulas 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.

$$h_{ca,UP} = 5.7 + 3.8V \quad \text{definición sobredimensionada (Malik)}$$

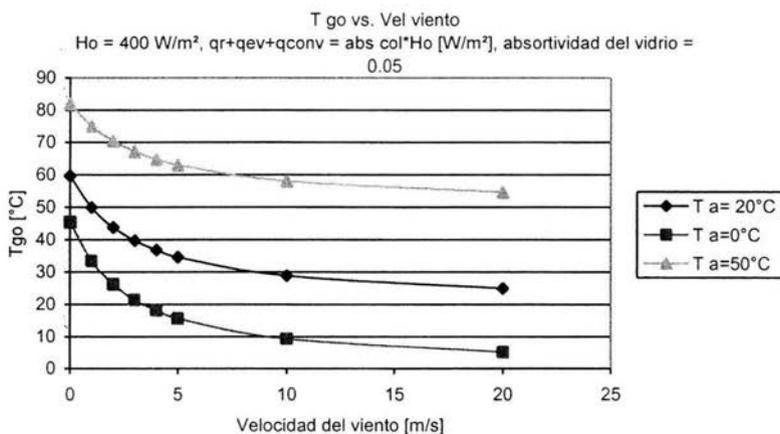
$$h_{ca,DOWN} = 2.8 + 3V \quad \text{definición alterna}$$

Como se dijo, en este trabajo utilizamos las dos definiciones para poder establecer comparaciones con respecto a los modelos que utilizan uno y otro.



**Fig. 14** Coeficiente de transferencia de calor de la convección forzada a distintas velocidades del viento según dos modelos de convección forzada en destiladores solares.

Como se puede apreciar, la diferencia entre las distintas correlaciones aumenta conforme aumenta la velocidad del viento. Si pensamos que es difícil encontrar regiones donde puedan ubicarse destiladores y además existan vientos muy poderosos, podemos suponer que la diferencia entre estos dos coeficientes de transferencia de calor no es importante. Sin embargo, muchas instalaciones de destiladores solares se ubican en playas o zonas cercanas al mar por ser la fuente de agua salada más abundante y típicamente los lugares donde se dificulta la obtención o el acceso de agua potable, donde existen vientos importantes.



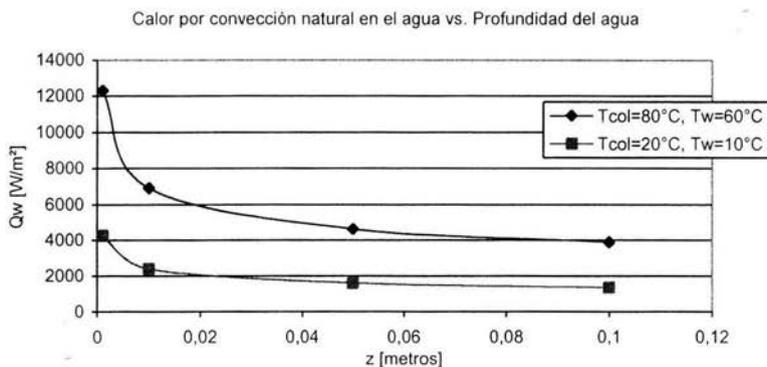
**Fig. 15** Temperatura exterior del vidrio a distintas velocidades del viento

Un balance de energía sobre la cubierta de vidrio arrojaría los resultados esperados que se muestran en la gráfica. A mayor velocidad del viento, se tiene una disminución importante de los 0 a los 10 m/s, mientras que para valores mayores de velocidad, la temperatura del vidrio casi no disminuye. Éste es un resultado obtenido desde un punto de vista aislado del sistema global de un destilador solar; sin embargo, resulta importante reconocer que la influencia del viento sólo adquiere una influencia importante para la temperatura del vidrio a velocidades bajas del viento.

#### 4.6 Parámetros de la convección natural en la masa de agua

##### *Profundidad del agua*

La profundidad del agua es un parámetro que aparece únicamente en el análisis de la transferencia de calor entre el colector y la masa de agua. Si hiciéramos caso a algunos trabajos donde la fracción de energía radiante que absorbe el agua es la única entrada de energía, la profundidad del agua no estaría contemplada como un parámetro, ya que únicamente aparece en la definición del número de Grashof que modela la convección natural en la masa de agua.



**Fig. 16** Calor por convección natural en la masa de agua a distintas profundidades del agua según McAdams como reportan Malik et al. [29].

En la figura 16, el calor por convección natural disminuye con una trayectoria hiperbólica a medida que la profundidad del agua aumenta. Este comportamiento resulta lógico cuando se sabe que, según resultados experimentales, entre más delgada sea la capa de agua en el destilador solar, mayor será la producción de destilado.

#### 4.7 Parámetros en la conducción de calor a través del aislamiento

##### *Temperatura Ambiente y Temperatura del Suelo*

La diferencia entre la temperatura del colector y la temperatura ambiente o del suelo, según donde se encuentre montado el destilador solar, es directamente proporcional a la cantidad de energía que se pierde hacia el exterior mediante conducción. De ahí, que entre mayor sea esta diferencia existirá mayor energía que no se aprovecha en el calentamiento de la masa de agua, y por tanto, menor producción de destilado. Si pensamos que la temperatura del colector será visiblemente elevada dependiendo de la cantidad de irradiación solar absorbida, una temperatura ambiente elevada igualmente ayudará a disminuir la energía que se pierde por conducción.

##### *Espesor del aislamiento*

El espesor del aislamiento es el grosor del medio encargado de separar al colector del medio ambiente. Aparece en el fenómeno de conducción de calor hacia el exterior desde el colector solar. 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. Generalmente, se utiliza aislamiento en estudios sobre destilación solar en el laboratorio, mientras que en campo, debido al costo y los problemas de mantenimiento suele no utilizarse.

### Conductividad térmica del aislamiento

La definición de la conductividad térmica está implícita en la ley de Fourier, que modela la transferencia de calor mediante conducción.

$$q_{ins} = \left( \frac{K_{ins}}{X_{ins}} \right) (T_{col} - T_a)$$

Entre menor sea el valor de la conductividad térmica, mayor será la diferencia de temperaturas entre el colector y el medio ambiente, y por tanto, poseerá mejor capacidad de aislamiento. En este trabajo, la conductividad térmica no depende de la temperatura del aislamiento. El aislamiento es supuesto como un medio continuo e isotrópico.

## 4.8 Parámetros climáticos

### Temperatura Ambiente

La temperatura ambiente es un parámetro de mucha importancia, no solamente en el campo de los destiladores sino en muchas otras aplicaciones de ingeniería. Como ya se dijo, este parámetro no es controlable en el sentido estricto, salvo estudios realizados en un laboratorio con condiciones artificiales de medio ambiente. La importancia de conocer el comportamiento de un destilador bajo distintas temperaturas ambientes radica en conocer cómo afectará a la producción de destilado una región calurosa en contraste con una fría.

Es cierto que la decisión de colocar destiladores solares no está directamente ligada con el valor de temperatura ambiente en una locación. Como se sabe, existen factores de capacidad, comodidad, económicos y sociales que deciden sobre el uso de un campo de destiladores solares en vez de otras alternativas existentes para la producción de agua potable. Sin embargo, es claro que los países con la mayor cantidad de estudios sobre destiladores son aquellos que, por su ubicación en el planeta, reciben mayor cantidad de radiación solar anualmente. No podemos decir mucho sobre sus temperaturas ambientes promedio debido a que al ser regiones áridas, poseen climas extremos con veranos ardientes e inviernos muy crudos. El conocimiento del comportamiento de un destilador bajo distintas temperaturas ambiente puede proveer información sobre la optimización del funcionamiento de estos equipos, ya que si no es posible dominar las condiciones circundantes de los equipos destiladores sí pueden hacerse modificaciones en su estructura o en su localización de manera que se aprovechen al máximo los efectos del medio ambiente sobre ellos.

## 4.9 Parámetros ópticos

### Emisividad

La emisividad es una medida de qué tan bien un cuerpo puede radiar energía comparado con un cuerpo negro. La capacidad de emisión depende de factores tales como la temperatura del cuerpo, la longitud de onda particular considerada para la energía siendo emitida, y el ángulo con el cual se emite la energía. La emisividad es medida usualmente mediante experimentación en una dirección normal a la superficie y como una función de la longitud de onda [43].

Para este trabajo, los valores de la emisividad de los cuerpos son constantes y se consideran promedio. Para fines del modelado matemático en un destilador solar, esta suposición es válida y utilizada por la mayoría de los investigadores de destilación solar. Para este trabajo, la emisividad no se considera parámetro de estudio en el funcionamiento de un destilador solar. La razón es que el cambio en valores de estos parámetros está asociado a la fabricación de materiales con

características especiales, frecuentemente costosos y poco prácticos para el uso en destiladores solares.

### *Absortividad*

La absortividad está definida como la fracción de energía incidente en un cuerpo que es absorbido por el cuerpo. La radiación incidente es el resultado de condiciones de radiación en la fuente de la energía incidente. La distribución espectral de la radiación incidente es independiente de la temperatura o la naturaleza física de la superficie absorbente (a menos que la radiación emitida por la superficie sea parcialmente reflejada de vuelta hacia la superficie). Comparada con la emisividad, la absortividad viene asociada a complejidades adicionales debidas a las características direccionales y espectrales de la radiación incidente [43].

Para los fines de este trabajo, la absortividad puede considerarse independiente de la longitud de onda y la temperatura del cuerpo. Su valor corresponde a los valores típicos empleados en la bibliografía relacionada a la destilación solar para cada uno de los materiales que intervienen en el proceso de captación de radiación solar.

### *Reflexividad*

Las propiedades reflectivas de una superficie son más complicadas de especificar que aquéllas de la emisividad o la absortividad. Esto se debe a que la energía reflejada depende no solamente del ángulo con el cual la energía incidente llega a la superficie, sino que adicionalmente depende de la dirección considerada para la energía reflejada [43].

En este trabajo, la reflexividad no aparece directamente. En todos los trabajos sobre destiladores solares se omite el valor de este parámetro óptico, donde solamente se consideran la absortividad y la transmisividad. Sin embargo, implícitamente suponen un valor a la reflexividad ya que para cualquier cuerpo la suma de las propiedades ópticas, reflexividad, transmisividad y absortividad es igual a uno.

De esta manera, la reflexividad es siempre igual a:

$$\zeta = 1 - \alpha - \tau$$

Para este trabajo, con el fin de simplificar la información relacionada con los parámetros ópticos, la reflexividad de los cuerpos participantes es igual a cero.

### *Transmisividad*

La transmisividad es la fracción de la energía incidente que pasa a través de un cuerpo. Para un cuerpo completamente transparente, el valor de la transmisividad es uno, mientras que los cuerpos opacos se suponen con transmisividad igual a cero. En este trabajo, el valor de la transmisividad para el vidrio y la masa de agua es igual a  $1 - \alpha = 0.9$ , que es un valor alto. Igualmente como los demás parámetros ópticos, este valor se considera constante en el rango de temperaturas y longitudes de onda de la radiación solar [43].

Cabe mencionar que la transmisividad como propiedad superficial, no existe, sino que el término correcto para describir esta propiedad debería ser la transmitancia, ya que resulta obvio que es una propiedad óptica que depende del volumen del cuerpo al cual llega la radiación incidente. Así, en el más simple de los casos, (ya no mencionemos si quiera la dependencia a la temperatura del cuerpo, al ángulo de incidencia, a la longitud de onda, etc.) la transmitancia de la cubierta de vidrio y del agua deberían estar en función de sus espesores si pensamos que las áreas son constantes.

No existe un estudio formal a este respecto en destilación solar, sino que se asume un valor constante de la transmisividad, ya que los espesores de la cubierta de vidrio y la masa de agua se mantienen siempre dentro de un rango práctico.

Sobre los parámetros utilizados en este trabajo cabe decir que son aquellos parámetros que aparecen en las correlaciones utilizadas para modelar el fenómeno de destilación solar, debido a que se trata de un trabajo puramente teórico. De ahí que no aparezcan parámetros de la destilación solar como la salinidad del agua salobre, tensión superficial del agua salada, uso de tinte negro en el agua salada, de termosifones, etc. Para mayor referencia de este tipo de parámetros en destilación solar, los trabajos de *Almanza et al. [4]*, *Morcos [32]*, *Goosen [18]*, *Kudish [26]*, entre otros pueden resultar útiles.

## 5 ANÁLISIS ENERGÉTICO

El análisis energético en un destilador solar consiste en realizar balances de energía en cada uno de los sistemas que lo conforman. Este análisis se llama de **parámetros concentrados**. En nuestro caso se le puede efectuar el balance de energía a aquellos sistemas que proporcionen la mayor cantidad de información necesaria, es decir, aquéllos que contengan la mayor cantidad de variables relevantes para el análisis.

En un análisis de parámetros concentrados 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. Algunos de estos subsistemas son: el colector solar, la masa de agua marina, la cubierta de vidrio y la masa de la mezcla vapor-agua dentro del destilador. La ventaja de esta clase de análisis es que se pueden suponer cada uno como sistemas aislados, analizarlos de esta forma, y obtener un conjunto de balances de energía (ecuaciones) igual al número de incógnitas que existen en el análisis global del destilador. Así es posible resolver el sistema de ecuaciones que presenta un destilador solar.

En este trabajo se realizan los balances de energía y la solución de las ecuaciones dentro de dos tipos de regímenes: *Permanente y Transitorio*.

El régimen permanente de un sistema es aquél que no posee variables que dependan de la variable **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.

Un régimen transitorio existe cuando las variables de las ecuaciones que modelan al fenómeno cambian con el tiempo. Es evidente que el fenómeno de destilación solar depende del tiempo, ya que la irradiación solar es una variable que varía con la hora en que se mida. Sin embargo, para períodos cortos de tiempo, por lo general una hora o incluso más, según **Almanza et al. [4]**, es posible suponer que la irradiación 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 el régimen transitorio el sistema tiene la característica de un sistema senoidal o periódico, ya que el movimiento del Sol sigue ese patrón, y es el Sol, tanto su presencia como su ausencia, quien excita al sistema térmico. Esta naturaleza periódica se deberá observar igualmente en las variables más importantes del destilador, de tal forma que la temperatura del agua, del vidrio y la diferencia entre éstas, serán funciones periódicas en el tiempo.

Existen otros tipos de análisis en destiladores solares que consideran la distribución de la temperatura a lo largo de un eje [15] o análisis que con base en resultados experimentales se encuentran relaciones para predecir el comportamiento a largo plazo de un destilador solar [30]. Este tipo de trabajos son mucho más complejos ya que requieren o de herramientas de cálculo relativamente poderosas o un trabajo de experimentación prolongado y preciso.

### COMPOSICIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE UN DESTILADOR SOLAR

Propiamente, el único trabajo que abarca en su totalidad el modelado de los fenómenos físicos en un destilador solar es el realizado por **Malik et al. [29]**. Estos autores revisan cada uno de los fenómenos de transporte de masa y energía que ocurren y proponen un modelo matemático para varias configuraciones y condiciones particulares. Además realizan una extensa revisión de las tecnologías de destilación solar. Sin duda, [29] es el trabajo más completo en lo referente a la destilación solar.

Existen muchos otros autores que han realizado investigación sobre algunos de los fenómenos de transporte, sin embargo, ninguno lo ha hecho en forma global para cada uno de los fenómenos de transporte. Es más, la mayoría de los investigadores se apoyan en los resultados de **Malik et al. [29]** para su propia investigación. De tal forma que resulta difícil comparar modelos de destilación solar cuando únicamente existe un solo modelo formal [29] para la descripción total del fenómeno.

Este trabajo intenta tomar resultados que proponen algunos investigadores sobre convección natural y evaporación en destiladores solares. De hecho, solamente el trabajo realizado por **Hongfei et al. [20]** modela tanto la convección natural y la evaporación en destiladores solares. En cambio, para el fenómeno de radiación interna y externa, no existen resultados diferentes a los que proponen **Malik et al. [29]**. En resumen, es difícil componer modelos matemáticos para un destilador solar distintos al propuesto por **Malik et al. [29]**.

Como se mencionó antes, en este trabajo, conformamos cuatro modelos matemáticos que se comparan entre ellos para obtener conclusiones sobre el funcionamiento de un destilador solar:

- 1) Malik
- 2) Efectivo
- 3) Hongfei
- 4) Cavidad

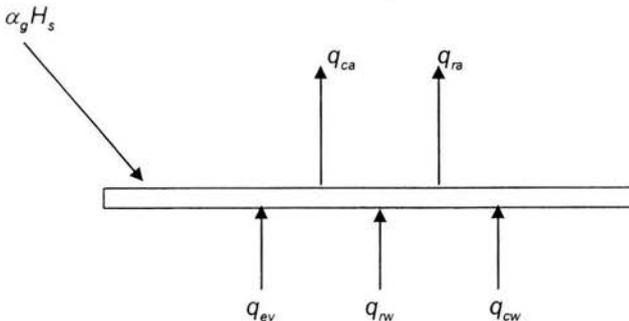
Estos cuatro modelos finalmente se representan como cuatro sistemas de 3 ecuaciones. En el régimen permanente, los modelos se presentan como sistemas de tres ecuaciones para cada subsistema del destilador solar: colector solar, masa de agua salada y cubierta de vidrio. Las tres incógnitas de este sistema de ecuaciones para cada uno de los cuatro modelos son la temperatura del colector, la temperatura del agua y la temperatura del vidrio. Cabe decir que salvo para el modelo **Malik**, los demás modelos son representados mediante un sistema de ecuaciones no lineales.

En el régimen transitorio, cada uno de los cuatros modelos se representa como un sistema de ecuaciones diferenciales, donde las temperaturas, la irradiación solar y la temperatura ambiente dependen del tiempo. La solución de este sistema de ecuaciones diferenciales se realizó en una hoja de trabajo Maple© mediante un método numérico. Igualmente que en el caso del régimen permanente, el modelo **Malik** resulta en un sistema de ecuaciones diferenciales lineales, mientras que los demás modelos son no lineales.

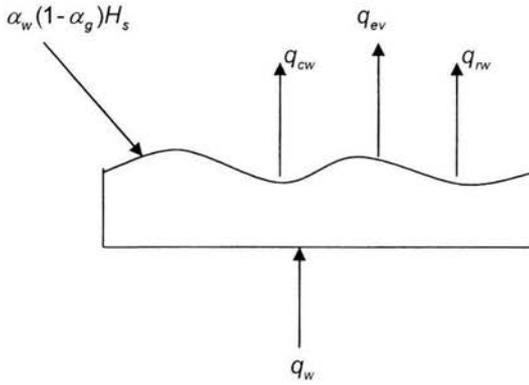
## FLUJOS DE ENERGÍA EN UN DESTILADOR SOLAR

### 5.1.1 Régimen permanente

VIDRIO

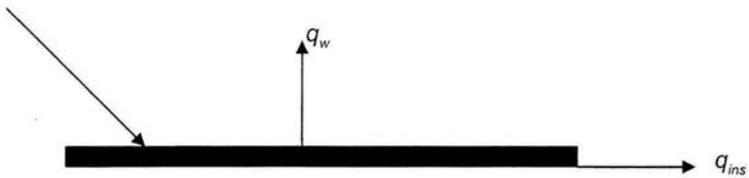


AGUA



COLECTOR

$$\alpha_{col}(1-\alpha_w)(1-\alpha_g)H_s$$



Malik

$$\alpha_g H_s + q_{ev, Malik} + q_{rw, Malik} + q_{cw, Malik} = q_{a, Malik}$$

vidrio

$$\alpha_w (1-\alpha_g) H_s + q_w = q_{ev, Malik} + q_{rw, Malik} + q_{cw, Malik}$$

agua

$$\alpha_{col} (1-\alpha_w) (1-\alpha_g) H_s = q_w + q_{ins}$$

colector

Propiamente, según la terminología de **Malik et al. [29]**, la definición de las ecuaciones que representan el balance de energía en el destilador solar es:

$$\tau_1 H_s + h_1 (T_w - T_g) = h_2 (T_g - T_a)$$

Vidrio

$$\tau_2 H_s + h_3 (T_{col} - T_w) = h_1 (T_w - T_g)$$

Agua

$$\tau_3 H_s = h_3 (T_{col} - T_w) - \left( \frac{K_{ins}}{X_{ins}} \right) (T_{col} - T_a)$$

Colector

Donde  $h_1 = 16.076 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ,  $h_2 = 40.88 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ,  $h_3 = 137.373 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ,  $\tau_1 = 0.1$ ,  $\tau_2 = 0.0$  y  $\tau_3 = 0.7$ .

Nótese que según estos valores, la masa de agua solo tiene una ganancia de energía que procede del colector, ya que la fracción de energía radiante absorbida es cero.

Además al linearizar el sistema de ecuaciones, proponiendo que los coeficientes de transferencia de calor ( $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$ ) adopten valores constantes, la resolución del sistema y, por lo tanto, la obtención de las temperaturas del destilador ( $T_w$ ,  $T_g$  y  $T_{col}$ ), es mucho más sencilla.

Efectivo

$$\alpha_g H_s + q_{ev,efectivo} + q_{rw,Malik} + q_{cw,efectivo} = q_{a,Malik} \quad \text{vidrio}$$

$$\alpha_w (1 - \alpha_g) H_s + q_w = q_{ev,efectivo} + q_{rw,Malik} + q_{cw,efectivo} \quad \text{agua}$$

$$\alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) H_s = q_w + q_{ins} \quad \text{colector}$$

Hongfei

$$\alpha_g H_s + q_{ev,Hongfei} + q_{rw,cavidad} + q_{cw,Hongfei} = q_{a,DOWN} \quad \text{vidrio}$$

$$\alpha_w (1 - \alpha_g) H_s + q_w = q_{ev,Hongfei} + q_{rw,cavidad} + q_{cw,Hongfei} \quad \text{agua}$$

$$\alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) H_s = q_w + q_{ins} \quad \text{colector}$$

Cavidad

$$\alpha_g H_s + q_{ev,Malik} + q_{rw,cavidad} + q_{cw,Malik} = q_{a,Malik} \quad \text{vidrio}$$

$$\alpha_w (1 - \alpha_g) H_s + q_w = q_{ev,Malik} + q_{rw,cavidad} + q_{cw,Malik} \quad \text{agua}$$

$$\alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) H_s = q_w + q_{ins} \quad \text{colector}$$

Nótese que hemos simplificado los términos de la energía que abandona al destilador por la cubierta de vidrio. Estos términos son debidos a la convección forzada ( $q_{ca}$ ) y la radiación hacia el exterior ( $q_{ra}$ ), mediante el flujo expresado como  $q_a$ . La distinción con los subíndices UP y DOWN se refieren únicamente a las definiciones de los coeficientes de transferencia de calor por convección forzada  $h_{ca}$  UP y DOWN.

### 5.1.2 Resultados, Gráficas y Tablas

Los resultados de resolver el sistema de ecuaciones para régimen permanente es la obtención de  $T_{col}$ ,  $T_w$  y  $T_g$ , dependiendo del valor de los parámetros. Con las temperaturas del destilador, se pueden obtener las producciones de destilado según cada modelo y su variación con respecto a los parámetros de estudio. Las gráficas a continuación es la producción de destilado evaluada según las temperaturas obtenidas de los parámetros probados. Recordemos que existen definiciones de la cantidad de masa de agua destilada según varios investigadores de acuerdo con sus respectivos experimentos en destilación solar. El objetivo de colocar estas distintas definiciones para la producción de destilado en la misma figura (Clark, Chilton-Colburn, etc.) está en resaltar las diferencias que existen respecto a los parámetros.

Para cualquier modelo la producción de destilado es obtenida según la definición de calor por evaporación de un líquido, es decir:

$$m_{ev} = \frac{q_{ev}}{h_{fg}}$$

De manera que para su obtención son necesarias las temperaturas del agua y del vidrio para cada uno de los valores de los parámetros. Directamente la temperatura del colector no tiene participación en la definición de la producción de destilado, sin embargo, el sistema de ecuaciones obliga a que exista una relación entre las temperaturas del destilador, por lo que no podrían obtenerse una sin las otras y viceversa.

Para el caso de la eficiencia energética, la definición es simplemente el cociente del calor por evaporación y la energía solar captada por el colector.

