

ZIZZIAS, JAVIER

0 año base de funcionamiento de un edificio según el artículo 1.1.1.1.

2014 74387



OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DESTILADOR SOLAR COLECTOR ACUMULADOR

por

Javier Zizzias

Tesis presentada para la obtención del grado de Magíster

Ciencias de la Ingeniería

Mención: Ingeniería Mecánica

FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE RIO CUARTO

Marzo 2014

743.7

MFN:

Clasif:

T. 968

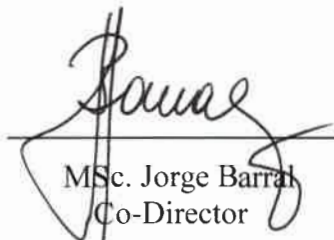
OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DESTILADOR SOLAR COLECTOR ACUMULADOR

por

Javier Zizzias



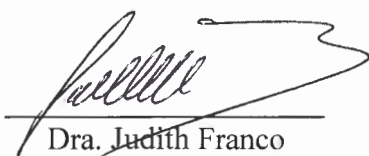
Lic. Amílcar Fasulo
Director



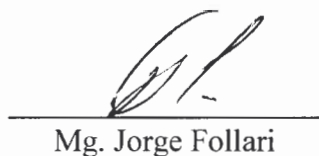
MSc. Jorge Barral
Co-Director

Director

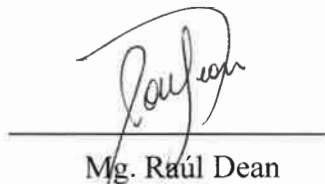
APROBADA POR:



Dra. Judith Franco



Mg. Jorge Follari

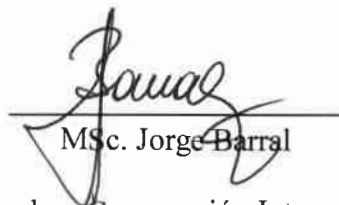


Mg. Raúl Dean



Dr. Leonardo Molisani

Secretario de Posgrado de la Facultad de Ingeniería U.N.R.C



MSc. Jorge Barral

Secretario de Posgrado y Cooperación Internacional de la UNRC

Marzo 2014

Dedicatoria

A mis amores, Claudia, Soledad, Ignacio y Agustina

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo en forma muy especial al Director de mi tesis, Prof. Amílcar Fasulo y al Co-Director, Ing. Jorge Barral, no solo por el apoyo, disponibilidad y consejos brindados por ambos, sino también por contagiarme su entusiasmo por esta actividad tan fascinante como lo es la investigación.

También quiero agradecer al Grupo de Energía Solar de esta Universidad por estar siempre presente, en especial a los Ingenieros Javier Marchesi, Jorge Adaro y Rodolfo Stoll por compartir mis inquietudes, sus saberes y su tiempo.

Deseo agradecer también a los integrantes de la cátedra de Calculo II, Ingenieros Alba Lema, Guillermo Bossio, Daniel Forchetti y Leticia Firman, por brindarme el tiempo necesario para poder realizar esta tesis.

Por ultimo agradecer a mi familia por el apoyo, la comprensión y el estímulo permanente.

TABLAS DE CONTENIDOS

| | |
|---|------|
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| TABLAS DE CONTENIDOS | V |
| INDICE DE TABLAS | VIII |
| INDICE DE FIGURAS | IX |
| NOMENCLATURA | XIII |
| RESUMEN | XX |
| ABSTRACT..... | XXI |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| I.1. Antecedentes | 1 |
| I.2. El desarrollo de la destilación solar | 3 |
| I.3. Sistemas de destilación solar..... | 6 |
| I.4. Antecedentes sobre el Destilador Solar Colector Acumulador..... | 7 |
| I.4.1. Descripción del dispositivo..... | 9 |
| I.5. Objetivos | 11 |
| I.5.1. Objetivos general | 11 |
| I.5.2. Objetivos específicos | 11 |
| I.6. Tareas realizadas | 11 |
| II. ESTUDIO EXPERIMENTAL..... | 13 |
| II.1. Estudio del DSCA | 16 |
| II.2. Estudio del destilador | 23 |
| II.3. Estudio del colector-acumulador..... | 25 |
| III. EVALUACIÓN DEL DSCA..... | 29 |
| III.1. Evaluación del destilador | 29 |
| III.2. Evaluación del dispositivo como acumulador de energía y destilador.... | 32 |
| III.2.1. Balance de energía simplificado. Cálculo de las pérdidas térmicas y del factor de eficiencia global | 33 |
| III.2.1.1. Pérdidas térmicas nocturnas..... | 33 |
| III.2.1.2. Pérdidas térmicas diurnas y cálculo de <i>Fe</i> | 37 |

| | | |
|-----------|---|----|
| IV. | ESTUDIO TEÓRICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL DSCA | 39 |
| IV.1. | Estudio del destilador solar | 39 |
| IV.1.1. | Ganancia de energía. Absorción de la radiación solar | 41 |
| IV.1.2 | Flujos de transferencia de calor en el destilador | 43 |
| IV.1.2.1. | Transferencia de calor internas | 44 |
| IV.1.2.2. | Transferencias de calor externas | 48 |
| IV.1.3. | Transf. de calor desde el agua del tanque colector hacia la batea... 50 | |
| IV.1.4. | Pérdidas térmicas en el destilador | 51 |
| IV.1.5. | Balances de energía en el destilador | 53 |
| IV.1.6. | Producción de destilado | 55 |
| IV.2. | Estudio del tanque colector acumulador | 56 |
| IV.2.1 | Ganancia de energía | 56 |
| IV.2.2 | Pérdidas de energía en el tanque por los laterales y el fondo | 67 |
| IV.2.3 | Pérdidas de energía por la parte superior del tanque | 73 |
| IV.2.4 | Balace de energía en el colector solar acumulador | 73 |
| V. | ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y PÉRDIDAS | 75 |
| V.1. | Verificación de pérdidas térmicas en el destilador..... | 75 |
| V.1.1. | Cálculos de los coeficientes de transferencias de calor..... | 75 |
| V.2. | Verificación de las pérdidas en el tanque colector | 78 |
| V.2.1. | Cálculos de los coeficientes de transferencias de calor..... | 79 |
| VI. | SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL DSCA | 85 |
| VI.1. | Cálculo de la radiación absorbida por el tanque colector-acumulador ... | 86 |
| VI.2. | Cálculos de temperaturas | 88 |
| VI.2.1 | Expresión matemática del calor útil..... | 89 |
| VI.4. | Determinación de la producción de destilado | 92 |
| VII. | PROPUESTAS DE MEJORAS EN EL DSCA | 95 |
| VII.1. | Reemplazo de la superficie colectora por aislación en la mitad sur del tanque..... | 95 |
| VII.2. | Aumento en la aislación en el fondo del tanque | 96 |
| VII.3. | Separación de las placas de policarbonatos | 98 |

| | |
|--|-----|
| VII.4. Disminución de la sombra proyectada por el destilador en el tanque .. | 100 |
| VII.5. Tamaño y forma del tanque | 102 |
| VII.6. Combinación de las modificaciones propuestas..... | 104 |
| | |
| VIII. ANÁLISIS DE COSTOS..... | 109 |
| VIII.1. Costo del litro de agua destilada | 109 |
| VIII.2. Recuperación de la inversión | 113 |
| VIII.3. Conclusiones | 114 |
| | |
| REFERENCIAS | 117 |