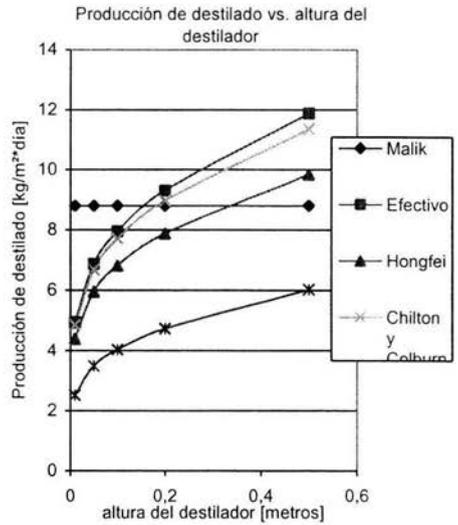
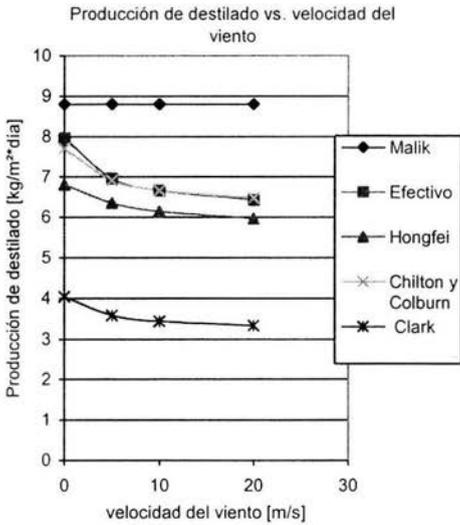
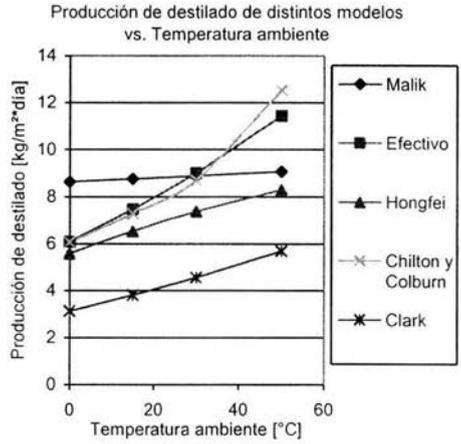
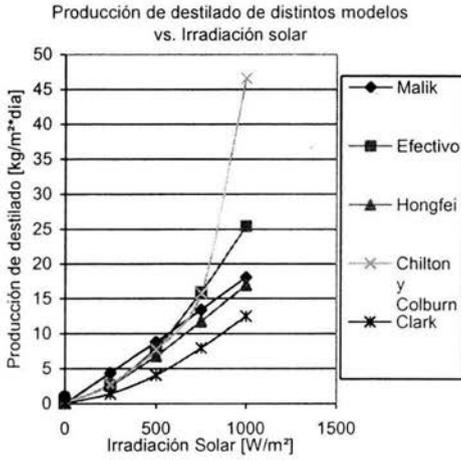
$$\eta_{en,col} = \frac{q_w}{\alpha_{col}(1-\alpha_w)(1-\alpha_g)H_s} \quad \text{colector}$$

$$\eta_{en,ev} = \frac{q_{ev}}{q_w + \alpha_w(1-\alpha_g)H_s} \quad \text{masa de agua}$$

Entonces la eficiencia energética total queda definida como:

$$\eta_{en,total} = (\eta_{en,col})(\eta_{en,ev})$$

## PRODUCCIONES DE DESTILADO



**Fig. 17** Producciones de destilado respecto a los parámetros de estudio

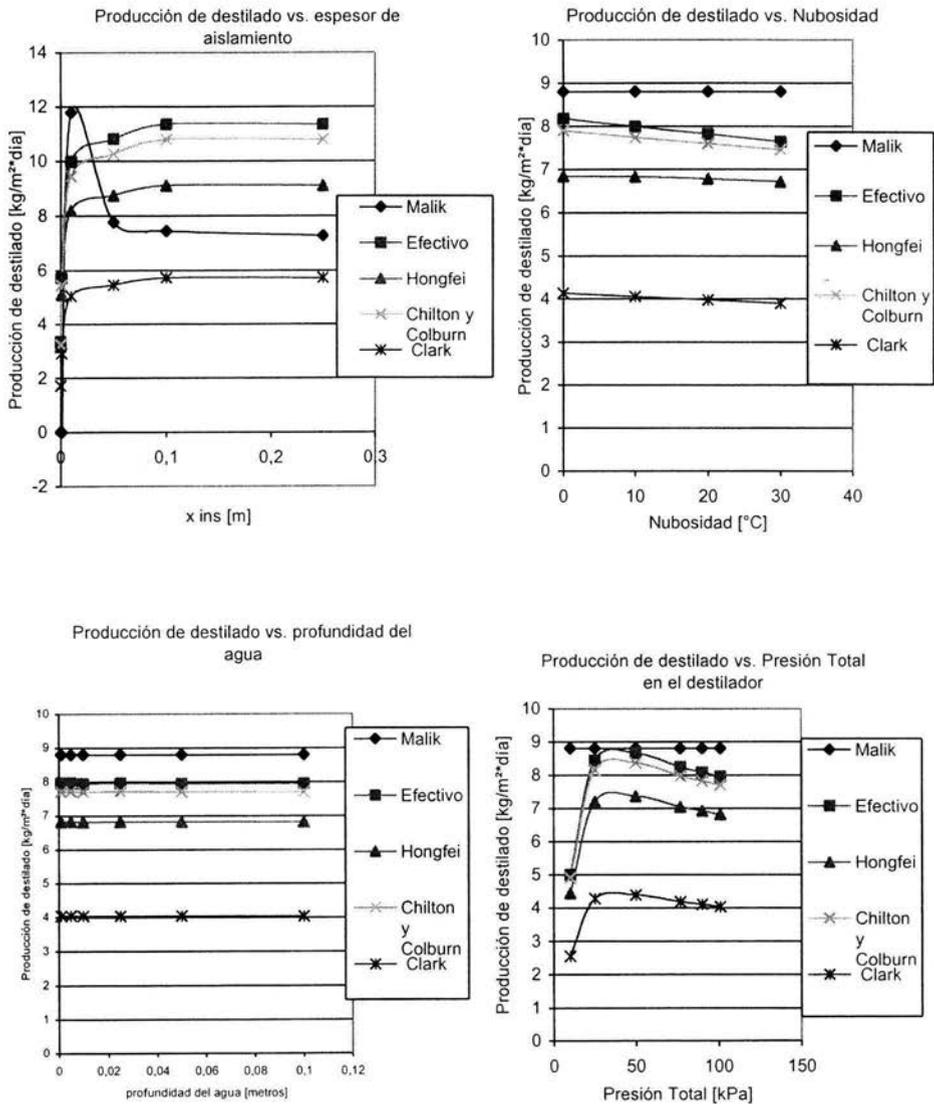
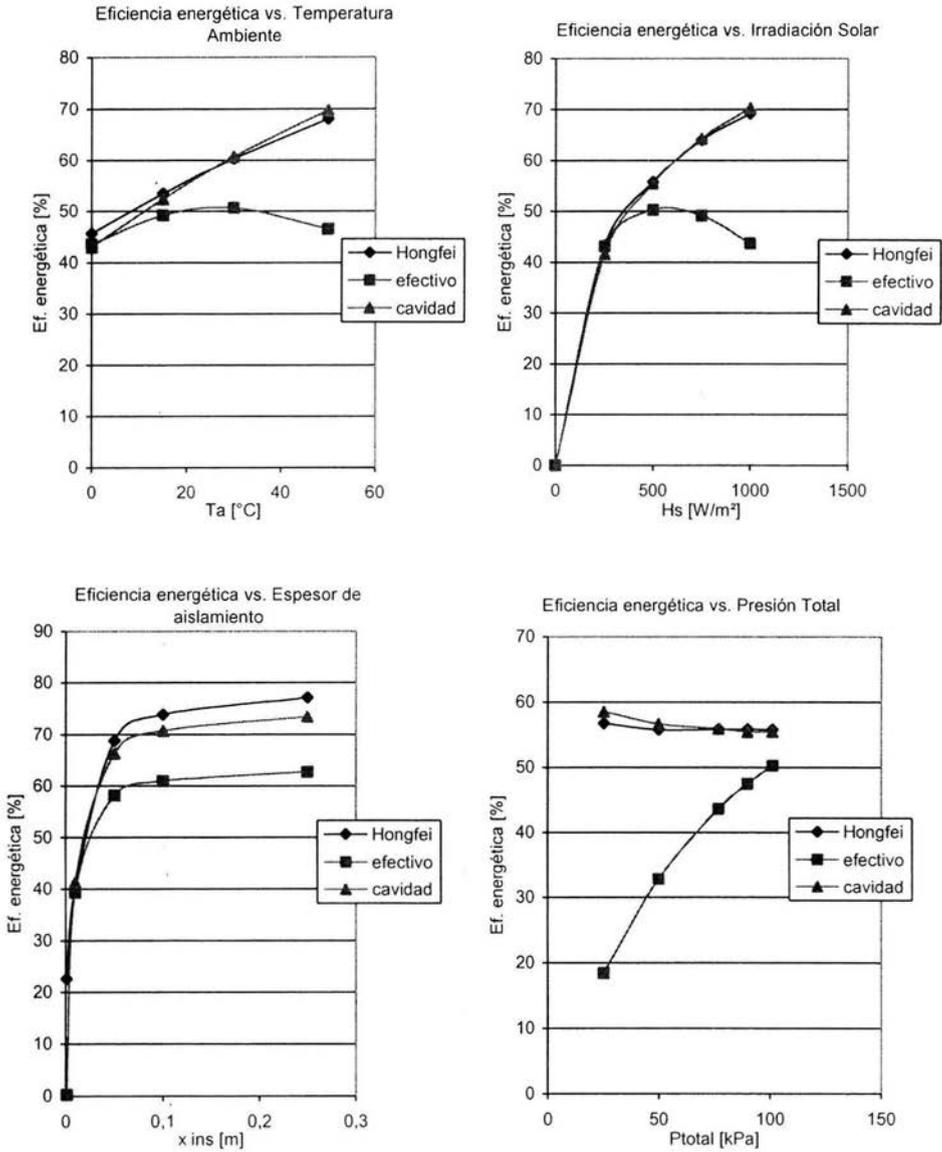


Fig. 17 Producciones de destilado respecto a los parámetros de estudio, continuación.

## EFICIENCIAS ENERGÉTICAS



**Fig. 18** Eficiencia energética contra los parámetros de estudio.

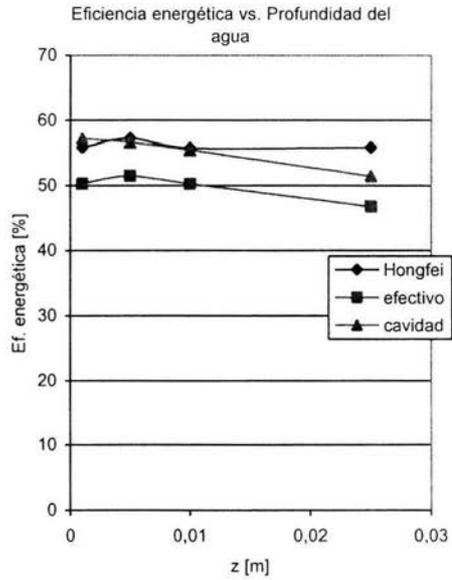
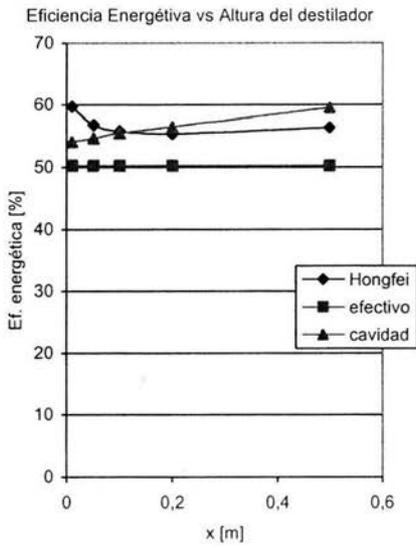
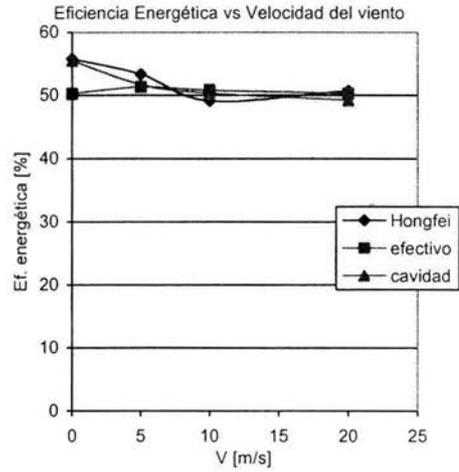
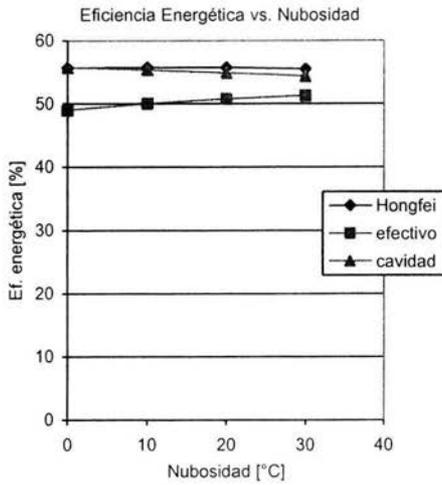


Fig. 18 Eficiencia energética contra los parámetros de estudio, continuación.

COMPORTAMIENTO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE EL AGUA Y EL VIDRIO Y LA PRODUCCIÓN DE DESTILADO CON RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE ESTUDIO (BASADO EN EL MODELO HONGFEI)

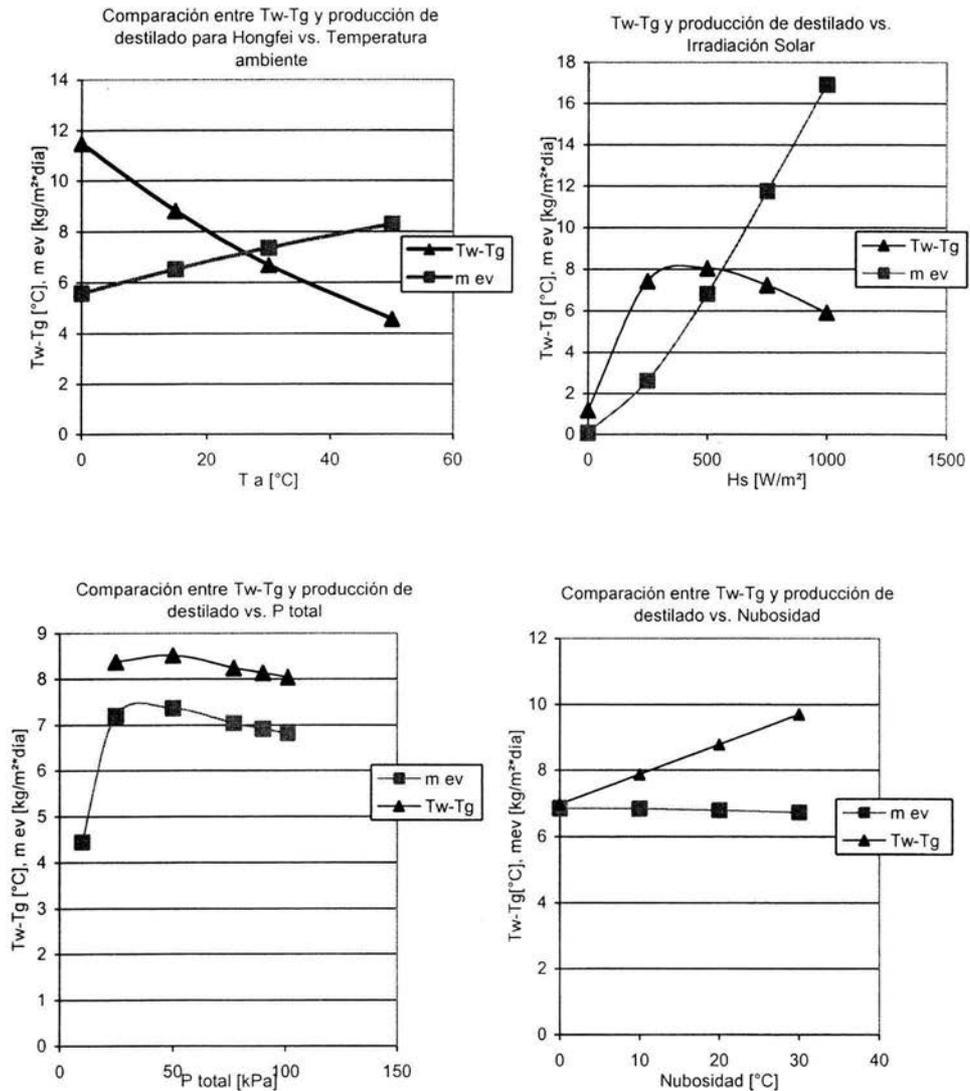
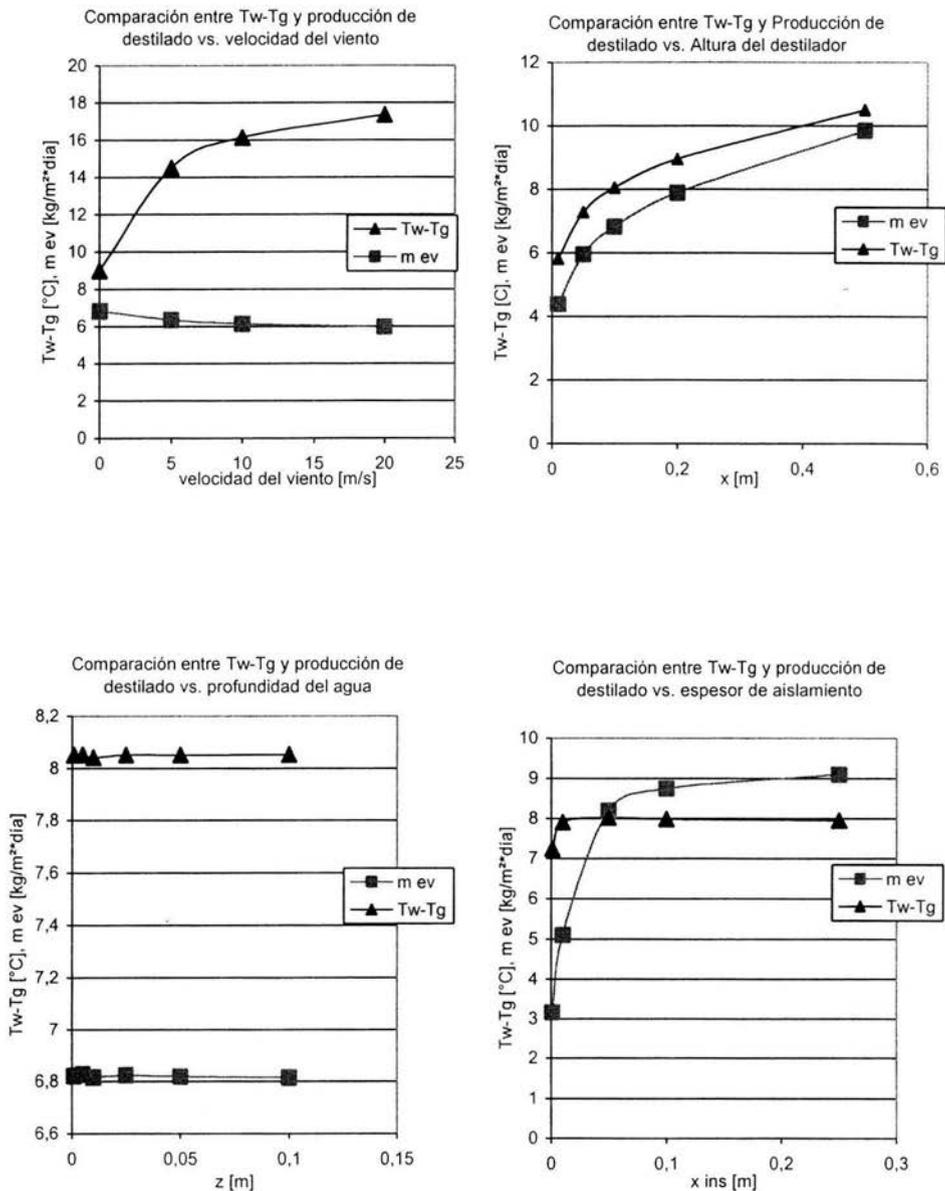


Fig. 19 Diferencia de temperaturas entre la masa de agua y la cubierta de vidrio y la producción de destilado para los distintos parámetros de estudio según el modelo Hongfei.



**Fig. 19** Diferencia de temperaturas entre la masa de agua y la cubierta de vidrio y la producción de destilado para los distintos parámetros de estudio según el modelo Hongfei, continuación.

### 5.2.1 Régimen transitorio

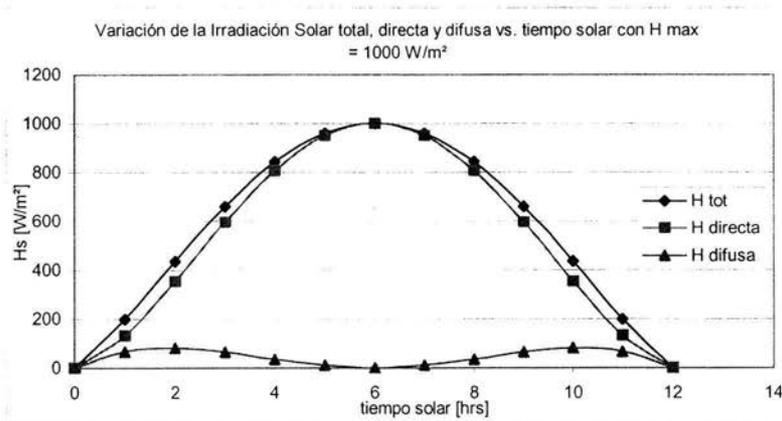
Para el régimen transitorio, existen algunos términos que dependen del tiempo como son la irradiación solar y la temperatura ambiente. El comportamiento de estos parámetros conduce a que las temperaturas del destilador obtenidas de la solución del sistema de ecuaciones diferenciales y todos los demás resultados que de estas temperaturas se deriven, dependan del tiempo igualmente.

El modelo propuesto por *Malik et al. [29]* utilizan el análisis de Fourier. Transforman su sistema de manera que los términos que dependen del tiempo y que presentan comportamiento periódico, como lo es la naturaleza de la energía solar, queden expresados en términos de una serie de Fourier. *Porta et al. [34]* modela la irradiación solar directa, difusa y total como una función cosenoidal y periódica en lugar de utilizar armónicas para su modelo. En este trabajo modificamos la función cosenoidal por la función senoidal, con el objetivo de facilitar la interpretación de que cuando  $t = 0$ , está amaneciendo, y por lo tanto no existe un valor de irradiación solar. De tal forma que las ecuaciones de la irradiación solar dependientes del tiempo quedan establecidas como:

$$H_{total} = H_{max} \operatorname{sen}^{1.2} \left( \frac{\pi t}{Ld} \right)$$
$$H_{directa} = H_{max} \operatorname{sen}^{1.5} \left( \frac{\pi t}{Ld} \right)$$
$$H_{difusa} = H_{total} - H_{directa}$$

donde  $t$  es el tiempo solar en horas, tomado con  $t=0$  cuando amanece, y  $Ld$  es la duración de un día solar, es decir, que idealmente  $Ld = 12$  hrs. Para este trabajo  $H_{s,max} = 1000 \text{ W/m}^2$ .

Así, los términos que dependen del tiempo adoptan un comportamiento periódico y senoidal, que aunque no representan con absoluta fidelidad los fenómenos de transporte en un destilador, resulta una muy buena aproximación para modelos matemáticos como los de este trabajo.



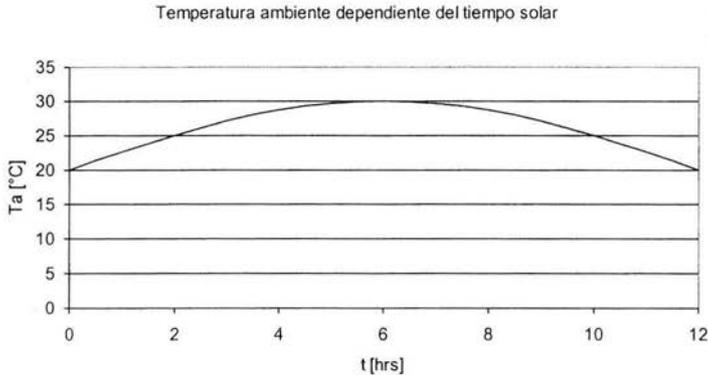
**Fig.20** Irradiación solar total, directa y difusa dependiente del tiempo según las definiciones modificadas que proponen *Porta et al. [34]*

La temperatura ambiente es otro de los parámetros que cambia conforme avanza la hora del día. Existen algunos trabajos que miden periódicamente la temperatura ambiente en las locaciones donde

habrán de colocar un destilador solar con el objetivo de modelar este parámetro correctamente, sin embargo, nosotros con un afán principalmente ilustrativo utilizaremos la siguiente fórmula para modelar la temperatura ambiente que, como se observa, es sencilla, periódica y tiene su máximo cuando los rayos del Sol tienen un ángulo de 0° con una normal a una superficie en posición horizontal colocada en la superficie terrestre.

$$T_a(t) = 10\text{sen}\left(\frac{1}{12}\pi t\right) + T_{a,i} \quad [^\circ\text{C}]$$

donde  $T_{a,i}$  es la temperatura ambiente al inicio del día.



**Fig.21** Variación de la temperatura ambiente con respecto a la hora solar, según la definición dada en este trabajo.

El término en régimen transitorio de la variación energética del volumen de control está dado por [46]:

$$M \frac{dT}{dt} \quad \text{donde} \quad M = \rho C_p Z$$

Este término tiene gran importancia en el estudio de destiladores solares debido a que, primeramente, caracteriza el comportamiento de los sistemas de un destilador a lo largo del día solar, y es de mayor importancia para la cantidad de destilado nocturno. Mientras que todos los demás términos en el balance de energía son interacciones a través de la frontera del sistema, concretamente, las transferencias de calor, este término es la inercia térmica del sistema y entre mayor sea su valor, mayor será la cantidad de producción de destilado en el período en que la irradiación solar es nula. Además, es el único término que considera como parámetro la masa del sistema, lo cual tiene gran relevancia para conocer el tiempo que tarda el destilador solar en producir destilado desde que amanece.

Con estos datos podemos ahora definir nuestras ecuaciones para el análisis energético en régimen transitorio. Queremos hacer énfasis, como se ve en el modelo Malik, que las temperaturas del destilador, la temperatura del medio ambiente y la irradiación solar son dependientes del tiempo. Esto es cierto para TODOS los modelos, no solamente el de Malik, ya que la irradiación solar es la excitación de nuestro sistema térmico, y si este parámetro depende del tiempo, también lo harán las variables que resultan de la solución de cada uno de los sistemas de ecuaciones.

Malik

$$\begin{aligned} \tau_1 H_s(t) + h_1(T_w(t) - T_g(t)) - h_2(T_g(t) - T_a(t)) &= M_g \frac{dT_g}{dt} && \text{Vidrio} \\ \tau_2 H_s(t) + h_3(T_{col}(t) - T_w(t)) - h_1(T_w(t) - T_g(t)) &= M_w \frac{dT_w}{dt} && \text{Agua} \\ \tau_3 H_s(t) = h_3(T_{col}(t) - T_w(t)) - \frac{K_{ins}}{X_{ins}}(T_{col}(t) - T_a(t)) + M_{col} \frac{dT_{col}}{dt} &&& \text{Colector} \end{aligned}$$

Efectivo

$$\begin{aligned} \alpha_g \dot{H}_s + \dot{q}_{ev,efectivo} + \dot{q}_{rw,Malik} + \dot{q}_{cw,efectivo} &= \dot{q}_{a,Malik} + M_g \frac{dT_g}{dt} && \text{Vidrio} \\ \alpha_w (1 - \alpha_g) \dot{H}_s + \dot{q}_w &= \dot{q}_{ev,efectivo} + \dot{q}_{rw,Malik} + \dot{q}_{cw,efectivo} + M_w \frac{dT_w}{dt} && \text{Agua} \\ \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) \dot{H}_s &= \dot{q}_w + \dot{q}_{ins} + M_{col} \frac{dT_{col}}{dt} && \text{Colector} \end{aligned}$$

Hongfei

$$\begin{aligned} \alpha_g \dot{H}_s + \dot{q}_{ev,Hongfei} + \dot{q}_{rw,cavidad} + \dot{q}_{cw,Hongfei} &= \dot{q}_{a,DOWN} + M_g \frac{dT_g}{dt} && \text{Vidrio} \\ \alpha_w (1 - \alpha_g) \dot{H}_s + \dot{q}_w &= \dot{q}_{ev,Hongfei} + \dot{q}_{rw,cavidad} + \dot{q}_{cw,Hongfei} + M_w \frac{dT_w}{dt} && \text{Agua} \\ \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) \dot{H}_s &= \dot{q}_w + \dot{q}_{ins} + M_{col} \frac{dT_{col}}{dt} && \text{Colector} \end{aligned}$$

Cavidad

$$\begin{aligned} \alpha_g \dot{H}_s + \dot{q}_{ev,Malik} + \dot{q}_{rw,cavidad} + \dot{q}_{cw,Malik} &= \dot{q}_{a,Malik} + M_g \frac{dT_g}{dt} && \text{Vidrio} \\ \alpha_w (1 - \alpha_g) \dot{H}_s + \dot{q}_w &= \dot{q}_{ev,Malik} + \dot{q}_{rw,cavidad} + \dot{q}_{cw,Malik} + M_w \frac{dT_w}{dt} && \text{Agua} \\ \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) \dot{H}_s &= \dot{q}_w + \dot{q}_{ins} + M_{col} \frac{dT_{col}}{dt} && \text{Colector} \end{aligned}$$

Donde las masas de cada sistema quedan definidas según:

$$M_{col} = C_{p,col} Z_{col} \rho_{col} \quad M_w = C_{p,w} Z_w \rho_w \quad M_g = C_{p,g} Z_g \rho_g$$

De esta definición se sigue que solamente la masa de agua no es constante, ya que la profundidad del agua es variable según el valor que asignemos al parámetro z. Siguiendo con esta idea, las densidades de los sistemas son constantes e invariantes con el tiempo y la temperatura, al igual que los calores específicos de cada sustancia. De tal forma que este modelo solamente se encarga de obtener la variación de las temperaturas del destilador con respecto al tiempo teniendo una masa de

agua inicial definida. Nada sabemos sobre el comportamiento en el tiempo de esta masa de agua, solamente que se reduce a medida que más agua se evapora. Esto constituye una limitación en el modelo de un destilador solar.

### 5.2.2 Resultados, Gráficas, Tablas

A diferencia de los resultados en el régimen permanente, en el caso del régimen transitorio, solamente presentaremos el comportamiento de las temperaturas y de la producción de destilado con respecto del tiempo solar. Obviaremos el comportamiento de la producción de destilado con respecto a los parámetros de estudio, ya que los resultados se encuentran en el caso del régimen permanente.

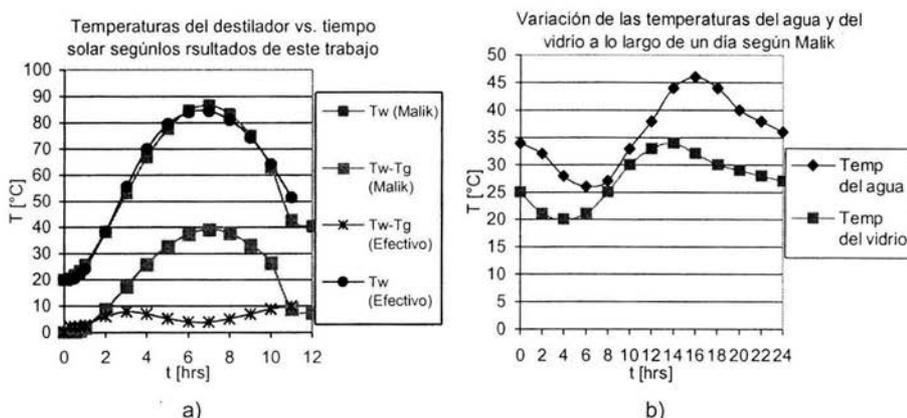
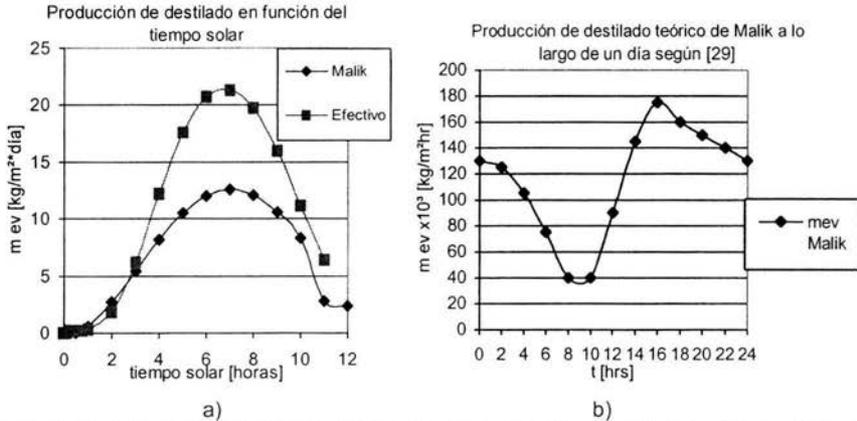


Fig. 22 Temperaturas del destilador según la hora solar a) para modelos Malik y efectivo, b) según Malik et al. [29]

Esta figura es el resultado de la solución del sistema de 3 ecuaciones diferenciales lineales y no lineales, es decir con los coeficientes de transferencia de calor constantes (Malik) y con dependencia de la temperatura (efectivo). De esta figura podemos observar que existe un tiempo corto, a inicios del día, donde tenemos condensación o en todo caso un fenómeno de estancamiento, lo que en una escala mayor es parecido a una inversión térmica. Este resultado concuerda con las observaciones hechas por Voropoulos et al. [41], aunque cabe recordar que la mayoría de los investigadores siguen la definición de la irradiación solar según una serie de Fourier. Por otro lado, observamos que según la cantidad de agua en el destilador, la temperatura del agua está muy por encima de su temperatura inicial, esto es lo que llamábamos inercia térmica, es decir, qué tanta resistencia opone un sistema a cambiar su temperatura.

Obsérvese que el modelo efectivo presenta dos máximos para  $T_w - T_g$ . Esto significaría que a medida que el sol calienta el destilador, se incrementa la temperatura de los sistemas, al principio acentuando la diferencia entre  $T_w$  y  $T_g$ , sin embargo, cerca de la hora de mayor insolación, ambas temperaturas se acercan. Después, cuando comienza a decrecer la irradiación solar, se acentúa de nuevo la diferencia entre  $T_w$  y  $T_g$ , hasta que anochece. Nótese la exagerada diferencia entre  $T_w - T_g$  que se percibe para Malik, así como las altas temperaturas que logran ambos modelos.



**Fig. 23** a) Diferencias de producción de destilado para los modelos Malik y efectivo según resultados de este trabajo y b) producción de destilado según los resultados de **Malik et al. [29]**

Con esta gráfica queremos concluir el análisis energético en régimen transitorio. La figura anterior representa la cantidad de destilado en kilogramos por unidad de área por día tanto para el modelo Malik como para el efectivo. Lo primero que se puede observar son los elevados valores de masa de agua evaporada para los dos modelos pero mucho más para el modelo efectivo (20 kg o más). Recordemos que para la construcción de este modelo nuestro irradianción solar es igual a  $1000 \text{ W/m}^2$ , lo que es de por sí un valor alto. **Malik et al. [29]** utiliza una serie de Fourier para modelar el régimen transitorio y con valores de irradianción solar promedios de la India, de ahí que esta gráfica no sea similar a la que aparece en la referencia [29]. Lo segundo que puede observarse es que para cualquier hora del día y noche (24 hrs) para Malik existe una producción de destilado ininterrumpida, mientras que para este trabajo que solo contempla 12 horas, en la primera hora del día la producción de destilado es nula.

Por otra parte, vemos que la suposición de mantener los coeficientes de transferencia de calor, sobre todo el de evaporación, controla los valores de destilado en un rango que concuerda con la experimentación. Es decir, la diferencia entre el modelo *Malik* y *efectivo*, es precisamente la consideración de mantener los coeficientes de transferencia de calor constantes (*Malik*) y suponerlos dependientes de las temperaturas del destilador (*efectivo*). En este sentido, nuestro objetivo es mostrar las diferencias que existen entre un modelo lineal y un modelo no lineal y sus tendencias a lo largo del día.

## 6 ANÁLISIS EXÉRGICO

Los análisis exérgicos son análisis termodinámicos en los que la evaluación de las pérdidas y eficiencias se realizan tanto con base en la primera ley como en la segunda ley de la termodinámica de manera que pertenecen a la categoría de análisis conocidos como Análisis de la Segunda Ley o Análisis de Exergía.

Este tipo de análisis es indispensable para determinar la calidad de la energía, así como para medir la degradación de energía que se produce en todo proceso real, puesto que la segunda ley gobierna los límites de convertibilidad entre las diferentes formas de la energía.

### *Antecedentes históricos*

La segunda ley de la termodinámica nació al descubrirse la existencia de un criterio de valor para las diferentes formas en que se manifiesta la energía de acuerdo con su convertibilidad en trabajo útil. Los primeros trabajos en este contexto fueron desarrollados por Carnot y Clausius, entre otros.

Por otra parte, en 1889, Gouy realizó la aplicación práctica del concepto de "energía utilizable" en sistemas cerrados y demostró que las pérdidas de "energía utilizable" en un proceso estaban dadas por el producto de la temperatura del medio ambiente por la diferencia de entropía de todos los cuerpos participantes en el proceso. En 1898, Stodola desarrolló los mismos conceptos para sistemas abiertos en régimen permanente, que tienen mucha mayor relevancia desde el punto de vista de la ingeniería. En los años siguientes, el desarrollo de estos conceptos fue muy lento hasta la década de los treinta en que el interés en su aplicación práctica se vio estimulado por su crecimiento industrial y los nuevos desarrollos tecnológicos. Los trabajos de Bosnjakovic en 1939 marcan una nueva era en el desarrollo de la segunda ley por su contribución a la formulación de nuevos criterios de funcionamiento y de técnicas de evaluación de la perfección termodinámica de los procesos.

El progreso de estos trabajos se vio interrumpido por la segunda Guerra Mundial y es hasta la década de los cincuenta cuando recupera fuerza, especialmente en el área de la ingeniería química. El primer ejemplo conocido de aplicación de un Análisis de la Segunda Ley a procesos químicos fue realizado por Rant en 1951 para un proceso de producción de carbonato de sodio. Unos años después Denbigh realizó el análisis de un proceso de oxidación de amoníaco en el que calculó la eficiencia de la segunda ley para el proceso [5].

Otros desarrollos importantes fueron hechos por Szargut, quien formuló la teoría de sustancias de referencia para el cálculo de la "exergía" química y Rant, quien generó el término "exergía" que en la actualidad ha ganado una aceptación prácticamente mundial reemplazando otra serie de términos diversos tales como "disponibilidad", "energía utilizable", "capacidad de trabajo", etc. Durante varias décadas la aplicación de los análisis exérgicos en procesos industriales permaneció como una especialidad europea mientras que era prácticamente ignorada en Norteamérica y Asia. Sin embargo, en el curso de los últimos 15 años, la crisis energética ha producido un creciente interés hacia la aplicación de análisis exérgicos en todas partes del mundo, por lo que en la actualidad este tipo de análisis se encuentra a la vanguardia mundial en lo que a estudios energéticos se refiere [5].

### *El concepto de exergía*

Uno de los objetivos principales del diseño en ingeniería es la optimización de un proceso, dadas ciertas restricciones. En el área energética esto implica utilizar de modo óptimo la energía durante su transferencia o transformación. Como en otras áreas de la ingeniería, aquí también es necesario tener una manera de medir el funcionamiento óptimo. Para los equipos esencialmente adiabáticos, como turbinas, compresores, etc. se considera que el funcionamiento óptimo es el isentrópico.

Las eficiencias que se formulan para condiciones isentrópicas reciben a menudo el nombre de *eficiencias de primera ley*, y son importantes en los análisis en ingeniería. No obstante, estas eficiencias tienen una seria desventaja. El estado final del proceso real y el del proceso isentrópico con el cual se compara no son iguales. Un enfoque más fundamental consiste en comparar el proceso real con el proceso óptimo entre los mismos estados extremos. Esta comparación da lugar a las *eficiencias de segunda ley*.

La optimización de la energía se basa en la idea de que la energía no sólo tiene cantidad, sino también calidad. Históricamente, al hablar de la calidad de una cantidad dada de energía, se está hablando del potencial de esa energía para producir trabajo útil para el ser humano. Si el potencial de trabajo de una cantidad de energía se reduce durante un proceso, se dice que la energía se degrada. Dicha degradación ocurre durante los procesos irreversibles. Así, la segunda ley de la termodinámica es una ley de la degradación de la energía.

Cada vez que la energía se transforme o se transfiera en un proceso real, se reduce para siempre su potencial para producir trabajo útil, sin excepción alguna. Cuando los expertos técnicos, políticos y usuarios discuten el tema de la energía, invariablemente hablan sobre la conservación de la energía. Este acercamiento para proveer un suministro adecuado de energía para el futuro está basado en la suposición implícita que la energía es una sustancia que fluye o puede ser transportada de un lugar a otro mediante medios no especificados. También se asume que la energía puede ahorrarse si no se utiliza y que la mejor forma de ahorro de energía es su no utilización. En esta seudoeconómica forma de pensar, toda la atención se centra en una propiedad del sistema (energía interna) y no en las interacciones energéticas entre sistemas. En la práctica, en cambio, la transformación de energía en trabajo y calor son importantes, de tal forma que las interacciones entre sistemas y los procesos, proveen el único método efectivo de conservar y utilizar eficientemente las reservas y fuentes energéticas.

Debido a que el trabajo (energía ordenada) es la forma de interacción entre sistemas de mayor calidad (o menor entropía), también es la forma de energía más valiosa y debe ser el índice utilizado para jerarquizar los procesos de conversión de energía. La segunda ley permite la definición de una propiedad llamada energía disponible, **A- la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de la energía en un sistema.**

Al contrario de la energía, la disponibilidad, energía disponible o exergía puede consumirse en un proceso. Donde la primera ley conduce a la conclusión de que la energía debe ser almacenada (no utilizada para ningún propósito) para minimizar el consumo, la segunda ley provee una medida cuantitativa que puede ser utilizada para minimizar el consumo de la exergía en cualquier proceso. El objetivo de la optimización de los procesos energéticos debe ser la minimización del consumo de la energía disponible, no la minimización del consumo de energía.

La exergía es el máximo trabajo que puede ser extraído de un sistema combinado de una masa de control (sistema) y el medio ambiente, cuando la masa de control pasa de un estado inicial a un estado muerto. En el estado muerto, tanto la masa de control como el medio ambiente poseen energía pero su exergía es igual a cero. Para todos los estados  $B \geq 0$ , donde B significa exergía [8, 9, 24, 31, 46].

La exergía es una medida de la diferencia de estados entre el sistema y el medio ambiente. Entre mayor es la diferencia entre la temperatura T de un estado determinado y la temperatura del medio ambiente  $T_0$ , mayor es el valor de la exergía. Esto sigue siendo cierto tanto para cuando  $T > T_0$  y  $T < T_0$ . Similarmente, entre mayor diferencia exista entre la presión p de un estado determinado y la presión del medio ambiente  $p_0$ , mayor será la exergía. La manera de desarrollar el análisis de segunda ley es similar al realizado en el análisis energético. Se efectúa un análisis de segunda ley para cada uno de los parámetros concentrados. Cada uno de los términos en las ecuaciones representa los flujos de exergía que entran y salen del sistema.

El análisis puede realizarse tanto para un régimen permanente como un régimen transitorio. En un balance de energía, la energía se conserva en cualquier proceso; en cambio, la exergía se destruye a lo largo de un proceso. Por eso no puede llamársele propiamente un balance de exergía.

La exergía de una sustancia puede dividirse en cuatro componentes básicos, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$B_{tot} = B_{cin} + B_{pot} + B_{fis} + B_{quim}$$

donde  $B_{tot}$  = exergía total  
 $B_{cin}$  = exergía cinética  
 $B_{pot}$  = exergía potencial  
 $B_{fis}$  = exergía física  
 $B_{quim}$  = exergía química

Los primeros dos componentes de la exergía,  $B_{cin}$  y  $B_{pot}$ , están asociados con formas de energía que se almacenan de manera ordenada y que son completamente convertibles a otras formas de energía. Por lo tanto, en el caso de una corriente ordenada, la exergía cinética de la corriente es igual a su energía cinética si la velocidad de la corriente está referida a la superficie de la Tierra. De manera similar, la exergía potencial de una corriente es igual a su energía potencial si ésta está referida al nivel del mar.

Las formas de energía asociadas con los componentes físicos y químicos de la exergía se almacenan de una manera que involucra un elemento de desorden. Por lo tanto, la determinación de estos dos componentes de la exergía involucra consideraciones mucho más complejas que para los componentes anteriores, puesto que es necesario utilizar la segunda ley de la termodinámica y considerar al ambiente como estado de referencia. La exergía física de una sustancia está dada por la siguiente ecuación:

$$B_{fis} = (H_i - H_o) - T_o(S_i - S_o)$$

en donde H es la entalpía, S es la entropía, T es temperatura y los subíndices, i y o indican respectivamente las condiciones de temperatura y presión de la corriente y del medio ambiente.

En el caso de la exergía química, la situación se complica más puesto que es necesario considerar la composición del medio ambiente. La ecuación para calcular la exergía química de una sustancia compuesta de varios componentes (gases) es:

$$B_{quim} = \sum x_i B_{x_{oi}} + RT_o \sum x_i \ln \gamma x_i$$

en donde R es la constante universal de los gases,  $x_i$  es la fracción mol del componente i,  $\gamma$  es el coeficiente de actividad, y  $B_{x_{oi}}$  es la exergía química estándar de cada componente. La exergía química estándar se calcula a partir de la composición elemental del componente, considerando la diferencia de potenciales químicos de determinadas sustancias de referencia que contengan cada elemento puede alcanzar el equilibrio con el ambiente.

### *Análisis Exérgico*

Como se mencionó anteriormente la exergía mide la capacidad máxima que tiene un objeto o una sustancia para producir un cambio. Esta capacidad existe debido a que el objeto no se encuentra en

equilibrio completo y estable con el medio que lo rodea. Por lo tanto, la exergía es una base perfectamente racional para asignar un valor a un combustible, entendiendo como combustible cualquier material que tenga el potencial para hacer que un proceso se efectúe. Consecuentemente, la exergía se consumirá irreversiblemente en todo proceso. Es un concepto simple y entendible completamente consistente con la intuición y percepciones cotidianas [5].

Desafortunadamente, otra propiedad llamada entalpía por científicos e ingenieros ha sido tradicionalmente usada para determinar el valor de combustible de un material, y debido a esto en los análisis energéticos ha sido ignorada la calidad de la energía.

Con el fin de considerar la calidad y no sólo la cantidad de la energía se desarrolló el análisis exérgico, como una aplicación sistemática de las dos leyes fundamentales de la termodinámica.

Es importante recordar que la primera ley dice que la energía se conserva, esto es, que no puede ser creada ni destruida, y que en todo proceso real, su magnitud permanece constante. La segunda ley, por su parte, sin negar el enunciado de la primera, expresa que en todo proceso real, su magnitud permanece constante. La segunda ley, por su parte, sin negar el enunciado de la primera, expresa que en todo proceso real, la energía se degrada y que dicha degradación está dada por la disminución en exergía. El análisis exérgico complementa, no reemplaza, los análisis convencionales con base en la primera ley. El balance de materia, cuando se usa junto con el balance de energía y otras herramientas de cálculo sirve para obtener un proceso o sistema operable.

La finalidad del análisis exérgico es ayudar a aproximar el diseño o la operación de un proceso o sistema hacia el óptimo. La manera principal en la que el análisis exérgico ayuda es detectando la verdadera localización y la magnitud real de las pérdidas irreversibles que se producen al operar todo proceso, así como las que se producen al desalojar corrientes al ambiente. Estas son las verdaderas ineficiencias y, por lo tanto, determinan la manera de mejorar equipos y procesos, estimulan la creatividad y guían hacia caminos de desarrollo de nuevas tecnologías.

Usando únicamente el balance de energía no se pueden generar medidas efectivas de aprovechamiento de la energía, puesto que las únicas pérdidas que pueden detectarse, y sin conocer su magnitud real, son las producidas al desalojar corrientes al ambiente. El método convencional no es capaz de percibir las pérdidas producidas por las irreversibilidades, que la mayoría de las veces son las de mayor importancia ni mucho menos determinar su localización.

### *Exergía Solar*

Para establecer parámetros del funcionamiento de un colector, necesitamos el concepto de exergía de las energías que llegan al colector desde distintas fuentes, cada una con su propia temperatura. Existen muchos autores que han desarrollado el tema de la exergía contenida en la energía radiante del Sol, desde puntos de vista distintos [8, 9, 11, 14, 19, 38]. Las diferencias entre cada una de las eficiencias propuestas para la exergía del Sol están en la visión del problema, sin embargo, no son muy asimiles los resultados unos de otros.

Este trabajo se basa en la definición de exergía para una transferencia de calor desde una fuente de energía con una temperatura  $T$  hasta la temperatura de referencia  $T_0$ , de tal forma que la exergía de una máquina térmica que funciona con la radiación solar es simplemente la eficiencia de Carnot multiplicada por el calor transferido.

Así, la exergía  $B'_s$  de la radiación solar extraterrestre  $q'_s$ , cuya temperatura es  $T'_s$ , se determina como [11]:

$$B'_s = \left(1 - \frac{T_0}{T'_s}\right) q'_s \quad (\text{extraterrestre})$$

La exergía  $B_1$  de la radiación directa  $q_1$  que alcanza la superficie terrestre con temperatura  $T_1$  es [11]:

$$B_1 = \left(1 - \frac{T_o}{T_1}\right) q_1 = \left(1 - \frac{T_o}{T_1}\right) \left(\frac{T'_s}{T'_s - T_o}\right) (1 - \alpha_{atm}) B'_s \cos \theta \quad (\text{terrestre})$$

La radiación  $q_1$  no tiene una temperatura uniforme  $T_1$ , sino que cada color (longitud de onda) tiene su propia temperatura. Pero para la determinación de la exergía de esta radiación es suficiente tener un valor promedio de  $T_1$ . Para climas despejados se puede estimar con cierta precisión que  $T_1 = 5400$  K. Con  $T'_s = 5780$  K y  $T_o = 300$  K, la expresión

$$\left(1 - \frac{T_o}{T_1}\right) \left(\frac{T'_s}{T'_s - T_o}\right) = 0.996$$

Incluso en un clima nublado, este factor permanece mayor a 0.99, de tal forma que se puede establecer con suficiente precisión que

$$B_1 = (1 - \alpha_{atm}) B'_s \cos \theta$$

La exergía  $B_2$  de la radiación difusa  $q_2$  con la temperatura  $T_2$  es

$$B_2 = \left(1 - \frac{T_o}{T_2}\right) q_2$$

La radiación atmosférica  $q_L$  como resultado de su baja temperatura de radiación  $T_L = T_o$ , no contribuye con exergía, ya que

$$B_L = \left(1 - \frac{T_o}{T_L}\right) q_L$$

De esta forma, la exergía o la capacidad de producir trabajo que le llega finalmente a un colector, está dada por la suma de exergías de las energías de radiación solar directa y difusa.

$$B_s = B_{directa} + B_{difusa}$$

La exergía neta que llega a un colector en un destilador solar es esta cantidad multiplicada por los coeficientes ópticos correspondientes a los cuerpos que debe atravesar la radiación solar para llegar al colector.

$$B_{total} = B_s (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) \alpha_{col}$$

o sustituyendo los valores de los coeficientes ópticos según la **TABLA 1** del Capítulo 4:

$$B_{total} = B_s (0.9)(0.9)0.8 = 0.648B_s$$

La exergía que existe en la energía radiante del sol, tanto directa como difusa, antes de la cubierta de vidrio, es la exergía neta terrestre. Pero como el colector se encuentra en el fondo del destilador solar,

este flujo exérgico debe pasar a través de la(s) cubierta(s) de vidrio, la(s) mezcla(s) de aire-vapor y la(s) masa(s) de agua salada dependiendo si se trata de un destilador de múltiple efecto o de batea simple.