INDICES DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla III.1: Producción diaria, temperatura ambiente media diaria, radiación total y eficiencia | 31 |
| Tabla III.2: Determinación de las pérdidas nocturnas del colector, del conjunto colector-destilador y totales | 36 |
| Tabla III.3: Determinación de las pérdidas diurnas del colector-acumulador, el destilador, de todo el dispositivo y del factor de eficiencia F_e | 38 |
| Tabla VII.1: Pérdidas y ganancias térmicas de la cara sur del tanque colector | 96 |
| Tabla VIII.1: Capital inicial para el diseño original del DSCA | 110 |
| Tabla VIII.1: Capital inicial para el nuevo diseño del DSCA..... | 111 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Vista del Destilador Solar Colector Acumulador | 8 |
| Figura 1.2: Esquema y referencias del Destilador Solar acumulador | 10 |
| Figura 2.1: a) Corte longitudinal del DSCA, b) Corte transversal del DSCA | 15 |
| Figura 2.2: Temperaturas ambiente, del vidrio, del agua de la batea y del interior del colector acumulador | 16 |
| Figura 2.3: Temperaturas medidas por las cuatro termocuplas ubicadas en el interior del colector acumulador | 17 |
| Figura 2.4: Temperaturas medidas en la cara norte del tanque | 18 |
| Figura 2.5: Temperaturas medidas en la cara sur del tanque..... | 19 |
| Figura 2.6: Temperaturas medidas en las caras norte y sur del tanque y en su interior..... | 19 |
| Figura 2.7: Temperaturas medidas en el policarbonato interior en caras norte y temperatura ambiente..... | 20 |
| Figura 2.8: Temperaturas medidas en el policarbonato exterior en caras norte y temperatura ambiente..... | 20 |
| Figura 2.9: Temperaturas medidas en el agua de las bateas del DSCA y del DS..... | 22 |
| Figura 2.10: Producción de dos días del DSCA y del DS | 22 |
| Figura 2.11: Producción del destilador simple y del destilador solar colector acumulador de seis días del mes de octubre | 23 |
| Figura 2.12: Producción diaria de destilado en función de la energía recibida por el dispositivo..... | 24 |
| Figura 2.13: Temperaturas medias nocturnas del vidrio, del agua de la batea, del ambiente y energía aportada al dispositivo | 25 |
| Figura 2.14: Corte longitudinal, (a), y transversal, (b), del colector-acumulador con el agregado de la bomba de circulación y la resistencia eléctrica..... | 26 |
| Figura 2.15: Curvas de enfriamiento del colector solar acumulador | 27 |
| Figura 3.1: Radiación total en MJ y eficiencia en % | 31 |
| Figura 3.2: Radiación total en MJ y producción en Kg. | 32 |
| Figura 3.3: Pérdidas térmicas nocturnas del acumulador en función de la diferencia entre la temperatura media del agua con la temperatura media ambiente..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.4: Pérdidas térmicas nocturnas en el destilador en función de la diferencia entre la temperatura media del agua de la batea con la temperatura media ambiente | 37 |
| Figura 4.1: Diagrama de flujos de energía de un destilador solar acoplado al colector solar acumulador | 40 |
| Figura 4.2: Diagrama de un circuito térmico de un destilador solar acoplado al colector solar acumulador | 41 |
| Figura 4.3: Temperaturas del agua de la batea y del agua del tanque..... | 50 |
| Figura 4.4: Esquema del tanque colector acumulador aproximado por un cilindro de sección hexagonal | 57 |
| Figura 4.5: Refracción del rayo al atravesar medios de distintos índices de refracción..... | 60 |
| Figura 4.6: Diagrama de flujos de energías en tanque colector-acumulador..... | 68 |
| Figura 4.7: Diagrama de un circuito térmico que representa las pérdidas por las paredes laterales del tanque colector acumulador..... | 69 |
| Figura 4.8: Diagrama de un circuito térmico que representa las pérdidas por el fondo del tanque colector acumulador | 69 |
| Figura 5.1: Variación de los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección, radiación y evaporación entre el agua de la batea y el vidrio en función de las temperaturas de vidrio y agua de la batea | 76 |
| Figura 5.2: Relación entre las presiones parciales del vapor de agua a temperatura del agua de la batea y del vidrio y el coeficiente de transferencia de calor por evaporación | 77 |
| Figura 5.3: Pérdidas en el destilador obtenidas a partir del modelo matemático y experimentalmente | 78 |
| Figura 5.4: Coeficientes de transferencias de calor por radiación de la cara norte calculados con las temperaturas medidas..... | 79 |
| Figura 5.5: Coeficientes de transferencias de calor por convección de la cara sur calculadas con las temperaturas medidas | 80 |
| Figura 5.6: Coeficientes de transferencias de calor por convección de la cara norte calculadas con las temperaturas medidas..... | 81 |
| Figura 5.7: Coeficientes de transferencias de calor por convección de la cara sur calculadas con las temperaturas medidas | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.8: Pérdidas en el tanque colector acumulador obtenidas a partir del modelo matemático y experimentalmente | 82 |
| Figura 5.9: Comparación de pérdidas por el tanque colector acumulador y por el destilador obtenidas y experimentalmente..... | 83 |
| Figura 6.1: Esquema del tanque colector acumulador aproximado por un cilindro de sección hexagonal..... | 86 |
| Figura 6.2: Radiación absorbida por las caras norte, sur y la total del cilindro hexagonal que aproxima al tanque para 9 días del mes de octubre | 87 |
| Figura 6.3: Temperaturas medias reales y simuladas de 5 días de octubre del agua del tanque colector acumulador | 90 |
| Figura 6.4: Temperaturas reales y simuladas del vidrio del destilador. | 91 |
| Figura 6.5: Temperaturas reales y simuladas del agua de la batea del destilador. | 92 |
| Figura 6.6: Producción de destilado medida experimentalmente y simulada..... | 93 |
| Figura 7.1: Temperaturas simuladas del agua del tanque con la configuración actual y con el agregado de la aislación de poliestireno expandido en la base..... | 97 |
| Figura 7.2: Temperaturas simuladas del agua de la batea con la configuración actual y con el agregado de la aislación de poliestireno expandido en la base..... | 97 |
| Figura 7.3: Producción de destilado simulada con la configuración actual y con el agregado de la aislación de poliestireno expandido en la base..... | 98 |
| Figura 7.4: Temperaturas simuladas del agua del tanque considerando dos distancias distintas entre las cubiertas de policarbonato: 0,02 y 0,03 m | 99 |
| Figura 7.5: Temperaturas simuladas del agua de la batea considerando dos distancias distintas entre placas, 0,02 y 0,03 m | 99 |
| Figura 7.6: Producción de destilado simulada considerando dos distancias distintas entre placas, 0,02 y 0,03 m | 100 |
| Figura 7.7: Temperaturas simuladas del agua del tanque considerando desplazamiento de la batea | 101 |
| Figura 7.8: Temperaturas simuladas del agua de la batea considerando el desplazamiento de la batea | 101 |
| Figura 7.9: Producción de destilado simulada considerando considerando el desplazamiento de la batea | 102 |
| Fig. 7.10: Temperaturas simuladas del agua del tanque para distintos tamaños del mismo..... | 103 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 7.11: Temperaturas simuladas del agua de la batea para distintos tamaños del tanque | 103 |
| Figura 7.12: Producción de destilado simulada para distintos tamaños del mismo | 104 |
| Fig. 7.13: Temperaturas simuladas del agua del tanque con la geometría actual del tanque y con las modificaciones propuestas..... | 105 |
| Fig.7.14: Temperaturas simuladas del agua de la batea con la geometría actual del tanque y con las modificaciones propuestas..... | 106 |
| Fig. 7.15: Producción de destilado simulada del DSCA con la geometría actual del tanque y con las modificaciones propuestas,..... | 106 |

NOMENCLATURA

| | |
|------------|--|
| A_a | Área de la abertura que une el tanque con el destilador [m^2]. |
| A_f | Área del fondo del tanque [m^2]. |
| A_L | Área de la pared del tanque [m^2]. |
| A_c | Área de cada colector que conforma el tanque colector-acumulador [m^2]. |
| A_t | Área de la sección rectangular media del colector [m^2]. |
| A_b | Área de la batea [m^2]. |
| c_p | Calor específico del agua [$MJ/Kg^{\circ}C$]. |
| C_g | Energía almacenada por el vidrio [MJ]. |
| C_w | Energía almacenada por el agua de la batea [MJ]. |
| d | Profundidad de la batea [m]. |
| d_p | Distancia entre placas [m]. |
| d_n | Día juliano. |
| Ee | Energía eléctrica [MJ]. |
| Fe | Factor de eficiencia óptico. |
| Gr | Número de Grashof |
| h | Humedad relativa. |
| h_c | Coefficiente de transferencia de calor por convección [W/m^2]. |
| h_r | Coefficiente de transferencia de calor por radiación [W/m^2]. |
| h_e | Coefficiente de transferencia de calor por evaporación [W/m^2]. |
| h_k | Coefficiente de transferencia de calor por conducción [W/m^2]. |
| $h_{c,wg}$ | Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el agua de la batea y el vidrio [$W/m^2^{\circ}C$]. |
| $h_{e,wg}$ | Coefficiente de transferencia de calor por evaporación entre el agua de la batea y el vidrio [$W/m^2^{\circ}C$]. |
| $h_{r,wg}$ | Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el agua de la batea y el vidrio [$W/m^2^{\circ}C$]. |
| $h_{l,wg}$ | Coefficiente total de transferencia de calor entre el agua de la batea y el vidrio [$W/m^2^{\circ}C$]. |
| $h_{c,ga}$ | Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el vidrio y el ambiente [$W/m^2^{\circ}C$]. |
| $h_{r,ga}$ | Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el vidrio y el ambiente [$W/m^2^{\circ}C$]. |

- $h_{i,ga}$ Coeficiente de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{k,ba}$ Coeficiente de transferencia de calor por conducción entre la batea y el ambiente [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{cr,ba}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación desde la batea al ambiente [W/m^2].
- $h_{k,g}$ Coeficiente de transferencia de calor por conducción por el vidrio [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{c,bw}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la batea y el agua de la batea [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{c,p2a}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa de policarbonato 2 y el ambiente [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{r,p2a}$ Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa de policarbonato 2 (exterior) y el ambiente [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{k,p2}$ Coeficiente de transferencia de calor por conducción por el policarbonato 2 [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{c,p1p2}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa de policarbonato 1 (interior) y el policarbonato 2 (exterior) [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{r,p1p2}$ Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa de policarbonato 1 (interior) y el policarbonato 2 (exterior) [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{k,p1}$ Coeficiente de transferencia de calor por conducción por el policarbonato 1 [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{c,tp1}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la pared del tanque y la placa de policarbonato 1 (interior) [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{r,tp1}$ Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la pared del tanque y la placa de policarbonato 1 (interior) [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{c,ma}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la madera del fondo del tanque y el ambiente [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{r,ma}$ Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la madera del fondo del tanque y el ambiente [$W/m^2\text{°C}$].
- $h_{k,m}$ Coeficiente de transferencia de calor por conducción por la madera [$W/m^2\text{°C}$].
- H^d Radiación solar diaria recibida por el dispositivo [MJ].
- H Radiación global horizontal horaria [MJ/m^2].
- H_b Radiación solar directa horaria [MJ/m^2].
- H_d Radiación solar difusa horaria [MJ/m^2].
- $H_{(90)}$ Radiación solar directa horaria sobre superficie vertical [MJ/m^2].

| | |
|------------------|--|
| I | Radiación global horizontal [W/m^2]. |
| I_b | Radiación global horizontal directa [W/m^2]. |
| I_d | Radiación global horizontal difusa [W/m^2]. |
| I_0 | Radiación global horizontal extraterrestre [W/m^2]. |
| I_{sc} | Constante solar [W/m^2]. |
| k_a | Conductividad térmica del aire [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]. |
| k_w | Conductividad térmica del agua [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]. |
| k_p | Conductividad térmica del poliestireno expandido [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]. |
| k_m | Conductividad térmica de la madera [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]. |
| k_t | Índice de claridad. |
| L | Calor latente de vaporización [J/Kg]. |
| L_g | Espesor del vidrio [m]. |
| L_m | Espesor de la madera [m]. |
| L_p | Espesor de la aislación de poliestireno expandido [m]. |
| m_w | Masa de agua de la batea [Kg]. |
| m_d | Masa de agua destilada [Kg]. |
| \dot{m}_d | Masa de agua destilada por hora [Kg/h]. |
| M_t | Masa de agua del tanque [Kg]. |
| n | Índice de refracción. |
| P | Pérdidas térmicas por el DSCA [MJ]. |
| P_D | Pérdidas térmicas por la cúpula del destilador [MJ]. |
| P_{CA} | Pérdidas térmicas por el tanque [MJ]. |
| P_e | Producción de destilado [Kg]. |
| P_w | Presión de vapor a temperatura del agua de la batea [N/m^2]. |
| P_g | Presión de vapor a temperatura del vidrio [N/m^2]. |
| Pr | Número de Prandtl |
| \dot{q} | Flujo de energía [W/m^2]. |
| $\dot{q}_{r,ga}$ | Flujo de energía por radiación desde el vidrio al ambiente [W/m^2]. |
| $\dot{q}_{c,ga}$ | Flujo de energía por convección desde el vidrio al ambiente [W/m^2]. |
| $\dot{q}_{t,ga}$ | Flujo de energía total entre el vidrio y el ambiente [W/m^2]. |
| $\dot{q}_{c,wg}$ | Flujo de energía por convección desde el agua de la batea al vidrio [W/m^2]. |