Es lógico comprobar que mientras más coherente (más directa) sea la radiación solar, más exergía puede ser aprovechada. La dispersión (*scattering*) de la radiación provocada por la atmósfera es un generador inherente de entropía. Esta cantidad de trabajo disponible que llega al colector, idealmente debería ser transferida a la masa de agua salada en su totalidad. Como esto no ocurre en la realidad, entonces existe una generación de entropía interna en este proceso de transferencia de calor, debido a que la transferencia de calor es un proceso intrínsecamente irreversible.

Podemos definir una eficiencia exérgica para la atmósfera como el cociente entre la exergía que llega hasta la superficie terrestre, concretamente hasta el colector, y la exergía contenida en la energía solar radiante que atraviesa el vacío hasta nuestro planeta.

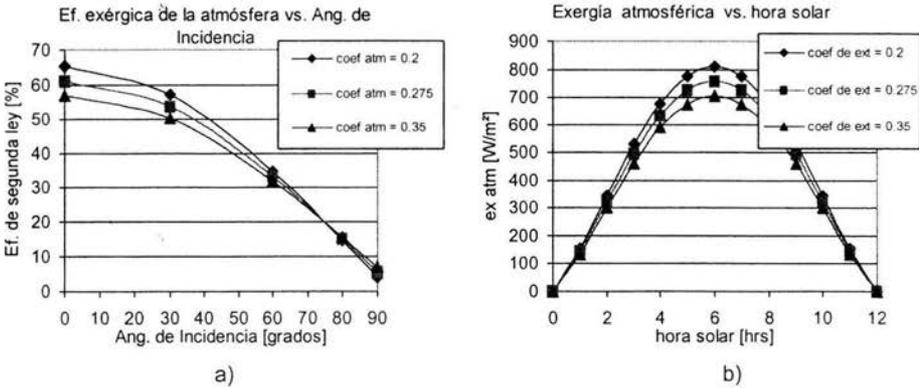
$$\eta_{ex,atm} = \frac{B_{total}}{B_s}$$

Se puede definir una eficiencia exérgica para el colector como la relación entre la exergía útil entre la exergía disponible que llega a él.

$$\eta_{ex,col} = \frac{B_w}{B_s \alpha_w (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_g)}$$

La exergía útil es aquella exergía que logra ceder a la masa del agua salada, mientras que la exergía disponible es la exergía neta que llega desde el Sol. En las siguientes gráficas podemos observar el comportamiento de la exergía que llega a la superficie terrestre para distintas condiciones climáticas traducidas en un cambio del coeficiente de extinción atmosférico  $\alpha_{atm}$ .

El ángulo de incidencia es el ángulo entre un vector normal a una superficie horizontal colocada en la superficie terrestre y un rayo de Sol, de tal forma que un valor de 0° significa que el Sol se encuentra directamente encima de la superficie, mientras que un valor de 90° indica que el Sol se ha metido en el horizonte. Obsérvese que aun cuando no existe radiación directa de energía (ángulo de incidencia  $\theta = 90^\circ$ ) la exergía difusa aún llega al colector. Esta exergía difusa aumenta si el coeficiente atmosférico de extinción  $\alpha_{atm}$  tiene un valor alto.



**Fig. 24** Eficiencia exérgica de la atmósfera a) a distintos ángulos de incidencia de los rayos de Sol y b) a distintas horas del día para diferentes coeficientes atmosféricos.

En la fig. 24 se simula el comportamiento de la eficiencia exérgica de la atmósfera con relación a todo un día solar. Esto se debe a que el modelo matemático utilizado para la construcción de esta gráfica pertenece a **Porta et al. [34]**, se emplea una función senoidal para reflejar el comportamiento de la irradiación solar directa. Cuando el ángulo de incidencia es igual a cero grados, el vector normal a la superficie es paralelo a los haces de Sol, lo que implica que el área del colector recibe directamente la radiación solar. Idealmente esto ocurre al medio día de cada día. Por otra parte, obsérvese que incluso cuando el Sol se ha ido por el horizonte (ángulo de incidencia = 90°) aún existe una pequeña cantidad de exergía que llega al colector solar. Esta exergía se debe a la radiación difusa.

## FLUJOS DE EXERGÍA EN EL DESTILADOR SOLAR

### 5.1.1 Régimen Permanente

Para el caso del análisis exérgico no repetiremos para cada modelo el sistema de ecuaciones que conforman el balance de exergía. Obviaremos el hecho de que para cada modelo (*Malik, efectivo, Hongfei y cavidad*) las ecuaciones de exergía de cada sistema está conformado con los términos de exergía correspondientes a cada modelo. Nótese que el análisis exérgico está conformado casi de igual manera que el análisis energético, con la diferencia de que se tratan de flujos de exergía y existe un término de destrucción de exergía, es decir, la irreversibilidad.

Como se mencionó anteriormente, todos los flujos de exergía en este análisis son aquellos resultantes de una transferencia de calor entre una diferencia finita de temperaturas entre dos depósitos de calor: el medio ambiente y el sistema en cuestión, de tal forma que para cualquier caso:

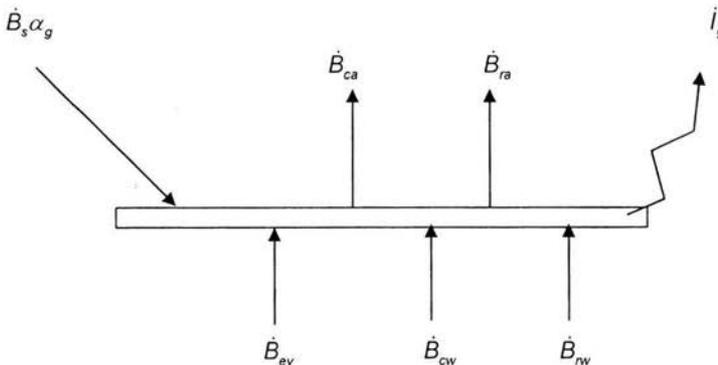
$$B_{transf} = q_{transf} \left( 1 - \frac{T_o}{T_{sist}} \right)$$

donde  $T_{sist}$  puede ser la temperatura del colector, de la masa de agua, del vidrio e incluso del Sol dependiendo de qué flujo de exergía se esté considerando. De ahí que en este caso el subíndice **transf** significa el modo de transferencia de calor. Este tipo de transferencia puede ser la convección natural, las pérdidas por conducción, evaporación, convección forzada, etc. **[8, 9, 31, 46]**.

### VIDRIO

$$\dot{B}_s \alpha_g + \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{cw} + \dot{B}_{rw} = \dot{B}_{ca} + \dot{B}_{ra} + \dot{i}_g$$

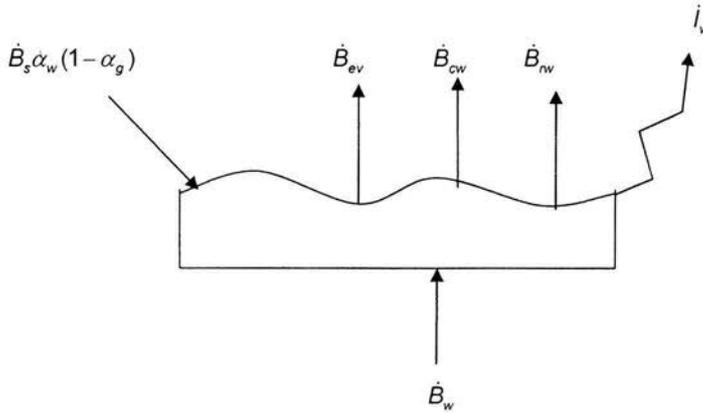
$$\dot{i}_g = \dot{B}_s \alpha_g + \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{cw} + \dot{B}_{rw} - (\dot{B}_{ca} + \dot{B}_{ra})$$



## AGUA

$$\dot{B}_s \alpha_w (1 - \alpha_g) + \dot{B}_w = \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{cw} + \dot{B}_{rw} + \dot{i}_w$$

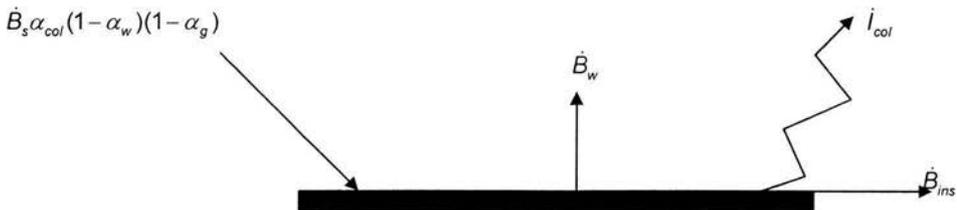
$$\dot{i}_w = \dot{B}_s \alpha_w (1 - \alpha_g) \dot{B}_{ev} + (\dot{B}_w + \dot{B}_{cw} + \dot{B}_{rw})$$



## COLECTOR

$$\dot{B}_s \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) = \dot{B}_w + \dot{B}_{ins} + \dot{i}_{col}$$

$$\dot{i}_{col} = \dot{B}_s \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) - (\dot{B}_w + \dot{B}_{ins})$$



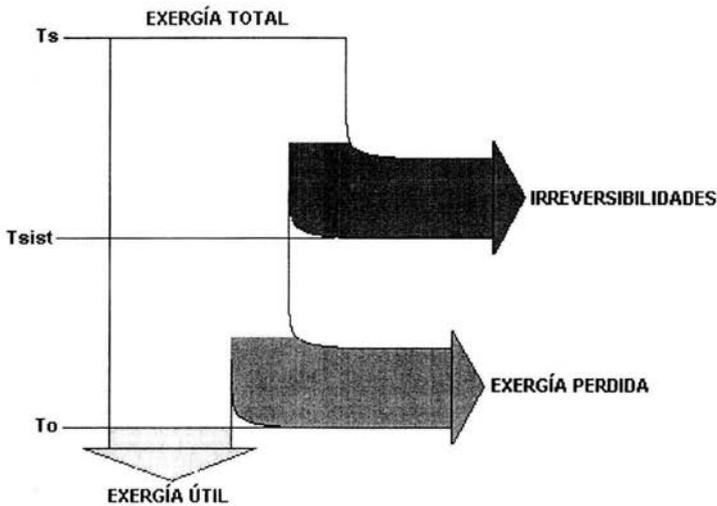
Nótese que en este trabajo encontramos que los flujos de exergía que van desde un sistema con temperatura distinta de  $T_0$  hacia el depósito térmico con temperatura  $T_0$ , el medio ambiente, tienen un valor distinto de cero. Estos flujos son  $B_{ins}$ ,  $B_{ca}$  y  $B_{ra}$ , que representan la irreversibilidad interna generada por una transferencia de calor entre una diferencia de temperaturas, desde el sistema hacia el medio ambiente. Consideramos que una definición más apropiada para estos términos sería la **exergía perdida** pero no la **exergía destruida** o **irreversibilidad** ya que esta exergía puede ser aprovechada de alguna manera para producir algún efecto benéfico en el proceso de destilación, como lo es aprovechar el calor latente del vapor al condensarse en cubiertas de vidrio superpuestas con el fin de calentar agua y producir su evaporación (destiladores de multiefectos) [18, 26, 29].

Es decir, en este trabajo separamos la exergía perdida de las irreversibilidades porque se tratan de dos cantidades que difieren en definición, aunque ambas se tratan de un desaprovechamiento de la exergía de un sistema. Las irreversibilidades, en este trabajo, se deben a la generación de entropía

provocada por la transferencia de calor entre dos sistemas con temperaturas distintas de las del medio ambiente.

Así, la irreversibilidad que ocurre al producirse una transferencia de calor entre el Sol y el colector solar se debe a la diferencia de temperaturas entre un depósito térmico y el otro. Mientras que la exergía perdida  $B_{ins}$  es aquel flujo de exergía que parte de un sistema con una temperatura distinta de la del medio ambiente hacia el medio ambiente. Esta exergía perdida podría ser aprovechada, de alguna forma, ya que existe un desequilibrio entre el sistema y el medio ambiente. Si se aprovecha o no, depende de otras circunstancias como son económicas, tecnológicas, etc, pero no son inaprovechables desde el punto de vista termodinámico.

Desde el punto de vista de optimización, tanto las irreversibilidades como la exergía perdida son las cantidades que deben ser minimizadas [8, 9].



**Fig. 25** Esquema de flujos de exergía desde un depósito térmico a temperatura  $T_s$  para lograr un efecto útil. Comparación entre las irreversibilidades y la exergía perdida.

Dicho lo anterior, en los resultados siguientes presentamos la distinción entre las irreversibilidades  $I$  y la exergía perdida ( $B_{ins}$ ,  $B_{ca}$  y  $B_{ra}$ ).

### 5.1.2 Resultados, Gráficas y Tablas

Para cada uno de los parámetros hemos aparejado la eficiencia exérgica global del destilador  $\eta_{ex,global}$ , junto con las irreversibilidades en el colector  $I_{col}$ , para relacionar de mejor forma el comportamiento exérgico del destilador con respecto de cada uno de los parámetros de estudio.

Nótese que salvo para la irradiación solar, siempre que las irreversibilidades en el colector disminuyan, la eficiencia exérgica global del destilador aumentará. Es por eso que escogimos esta forma de presentar los resultados, debido a que las irreversibilidades en el colector afectan sensiblemente el comportamiento exérgico de un destilador solar.

Se observará también que para todos los casos, la eficiencia exérgica global es menor numéricamente que la eficiencia energética en un destilador solar. Esto es lógico si se piensa que además de considerar las pérdidas de energía, en un análisis de exergía se toman en cuenta las irreversibilidades producidas en el proceso de transferencia de calor.

### TEMPERATURA AMBIENTE

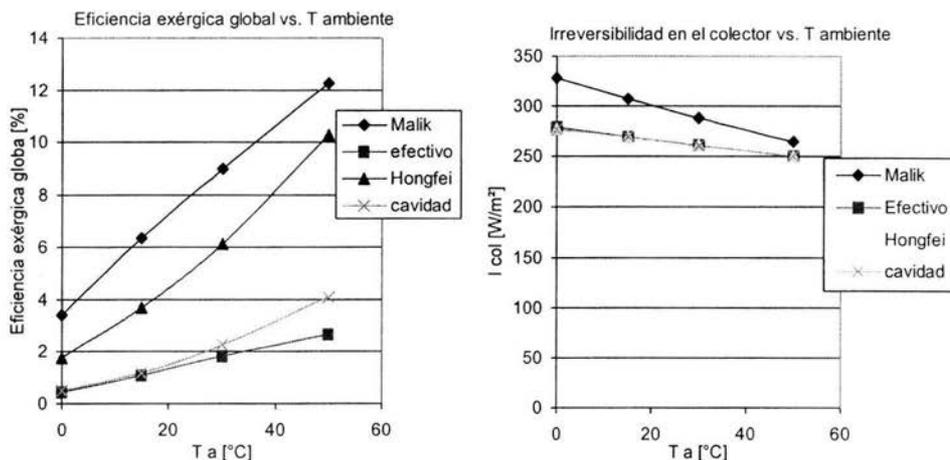
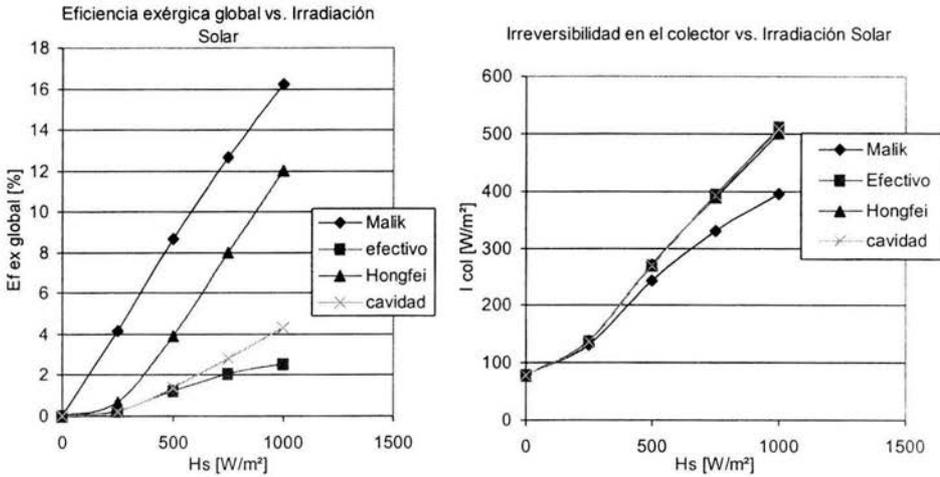


Fig. 26 Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas temperaturas ambiente

Cuando la temperatura ambiente aumenta, notamos que así mismo lo hace la  $\eta_{ex,global}$ . Esto se debe a que la exergía de un sistema depende de su temperatura, y entre mayor sea ésta, mayor capacidad de producir trabajo posee. Así, si la temperatura ambiente aumenta, se produce un desequilibrio térmico entre los alrededores y el sistema, se transfiere calor hacia el sistema, y su exergía aumenta.

En cambio,  $I_{col}$  disminuye, aunque de manera menos sensible que el aumento de la eficiencia exérgica, ya que la ganancia de exergía significa una disminución en la generación de entropía, pero no es directamente proporcional. Una optimización exérgica del parámetro  $T_a$  consistiría en el mayor aumento posible de su valor, en colocar el destilador en las zonas geográficas o con condiciones climáticas más calurosas posibles. Por fortuna, los lugares donde más se necesita agua potable, ya que resulta difícil su obtención por otros medios más económicos, son aquellos donde la temperatura ambiente puede llegar a valores del orden de los 50°C.

## IRRADIACIÓN SOLAR



**Fig. 27** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas irradiaciones solares

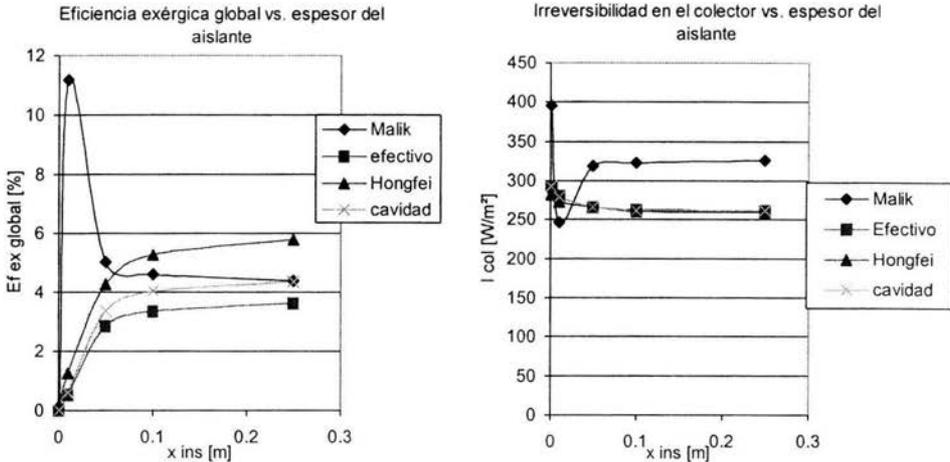
Este resultado resultaba obvio de antemano. La irradiación solar es el parámetro fundamental del fenómeno de evaporación en un destilador solar.

Más allá de que bajo ciertas condiciones se puede lograr un importante porcentaje de destilado nocturno por la inercia térmica de la masa de agua, o con el empleo de calor de desperdicio de alguna fuente, la irradiación solar es el más influyente de los parámetros. Altos valores de Irradiación Solar producen tanto altos valores de producción de destilado como de eficiencia exérgica.

En las gráficas podemos observar que para el modelo *Malik*, la eficiencia exérgica adquiere valores sumamente altos en comparación con los demás modelos. Estos modelos también aumentan su eficiencia exérgica para valores cada vez mayores de  $H_s$ . La diferencia entre el modelo *Malik* y los demás es que los coeficientes de transferencia de calor son constantes. Como hemos visto, esto produce una diferencia importante entre las temperaturas del destilador solar. Estas notables diferencias pueden ser las causantes de la diferencia entre los valores de la eficiencia exérgica global de cada modelo. Podríamos concluir que un ritmo menor en el incremento de  $I_{col}$  a medida que  $H_s$  crece, se traduce en un aumento sensible en la eficiencia exérgica del destilador.

De resultados anteriores hemos visto que suponer el coeficiente de transferencia de calor para la evaporación  $h_{ev}$  es un resultado incorrecto para cualquier rango de temperatura del agua  $T_w$ , ya que es muy sensible a variaciones de esta variable. Esta particularidad se refleja en el comportamiento en los resultados de cada uno de los parámetros.

## ESPESOR DEL AISLAMIENTO



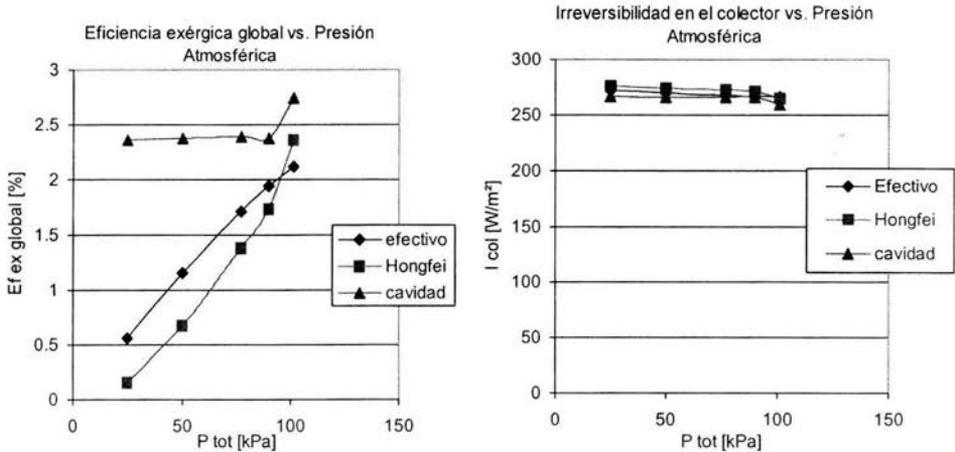
**Fig. 28** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintos espesores de aislamiento

El modelo *Malik* presenta un comportamiento errático cuando el espesor del aislamiento está cerca del cero, aproximadamente cuando toma el valor de 5 mm. Esto puede deberse a una singularidad matemática; sin embargo, el comportamiento de la exergía global para los demás modelos no deja duda de que el aislamiento constituye un factor importante para impedir que se pierda exergía debido a las pérdidas de energía del colector hacia el medio ambiente.

A medida que aumenta el espesor del aislamiento, su influencia en la eficiencia exérgica global va disminuyendo. Este resultado concuerda con los resultados de la mayoría de los investigadores que han estudiado el comportamiento del destilador con aislamiento. *Almanza et al. [4]* proponen que para un diseño preliminar se puede prescindir de aislamiento. Nosotros recomendaríamos, que de utilizarse materiales con poca conductividad térmica para las paredes del destilador, en términos de la exergía, la propuesta de *Almanza et al. [4]* puede ser considerada. Sin embargo, es visible que si no se utiliza aislamiento, la eficiencia exérgica global es casi nula.

Nótese que las irreversibilidades en el colector casi no disminuyen ante el incremento de espesor del aislamiento. Esto podría significar que resulta más importante para la eficiencia exérgica global la cantidad de exergía perdida que la cantidad de exergía destruida. Recordemos que la exergía destruida se traduce precisamente en las irreversibilidades en el colector. Así pues, para el parámetro del espesor de aislamiento, la exergía perdida afecta más sensiblemente al sistema, que la exergía destruida.