- $\dot{q}_{e,wg}$ Flujo de energía por evaporación desde el agua de la batea al vidrio [W/m^2].
- $\dot{q}_{r,wg}$ Flujo de energía por radiación desde el agua de la batea al vidrio [W/m^2].
- $\dot{q}_{k,ba}$ Flujo de energía por conducción a través de la batea [W/m^2].
- $\dot{q}_{c,bw}$ Flujo de energía por convección desde la batea al agua de la batea [W/m^2].
- \dot{q}_{ba} Flujo de energía que representa las pérdidas térmicas totales desde el agua de la batea al ambiente por la base y los laterales del destilador [W/m^2].
- \dot{q}_{wa} Flujo de energía que representa las pérdidas térmicas totales desde el agua de la batea al ambiente por la cúpula del destilador [W/m^2].
- \dot{q}_{td} Flujo de energía que representa las pérdidas térmicas totales en el destilador [W/m^2].
- \dot{q}_u Calor útil, Energía que aporta el colector al destilador [W/m^2].
- \dot{q}_{tw} Flujo de energía que se produce entre el agua de la batea y el agua del tanque [W/m^2].
- $\dot{q}_{c,bw}$ Flujo de energía por convección entre batea y agua de la batea [W/m^2].
- $\dot{q}_{c,tp1}$ Flujo de energía por convección desde la pared del tanque al policarbonato 1 (interior) [W/m^2].
- $\dot{q}_{r,tp1}$ Flujo de energía por radiación desde la pared del tanque al policarbonato 1 (interior) [W/m^2].
- $\dot{q}_{c,p1p2}$ Flujo de energía por convección entre los policarbonatos 1 (interior) y 2 (exterior) [W/m^2].
- $\dot{q}_{r,p1p2}$ Flujo de energía por radiación entre los policarbonatos 1 (interior) y 2 (exterior) [W/m^2].
- $\dot{q}_{c,p2a}$ Flujo de energía por convección desde el policarbonato 2 (exterior) al ambiente [W/m^2].
- $\dot{q}_{r,p2a}$ Flujo de energía por radiación desde el policarbonato 2 (exterior) al ambiente [W/m^2].
- $\dot{q}_{k,p1}$ Flujo de energía por conducción a través del policarbonato 1 (interior) [W/m^2].
- $\dot{q}_{k,p2}$ Flujo de energía por conducción a través del policarbonato 2 (exterior) [W/m^2].

| | |
|------------------|--|
| $\dot{q}_{k,m}$ | Flujo de energía por conducción a través de la madera del fondo del tanque [W/m ²]. |
| $\dot{q}_{c,ma}$ | Flujo de energía por convección desde la madera del fondo del tanque hacia el ambiente [W/m ²]. |
| $\dot{q}_{r,ma}$ | Flujo de energía por radiación desde la madera del fondo del tanque hacia el ambiente [W/m ²]. |
| \dot{q}_{pl} | Flujo de energía que representa las pérdidas térmicas desde el tanque hacia el ambiente por las paredes laterales [W/m ²]. |
| \dot{q}_{pf} | Flujo de energía que representa las pérdidas térmicas desde el tanque hacia el ambiente por del fondo del mismo [W/m ²]. |
| \dot{q}_{ta} | Flujo de energía que representa las pérdidas térmicas desde el tanque hacia el ambiente por los laterales y por del fondo del mismo [W/m ²]. |
| R | Fracción de energía reflejada. |
| Ra | Número de Rayleigh. |
| R_b | Factor geométrico. |
| R'_w | Fracción de energía (flujo solar) reflejada por el agua de la batea [W/m ²]. |
| R'_g | Fracción de energía (flujo solar) reflejada por el vidrio [W/m ²]. |
| S | Radiación absorbida por metro cuadrado de colector [W/m ²]. |
| S_c | Radiación absorbida por cada colector vertical [W]. |
| S_t | Radiación absorbida por todo el tanque colector-acumulador [W]. |
| T | Temperatura [°C]. |
| T_a | Temperatura ambiente [°C]. |
| T_{am} | Temperatura ambiente promedio diaria [°C]. |
| T_b | Temperatura de batea [°C]. |
| T_g | Temperatura de vidrio [°C]. |
| T_{p1} | Temperatura del policarbonato 1 (interior) [°C]. |
| T_{p2} | Temperatura del policarbonato 2 (exterior) [°C]. |
| T_{pt} | Temperatura de la pared del tanque [°C]. |
| T_{ptn} | Temperatura de la pared norte del tanque [°C]. |
| T_{pts} | Temperatura de la pared sur del tanque [°C]. |

| | |
|---------------------|---|
| T_{p1n} | Temperatura de la pared norte del policarbonato 1 (interior) [°C]. |
| T_{p1s} | Temperatura de la pared sur del policarbonato 2 (exterior) [°C]. |
| T_{p2n} | Temperatura de la pared norte del policarbonato 1 (interior) [°C]. |
| T_{p2s} | Temperatura de la pared sur del policarbonato 2 (exterior) [°C]. |
| T_{sky} | Temperatura de cielo [°C]. |
| T_i | Temperatura del agua del tanque [°C]. |
| T_{im} | Temperatura del agua del tanque promedio diaria [°C]. |
| T_w | Temperatura del agua de la batea [°C]. |
| U_b | Coefficientes total de pérdidas por la base y los laterales del destilador [W/m ² °C]. |
| U_i | Coefficientes total de pérdidas por la cúpula del destilador [W/m ² °C]. |
| U_D | Coefficientes total de pérdidas por el destilador [W/m ² °C]. |
| U_L | Coefficientes total de pérdidas por la pared lateral del tanque [W/m ² °C]. |
| U_F | Coefficientes total de pérdidas por la base del tanque [W/m ² °C]. |
| V | Velocidad del viento [m/s ²]. |
| X_w | Longitud característica del destilador entre la base y la superficie del agua [m]. |
| Δh | Cambio de entalpía [MJ/Kg]. |
| α | Absortancia |
| α_s | Altitud solar. |
| α_g | Absortancia del vidrio. |
| α_w | Absortancia del agua. |
| α_b | Absortancia del batea. |
| α' | Fracción de energía absorbida |
| α'_g | Fracción de energía absorbida por el vidrio. |
| α'_w | Fracción de energía absorbida por el agua de la batea. |
| α'_b | Fracción de energía absorbida por la batea. |
| β | Angulo de inclinación del colector. |
| β_v | Coefficiente de expansión volumétrica [1/°C]. |
| δ | Declinación solar. |
| ε_{eff} | Emitancia efectiva. |
| ε_g | Emitancia del vidrio. |
| ε_w | Emitancia del agua de la batea. |
| ε_l | Emitancia del policarbonato 1. |

| | |
|------------------|--|
| ε_2 | Emitancia del policarbonato 2. |
| θ | Angulo de incidencia. |
| θ_z | Distancia cenital. |
| θ_{ed} | Angulo de incidencia equivalente para radiación difusa. |
| θ_{er} | Angulo de incidencia equivalente para radiación reflejada. |
| ρ | Reflectancia |
| ρ_g | Reflectancia para radiación difusa. |
| ρ_g | Albedo terrestre. |
| ρ_w | Densidad del agua [Kg/m^3]. |
| Γ | Angulo día. |
| τ | Transmitancia |
| σ | Constante de Stefan Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8}$) [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]. |
| $(\tau\alpha)_b$ | Producto transmitancia-absortancia de la radiación directa. |
| $(\tau\alpha)_d$ | Producto transmitancia-absortancia de la radiación difusa. |
| $(\tau\alpha)_g$ | Producto transmitancia-absortancia de la radiación reflejada. |
| ν | Viscosidad cinemática [m^2/s]. |
| μ | Viscosidad dinámica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]. |
| ω | Angulo horario. |
| Ψ | Angulo azimut solar. |
| γ | Azimut solar de la superficie. |

RESUMEN

En este trabajo se estudió la optimización del funcionamiento de un sistema constituido por un colector solar acumulador monotanque cilíndrico vertical con doble cubierta de policarbonato, CSA, al cual se le incorpora en su extremo superior una batea que permite instalar una cubierta vidriada condensadora, constituyendo así un dispositivo que posee la doble función de destilador solar y colector solar acumulador (DSCA).

Se realizó una evaluación sistemática del sistema llevando adelante experimentos y desarrollos analíticos poniendo especial atención en la determinación de la capacidad de absorción y acumulación de energía solar del CSA, a fin de conocer cuánta de esta energía es transferida al destilador y cuánto de ésta se utiliza en la producción de destilado.

Se evaluaron experimentalmente pérdidas térmicas diarias, tanto diurnas como nocturnas, determinando el valor de éstas a través del tanque colector y a través del destilador. En este aspecto la conclusión más relevante es que las pérdidas por la cúpula del destilador duplican a las pérdidas por el tanque y que en este las pérdidas por el fondo son en proporción a las superficies, más importantes que las pérdidas por las paredes laterales.

Asimismo fueron desarrollados modelos matemáticos que describen el funcionamiento de todo el dispositivo. Con los datos experimentales obtenidos se verificaron estos modelos y luego a partir de estos se desarrolló un software con el objetivo de simular el comportamiento del dispositivo.

Esto último permitió evaluar posibles modificaciones en el DSCA para mejorar el desempeño de cada una de las partes, en especial del tanque colector acumulador, con el objetivo de optimizar su prestación y el funcionamiento todo el sistema.

Se analizó el agregado de aislación en la cara sur del tanque, un aumento de la aislación en la base del mismo, el corrimiento de la batea, el aumento en la separación de las placas de policarbonato y la reducción en la altura del tanque.

Finalmente se realiza un análisis de costos de ambos diseños y se obtienen los periodos de recuperación de la inversión.

Los resultados obtenidos prevén que una reducción del tamaño del tanque y una mejora de la aislación en su base, no solo mejoraría su producción sino que también disminuiría el costo del mismo.

ABSTRACT

This thesis studies the functioning optimization of a system composed by an integral collector storage, ICS, and a basin solar still. The basin of the solar still is mounted on the ICS, has one single glass cover, which works as the condenser, and the ICS has just one vertical cylindrical tank, covered by three layers of alveolar polycarbonate. The basin water is communicated with the upper layers of ICS water and the whole system accomplishes the double function of solar collector-storage and solar still.

A systematic evaluation was performed by means of experiments and analytical developments, considering especially the determination of the ICS energy absorption and accumulation capacity, in order to know how much energy is transferred to the still and how much of this energy is used to obtain distilled water.

Daily heat losses were experimentally evaluated for the two components, considering daytime and nocturnal losses as well. It was determined that heat losses through the still dome double tank heat losses, and that losses per square meter through the tank bottom were greater than lateral losses per square meter through the tank walls.

The solar gains, heat losses, and other physical aspects were assemble to develop mathematical models, which described the whole system functioning. The theoretical models were then verified by comparisons with the experimental data, and an algorithm was designed to simulate the system behavior.

By using the computational model it was possible to evaluate different constructive alternatives for the system, looking for improvements in the performance of each part, especially in the storage tank, in order to optimize the behavior of the whole system.

Many alternatives were analyzed: addition of insulation in the South tank face, increasing in the insulation thickness in the tank bottom, changes in the basin position, increasing in the separation between polycarbonate layers, reduction in the tank height.

Finally, a cost analysis of both designs is performed and periods of payback are obtained.

Analyzing the results, it was possible to show that better functioning could be achieved by modifying the tank design. Making a reduction of the tank size and by enhancing its insulation not only would improve its productivity but also would decrease the cost.

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Antecedentes

La escasez de agua potable es un problema aceptado a nivel mundial y sobre el cual hay acuerdo en que se intensificará en el futuro. Aunque el agua abunda en la Tierra, aquella que es de utilidad para el consumo del hombre es escasa, solamente el 3% del total es agua dulce. Si bien es un recurso renovable, la recuperación de las fuentes muchas veces no es inmediata, demorando en algunos casos muchos años. De ese 3% de agua dulce mencionado, solo el 1% se encuentra en la superficie y es accesible (ríos y lagos), el 20% se encuentra en depósitos subterráneos y 79% en los polos y glaciares.

Muchos centros poblados fueron construidos próximos a ríos y muchos de estos cursos de agua fueron embalsados, lo que ha permitido acumular el recurso para el abastecimiento de estas poblaciones. Sin embargo, éstos están sometidos a las fluctuaciones temporales de la naturaleza. Recientemente grandes extensiones del país sufrieron la sequía mas intensa de los últimos cien años llevando al límite la provisión del recurso a muchas ciudades, llegando en algunos casos a la implementación de racionamientos.

La utilización de fuentes subterráneas es muy común en zonas como Río Cuarto.

Como el agua es un solvente, al circular por extractos que contienen sal, entre otros elementos solubles, se encuentra que en muchos casos estas fuentes subterráneas están contaminadas con sales. Tal es el caso del oeste de San Luís, parte de la Pampa y sur de Córdoba. La cuenca del Desaguadero con más de 180.000 Km² se extiende desde San Juan donde recibe los derrames de las lagunas saladas de Guanacache (que le da el nombre de Salado) recorre los límites entre Mendoza y San Luís, tramo en los que recibe los afluentes de los ríos Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel. El río Salado se sumerge y reaparece por tramos para llenar la sucesión de lagunas (cuando su caudal lo permite) Urre Lauquen, La Dulce y la Amarga que operan en forma de cubetas en la provincia de La Pampa. Esta cuenca provee de aguas subterráneas a extensas zonas que se extienden hasta el sur de Córdoba. Es así que en numerosos casos las extracciones de agua subterráneas resultan salobres.

El Código Alimentario Argentino (C.A.A.) admite hasta 1,5 g/l de sales totales disueltas en agua y vemos que en el sur de Córdoba, existen varias localidades como Gral. Levalle en donde el agua posee 12 g/l lo que indica que estas zonas tienen graves

problemas para acceder a fuentes de agua seguras [Blarasin, *et al.*, 2003]. En algunos casos incluso se constata la presencia de sustancias tóxicas como el Arsénico. Las tecnologías convencionales como cloración, sólo sirven para desinfectar dichas aguas, pero no para desalinizarlas. Otras poblaciones usan el método de ósmosis inversa que solamente desaliniza las aguas pero no las desinfecta ni extrae la contaminación producida por pesticidas y agroquímicos.