## PRESIÓN TOTAL



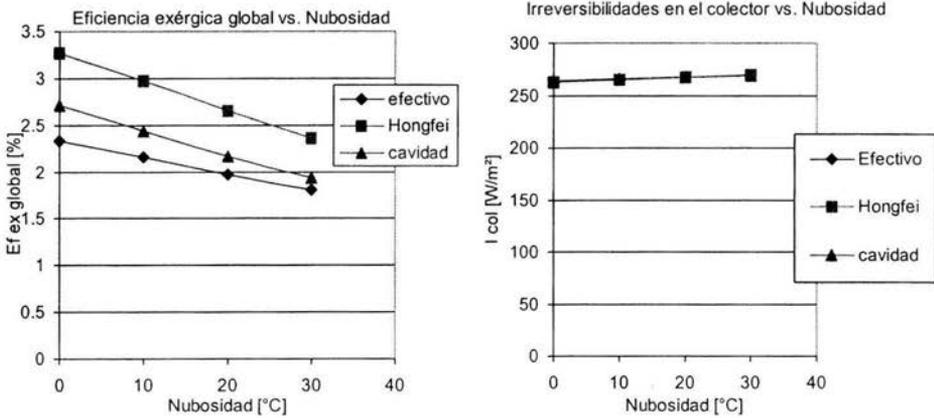
**Fig. 29** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas presiones totales

El comportamiento de las variables del destilador como son las temperaturas, la producción de destilado y las variables de la exergía con respecto a la presión total es contradictorio con los resultados experimentales de algunos investigadores. Como se aprecia en las gráficas la Presión Total o aquella que existe en el espacio dentro del destilador, la eficiencia exérgica global disminuye igualmente a medida que la presión disminuye.

Por el lado de las irreversibilidades en el colector, a medida que se genera vacío en el destilador, es decir, que la presión se hace menor que la presión atmosférica (presión negativa), la exergía destruida en el colector aumenta. Esto significaría que en zonas geográficas donde la presión atmosférica es cada vez menor, se tendría naturalmente una pérdida de eficiencia exérgica. Los datos experimentales en destiladores al vacío **Al-Hussaini et al. [3]** indican que una reducción en la presión atmosférica produce un incremento en la evaporación del agua a cada vez temperaturas más bajas.

Podemos concluir que, tal y como está planteado el modelo matemático tradicional en destiladores solares, no se refleja este comportamiento en los resultados energéticos y exérgicos. Experimentos de este tipo no pueden ser modelados por este planteamiento matemático.

## NUBOSIDAD



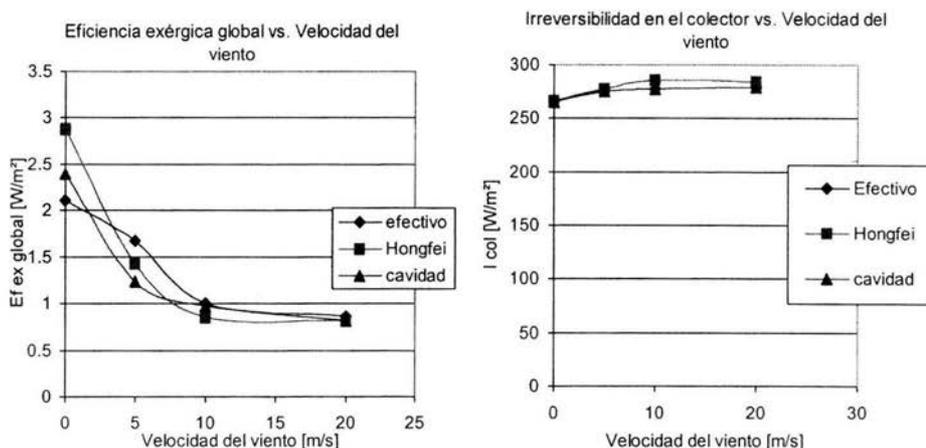
**Fig. 30** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas “Nubosidades”

El parámetro Nubosidad es aquél que se traduce en la claridad existente en la atmósfera, mejor conocido como qué tan despejado se encuentra el cielo. Se puede pensar que este parámetro está relacionado con el otro parámetro visto en el desarrollo de los términos sobre radiación solar llamado coeficiente de extinción  $\alpha_{atm}$  [38].

Como quiera que sea, ambos parámetros indican una disminución tanto en la producción de destilado como para la eficiencia exérgica global, debido a que la radiación directa o coherente proveniente del Sol se difunde con más facilidad en una atmósfera nublada que en una atmósfera despejada.

De la figura 25 podemos notar que a medida que crece esta “nubosidad” la eficiencia exérgica global disminuye, aunque a un ritmo lento. Las irreversibilidades en el colector aumentan a medida que crece nubosidad, sin embargo, se mantiene dentro de un rango limitado, e incluso puede suponerse que las irreversibilidades en el colector son independientes del parámetro nubosidad.

## VELOCIDAD DEL VIENTO



**Fig. 31** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas velocidades del viento

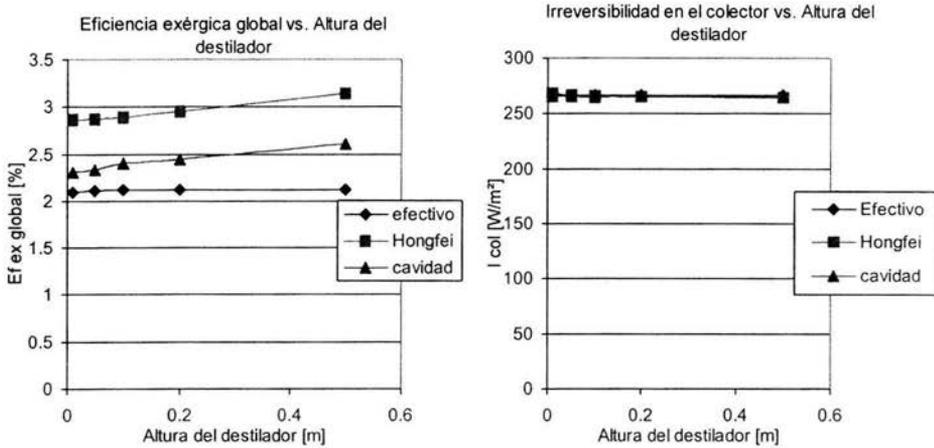
La velocidad del viento ha sido un parámetro de mucho estudio por parte de algunos investigadores en el campo de la destilación solar. La importancia de este parámetro radica en que en las zonas geográficas donde los destiladores solares encuentran una mayor aplicación generalmente son zonas de vientos importantes. De antemano, se puede pensar que una velocidad alta del viento produciría una diferencia importante entre la temperatura del agua con la del vidrio. En términos energéticos, esto es verdad, como lo demuestran los experimentos de **El-Sebaili et al. [7]**.

Sin embargo, como ya pudimos demostrar, para los modelos en donde los coeficientes de transferencia de calor no son constantes (efectivo, Hongfei y cavidad), la diferencia de temperaturas entre el agua y la cubierta de vidrio no es directamente proporcional a la producción de destilado. Incluso, a veces, son inversamente proporcionales. De tal manera, que producir una diferencia de temperaturas entre el agua y la cubierta del vidrio no significa que siempre obtendremos mayor cantidad de destilado.

En términos de la exergía, un aumento en la velocidad del viento, significa una disminución en las temperaturas del destilador. Por definición, si la temperatura de un sistema se acerca más a la temperatura de referencia, existe menor contenido de exergía en él. De las gráficas podemos observar una disminución drástica en la eficiencia exérgica global a medida que la velocidad del viento aumenta. Notamos también, que las irreversibilidades en el colector aumentan con velocidades del viento cada vez mayores.

Este resultado es curioso si pensamos que la velocidad del viento ejerce influencia en la cubierta del vidrio, mientras que las irreversibilidades en el colector es la exergía destruida en el colector. Obviamente, el modelo matemático no los considera como dos sistemas aislados, si no que, para este parámetro, el efecto producido sobre un sistema, afecta al otro. Esta es otra prueba de que un destilador solar es un sistema dinámico-térmico altamente complejo.

## ALTURA DEL DESTILADOR

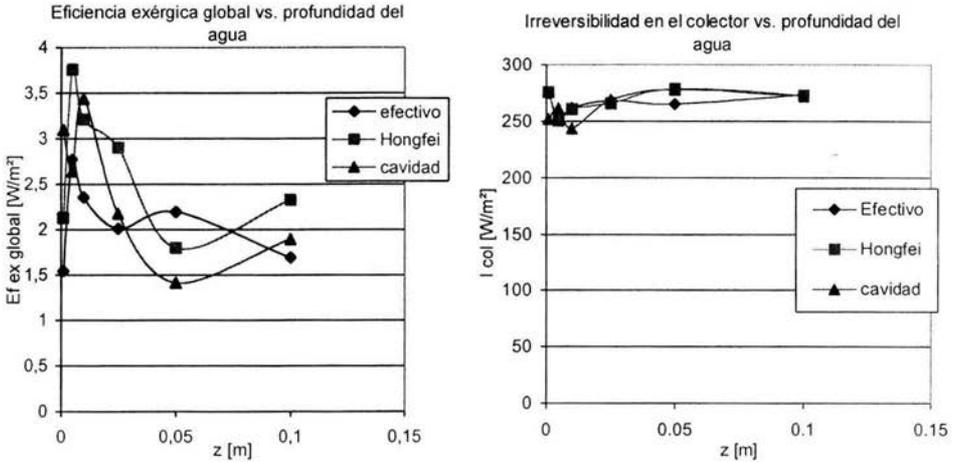


**32** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas alturas del destilador *Fig.*

La altura del destilador parece ser un parámetro de poca influencia en términos exérgicos. Una variación importante en los valores de  $x$ , no produce más que un tenue incremento en la eficiencia exérgica global. Recordemos que la altura del destilador es, tal vez, el parámetro más importante en la convección natural de la mezcla aire-vapor debido a que se encuentra elevado al cubo en la definición del número de Grashof. Ésta puede ser la explicación de que a medida que se incrementa la altura en un destilador, la eficiencia exérgica global aumenta.

El comportamiento de las irreversibilidades en el colector, tal como se muestra en la gráfica, para cada uno de los modelos, es independiente de la altura del destilador. Podemos concluir que la altura del destilador no es un parámetro de mucha influencia en el comportamiento exérgico del destilador solar. Sin embargo, la tendencia observada es que a medida que la altura del destilador aumenta, las irreversibilidades en el colector disminuyen.

## PROFUNDIDAD DEL AGUA



**Fig. 33** Eficiencia exérgica e Irreversibilidades en el colector a distintas profundidades del agua

La profundidad del agua resulta ser un parámetro que produce un comportamiento extraño en las variables exérgicas del destilador, en el sentido de que todos los demás parámetros producen en la eficiencia exérgica global, comportamientos monótonos. Es decir, ya fuera desde un valor más bajo hacia un valor mayor de eficiencia o viceversa, los parámetros no producen máximos o mínimos si no son en el cero o en el infinito. En cambio, la profundidad del agua produce un comportamiento senoidal con varios máximos y mínimos.

Desde el punto de vista matemático, una función de este tipo es ideal para la optimización de la eficiencia exérgica con respecto a la profundidad del agua, ya que se encuentra mediante métodos sencillos del cálculo diferencial. Pero desde un punto de vista físico del fenómeno resulta confuso pensar que a un determinado valor de  $z$ , la eficiencia exérgica global aumenta y que para otro valor de  $z$ , la eficiencia exérgica global disminuye. ¿Qué fenómeno ocurre que para un valor cada vez más alto de  $z$ , se encuentren fluctuaciones en la eficiencia exérgica global? No encontramos una respuesta clara, pero si observamos a las variables como las temperaturas, sus valores permanecen casi constantes a medida que varía la profundidad del agua. Se puede concluir superficialmente que ésta es una respuesta del sistema matemático, que no tiene relación con el fenómeno termodinámico real en el destilador.

### 6.2.1 Régimen Transitorio

Igualmente que en el análisis energético, para el régimen transitorio, encontramos que la irradiación solar es dependiente del tiempo, al igual que la temperatura ambiente.

La irradiación solar en términos del tiempo queda definida como se mostró anteriormente:

$$H_{total} = H_{max} \operatorname{sen}^{1.2} \left( \frac{\pi t}{Ld} \right) \quad H_{directa} = H_{max} \operatorname{sen}^{1.5} \left( \frac{\pi t}{Ld} \right) \quad H_{difusa} = H_{total} - H_{directa}$$

donde  $t$  es la hora solar y  $L_d$  la cantidad de horas solares que existen en un día solar, es decir, idealmente 12. La diferencia entre esta definición y la que ofrecen **Porta et al. [34]** son los valores de  $t$  a la cual comienza a evaluarse  $H_s$ . La hora de máxima intensidad solar para **Porta et al. [34]** es  $t=0$ , mientras que para este trabajo, el día solar empieza cuando  $t=0$  hrs.

Con respecto a la temperatura ambiente, utilizaremos la misma definición planteada para el análisis energético en régimen transitorio.

$$T_a(t) = 10 \operatorname{sen} \left( \frac{1}{12} \pi t \right) + T_{a,i} \quad [^\circ\text{C}]$$

donde  $T_{a,i}$  es la temperatura ambiente al inicio del día.

Sobre el término de ganancia de exergía del sistema por unidad de tiempo hay muy poca información debido a que en la mayoría de las referencias bibliográficas sobre análisis exérgicos, se considera un sistema en régimen permanente, es decir que este término dependiente del tiempo es siempre igual a cero.

Sin embargo, encontramos que el término debido a la ganancia o pérdida de exergía con respecto al tiempo del sistema es el mismo que para un análisis energético, como se puede ver en las ref. **[30]**, **[31]** y **[44]** es decir, dependiendo del sistema (colector, masa de agua, vidrio, etc) es:

$$T_o(S_2 - S_1)$$

$$S_2 - S_1 = M \left( \ln \frac{T_2}{T_1} \right)$$

Para cada uno de los modelos que se construyan, se tendrán ecuaciones de este tipo donde las irreversibilidades en cada sistema se despejan para que estén en forma explícita en el análisis de exergía.

$$\begin{aligned} \alpha_g \dot{B}_s + \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{rw} + \dot{B}_{cw} &= \dot{B}_{ca} + \dot{B}_{ra} + M_g \frac{d(\ln T)}{dt} + \dot{i}_g \\ \dot{i}_g &= \alpha_g \dot{B}_s + \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{rw} + \dot{B}_{cw} - \left( \dot{B}_{ca} + \dot{B}_{ra} + M_g \frac{d(\ln T)}{dt} \right) && \text{Vidrio} \\ \alpha_w (1 - \alpha_g) \dot{B}_s + \dot{B}_w &= \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{rw} + \dot{B}_{cw} + M_w \frac{d(\ln T)}{dt} + \dot{i}_w \\ \dot{i}_w &= \alpha_w (1 - \alpha_g) \dot{B}_s + \dot{B}_w - \left( \dot{B}_{ev} + \dot{B}_{rw} + \dot{B}_{cw} + M_w \frac{d(\ln T)}{dt} \right) && \text{Agua} \\ \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) \dot{B}_s &= \dot{B}_w + \dot{B}_{ins} + M_{col} \frac{d(\ln T)}{dt} + \dot{i}_{col} \\ \dot{i}_{col} &= \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) \dot{B}_s - \left( \dot{B}_w + \dot{B}_{ins} + M_{col} \frac{d(\ln T)}{dt} \right) && \text{Colector} \end{aligned}$$

Donde los flujos de exergía en régimen transitorio se definen como:

$$\dot{B} = \dot{q} \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right)$$

Las ecuaciones anteriores representan la tasa de variación con respecto del tiempo de las irreversibilidades de cada sistema, cuyas unidades son los W/m<sup>2</sup>. Sin embargo, en el régimen transitorio nos interesa conocer la cantidad de irreversibilidad existente en el sistema en un intervalo definido de tiempo. De tal forma que para conseguir esto se debe integrar con respecto al tiempo cada uno de los términos de exergía o irreversibilidad en las ecuaciones anteriores.

Así, las 3 ecuaciones en un destilador solar de la irreversibilidad en un intervalo de tiempo son:

VIDRIO:

$$[I_g]_{t_1}^{t_2} = \alpha_g \int_{t_1}^{t_2} (B_s) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{ev}) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{rw}) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{cw}) dt - \left( \int_{t_1}^{t_2} (B_{ca}) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{ra}) dt + M_g \ln \left( \frac{T_{g,2}}{T_{g,1}} \right) \right)$$

AGUA:

$$[I_w]_{t_1}^{t_2} = \alpha_w (1 - \alpha_g) \int_{t_1}^{t_2} (B_s) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_w) dt - \left( \int_{t_1}^{t_2} (B_{ev}) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{rw}) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{cw}) dt + M_w \ln \left( \frac{T_{w,2}}{T_{w,1}} \right) \right)$$

COLECTOR:

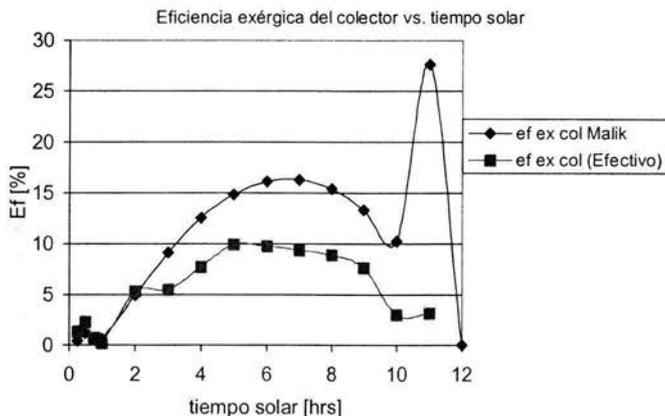
$$[I_{col}]_{t_1}^{t_2} = \alpha_{col} (1 - \alpha_w) (1 - \alpha_g) \int_{t_1}^{t_2} (B_s) dt - \left( \int_{t_1}^{t_2} (B_w) dt + \int_{t_1}^{t_2} (B_{ins}) dt + M_{col} \ln \left( \frac{T_{col,2}}{T_{col,1}} \right) \right)$$

## 6.2.2 Resultados, Gráficas y Tablas

Los resultados presentados a continuación ya fueron presentados en el capítulo 5 para régimen permanente. El objetivo de presentar el caso en régimen transitorio fue simplemente contrastar el comportamiento del modelo lineal de **Malik et al. [29]**, con el modelo *efectivo*.

Para los propósitos de este trabajo, que consiste en mostrar la tendencia de las variables exérgicas con respecto del tiempo y la diferencia de los modelos lineal y no lineal, no son necesarias para el cálculo las definiciones de  $I_g$  e  $I_w$ , ya que es posible obtener estas variables a partir de la irreversibilidad en el colector, porque YA se conocen los valores de cada uno de los flujos de exergía. Estos valores de exergía se obtienen con el conocimiento de la temperatura de los sistemas  $T_{col}$ ,  $T_w$  y  $T_g$ , que se obtienen del balance energético en régimen transitorio.

Los intervalos de tiempo son desde los 15 minutos para Malik, hasta una hora para el modelo Efectivo. La razón de este procedimiento es la velocidad con que el programa arrojaba los valores para cada uno de los modelos. No es de extrañarse que el modelo lineal ofrezca ventajas en el tiempo requerido para el cálculo de sus variables. Aunque un intervalo de una hora puede parecer poco preciso, de hecho lo es, afortunadamente (para este caso) los sistemas térmicos reaccionan lentamente al cambio, de manera que es posible observar con nitidez la tendencia senoidal que tiene el destilador al sufrir cambios en la irradiación solar durante el día, tanto para el modelo lineal como para el no lineal.



**Fig. 34** Eficiencia exérgica del colector durante el día solar para el modelo Malik y el modelo efectivo.

En esta figura comparamos dos modelos, la eficiencia exérgica del colector del modelo tradicional lineal *Malik* con el modelo no lineal *Efectivo*, en relación al tiempo solar. Nótese que el modelo *Malik* logra alcanzar valores de eficiencia exérgica más elevados que el modelo *efectivo*, el máximo ubicado poco antes de las 14:00 horas u 8 horas después del amanecer. Esto se debe a que los coeficientes de transferencia de calor permanecen constantes, de manera que las propiedades no cambian con la temperatura del destilador.

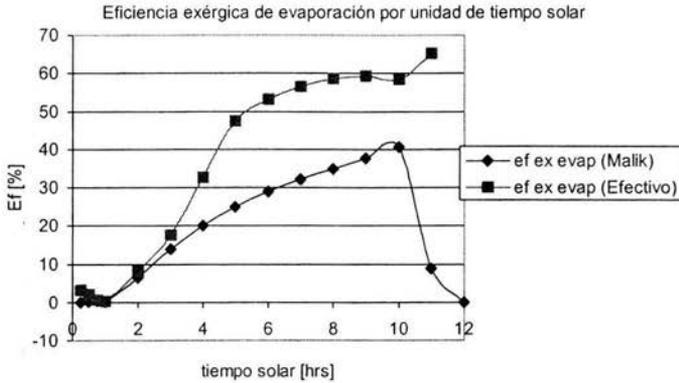
Recordando la definición de la eficiencia exérgica del colector:

$$\eta_{ex,col} = \frac{B_w}{\alpha_{col}(1-\alpha_w)(1-\alpha_g)B_s} = \frac{q_w \left(1 - \frac{T_o}{T_{col}}\right)}{\alpha_{col}(1-\alpha_w)(1-\alpha_g)H_s \left(1 - \frac{T_o}{T_s}\right)}$$

Se puede ver que a poco de existir irradiación solar, la exergía útil que cede el colector a la masa de agua disminuye hasta el cero, cerca de las 8:00 horas o a 2 horas de haber amanecido. Este punto donde  $B_w = 0$  depende de la temperatura de referencia. Como se observa en la fig 22. del capítulo 5, durante el tiempo ocurrido desde el amanecer hasta las 8:00 hrs, la temperatura del colector es menor a la temperatura de referencia, en este caso  $T_o = 25^\circ\text{C}$ .

La razón de valores de eficiencia exérgica tan pequeña, expresada como está, se debe a la diferencia entre las temperaturas de los depósitos térmicos que son el Sol y el colector. Desde el punto de vista de la segunda ley, se trata de un proceso muy ineficiente el calentamiento de un cuerpo aprovechando la energía del sol, ya que es un gran desperdicio de exergía aprovechar una reacción de fusión a una elevada temperatura para calentar un colector a una temperatura relativamente cercana a la temperatura de referencia [9, 10]. Desde otro punto de vista [25], puede verse que la exergía contenida en la energía solar es aprovechada en gran parte si pensamos que el colector a una temperatura  $T_{col}$  calienta una masa de agua a una temperatura muy cercana a la del colector. Desde una perspectiva simplista no puede hacerse nada para modificar la reacción de fusión que ocurre en el centro del sol, por lo que recibimos del sol gratuitamente una cantidad de exergía constante, de ahí que pensamos que los análisis de exergía solar deben hacerse partiendo desde el cuerpo que recibe la energía solar y desde su temperatura, así sea un colector solar, un concentrador, etc.

Pensando así, llegamos a la siguiente figura:



**Fig.35** Eficiencia exérgica de evaporación durante el día solar para el modelo Malik y el modelo efectivo.

Esta gráfica es interesante porque parece no coincidir con el resto de los resultados obtenidos en el régimen transitorio, donde las variables alcanzan un máximo y después decrecen, conducidas por que la excitación de todo el sistema es el comportamiento periódico. La definición de la eficiencia exérgica de evaporación es:

$$\eta_{ex, ev} = \frac{B_{ev}}{B_w + \alpha_w(1 - \alpha_g)B_s} = \frac{q_{ev} \left(1 - \frac{T_o}{T_w}\right)}{q_w \left(1 - \frac{T_o}{T_{col}}\right) + H_s \alpha_w (1 - \alpha_g) \left(1 - \frac{T_o}{T_s}\right)}$$

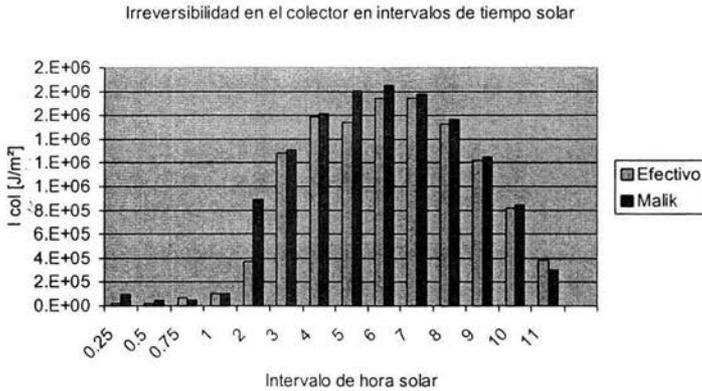
Primero observemos que el modelo *efectivo* durante casi todo el día solar arroja valores superiores de eficiencia exérgica de evaporación a los de *Malik*. Este comportamiento se puede explicar ya que los modelos no lineales (*efectivo*, *Hongfei* y *cavidad*) para cualquier caso producen diferencias de temperatura entre el colector y la masa de agua menores que el modelo *Malik* como puede verse en la fig. 23 del Capítulo 5. Como sabemos diferencias menores de temperaturas producen menores irreversibilidades en los sistemas, lo cual, a su vez, produce un aumento en la eficiencia exérgica de evaporación. El término de exergía absorbida por la masa de agua es casi despreciable, ya que para el mejor de los casos  $H_s \max = 1000 \text{ W/m}^2$ , que multiplicados por la absorptividad del agua y la transmisividad del vidrio, dan como resultado 0.09, es decir que contribuye con  $90(1 - T_o/T_s) \text{ W/m}^2$  en el mejor de los casos.