Por otra parte, muchas industrias como la textil, la de alimentación y los laboratorios, emplean agua destilada para su producción. Los destiladores convencionales gastan demasiada agua para el proceso de condensación, de 10 a 20 litros de agua potable se requieren para la refrigeración del condensador en los destiladores compactos para la producción de un litro de agua destilada. En casi todos los casos el agua de refrigeración es drenada hacia el sistema de cloacas. De esta manera la operación de estos destiladores constituye un uso no racional de tan valioso recurso. Además, este proceso demanda un gasto importante de energía eléctrica.

Un sistema de desalinización eficiente, económico, libre del uso de energía convencional y fácilmente operable, es la solución para aprovechar estos recursos hídricos. Esto podría permitir el acceso de agua potable a poblaciones importantes de la región, y además, al desarrollo de extensas regiones semidesérticas del centro oeste del país conforme a las normas sanitarias recomendadas. Un sistema de estas características permitiría la expansión de los pequeños y aislados asentamientos de poblaciones actualmente existentes al disponer de este valioso recurso como es el agua.

En este sentido, la destilación solar aparece como la solución más recomendable para abordar este problema, tanto para las regiones desérticas como para las poblaciones que requieren agua destilada. Los destiladores solares no requieren energías convencionales, pueden producir agua destilada de alta calidad y no requieren más agua que la que van a procesar, pues el medio ambiente cumple la función de refrigerar el condensador. Sin embargo, los dispositivos existentes poseen limitaciones que se deben superar para posibilitar su uso intensivo.

Los destiladores solares actualmente disponibles trabajan a muy bajas temperaturas, en consecuencia la producción de vapor es pequeña y requieren instalaciones con superficies muy extensas, lo que hace que sean muy costosos tanto en su construcción como en su mantenimiento. Por otro lado, se ha comprobado que la superficie condensadora de estos dispositivos posee una capacidad que supera en más de 10 veces la capacidad de producir vapor de la batea, es decir que con un metro cuadrado de destilador

podemos condensar más de 50 litros de agua por día [Fasulo *et al.*, 2008b]. Se ha demostrado que incrementando la temperatura del agua en la batea, mediante la incorporación de colectores solares planos, se incrementa la producción de destilado [Yadav y Prasad, 1995] [Tiris *et al.*, 1998] [Voropoulos *et al.*, 2001] [Marchesi *et al.*, 2008].

Esto nos indica que podríamos disminuir la superficie de los destiladores si se les acopla dispositivos que aporten energía térmica al agua de la batea, como serían destiladores acumuladores acoplados con colectores solares que son dispositivos de bajo costo y que requieren escaso mantenimiento. Por otra parte, al concentrar por este procedimiento la energía en una batea de pequeñas dimensiones queda abierta la posibilidad de aplicar en ésta, técnicas conocidas que permiten: a) bajar la temperatura de evaporación; bajando por ejemplo la presión o la temperatura de la superficie condensadora [Armenta-Deu, 2004] [Kumar y Tiwari, 1996], y b) recuperar parte de la energía liberada en la condensación para reincorporarla al proceso de evaporación como es en el caso de un destilador de múltiple efecto o múltiple etapa. [Fernández y Chardoy, 1990] [Franco y Saravia, 1992] [Fasulo *et al.*, 2009b].

I.2 El desarrollo de la destilación solar.

La bibliografía internacional registra como una de las primeras instalaciones para la desalación solar de aguas salobres la construida al norte de Chile hacia 1872, con bateas de madera cubriendo una superficie de 4700 m², la que se mantuvo en funcionamiento hasta 1910 [Frick y Hirschman, 1973]. Sin embargo, a menor escala, los dispositivos para obtener agua pura se remontan a los orígenes de la civilización. Delyannis (2003), que efectúa un exhaustivo recuento de los antecedentes históricos del tema, encuentra que éstos se remontan desde las antiguas civilizaciones chinas, egipcias y griegas. El mismo autor da cuenta de un dispositivo para producir agua fresca empleando energía solar diseñado por Della Porta (1535-1615). También señala, que durante la segunda guerra mundial, el Nacional Defense Committee otorgó subvenciones para el desarrollo de destiladores solares y el efecto fue el desarrollo de numerosas patentes. Varios de éstos, son dispositivos de pequeñas dimensiones para la supervivencia. En la década del 50, frente a condiciones de sequía en varias regiones del planeta, se busca como solución la destilación de aguas marinas y se diseñaron pequeñas plantas de destilación, entre éstas, una solar. La conclusión en ese momento fue que los dispositivos solares no resultan económicos frente

a los que emplean energías convencionales. Una de las innovaciones más destacables fue la propuesta por María Telkes [Howe y Tleimat, 1980], del MIT, en la década del 50 del siglo pasado, quien propuso el reemplazo de las bateas por telas porosas ennegrecidas dispuestas en planos inclinados, de forma tal que el agua salobre se deslizara por éstas. Lo que buscó con este dispositivo fue reducir los efectos de la inercia térmica de las bateas, posibilitando que el mismo entre en funcionamiento más temprano y resulte menos afectado por los períodos con nublados intermitentes.

Varios investigadores han contribuido en el estudio de los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren en los destiladores de batea. En 1961, Dunkle plantea un modelo a través de un circuito térmico que representa las transferencias de calor en un destilador de batea simple y propone expresiones de los coeficientes en función de las temperaturas de batea y vidrio. Mediante interferometría, Baum y Bairanov establecen en 1964, las características del movimiento del vapor en la atmósfera encerrada por una cubierta vidriada, sentando las bases para su estudio; éstas son: 1) la evaporación y condensación en la cubierta de vidrio están interrelacionadas y no deben ser tratadas por separado y, 2) en el proceso de transferencia de calor y masa interviene la capa superior del agua en la batea, en un espesor que varía de varios milímetros a unos pocos centímetros. Proponen dos ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de transferencia del calor para los procesos de evaporación y condensación. Cooper completa el modelo de Dunkle y realiza las primeras simulaciones numéricas del funcionamiento de un destilador solar [Cooper, 1969 y 1973a]. Este investigador, a posteriori, presenta otros estudios en los cuales define la eficiencia como el cociente entre el calor transferido por evaporación y la radiación solar horizontal, y concluye que un destilador ideal tendrá como máximo una eficiencia del 60% y encuentra una relación lineal entre producción y radiación solar en una secuencia de experiencias en las cuales la eficiencia siempre está por debajo del 50% [Cooper, 1973b]. En nuestro país, De Paul realiza numerosos estudios en la Universidad Nacional de Salta, hallando expresiones empíricas para la determinación del coeficiente de convección analizando el funcionamiento no estacionario de los destiladores [De Paul *et al.*, 2000, 2003, 2004]. Plantea además un nuevo modelo matemático para un destilador de batea simple [De Paul, 2002].

Otros autores han propuesto un análisis exergético para determinar eficiencias o bien la realización en forma conjunta de análisis energéticos y exergéticos para el estudio de parámetros en destiladores solares [Torchia-Nuñez *et al.*, 2010] y [Tiwari *et al.*, 2009].