El término de la exergía cedida por convección natural del colector hacia el agua,  $B_w$  y la exergía del calor de evaporación  $B_{ev}$  provienen de depósitos térmicos (colector y masa de agua, respectivamente) a temperaturas muy semejantes, por lo que, haciendo una estimación, la eficiencia exérgica de evaporación es una relación entre el calor de evaporación y el calor cedido del colector a la masa de agua. Como podemos observar en la gráfica a medida que la irradiación solar, esta eficiencia aumenta exponencialmente hasta una abrupta caída hacia el cero de eficiencia. Este comportamiento puede explicarse por medio de las temperaturas del destilador, quienes finalmente son las variables que deciden el comportamiento entero de este equipo.

El calor por convección natural del colector hacia la masa de agua depende de las temperaturas del colector y del agua, que como mencionamos anteriormente, estas temperaturas son casi idénticas. Por otra parte, el calor por evaporación depende enteramente de las presiones parciales cerca de la

superficie del agua y cerca de la cubierta de vidrio,  $P_w$  y  $P_g$ , las cuales pueden expresarse en función de las temperaturas de la masa de agua y la cubierta de vidrio,  $T_w$  y  $T_g$ . Recordemos que esta transferencia de calor posee, a temperaturas elevadas del agua, la fracción más importante energéticamente hablando dentro de un destilador solar.

A medida que transcurre el tiempo, tanto la diferencia  $T_{col} - T_w$  como  $T_w - T_g$ , se incrementan hasta un máximo y después decrecen (*Malik*). Por el lado del modelo no lineal Efectivo, la diferencia de temperaturas  $T_w - T_g$  crece aún en el último intervalo de tiempo. La razón de que la eficiencia exérgica de evaporación no decrezca durante todo el día solar se debe al ritmo al cual crece y se comporta cada una de las diferencias de temperatura que regulan un fenómeno de transferencia de calor como el otro. Mientras que  $T_{col} - T_w$  llega a un máximo cerca de las 12:00 horas o 6 horas después del amanecer y comienza a decrecer,  $T_w - T_g$  sigue creciendo a un ritmo mucho más importante que el de  $T_{col} - T_w$  hasta cerca de las 14:00 horas, después del cual decrece, sin embargo, la diferencia de  $T_{col} - T_w$  durante las últimas horas del día solar son tan pequeñas que cualquier disminución de  $T_w - T_g$  producen un cociente cada vez más elevado. Pensamos que se trata de una deficiencia del modelo, ya que si siguiéramos suministrando energía solar o alargáramos de alguna forma la duración del día solar, la eficiencia exérgica de evaporación llegaría sin ningún problema a superar el 100 %, lo cual es termodinámicamente imposible.



**Fig. 36** Irreversibilidad en el colector en distintos intervalos de tiempo a lo largo del día solar.

La fig. 36 es una comparación de las irreversibilidades producidas en el colector para los modelos *efectivo* y *Malik*, en intervalos de tiempo. De cero hasta la primera hora, los intervalos de tiempo miden 15 minutos, después se obtienen las irreversibilidades cada hora hasta que se oculta el sol. La tendencia observada es clásica del comportamiento periódico de la irradiación solar. Se observa que tanto, las variables energéticas y exérgicas tienen su máximo cuando la irradiación solar es máxima. Como habíamos visto en el análisis exérgico en régimen permanente, aun cuando se incrementan las irreversibilidades a medida que se incrementa  $H_s$ , también se incrementa la eficiencia exérgica del colector.

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1 Comentarios sobre los resultados

El proceso de recolección de datos, construcción de gráficas y resolución de los distintos sistemas numéricos para la solución de los modelos en destiladores solares se realizó con dos herramientas computacionales: Hoja de Cálculo Excel de Office® y Lenguaje de Programación Matemática Maple®.

Se construyeron 4 hojas de cálculo en donde se evaluaban los términos independientes de cada modelo que formarían el sistema de ecuaciones que representan los balances de energía y análisis de exergía. Se evaluaba el comportamiento de cada término en relación a los parámetros y variables más importantes en un destilador solar.

*Ejemplo: La construcción de la gráfica producción de destilado vs. irradiación solar se hace con todos los parámetros constantes según los valores estándares de la tabla 1 en el capítulo 4, con excepción del parámetro irradiación solar, por supuesto, ya que éste varía por ser la variable independiente en la gráfica. De la misma forma, para evaluar la producción de destilado con respecto a la temperatura ambiente, los valores de los parámetros se mantenían constantes mientras que el parámetro  $T_a$  variaba para conocer su influencia en la producción de destilado. El mismo procedimiento se aplicó para el conocimiento de las variables de la exergía como la eficiencia exérgica, las irreversibilidades, etc.*

Se construyó una hoja de cálculo para describir cada uno de los fenómenos de transferencia de calor internos en un destilador: convección natural, radiación interna y evaporación. Al principio, cuando el objetivo era conocer el comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor con respecto a las temperaturas del destilador,  $T_{col}$ ,  $T_w$  y  $T_g$ , fueron estas mismas las que funcionaron como parámetros (variando dentro de un rango determinado) y las variables dependientes eran los coeficientes de transferencia de calor.

Se construyeron 3 sistemas de ecuaciones para describir los balances de energía. Cada uno de los sistemas reflejaba un modelo distinto en alguno de sus términos, de tal forma que se pudieran comparar unos con otros. Los programas para resolver cada uno de los sistemas de ecuaciones, tanto para régimen permanente como transitorio, se realizaron con Maple®.

Los resultados obtenidos en este trabajo provienen del siguiente proceso:

- 1) Definición de cada uno de los modelos de evaporación, convección natural y radiación interna.
- 2) Definición de los sistemas de ecuaciones para cada uno de los modelos.
- 3) Por cada uno de los sistemas, obtención de las variables ( $T_{col}$ ,  $T_w$  y  $T_g$ ).
- 4) Con estos valores de temperaturas del destilador para cada sistema definido, obtención de las producciones de destilado, energías y exergías del destilador.
- 5) Para obtener las producciones de destilado se utilizaron las definiciones de los modelos de *Malik*, *efectivo*, *Hongfei*, *Chilton* y *Colburn*, y *Clark*, aunque solamente se obtuvieran temperaturas para 4 sistemas: *efectivo*, *Malik*, *cavidad* y *Hongfei*.

Para el caso del punto número cinco, debemos comentar algunas especificaciones:

Para el régimen permanente, se resolvía un sistema de 3 ecuaciones no lineales -con excepción del modelo *Malik* que es lineal- (colector, masa de agua y cubierta de vidrio). Cada modelo (*Hongfei*, *efectivo* y *cavidad*) derivaba en un distinto sistema de 3 ecuaciones no lineales. La solución de este sistema de ecuaciones eran, como se ha dicho, las temperaturas  $T_{col}$ ,  $T_w$  y  $T_g$ . Se obtuvieron ternas de temperaturas del destilador para cada parámetro de estudio. Es decir, se necesitaba una terna de temperaturas para cuando  $T_a$  era igual a 0, 15, 30 y 50 °C. Igualmente para los demás parámetros. De más está decir que se trató de una tarea sencilla pero sumamente extensa. Las temperaturas para cada valor de cada parámetro de estudio pueden encontrarse en el Apéndice de este trabajo.

Con estas temperaturas fue posible obtener la producción de destilado con respecto a cada parámetro. Sin embargo, nuestros modelos, con excepción de *Malik*, fueron construidos de manera arbitraria con la intención de obtener más información de los fenómenos comparándolos unos con otros. El modelo *Malik* es enteramente construido por *Malik et al. [29]*, mientras que *Hongfei et al. [20]* propone correlaciones distintas solamente para la convección natural y la evaporación. No propone una correlación distinta de la de *Malik et al. [29]* para la convección forzada o la radiación interna. Por lo tanto, para poder construir modelos con algunos elementos distintos de los propuestos por *Malik et al. [29]* necesitamos agregar correlaciones de otros investigadores o proponer las nuestras. De esta forma, arbitrariamente, se construyeron los modelos que aparecen en este trabajo. Lógicamente, con tantos elementos propuestos por muchos investigadores en el fenómeno de destilación solar, se podrían construir un sin fin de modelos que intenten reproducir con exactitud el comportamiento de un destilador. Desafortunadamente, existen tantos modelos como experimentos en destiladores, y la metodología de la experimentación es tan extensa que resultaría inútil construir muchos modelos combinando los resultados que se encuentran en convección natural con aquellos que se logran en el fenómeno de la evaporación mediante experimentos en condiciones totalmente distintas.

De ahí que la elección para conformar los modelos en este trabajo fueron los siguientes:

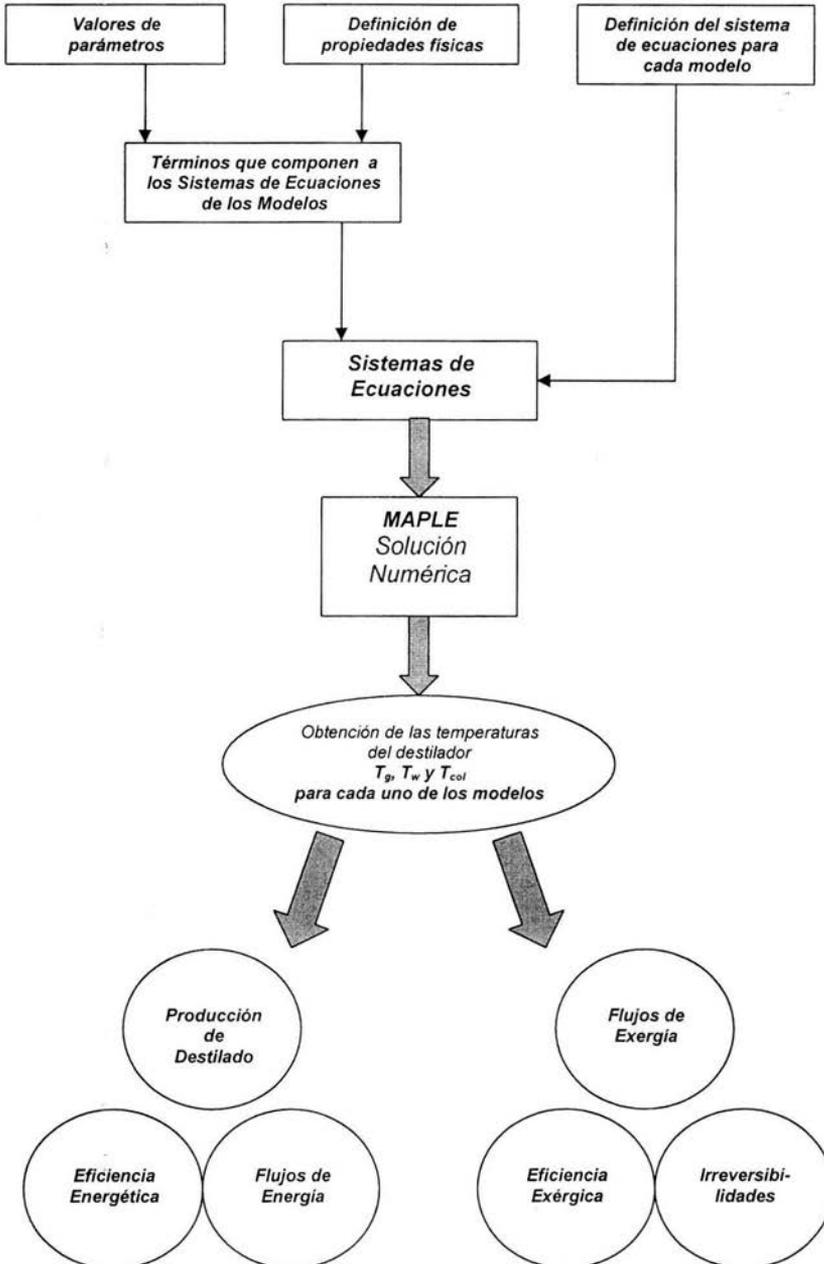
- a) El modelo *Malik* está basado en los resultados de Dunkle (1961) y reportados extensamente por *Malik et al. [29]*.
- b) El modelo efectivo contiene los mismo términos que el modelo *Malik* excepto que los coeficientes de transferencia de calor para la convección natural y la evaporación dependen de las temperaturas del destilador y, por tanto, no son constantes.
- c) El modelo *Hongfei* contiene los términos de convección natural y evaporación obtenidos por *Hongfei et al. [20]*. El término de la radiación interna pertenece a la definición de transferencia de calor en una cavidad. Los coeficientes de transferencia de calor no son constantes porque dependen de la temperatura.
- d) Por último, el modelo cavidad está basado en el modelo *Malik* para la convección natural y evaporación. El término energético y exérgico debido a la radiación interna, al igual que para el modelo *Hongfei* es aquél término utilizado para la radiación interna en una cavidad bidimensional que propone este trabajo. Los coeficientes de transferencia de calor no son constantes porque dependen de la temperatura.

La cuestión que surge de todo este proceso para poder recopilar y comparar información es cuál modelo de los aquí propuestos habrá de arrojar las temperaturas necesarias para utilizarlas en la definición de las producciones de destilado de *Clark* y *Chilton-Colburn*. En realidad, no existen temperaturas correctas para utilizarse en *Clark* y *Chilton-Colburn*, ya que no son temperaturas que provengan de la solución de un sistema de ecuaciones formado para un modelo completo que estudie la convección natural, la radiación interna, la convección forzada, etc. *Clark* y *Chilton-Colburn* definen de manera empírica o semiempírica la producción de destilado según sus propios experimentos y teoría.

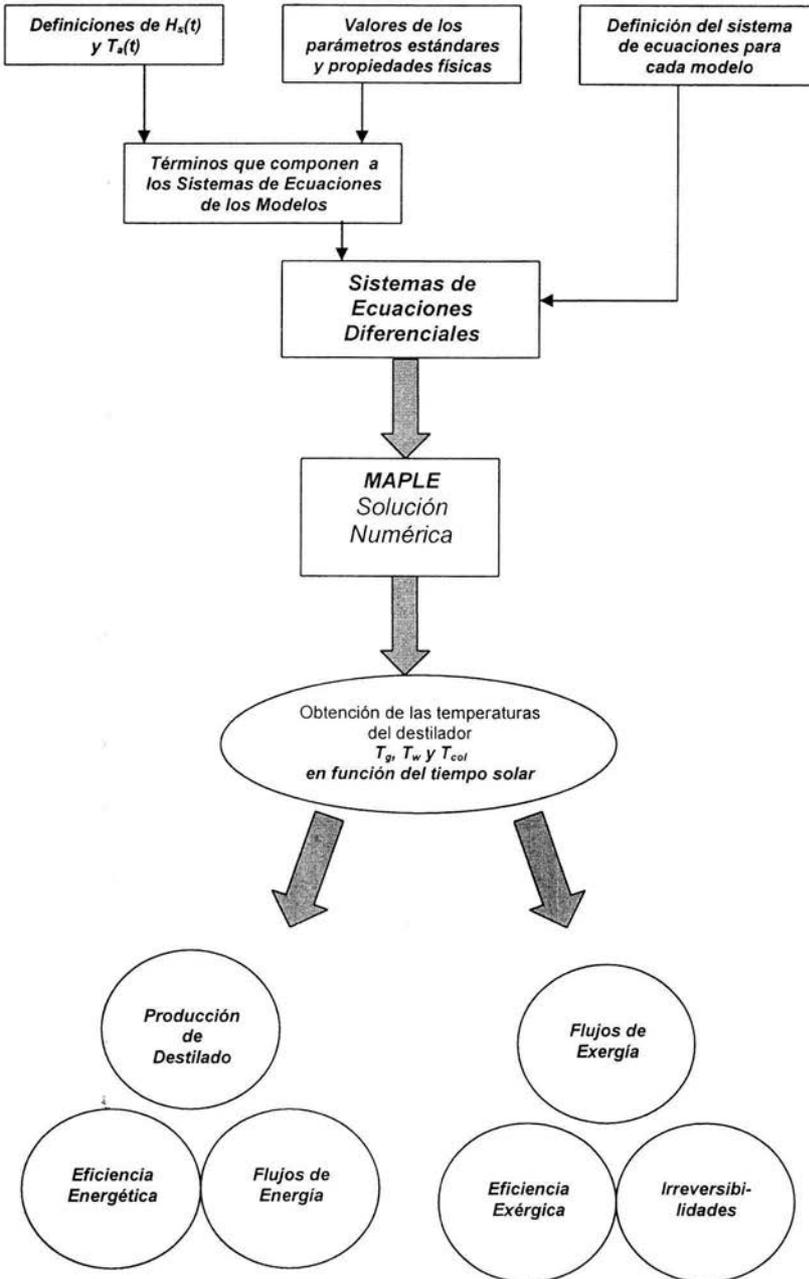
En este trabajo utilizamos las temperaturas producidas por el modelo *Hongfei* para la obtención de todas las definiciones de producción de destilado. Al hacer esto, incurrimos en un error cuyas consecuencias en el resultado son discutibles pero recordemos que este trabajo se trata de un desarrollo teórico de los fenómenos en un destilador solar. Matemáticamente, las temperaturas arrojadas por uno u otro modelo no varían de manera sensible, con excepción de aquellas obtenidas por el modelo *Malik* para algunos parámetros. Encontramos que las diferencias más apreciables entre modelos se producen debido al hecho de que los coeficientes de transferencia de calor para *Malik* son constantes.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES DE UN DESTILADOR SOLAR

RÉGIMEN PERMANENTE



## RÉGIMEN TRANSITORIO



## EXERGÍA DE CADA FENÓMENO DE TRANSPORTE EN UN DESTILADOR

La construcción de las figuras se realizó con el mismo procedimiento de evaluación del comportamiento de las variables de un destilador, es decir, los parámetros que no se evaluaban se mantenían constantes según la tabla 1 en el capítulo 4 mientras que el parámetro de estudio variaba según los valores extremos utilizados en cada análisis.

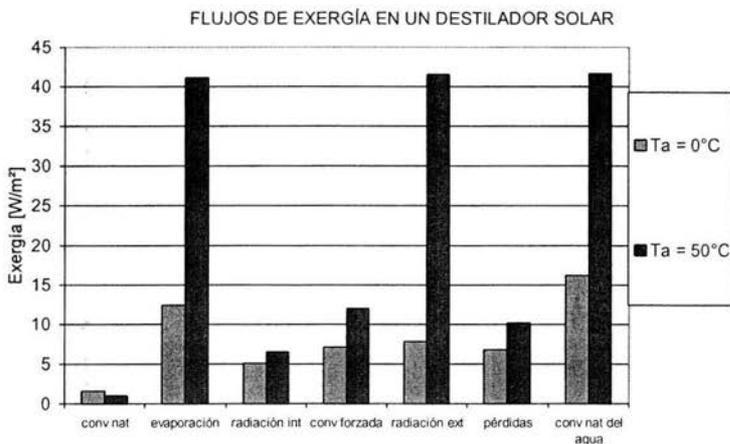


Fig. 37 Comparación entre los flujos exérgicos en un destilador con los valores extremos de  $T_a$ .

La transferencia de calor por evaporación es el mecanismo de transporte en el cual nos interesamos más por estar directamente relacionado con la producción de destilado (si no seguimos el análisis hasta la condensación en la cara interna de la cubierta de vidrio).

Exérgicamente, como podemos ver en la fig. 30, la exergia debida a la evaporación aumenta más de 3 veces cuando la temperatura ambiente va desde los 0 hasta los 50 °C. Notamos que el flujo exérgico que crece más en este rango de temperaturas ambiente es la radiación al exterior con más de 5 veces su valor cuando  $T_a=0^\circ\text{C}$ .

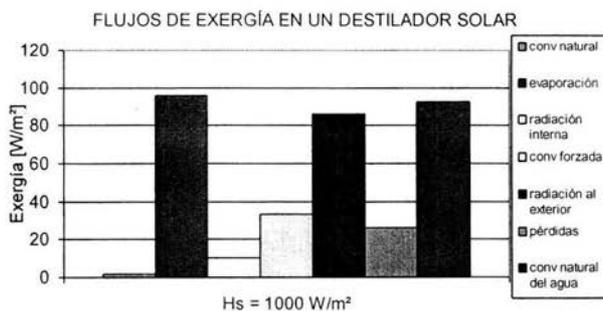
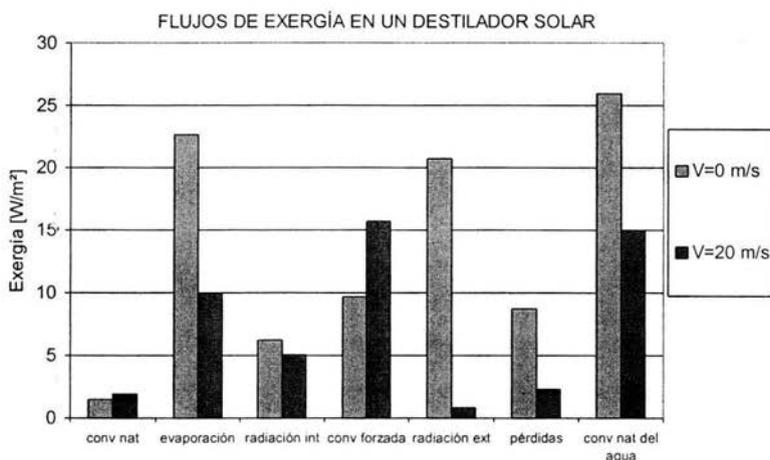


Fig.38 Comparación entre los flujos energéticos de un destilador con  $H_s=1000\text{ W/m}^2$

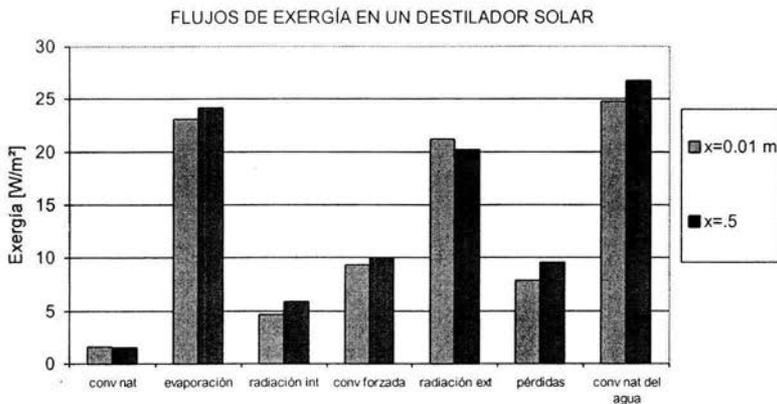
Si pensamos que cuando no existe irradiación solar ( $H_s=0$ ) todos los flujos de exergía son cero, entonces observamos una gran variación entre  $H_s = 0$  y  $H_s = 1000 \text{ W/m}^2$ . Como otros resultados, los mismos de este trabajo y la lógica parecen indicar, la irradiación solar es el parámetro que ejerce mayor influencia en el proceso de transferencia de calor y masa en un destilador. Esto se confirma cuando observamos dos detalles importantes de la fig. 38.

Por una parte, la exergía de la evaporación posee la mayor cantidad exérgica en relación con los demás mecanismos de transferencia de exergía en el destilador. Ningún otro parámetro produce este comportamiento. Por otra parte, la escala del eje de las abscisas es la mayor en todas las gráficas de este tipo, lo que indica que no solamente a altos valores de irradiación solar la evaporación ocupa el primer lugar en cantidad exérgica en comparación con los demás flujos exérgicos, sino que además, este flujo exérgico de evaporación es el mayor que aquellos obtenidos para cualquier otro parámetro.



**Fig. 39** Comparación entre los flujos de exergía de un destilador para los valores extremos de velocidad del viento.

Como apuntaban los resultados anteriores de este trabajo respecto a la exergía en un destilador solar, la velocidad del viento tiene un efecto negativo que disminuye la cantidad de exergía del sistema global de un destilador solar. Para vientos que poseen una velocidad de 20 m/s, la disminución de la exergía en la evaporación es más del doble, mientras que el incremento en la exergía de la transferencia de calor por convección forzada no aumenta más de un 50% de su valor cuando la velocidad del viento es igual a cero. Observamos también una disminución drástica en la exergía de la radiación al exterior, debido a que junto con la convección forzada son los dos mecanismos de transferencia mediante los cuales la exergía se pierde (cuando no se destruye) hacia el medio ambiente y, obviamente, están relacionados. Cuando aumenta la convección forzada, la radiación al exterior comparativamente disminuye y viceversa.



**Fig. 40** Comparación entre los flujos exérgicos de un destilador para los valores extremos de la altura del destilador.

Como podemos observar en la fig. 40 la altura del destilador, según este modelo matemático no ejerce más que una leve, casi inexistente, influencia en la exergia de los mecanismos de transferencia dentro de un destilador solar. Un aumento de 50 veces la altura del destilador no produce más que un aumento casi imperceptible en la exergia de los flujos en un destilador.

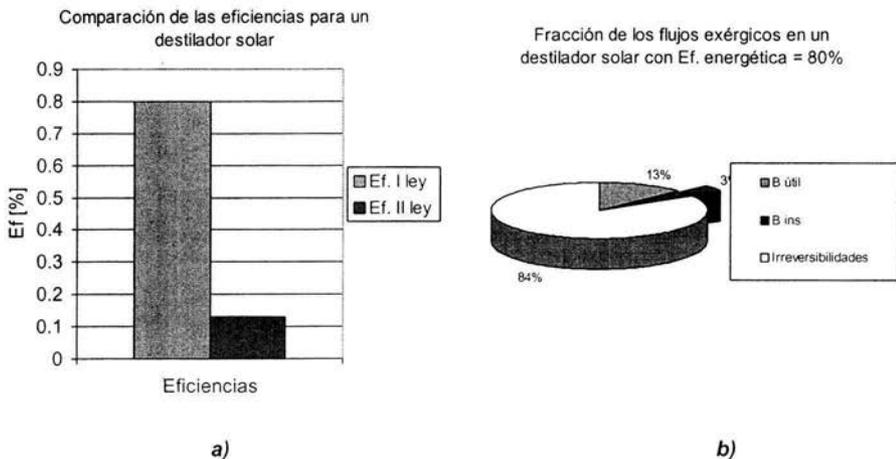
A continuación presentamos un pequeño ejercicio numérico que sirve para hacer la distinción clara entre las eficiencias energéticas y exérgicas de un destilador solar, así como de sus valores tan dispares:

**TABLA 2.** Valores usuales en el fenómeno de destilación solar para encontrar las variables exérgicas y energéticas.

|       |      |                  |           |        |                  |
|-------|------|------------------|-----------|--------|------------------|
| $q_o$ | 200  | W/m <sup>2</sup> | Ex Sun    | 950.93 | W/m <sup>2</sup> |
| $q_s$ | 1000 | W/m <sup>2</sup> | Ex out    | 124.64 | W/m <sup>2</sup> |
| $q$   | 800  | W/m <sup>2</sup> | I sun-col | 795.12 | W/m <sup>2</sup> |
| $T_s$ | 5800 | °C               | Icol-out  | 31.16  | W/m <sup>2</sup> |
| $T_c$ | 80   | °C               |           |        |                  |
| $T_o$ | 25   | °C               |           |        |                  |

|                      |        |                  |                |              |
|----------------------|--------|------------------|----------------|--------------|
| $B_s$                | 950.93 | W/m <sup>2</sup> | <b>Ef ener</b> | <b>0.8</b>   |
| $B_{\text{útil}}$    | 124.64 | W/m <sup>2</sup> | <b>Ef exer</b> | <b>0.131</b> |
| $B_{\text{perdida}}$ | 31.16  | W/m <sup>2</sup> |                |              |
| Irreversibilidades   | 795.12 | W/m <sup>2</sup> |                |              |

Si pensamos que de  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiación solar  $q_s$ , que podrían llegar a la superficie terrestre, el 80% de este calor fuera aprovechado en energía útil para calentar la masa de agua sobre el colector solar  $q$ , y el 20% restante se perdiera hacia el medio ambiente por conducción a través del aislamiento  $q_o$ , entonces, pensando en las temperaturas de los depósitos térmicos como vienen presentados en la TABLA 2, la eficiencia energética y exérgica se presentan en la fig. 41 a). Los flujos de exérgia que abandonan el colector solar se muestran en la fig. 41 b).



**Fig. 41.** a) Comparación entre las eficiencias energética y exérgica para los valores de la tabla 2. b) Fracción de los flujos exérgicos que salen de un colector solar después de recibir una cantidad de exérgia solar.

Notamos que para un 80% de eficiencia de primera ley obtenemos tan solo un 13% de eficiencia exérgica. ¿Porqué? La respuesta está en las temperaturas de los depósitos térmicos. La definición de exérgia para un flujo de calor está definida por 3 parámetros a saber: El flujo de calor  $Q$ , la temperatura del sistema y la temperatura de referencia. Si mantenemos el flujo de calor constante o dentro de un rango usual y pensamos que para la mayoría de las aplicaciones la temperatura de referencia es casi constante, entonces la variable decisiva es la temperatura del sistema. No importa qué tanto flujo de calor podamos transferir, si la temperatura del sistema es cercana a la de referencia, el valor de la exérgia será siempre relativamente bajo. Así, si el colector es incapaz de alcanzar temperaturas cercanas a la del sol (como puede ocurrir en la concentración solar), la eficiencia exérgica-estará limitada.

Para poner más énfasis en este hecho, pensemos que no existen flujos de calor hacia el medio ambiente por conducción a través del aislamiento y que toda la energía solar es aprovechada para calentar la masa de agua sobre el colector. Entonces, los valores de los flujos energéticos y exérgicos son los que aparecen en la TABLA 3.

**TABLA 3.** Valores usuales en el fenómeno de destilación solar para encontrar las variables energéticas y exérgicas.

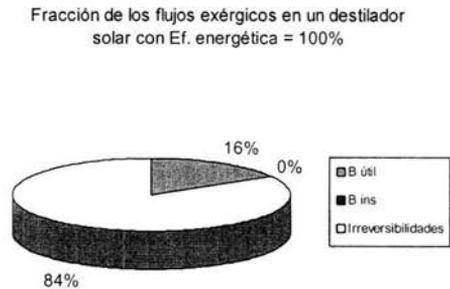
|       |      |                    |           |        |                |
|-------|------|--------------------|-----------|--------|----------------|
| $q_o$ | 0    | $\text{W/m}^2$     | Ex Sun    | 950.93 | $\text{W/m}^2$ |
| $q_s$ | 1000 | $\text{W/m}^2$     | Ex out    | 155.8  | $\text{W/m}^2$ |
| $q$   | 1000 | $\text{W/m}^2$     | I sun-col | 795.12 | $\text{W/m}^2$ |
| $T_s$ | 5800 | $^{\circ}\text{C}$ | Icol-out  | 0      | $\text{W/m}^2$ |
| $T_c$ | 80   | $^{\circ}\text{C}$ |           |        |                |

|       |    |    |
|-------|----|----|
| $T_o$ | 25 | °C |
|-------|----|----|

|                    |               |                  |                |              |
|--------------------|---------------|------------------|----------------|--------------|
| Bs                 | 950.93        | W/m <sup>2</sup> | <b>Ef ener</b> | <b>1</b>     |
| B útil             | 155.8         | W/m <sup>2</sup> | <b>Ef exer</b> | <b>0.163</b> |
| B perdida          | 0             | W/m <sup>2</sup> |                |              |
| Irreversibilidades | <b>795.12</b> | W/m <sup>2</sup> |                |              |



a)



b)

**Fig. 42.** a) Comparación entre las eficiencias energética y exérgica para los valores de la tabla 3. b) Fracción de los flujos exérgicos que salen de un colector solar después de recibir una cantidad de exergía solar.

En este caso, la eficiencia energética es 100% mientras que la eficiencia de segunda ley apenas alcanza el 16%. De aquí se pueden concluir algunas cosas:

- Los valores de la eficiencia energética, efectivamente, no son un indicador adecuado para conocer el aprovechamiento termodinámico de un sistema.
- El hecho de querer calentar una masa de agua mediante un depósito térmico a una temperatura de 5800 K es, obviamente, un desperdicio de exergía.
- El hecho de que no existan pérdidas al medio ambiente no significa, en cuanto a términos exérgicos que el sistema funcione óptimamente. En términos energéticos, la diferencia entre tener pérdidas o no es muy importante, ya que con un aislamiento perfecto, la eficiencia de primera ley es igual a uno.
- Las irreversibilidades en el sistema son independientes de la cantidad de exergía que se aprovecha y de la exergía que se pierde hacia el medio ambiente. Las irreversibilidades solamente dependen del flujo que llega al colector desde el sol, y las temperaturas tanto del sol, del colector y la de referencia.

## 7.2 Comparación con otros resultados

**Malik et al. [29]** reportan los efectos de los parámetros meteorológicos y de diseño del destilador en la producción de destilado. Tal y como definen su balance de energía con los coeficientes de transferencia de calor constantes,  $h_{eff}$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  y  $h_4$ , es imposible evaluar la producción de destilado contra alguno de los parámetros, ya que si variamos los parámetros debemos variar algún coeficiente de transferencia de calor. De tal forma, que suponemos que **Malik et al. [29]** encuentran estos resultados mediante observaciones experimentales y no basados en sus propias suposiciones.

### Temperatura Ambiente

**Malik et al. [29]** reportan que Morse y Read (1968) muestran que un cambio en la temperatura de 26.7 a 37.8 °C causa un incremento en la producción del 11 %, mientras que un cambio de 26.7 a 15.6°C causa un 14 % de disminución en la producción. Según **Malik et al. [29]** también Cooper (1969) concluye que una caída en la temperatura ambiente promedio produce un decremento en la producción de destilado. La explicación es que la temperatura general del sistema aumenta con un incremento en la temperatura ambiente.

Según los resultados de este trabajo, la producción de destilado se incrementa cuando la temperatura ambiente aumenta. Sin embargo, notamos que a medida que la temperatura ambiente aumenta, disminuye la diferencia de temperaturas entre el agua y el vidrio. Una vez más observamos que, teóricamente, una diferencia de temperaturas mayor no implica una producción de destilado mayor. **Malik et al. [29]** explican que aunque se produce un aumento en la diferencia de temperaturas del agua y el vidrio cuando disminuye  $T_a$ , no es suficiente para compensar la caída de la temperatura general del sistema. Además a medida que crece  $T_a$ , la pérdida de energía desde el colector hacia el medio ambiente a través del aislante, disminuye, lo cual produce que se aproveche más energía para calentar el agua salada.

En términos de la exergía, este comportamiento puede explicarse bastante bien. A mayor temperatura general del sistema global, se posee mayor cantidad de exergía, como puede observarse en la fig. 26. Entre mayor diferencia entre las temperaturas del sistema y la temperatura de referencia, la cantidad de exergía aprovechable de ese sistema será mayor. Los resultados obtenidos por **Liley [28]** muestran que la cantidad de exergía en una mezcla de aire-vapor aumenta cuando la temperatura del fluido y su contenido de humedad aumentan. Aunque en este trabajo no se realizó un análisis de exergía en la mezcla de aire-vapor, incluso así, los resultados concuerdan con la realidad según **Liley [28]** y pueden extrapolarse al comportamiento de la exergía del colector, la masa de agua y la cubierta de vidrio.

Como se pudo notar no se dijo nada sobre la temperatura del agua salada que debe alimentarse continuamente si se piensa que debe existir una masa constante. Dentro de las suposiciones generales realizadas en este trabajo, la cantidad de agua salada se mantenía constante en cualquier momento con el fin de evitar que existiera el término de cambio de masa por unidad de tiempo en el régimen transitorio

$$T \frac{dM}{dt}$$

Además, si pensamos que no existe ninguna fracción de energía proveniente del colector que se utilice para calentar el agua desde la temperatura de entrada al destilador hasta la temperatura uniforme que adquiere dentro del destilador y que depende de la hora solar, entonces significa que entra a la temperatura del agua dentro del destilador. Esto sería posible en la práctica de dos maneras: con una alta temperatura ambiente que caliente el depósito de donde viene el agua salada o mediante métodos activos de calentamiento del agua como pueden ser los colectores solares planos, el empleo de calor residual, etc. [16, 18, 21, 26, 30].

### *Irradiación Solar*

La irradiación solar es, tal vez, el parámetro más importante en el diseño de un destilador solar y el más influyente en el valor de la producción de destilado. Los resultados, tanto de los demás trabajos como éste, apuntan a que entre mayor sea el valor de la intensidad solar, mayor resulta la masa de agua evaporada. Este parece ser el comportamiento lógico de un destilador solar y los modelos propuestos predicen correctamente este comportamiento.

Sin embargo, observamos nuevamente que la diferencia de temperaturas  $T_w-T_g$  no crece indefinidamente a medida que aumenta  $H_s$ , al menos matemáticamente cuando hacemos que  $h_{ev}$  dependa de las temperaturas del destilador. Concluimos que la producción de destilado no se comporta, al menos en algunos casos, directamente proporcional a  $\Delta T$  y que el comportamiento de  $h_{ev}$  afecta sensiblemente el valor final del destilado.

Con respecto a la exergía, a medida que crece la irradiación solar, la exergía en el destilador aumenta, obviamente, ya que la radiación solar es la única fuente de exergía del destilador. Sin embargo, observamos que incluso cuando las irreversibilidades en el colector aumentan, la exergía del sistema aumenta igualmente, cuando toda la teoría parece indicar que debido a que las irreversibilidades son destructoras de exergía, un aumento en las irreversibilidades significa una disminución en la exergía de los sistemas. Dado este caso, tenemos que suponer que la tasa a la cual se destruye exergía en un colector es menor que la exergía que gana el colector, cuando la irradiación solar aumenta.

### *Espesor del aislamiento*

Trabajos como los de **Almanza et al. [4]** y **Rubio [36]** proponen que para diseños preliminares el uso de aislamiento no es necesario. Otros autores como **Aboul-Enein et al. [1]** obtienen experimentalmente el comportamiento de la producción de destilado en función del espesor del aislamiento. Sus resultados muestran que la producción de destilado aumenta monótonamente hasta que se vuelve independiente del aislamiento. En general, todos los trabajos muestran que la producción de destilado aumenta con el incremento en el espesor del aislamiento, sin embargo, lo importante es conocer cuál es el espesor de aislamiento óptimo que cumpla con su objetivo de impedir pérdidas hacia el exterior además de ser práctico y económico en la operación de un destilador. Según el análisis exérgico, este parámetro no puede considerarse despreciable incluso para los diseños más básicos, ya que si no existe aislamiento, la mayor parte de la exergía que llega al colector se pierde hacia el medio ambiente por conducción antes de ser transferida a la masa de agua. El aislamiento se vuelve aún más importante en la producción nocturna de destilado, ya que mantener la masa de agua a una temperatura lo más elevada posible depende tanto del aislamiento como de la cantidad de masa de agua.

### *Presión Total*

Como se mencionó en el capítulo 5 y 6, la Presión Total es un parámetro que no está bien modelado matemáticamente en los destiladores solares. Principalmente, los experimentos usuales en destiladores no consideran un cambio en la condiciones de presión dentro del destilador, salvo la relación biunívoca dada por la ley de Dalton, donde  $P_w + P_{aire} = P_{total}$ . Para la mayoría de las condiciones a las cuales se llevan a cabo los experimentos,  $P_{total}$  es una constante igual a  $P_{atm}$  y son los valores de  $P_w$  y  $P_{aire}$  los que se mueven a medida que la temperatura de la masa de agua aumenta. Para este modelo matemático, el valor de  $P_{aire}$  queda definido numéricamente por los valores de  $P_{atm}$  y  $P_w$ ; de tal forma que se controla la relación de aire y vapor con la temperatura de la masa de agua,  $T_w$ .

Si el análisis de un destilador no involucra cambios de presión en la cavidad del destilador, el modelo refleja adecuadamente los fenómenos físicos de la destilación solar. Cuando se logra vacío en la cavidad de destilación, ocurren algunas modificaciones en el transporte de masa y energía como reportan **Al-Hussaini et al. [3]**. Según estos autores, el fenómeno de la convección natural desaparece, debido a que no existe aire dentro de la cavidad. Precisamente, el modelo matemático

indica que existe presión debida a la masa de aire aún cuando la presión total disminuya. En cambio, en la realidad, cuando la presión total disminuye, la masa de aire es extraída y la única sustancia que existe en la cavidad de destilación es el vapor de agua. Al existir menos presión, la masa de agua se evapora a una mayor velocidad debido a que no existe la resistencia térmica producida por el aire (gases no condensables) además de que la temperatura de saturación del vapor disminuye, provocando que se necesite un menor calentamiento de la masa de agua para producir una cantidad determinada de destilado.

Concluimos que la ley de Dalton no alcanza a modelar adecuadamente el fenómeno de destilación solar cuando se disminuye la presión dentro del destilador debajo de la presión atmosférica. Es necesario hacer uso de otras herramientas matemáticas y conceptos físicos más complejos que modelen con precisión la presión negativa en un destilador. **Al-Hussaini et al. [3]** propone una fórmula empírica para predecir la cantidad de destilado en este tipo de destiladores al vacío.

#### *Nubosidad*

La nubosidad es un parámetro que propone este trabajo, solamente para medir su influencia en las variables de un destilador. Un valor alto de nubosidad significa una temperatura aparente de la bóveda celeste menor, un cielo más frío, hacia donde se emite radiación desde la cubierta de vidrio. En realidad, bien pudimos haber escogido como parámetro la temperatura aparente de la bóveda celeste,  $T_{sky}$ , pero nos pareció más explícita la Nubosidad para el estudio de los variables en el destilador.

A medida que crece este parámetro que significa, paradójicamente la claridad del cielo, la producción de destilado y la eficiencia exérgica disminuyen proporcionalmente. Este resultado parece estar de acuerdo con la realidad si pensamos que temperaturas menores del cielo implican una mayor emisión de radiación desde la cubierta de vidrio. Sin embargo, valores pequeños de nubosidad implicarían un cielo nublado y cálido. En estos casos habría que estimar la relación que puede existir entre este parámetro y la irradiación solar, que por supuesto depende de las condiciones climáticas. Más allá de este tipo de suposiciones, es evidente que la irradiación solar es un parámetro mucho más influyente en las variables energéticas y exérgicas del destilador que la nubosidad, por lo que podríamos despreciar los efectos de valores altos de la nubosidad si a cambio tenemos altos índices de irradiación solar.

#### *Velocidad del viento*

Según **Malik et al. [29]**, Cooper concluye que de 0 a 2.15 m/s en la velocidad del viento, el destilado aumenta un 11.5%, mientras que de 2.15 hasta 8.81 m/s, el incremento es de tan sólo 1.5%. Por su parte, **El-Sebaili et al. [17]** realiza un trabajo con el fin de esclarecer contradicciones suscitadas por los resultados de trabajos como los de Garg, Cooper, Malik, Yeh y Chen entre otros. Experimentalmente, **El-Sebaili et al. [17]** concluye que la producción de destilado aumenta a medida que la velocidad del viento aumenta. A altas velocidades la producción de destilado es independiente de la velocidad del viento. Además cuando la velocidad del viento aumenta, la diferencia de temperaturas aumenta. Por su parte, **Almanza et al. [4]** reportan que existe un aumento en la producción hasta aproximadamente una velocidad de 5 m/s, pasando esta velocidad la producción de destilado disminuye hasta volverse independiente de la velocidad del viento.

Según los resultados de este trabajo, el viento disminuye la producción de destilado para cualquier valor de la velocidad. A bajas velocidades del viento, la disminución de la producción de destilado es mayor que a altas temperaturas, donde parece tomar un comportamiento asintótico. Esto contradice algunos resultados como los de Cooper y **El-Sebaili et al. [17]**. La contradicción puede deberse al proceso que seguimos en la obtención de los resultados para este trabajo. La obtención de temperaturas se efectúa para cada valor de la velocidad del viento, que es nuestro parámetro. De tal forma, que para cada nuevo valor de  $V$ , encontramos una terna de temperaturas del destilador ( $T_g$ ,  $T_w$  y  $T_{col}$ ).

Debemos tomar en cuenta que, como hemos visto, existen algunos trabajos con respecto a la influencia del viento en las variables del destilador cuyos resultados se contradicen. Por un lado, la explicación de un aumento en la producción de destilado se debe a que la diferencia de temperaturas entre la masa de agua y la del vidrio aumenta a medida que la temperatura del vidrio disminuye cuando la velocidad del viento aumenta. Por otra parte, como la velocidad del viento afecta directamente a la disminución de las temperaturas en el destilador, la producción de destilado y la eficiencia exérgica disminuyen. Según este trabajo, el efecto de la disminución de las temperaturas es mayor al efecto del aumento de la diferencia entre  $T_w$  y  $T_g$  y por tanto, la producción de destilado disminuye hasta un cierto valor donde se vuelve independiente de la velocidad del viento. Desde el punto de vista exérgico, los resultados de ese trabajo parecen tener sentido ya que cualquier efecto que conduzca a la disminución de las temperaturas influye directamente en una disminución de la capacidad exérgica de ese sistema.

Como podemos observar, los resultados de este trabajo apuntan a que no necesariamente un incremento en la diferencia de temperaturas  $T_w-T_g$  producen un incremento en la producción de destilado. Esto quiere decir que el coeficiente de transferencia de calor por evaporación influye de manera evidente, a veces contraria al comportamiento de  $\Delta T$ .

#### *Altura del destilador*

Existen pocos trabajos que investiguen los efectos de la altura del destilador como parámetro influyente en el fenómeno de destilación solar. Esto puede deberse a que el modelo para la convección natural propuesto por **Malik et al. [29]** implica que la transferencia de calor por convección natural es independiente de la altura del destilador.

**Porta [33]** muestra la influencia de la producción de destilado con respecto a la altura del destilador con base en resultados obtenidos experimentalmente. En su trabajo, **Porta [33]** utiliza seis destiladores con distintas alturas que colocan durante 3 días consecutivos en operación. Los resultados de estas observaciones no parecen tener un patrón lógico, ya que a lo largo del rango de alturas empleadas obtienen fluctuaciones en la producción de destilado. En su trabajo, Porta no comenta a qué puede deberse esta diferencia de cantidad de destilado producido. Sin embargo, menciona que las celdas convectivas más pequeñas que se producen con alturas bajas del destilador son responsables de una mayor transferencia de masa, en comparación con celdas convectivas más grandes y menos veloces, como supone que ocurre en destiladores de gran sección.

Por su parte, **Rubio [36]** obtiene experimentalmente el perfil de temperaturas en un destilador entre la masa de agua y la cubierta de vidrio (pared caliente y pared fría, respectivamente). Sus resultados muestran poca dependencia del coeficiente de transferencia de calor por convección natural,  $h_{cw}$  con la temperatura de referencia, al igual que este trabajo (véase Capítulo 3). Es decir, como han concluido otros autores, como **Baum et al. [6]**, la región media de la masa de aire-vapor no contribuye significativamente al fenómeno de transporte de energía y masa. Sin embargo, esto no aclara cuál sería la altura del destilador óptima.

Los resultados obtenidos por este trabajo indican que a medida que crece la altura en un destilador la producción de destilado aumenta a un ritmo cada vez menor a medida que la altura adquiere valores mayores. Este resultado tiene sentido si pensamos que el número de Grashof que modela la convección natural, depende del cubo de la altura del destilador. Matemáticamente, estos resultados parecen tener sentido desde el punto de vista de la convección natural, pero también el modelo está limitado en relación a los demás parámetros, ya que podemos obtener resultados numéricos válidos aun cuando supongamos que la altura del destilador es menor que la profundidad del agua, lo cual no tiene sentido práctico. De ahí que los resultados de este trabajo sobre la altura del destilador deben tomarse cautelosamente.

Pensamos que debe existir algún tamaño de celda convectiva característico para una relación de aspecto dada o incluso para un volumen del destilador determinado. Los resultados de **Porta [33]** muestran que existe una fluctuación en las producciones de destilado para distintas alturas del

destilador. Esto parece indicar que existen alturas del destilador a las cuales se inhiben las estructuras de flujo convectivo natural dependiendo del área de evaporación del destilador. El modelo matemático está alimentado con las ecuaciones básicas de la convección natural utilizando números adimensionales relacionados con este tipo de transporte, pero no se toman en cuenta parámetros como la velocidad de la mezcla aire-vapor en la cavidad de destilación debido a que la mezcla de aire-vapor no se considera como sistema de estudio en este trabajo. Incluso si se considerara, sería necesario un análisis numérico donde las ecuaciones de Navier-Stokes modelaran el problema con el fin de conocer las variables hidrodinámicas y termodinámicas que ocurren en un destilador. Este tipo de análisis fue realizado por **Djebedjian et al. [15]** con resultados interesantes respecto a la forma de las estructuras convectivas, entre los que destacan la importancia de las dimensiones del destilador en el fenómeno de la convección natural.

#### *Profundidad del agua*

**Malik et al. [29]** indican que Cooper (1969) estudió el efecto de la profundidad del agua en la producción de destilado. Sus resultados están en relación con la capacidad térmica del agua y el aislamiento. Los resultados muestran que para un destilador con aislamiento existe una caída en la producción de destilado gradual hasta aproximadamente los 10 cm. de profundidad del agua, después este parámetro parece no tener una influencia sobre la producción. Para un destilador sin aislamiento, la producción de destilado casi no depende de la profundidad del agua. Los resultados apuntan a que para producir la máxima cantidad posible de destilado diurno, la profundidad del agua debe ser la mínima posible. Cuando anochece la única fuente de energía que alimenta el sistema es precisamente su capacidad térmica por lo que la producción nocturna depende en gran parte de la cantidad de agua en el destilador. Estos resultados concuerdan con los obtenidos experimentalmente por Garg y Mann (1976), Lawrence et al. (1990) y Yadav y Prasav (1991) según reportan **Aboul-Enein et al. [1]**. Existen muchos otros autores [17], [42], [26], [11], [12] que no consideran que la ganancia de energía y, decimos nosotros también, de exergía, se debe principalmente a la transferencia de calor entre el colector y la masa de agua, es decir que la ganancia de energía en la masa de agua se debe enteramente a la capacidad de absorción de la radiación solar por el agua. En este trabajo encontramos que la profundidad del agua aparece únicamente en el fenómeno de convección natural en la masa de agua, en la transferencia de calor entre el colector y el vidrio.