Actualmente varios países poseen centros de investigación dedicados a la solución solar para la provisión de agua potable, como por ejemplo Grecia, que posee una gran cantidad de islas pequeñas sin recursos de agua dulce suficientes. Experiencias con destiladores solares asistidos mediante colectores solares planos han sido efectuadas recientemente en Grecia, en Solar & Others Energy System Laboratorio. Entre las más importantes, Voropoulos (2001) muestra las ventajas que se obtiene al incorporar un acumulador al destilador solar logrando duplicar la producción, con un incremento importante en la producción nocturna y Belessiotis *et al.* (1995) proponen un método de evaluación del proceso de destilación conocido como input-output que permite obviar el complejo análisis térmico en el interior del destilador. Una recopilación de Tiwari *et al.* (2003) y otra actual muy detallada de Sampathkumar *et al.* (2010) sobre destiladores asistidos térmicamente (destilación solar activa), muestran los diferentes desarrollos que hasta el momento se han realizado y dejan de manifiesto la importancia de esta asistencia térmica para el aumento de la producción. En la actualidad se está avanzando en el desarrollo de plantas que utilizan el método de humificación-deshumidificación, plantas que combinan colectores planos de agua y de aire y con los cuales se obtienen importantes incrementos en la producción [Imed *et al.*, 2006] [Guofeng *et al.*, 2011].

A nivel nacional encontramos varios intentos de solucionar la carencia de agua potable en centros aislados mediante destiladores solares y en casi todos los casos conocidos, luego de un breve tiempo de uso fueron abandonadas. La más notable por la tecnología empleada y tamaño es la de El Cebollar, en La Rioja en la década del 70 [Linares y Souto, 1977]. En todos los otros casos se recurrió al diseño tradicional, del mismo tipo del empleado en la planta instalada en Antofagasta; esto es así por que es el diseño más económico, fácil de construir y mantener. Los principales avances se han dado en función de los nuevos materiales. Así surgieron los llamados destiladores solares livianos, de bajo costo y fácil mantenimiento por la innovación de la incorporación de una cúpula desmontable [Follari, 1994]. En la Universidad Nacional de San Luis en los primeros años de este siglo se construyó una pequeña planta de destilación solar destinada a satisfacer las necesidades de los laboratorios de la Facultad de Química Bioquímica y Farmacia. Esta planta, que se encuentra actualmente en funcionamiento, permite por su ubicación poner directamente (mediante conductos y gravedad) en cada uno de los laboratorios instalados en el centro de la ciudad unos 30.000 litros de agua destilada. Esta agua destilada tiene sólo 1 microsiemens de conductividad, generando un ahorro de unos

30.000 Kw-hora de energía y unos 800.000 litros de agua potable a la ciudad de San Luis en un año [Fasulo *et al.*, 2004] y [Fasulo *et al.*, 2006].

I.3 Sistemas de destilación solar.

Muchos han sido los intentos por mejorar el rendimiento de los sistemas de destilación solar. De las distintas recopilaciones mencionadas en el trabajo se pueden extraer distintos tipos de dispositivos de destilación solar que han sido y son utilizados en la actualidad. Varios investigadores han propuesto clasificaciones de estos sistemas, que en general no difieren mucho entre sí.

En general se clasifican en destiladores solares pasivos y destiladores solares activos, denominándose así a estos últimos porque reciben aportes de energía térmica, ya sea, desde dispositivos solares o dispositivos que utilizan energías convencionales.

Estos se pueden resumir en la siguiente clasificación.

- *Sistemas pasivos.*
 - Destiladores de batea simple.
 - Destiladores de mecha.
 - Destilación por difusión.
 - Destiladores de múltiple etapas.
 - Destiladores esféricos
 - Destiladores de tubos concéntricos.

- *Sistemas activos.*
 - Destilación solar activa a alta temperatura.
 - Destilador solar acoplado con colectores planos.
 - Destilador solar acoplado con concentrador parabólico.
 - Destilador solar acoplador con tubos evacuadores de calor.
 - Destilador solar acoplado con tubos de calor.
 - Destilador solar acoplado con estanque solar.
 - Destilador solar acoplado con sistema híbrido PV/T.
 - Sistema de destilación solar activa multietapa.

- Sistema solar activo multiefecto.
- Destilador solar con burbujas de aire.
- Sistema de destilación solar híbrido.
- Sistema de destilación activo con precalentamiento de agua.
- Sistema solar activo nocturno.

Si bien se pueden encontrar otros sistemas, en general estos van a ser variaciones de los mencionados en la clasificación.

El destilador que se analiza en este trabajo se encuentra entre los destiladores solares activos ya que es asistido por un tanque colector-acumulador, pero, si bien tiene características similares a algunos de los mencionados posee una característica que lo diferencia de éstos. Esta característica es la gran inercia térmica que posee debido a la gran masa de agua contenida en el tanque colector. Esta inercia térmica es la que permite que haya producción tanto de noche como en días nublados. Esta particularidad hace que no se lo pueda considerar como uno de los mencionados en la clasificación anterior, sino que debería ser considerado como otro sistema de destilación distinto a los presentados en la misma, aunque muestre alguna similitud de funcionamiento con el sistema solar activo nocturno el cual utiliza durante la noche agua residual caliente.

1.4 Antecedentes sobre el DSCA

En los últimos años, en tareas conjuntas entre el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Universidad Nacional de San Luis y el Grupo de Energía Solar (GES) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, se desarrolló un colector solar acumulador monotanque que es único por sus características [Fasulo *et al.*, 1997] [Fasulo *et al.*, 2001] [Barral *et al.*, 2001] [Fasulo *et al.*, 2002] [Fasulo *et al.*, 2007]. A partir de este dispositivo se diseñó un destilador colector solar acumulador, DSCA, que también es el primero de estas características a nivel internacional [Esteban *et al.*, 2000] [Esteban *et al.*, 2005] [Fasulo *et al.*, 2008]. Este equipo consiste en un destilador común cuya batea se prolonga en un tanque cilíndrico con paredes externas recubiertas por superficies selectivas y por dos envolturas concéntricas de policarbonato celular. Es decir, que posee la doble función de colector solar acumulador y destilador solar. La gran masa de agua contenida por este dispositivo lo hace enteramente diferente de los destiladores comunes, ya que produce durante el día y continúa durante la noche a expensas de la energía acumulada en

el tanque. Este dispositivo requiere menor mantenimiento, por cuanto las sales y otros residuos se acumulan en el fondo del mismo, facilitando su limpieza por simple drenaje del agua acumulada, no requiriendo el desmontado de su cúpula, como sucede en los destiladores comunes.

Este dispositivo ya ha sido objeto de distintos estudios. Se analizó en primer lugar las características del funcionamiento y la producción [Esteban *et al.*, 2002] Posteriormente se avanzó en el estudio de las pérdidas del dispositivo completo. [Esteban *et al.*, 2004] [Esteban *et al.*, 2006] [Fasulo *et al.*, 2002]. Se comparó con la producción de un destilador de batea simple y uno asistido con colectores planos [Marchesi *et al.*, 2007] y también se realizó una simulación numérica con la cual se obtiene la producción en función de las temperaturas de batea, de la temperatura ambiente y la radiación solar [Ducculi *et al.*, 2008].