Según la definición de  $M$  que multiplica al término  $dT/dt$ , la profundidad del agua  $z$ , es el único parámetro que representa a la masa de agua en el destilador, y además la única que podría variar en el tiempo. Si vemos la definición de las irreversibilidades en el agua, entre mayor sea la masa de agua las irreversibilidades disminuirán, aunque habría que calcular qué tanta agua es necesaria para lograr una reducción significativa de las irreversibilidades en el agua, que como vimos no poseen un valor importante. Según los resultados de este trabajo, la variación de la profundidad del agua genera un comportamiento extraño en las variables exérgicas y energéticas del destilador. Su influencia se siente en la convección natural del agua y por lógica deberíamos de tener una profundidad importante para que se incremente este calor transmitido del colector a la masa de agua. Sin embargo, como se sabe experimentalmente la profundidad del agua debe ser la mínima posible para lograr un calentamiento de esta agua en el menor tiempo posible y lograr tener condensado desde los primeros instantes en que se recibe irradiación solar. Pensamos que el modelo está limitado para modelar un destilador solar con respecto a este parámetro.

#### *Ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio*

**Almanza et al. [4]** reportan que para un destilador somero el ángulo de inclinación influye en la producción de destilado a partir de los 15° aproximadamente, decreciendo a medida que el ángulo de inclinación aumenta. Además sugieren que el ángulo de inclinación de la cubierta del vidrio debe ser el valor en grados de la latitud de la zona en la cual se ha de montar el destilador. Ha sido demostrado por otros investigadores que el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio no tiene influencia en la producción en las épocas más calurosas del año como lo es el verano, mientras que para la época invernal, de menor irradiación solar se sugieren ángulos de inclinación solar de hasta 50° o el uso de reflectores para incrementar la cantidad de radiación solar que llega al destilador solar.

Según reportan **Malik et al. [29]**, Cooper (1969) encontró que la producción de destilado disminuye cuando la inclinación toma valores de 0 a 45 °, crece alrededor de los 60 y vuelve a disminuir después de los 75°. En este mismo trabajo **[29]**, mencionan que existen resultados que concluyen en que la inclinación de la cubierta de vidrio no tiene efecto en la producción de destilado.

En este trabajo no hemos utilizado al ángulo de inclinación de la cubierta del vidrio como parámetro de estudio, ya que no interviene en ninguno de los modelos de los fenómenos de transporte de masa y energía en el destilador. Los trabajos que hablan de la inclinación de la cubierta como parámetro han obtenido sus resultados experimentalmente.

### 7.3 Discusión de resultados

La diferencia con algunos de los resultados reportados por diferentes investigadores puede deberse al enfoque del análisis efectuado en este trabajo. Como reportan los experimentos de algunos investigadores, frecuentemente son las temperaturas del destilador, los parámetros del experimento. Es decir, para estudiar los mecanismos de transferencia en los destiladores en régimen permanente controlan la temperatura del agua, del vidrio o la diferencia entre éstas y obtienen la producción de destilado en esas condiciones particulares.

Para condiciones dependientes del tiempo, registran las producciones de destilado cada cierto tiempo mientras el destilador funciona con la energía radiante del Sol. En este trabajo, las variables del fenómeno en un destilador solar son las temperaturas del colector, del agua y del vidrio. De acuerdo al algoritmo, los parámetros geométricos, climáticos o termodinámicos son los que producen los valores de las variables, según los balances de energía y el análisis de exergía propuesto anteriormente. De ahí que algunos resultados no se asemejen con los resultados experimentales de algunos investigadores.

Definitivamente, los resultados más complicados para su obtención y su interpretación es la del análisis exérgico en régimen transitorio. Como se dijo al principio del capítulo 6, los análisis de exergía comúnmente se realizan en régimen permanente, por lo que el término que contiene a la derivada de la temperatura con respecto del tiempo se omite en la mayoría de las ocasiones. Solamente en bibliografía especializada en el tema de la minimización de la entropía, en los capítulos de almacenamiento de exergía o régimen transitorio, aparece este término según el tipo de problema.

## 8 CONCLUSIONES

- Los análisis de exergía son una herramienta valiosa para el estudio de sistemas termodinámicos tan complejos como lo es un destilador solar. Los resultados de los análisis de segunda ley apuntan a que la mayor parte de la exergía que llega con la radiación solar a la superficie terrestre es destruida en el colector solar. Las irreversibilidades en el colector constituyen el foco más grande de exergía destruida en un destilador solar. En todo caso, la atmósfera constituye también un destructor inevitable de exergía donde su eficiencia exérgica depende en su mayor parte en el ángulo de incidencia de la radiación solar. La causa principal de las irreversibilidades se deben a la diferencia de temperaturas tan grandes entre la temperatura de la fuente de la cual se recibe la exergía, el Sol, y las temperaturas tan bajas conseguidas por la absorción de la energía radiante en un colector solar plano. El hecho de que un colector posea temperaturas cercanas a la temperatura de referencia se traduce en cantidades limitadas de exergía que posee el colector.
- Se encuentran marcadas diferencias entre los distintos modelos matemáticos propuestos por este trabajo que intentan predecir el funcionamiento de un destilador solar para algunos parámetros. Entre las diferencias más notorias está la diferencia de temperaturas  $T_w - T_g$  tan altas que llega a adquirir el modelo *Malik* cuando la irradiación solar es máxima en comparación con diferencias de temperatura moderadas que resultan de los demás modelos. Todos los modelos que no consideran a los coeficientes de transferencia de calor como constantes en el rango de temperaturas (*Hongfei*, *efectivo* y *cavidad*), poseen un valor de  $T_w - T_g$  moderado con respecto a todos los parámetros estudiados. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por *Voropoulos et al. [44]* quienes encuentran que, a lo largo de un día, la diferencia de temperaturas no llega a ser mayor a  $12^\circ$ , siendo, la mayor parte del tiempo mucho más baja que este valor. Sin embargo, existen muchas coincidencias en la mayoría de los resultados arrojados por cada uno, como lo es la pequeña diferencia en todos los casos entre la temperatura del colector y la temperatura del agua,  $T_{col} - T_w$ .
- Energética y exérgicamente, la optimización de las variables de un colector se logra cuando los valores de la irradiación solar y la temperatura ambiente son los máximos posibles, lo cual está de acuerdo con *Akinsete et al. (1979)* según mencionan *Malik et al. [29]*. Podemos agregar a estas condiciones, el espesor del aislamiento, ya que para el análisis exérgico resulta ser un parámetro muy influyente.
- Sobre el parámetro presión total, el modelo matemático es incapaz de reproducir adecuadamente la realidad del fenómeno de la destilación solar a presiones menores a la presión atmosférica.
- Uno de los resultados importantes de este trabajo es hacer notar que la producción de destilado no es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas  $T_w - T_g$  para los modelos distintos al de *Malik* (propiedades físicas en función de las temperaturas). *Malik et al. [29]* y *Porta [33]* muestra que la masa evaporada no solamente está relacionada con la diferencia de temperaturas entre el agua salada y la cubierta de vidrio sino también con el valor de la temperatura del agua. Esto no quiere decir que una mayor  $T_w - T_g$  no produce una mayor cantidad de destilado, sino que a medida que un parámetro cambia, la producción de destilado no es proporcional a  $T_w - T_g$ . Recordemos que estos son resultados teóricos para el modelo *Hongfei* que requieren de confirmación experimental.
- La teoría que modela el fenómeno de convección natural es insuficiente para poder predecir los resultados de las variables energéticas y exérgicas en un destilador. Consideramos que debe tomarse en cuenta el efecto de las dimensiones del destilador, concretamente la relación de aspecto como un parámetro de estudio más útil para la obtención de resultados más concluyentes y acertados.

- Matemáticamente, el ángulo de inclinación de la cubierta del vidrio podría intervenir en el cálculo del área de evaporación y formular con respecto al área del colector un modelo de transferencia de calor por radiación interna distinto a los que se conocen. Sin embargo, para algunas condiciones resulta innecesario su conocimiento en los destiladores someros, con la salvedad de que dicho ángulo debe ser calculado para que la masa de agua condensada fluya sin goteo hacia el canal de recolección.
- En todos los casos donde los costos lo permitan, debe colocarse aislamiento en la base de los destiladores para obtener un óptimo desempeño energético y exérgico. El espesor de este aislamiento debe ser al menos de 5 cm dependiendo de su conductividad térmica y el criterio práctico que se emplee en cada caso.
- Según los resultados de este trabajo, la temperatura más alta que adquiere el destilador está cerca de los 90 °C a las 7 horas de haber salido el sol con una irradiación solar máxima de 1000 W/m<sup>2</sup>. Se han reportado rangos de temperatura del agua que van desde los 45 hasta los 80 °C [33], [41], y [44], para destiladores someros, por lo que concluimos que los modelos sobreestiman valores para la temperatura del agua  $T_w$ . La diferencia de temperaturas entre la masa de agua y el vidrio ocurre una hora después siendo ésta aproximadamente igual a los 40 °C (Malik).
- El modelo lineal de Malik produce valores de destilado más cercanos a las observaciones experimentales en comparación con los valores producidos por el modelo no lineal (efectivo). En cambio, la diferencia de temperaturas entre el agua y el vidrio  $T_w - T_g$  para Malik es exageradamente alta, producido por los coeficientes de transferencia de calor constantes. Entonces, para algunas variables el modelo Malik representa con adecuada precisión la realidad experimental. Sin embargo para modelar otras variables, la suposición de coeficientes de transferencia de calor constantes es inadecuada.

### 8.1 Investigación a desarrollar

En lo referente a los modelos matemáticos en destiladores pensamos que queda mucha tarea por lograr que la realidad tan compleja de los efectos termodinámicos y de mecánica de fluidos en un destilador solar sea predicha de manera más exacta y sencilla. Existen algunos acercamientos a modelos sencillos que predicen las variables de un destilador teniendo como parámetros a la irradiación solar y la temperatura ambiente [41] y [42]. Sin embargo parece difícil la formulación de un modelo que tenga como entradas todos los parámetros de un destilador sin que el manejo matemático se complique demasiado. Además la naturaleza periódica e incluso caótica de la irradiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento hacen que su modelado dependa de la zona geográfica y la época del año.

Pensamos que debe de homogeneizarse de alguna manera la metodología experimental en la investigación de destiladores solares con el fin de obtener resultados reproducibles bajo las mismas condiciones. La mayoría de las observaciones experimentales se realizan con equipos que varían mucho según el tipo de investigación y esto conduce a la formulación de un número de modelos que intentan predecir las variables de un destilador igual al número de experimentos. Como las características de los destiladores dependen de los recursos económicos que se dispongan tanto en laboratorio como en campo, muchas veces los experimentos se desarrollan con los materiales del destilador que se tengan a mano, así como también se realicen ingeniosos modos de poner en funcionamiento un destilador. Sin embargo, recordemos que la mayoría de las correlaciones que se tienen hoy en día es empírica y funcionan lo suficientemente bien como para proseguir en la línea experimental para recopilar más información sobre la fenomenología de un destilador. En este sentido, la teoría ha sido superada ampliamente y a veces sólo resta ajustarse al rumbo que indican las observaciones experimentales.

Debemos partir de una base incierta de que el clima afecta el funcionamiento del destilador solar y el clima no ha podido ser modelado con exactitud para la predicción de sus propias variables.

## 8.2 Sugerencias para el diseño

Más allá de que la expresión matemática completa de los fenómenos físicos que ocurren en un destilador solar es extremadamente compleja, es posible agregar otros términos que modelen con mayor fidelidad cada uno de los mecanismos de transporte en un destilador.

Un análisis más formal de la radiación en cavidades (múltiples reflexiones) podría arrojar resultados interesantes, sobre todo en el estudio de destiladores solares a bajas temperaturas. Existe poco desarrollo teórico y experimental en el ámbito de la radiación solar, de hecho no existen modelos de radiación interna y externa distintos de los de **Malik et al. [29]**, salvo la propuesta en este trabajo (cavidad). Nuevas correlaciones para el cálculo de la radiación interna y externa, ya sea por el fenómeno de reflexión como el de emisión de radiación en los cuerpos sólidos o medios participantes pueden modelar con mayor precisión este tipo de transferencia de calor.

Con respecto al estudio de destiladores a bajas presiones, debe tomarse en cuenta que el calor latente del agua además de depender de la temperatura, depende de la presión. Este es solo una propiedad física que ejemplifica que un modelo que intente predecir las variables del destilador a bajas presiones debe considerar que algunas propiedades físicas del aire y del agua varían con la presión.

De acuerdo a los resultados quedan aún muchos puntos inconclusos en la solución de modelos sobre destiladores solares. Los principales retos están en descubrir qué parámetros son realmente indispensables para el funcionamiento del destilador y cómo representarlos matemáticamente de la forma más fiel posible de acuerdo a los resultados de la experimentación.

Un diseño óptimo de un destilador solar debe ser aquél que para cualquier condición climática se tenga la mayor producción de destilado. Como existen parámetros que no pueden ser controlados, deben ser aprovechados al máximo siguiendo las pautas que proporciona la bibliografía incluyendo este trabajo.

## 8.3 Recomendaciones sobre la teoría

A medida que se intente predecir con mayor precisión las variables de un destilador, el manejo matemático requerirá de una mayor capacidad de almacenamiento de datos, velocidad de cálculo y presentación de los resultados. Ésta fue una de las limitaciones de este trabajo, el empleo de herramientas de cálculo no muy apropiadas para la cantidad y el tipo de operaciones. Cabe discutir si los resultados existentes en destiladores solares son ya suficientes para establecer con seguridad uno o varios modelos de acuerdo a los parámetros o variables más comunes o que presenten resultados más satisfactorios.

## 9 REFERENCIAS

1. **Aboul-Enein, S., El-Sebaili, A. A. and El-Bialy, E.**, Investigation of a Single-Basin Solar Still with Deep Basins, *Renewable Energy*, Vol. 14, Nos. 1-4, pp. 299-305, 1998.
2. **Adhikari, R. S., Kumar, A. and Kumar, A.**, Estimation of Mass-Transfer Rates in Solar Stills, *International Journal of Energy Research*, Vol. 14, pp. 737-744, 1990.
3. **Al-Hussaini, H. and Smith, I. K.**, Enhancing of Solar Still Productivity Using Vacuum Technology, *Energy Conversion Management* Vol. 36, No. 11, pp. 1047-1051, 1995.
4. **Almanza S. R. y Muñoz G. F.**, *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional, México, 1994.
5. **Anaya, D. A. y Rivero, R. R.**, Aplicación del Análisis Exérgico para la Optimización del Uso de la Energía en Plantas Industriales, *Ingeniería Química*, Año XXXI, Vol. 11, IMP.
6. **Baum, V. A. y Bairamov, R.**, Heat and Mass Transfer Processes in Solar Stills of Hotbox Type, *International Journal of Solar Energy*, Vol. 8, No. 3, pp. 78-82, 1964.
7. **Bejan, A.**, *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.
8. **Bejan, A.**, *Entropy Generation through Heat and Flow*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
9. **Bejan, A.**, *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
10. **Bosnjakovic, F.**, *Technical Thermodynamics*, Holt, Rinehart and Winston, Third Edition, New York, 1960.
11. **Bosnjakovic, F.**, *Solar Collectors as Energy Converters*, McGraw Hill, 1979.
12. **Cervantes de Gortari, J. G.**, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Fondo de Cultura Económica, México, 1999.
13. **Clark, J. A.**, The Steady-State Performance of a Solar Still, *Solar Energy* Vol. 44, No. 1, pp. 43-49, 1990.
14. **De Vos, A. and Van Der Wel, P.**, Endoreversible Models for the Conversion of Solar Energy into Wind Energy, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 17, pp. 77-89, 1992.
15. **Djebedjian, B. and Rayan, M. A.**, Theoretical Investigation on the Performance Prediction of Solar Still., *Desalination* 128, 2000.
16. **Dutt, D. K., Rai, S. N. and Tiwari, G. N.**, Thermal Modelling of High Temperature Distillation, *Energy Conversion Management* Vol. 28, No. 2, pp. 151-159, 1988.
17. **El-Sebaili, A. A.**, Effect of wind speed on some designs of solar stills, *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, pp. 523-538, 2000.

18. **Goosen, M. F. A., Sablani, S. S., Shayya, W. H., Paton, C. And Al-Hinai, H.,** Thermodynamic and Economic Considerations in Solar Desalination, *Desalination* 129, pp. 63-89, 2000.
19. **Gribik, J. A. and Osterle, J. F.,** The Second Law Efficiency of Solar Energy Conversion, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 106, 1984.
20. **Hongfei Z., Xiaoyan Z., Jing Z., Yuyuan W.,** A Group of Improved Heat and Mass Transfer Correlations in Solar Stills, *Energy Conversion and Management*, 2001.
21. **Howe, E. D. and Tleimat, B. W.,** Fundamentals of Water Desalination, *Solar Energy Engineering*, Academic Press, N. Y., pp. 431-464, 1977.
22. **Incropera, F. P. and DeWitt, D. P.,** Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
23. **Kestin, J.,** Availability: the concept and associated terminology, *Energy* 5, pp. 679-692, 1980.
24. **Koroneos, C., Spachos, T. and Moussipoulos, N.,** Exergy Analysis of Renewable Energy Sources, *Renewable Energy* 28, pp. 295-310, 2003.
25. **Kreith, F. and Kreide, J. F.,** Principles of solar engineering, Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1978.
26. **Kudish, A. I.,** Water Desalination, Solar Energy in Agriculture, B.F. Parker edition, Elsevier Science, Amsterdam, Chapter 8, pp. 255-290, 1996.
27. **Kwatra, H. S.,** Performance of a Solar Still: Predicted Effect of Enhanced Evaporation Area on Yield and Evaporation Temperature, *International Journal of Solar Energy*, Vol. 56, No. 3, pp. 261-266, 1996.
28. **Liley, P. E.,** Flow Exergy of Moist Air, Exergy, an International Journal, 2001.
29. **Malik, M. A. S, Tiwari, G.N., Kumar A., Sodha, M.S.,** Solar Distillation: A Practical Study of a Wide Range of Stills and Their Optimum Design, Construction and Performance, Pergamon Press, Oxford, 1982.
30. **Mathioulakis, E., Voropoulos, K., Belessiotis, V.,** Modeling and Prediction of Long-Term Performance of Solar Stills, *Desalination* 122, pp. 85-93, 1999.
31. **Moran, J. M.,** Availability Analysis A Guide to Efficient Energy Use Corrected Edition, ASME Press, New York, 1989.
32. **Morcós, V. H.,** Some Experimental and Theoretical Studies of a Single Basin Solar Still, *renewable Energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 401-407, 1994.
33. **Porta G., M. Á.,** Mecanismos de Transferencia en Destiladores Solares Someros. Tesis de Doctorado. UNAM, México, 1997.
34. **Porta, M. A., Chargoy, N., y Fernández, J. L.,** Extreme Operating Conditions in Shallow Solar Stills, *Solar Energy* Vol. 61, No. 4, pp. 279-286, 1997.
35. **Rosen, Marc A., and Dincer, I.,** Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. *Exergy, an International Journal* Vol. 1, Nos 1-4, pp. 3-13, 2001.

36. **Rubio, C. E.**, Convección Natural en Destiladores Solares de Caseta de Gran Sección, Tesis de doctorado, UNAM, México, 2002.
37. **Sartori, E.**, Solar Still versus Solar Evaporator: A Comparative Study between their Thermal Behaviors, *Solar Energy*, Vol. 56, No. 2, pp. 199-206, 1996.
38. **Shaley, H. M., Ismail, I. M.**, Thermodynamics of the Conversion of Solar Radiation, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 112/145, 1990.
39. **Sharma, V. B. and Mullick, S. C.**, Estimation of Heat-Transfer Coefficients, the Upward Heat Flow, and Evaporation in a Solar Still, *Transactions of the ASME*, Vol. 113, pp. 36-41, 1991.
40. **Sharma, V. B. and Mullick, S. C.**, Analysis of Heat Transfer Coefficients and Evaporation in a Solar Still, *International Journal of Energy Research*, Vol. 16, pp. 517-531, 1992.
41. **Sharma, V. B. and Mullick, S. C.**, Calculation of Hourly Output of a Solar Still, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 115, pp. 231-236, 1993.
42. **Shawaqfeh, A. T. and Farid, M. M.**, New Development in the Theory of Heat and Mass Transfer in Solar Stills, *Solar Energy*, Vol. 55, No. 6, pp. 527-535, 1995.
43. **Siegel, R. and Howell, J. R.**, *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill Kogakusha, LTD., International Student Edition, Tokyo, 1972.
44. **Tiwari, G. N., Emran Khan, Md. and Goyal, R. K.**, Experimental Study of Evaporation in Distillation, *Desalination* 115, pp. 121-128, 1998.
45. **Voropoulos, K., Mathioulakis, E., Belessiotis, V.**, Transport Phenomena and Dynamic Modeling in Greenhouse-Type Solar Stills, *Desalination* 129, pp. 273-281, 2000.
46. **Wark, K. Jr.**, *Termodinámica*, McGraw-Hill, Quinta Edición, México, 1991.

10 APÉNDICE Y FORMULARIO

$$T_{prom} = \frac{T_w + T_g}{2}$$

$$\beta = \frac{1}{T_{prom} + 273}$$

$$P_{aire} = P_{tot} - P_w$$

$$P_g = \frac{\exp\left[25.317 - \frac{5144}{T_g + 273}\right]}{1000}$$

$$P_w = \frac{\exp\left[25.317 - \frac{5144}{T_w + 273}\right]}{1000}$$

$$\rho_{vapor} = \frac{P_w}{R_{vapor}(T_{prom} + 273)}$$

$$\rho_{aire} = \frac{P_{aire}}{R_{aire}(T_{prom} + 273)}$$

$$r_{aire} = \left(\frac{P_{aire}}{P_{tot}}\right)$$

$$M_{aire} = 28.96$$

$$M_w = 18$$

$$\rho_{mezcla} = \rho_{vapor}r_{vapor} + \rho_{aire}r_{aire}$$

$$D_{wa} = 0.000023 * \left(\frac{T_{prom} + 273}{273}\right)^{1.74}$$

$$K_f = 0.0244 + 0.00007673T_{prom}$$

$$M_{mezcla} = M_{vapor}r_{vapor} + M_{aire}r_{aire}$$

$$R_{vapor} = \frac{R_u}{M_{vapor}}$$

$$C_{p,vapor} = 1.8$$

$$R_u = 8.314$$

$$R_{aire} = \frac{R_u}{M_{aire}}$$

$$\mu_{mezcla} = 0.00001718 + 0.0000000462T_{prom}$$

$$h_{fg} = \frac{3161500 - 2407.41(T_w + 273)}{1000}$$

$$C_{p,mezcla} = 1.2$$

$$r_{vapor} = \frac{P_w}{P_{tot}}$$

$$M_{vapor} = 18.016$$

$$C_{p,aire} = 1.01$$

$$\Delta T' = T_w - T_g + \left( \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273)}{M_{aire}P_{tot}} \right) \left( \frac{1}{(M_{aire} - M_{vapor}) - P_w} \right)$$

$$Ra = Gr' * Pr$$

$$Gr' = \frac{x^3 \rho^2 g \beta \Delta T'}{\mu_{mezcla}^2}$$

$$Pr = \frac{1000 \mu_{mezcla} C_{p,mezcla}}{K_f}$$

$$Nu = C(Ra)^n$$

$$h_{cw, Malik} = 0.884 \Delta T'^{1/3}$$

$$Nu_{Malik, turb} = 0.075 Ra^{1/3}$$

$$q_{cw, Malik} = h_{cw, Malik} * (T_w - T_g)$$

$$q_{cw, efectivo} = h_{cw, efectivo}(T_w - T_g)$$

$$h_{cw, efectivo} = \frac{Nu_{Malik, turb} * K_f}{x}$$

$$h_{cw, Hongfei} = 0.2 Ra^{0.26} * \left(\frac{K_f}{x}\right)$$

$$q_{cw, Hongfei} = h_{cw, Hongfei}(T_w - T_g)$$

$$h_{cw, la min ar} = 0.21 Ra^{0.25} * \left(\frac{K_f}{x}\right)$$

$$q_{cw, \text{la min ar}} = h_{cw, \text{la min ar}}(T_w - T_g)$$

$$q_{cw, \text{GlobeyDropkin}} = h_{cw, \text{GlobeyDropkin}}(T_w - T_g)$$

$$h_{cw, \text{GlobeyDropkin}} = 0.069 Ra^{1/3} * Pr^{0.074} * \left( \frac{K_f}{x} \right)$$

$$m_{ev, \text{Malik}} = \frac{3.6 * 24 * q_{ev, \text{Malik}}}{h_{fg}}$$

$$q_{ev, \text{Malik}} = 16.273 h_{cw, \text{Malik}}(P_w - P_g)$$

$$Le = \frac{K_f}{\rho_{mezcla} C_{p, \text{mezcla}} D_{wa} * 1000}$$

$$q_{ev, \text{efectivo}} = \left( \frac{M_{vapor}}{M_{aire}} \right) (P_w - P_g) * h_{cw, \text{efectivo}} * C_{p, \text{aire}} * h_{fg} * \left( \frac{P_{tot}}{(P_{tot} - P_w)(P_{tot} - P_g)} \right)$$

$$m_{ev, \text{Hongfei}} = \left( \frac{3.6 * 24 h_{cw, \text{Hongfei}} M_{vapor}}{R_u \rho_{mezcla} C_{p, \text{aire}} Le^{(1-1/3)}} \right) \left( \frac{P_w}{T_w + 273} - \frac{P_g}{T_g + 273} \right)$$

DIFERENCIA DE TEMPERATURAS CON RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE ESTUDIO