Figura 1.1. Vista del Destilador Solar Colector Acumulador usado en nuestra experiencia

Estudios posteriores pusieron de manifiesto que los destiladores con acumulador poseen eficiencias muy superiores a las obtenidas por los destiladores solares comunes [Fasulo *et al.*, 2009a].

Los últimos estudios realizados determinaron las pérdidas de cada uno de los componentes por separado y discriminadas en nocturnas y diurnas [Zizzias *et al.*, 2010] [Fasulo *et al.*, 2011].

1.4.1 Descripción del dispositivo:

En la figura 1.2 se muestra un esquema del DSCA. En la misma se observa un corte transversal esquemático del DSCA y las referencias que indican cada uno de los componentes del dispositivo.

El colector está constituido por un tanque cilíndrico de acero inoxidable, con su superficie exterior cubierta por una superficie selectiva y sus dimensiones son 0,8 m de diámetro y 1,20 m de alto. Este está rodeado por dos láminas de policarbonato alveolar, de 0,004 m de espesor, separadas entre sí por aproximadamente 0,02 m de distancia. En el extremo superior del tanque se encuentra montado un destilador tipo batea. Esta es de acero inoxidable, de 1,20 m de largo, 0,83 m de ancho y 0,08 m de alto. La base de la batea tiene una abertura circular de igual diámetro que la del tanque y es por donde se comunican. El tanque con la batea están unidas mediante soldadura. Una lámina perforada de material plástico de color negro cubre el fondo de la batea para facilitar la absorción de la radiación solar.

La cubierta del destilador es de vidrio y es asimétrica, formando la cara que da al norte un ángulo de 37° respecto a la horizontal, mientras que la cara que da al sur forma un ángulo de 82°. Esta cubierta está apoyada sobre un marco de acero inoxidable que posee dos canales en forma de U, uno invertido con respecto al otro. El canal interior al marco, tiene por función coleccionar el agua destilada que desliza por las cubiertas vidriadas y transportarla al exterior del destilador. El canal exterior invertido, tiene por función alojar un tabique de policarbonato celular de 0,010 m de espesor, que va entre el marco y el fondo de la batea. El tabique de policarbonato tiene las siguientes funciones: 1) Asentar sobre la batea el peso del marco con la cubierta de vidrio. 2) establecer un sello que permita aislar la atmósfera interior del destilador del medio ambiente y, 3) separar térmicamente la cubierta vidriada del agua de la batea. Esta cubierta es desmontable, con

un diseño similar al utilizado por Follari (1994) para construir los destiladores solares livianos desmontables.

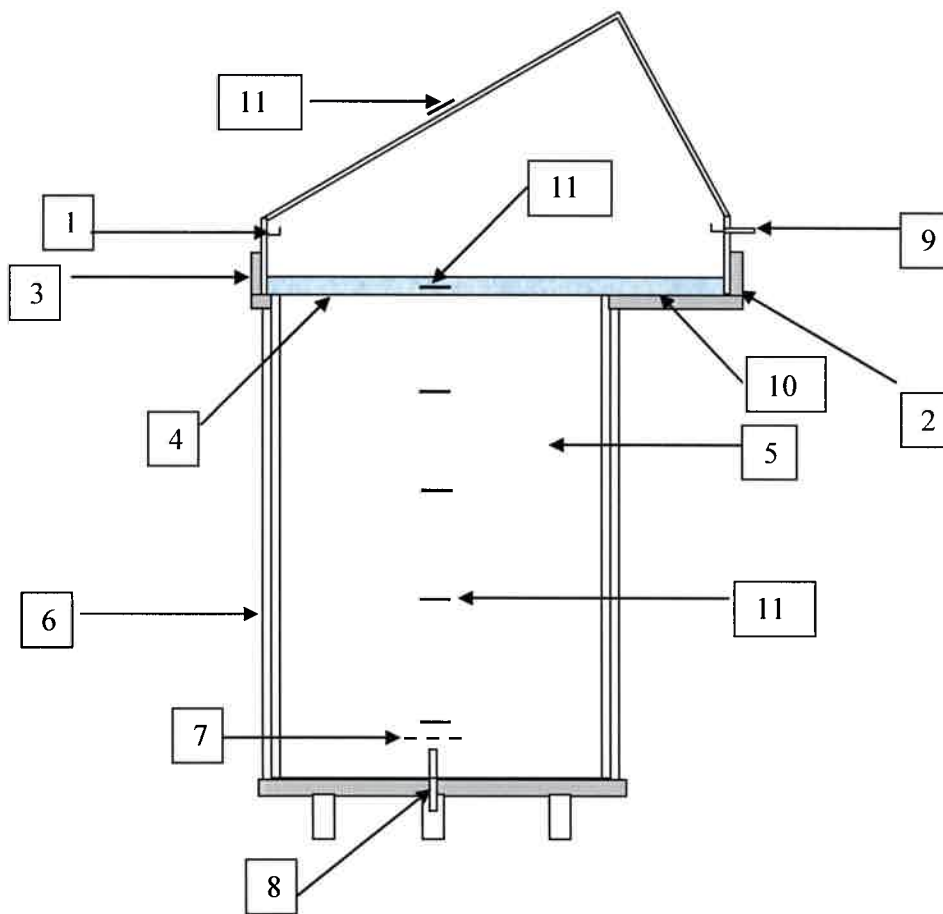


Figura 1.2. Esquema y referencias del Destilador Solar acumulador usado en nuestra experiencia

- 1- Marco de acero inoxidable Canales y soporte placas de vidrio.
- 2- Material aislante, recubre parte inferior de la batea de acero inoxidable.
- 3- Chapa metálica de acero galvanizado protectora del material aislante.
- 4- Membrana de plástico, perforada cubre fondo de la batea.
- 5- Interior del tanque de acero inoxidable.
- 6- Dos cubiertas concéntricas de policarbonato celular de 0,004m de espesor.
- 7- Placa deflectora del flujo de agua.

- 8- Tubo ingreso de agua cruda.
- 9- Soporte de material aislante.
- 10- Tubo descarga exceso de agua.
- 11- Termocuplas

I.5 Objetivos

I.5.1 Objetivo general.

El objetivo de este trabajo fue optimizar el funcionamiento del DSCA a partir de una evaluación teórico-experimental realizada por medio de simulaciones computacionales realizadas con un modelo físico matemático que se valida mediante experimentación.

I.5.2 Objetivos específicos.

- 1) Efectuar una revisión del desarrollo a nivel nacional e internacional de la destilación solar, poniendo énfasis en los sistemas con batea y asistencia térmica adicional.
- 2) Determinar la evolución térmica diaria del dispositivo a partir de un estudio analítico de los datos experimentales obtenidos utilizando ecuaciones de balances de energía.
- 3) Evaluar la producción de agua destilada del DSCA a partir de un modelo físico-matemático que esté en función de los parámetros característicos del equipo.
- 4) Desarrollar una simulación numérica del funcionamiento del dispositivo y mediante ésta evaluar modificaciones en el mismo que permitan optimizar su funcionamiento.

I.6 Tareas realizadas.

Las tareas realizadas para la concreción de este trabajo son las que a continuación se enumeran:

- a. Revisión bibliográfica.

b. Operación el DSCA por períodos de no menos de 15 días, que incluyó varios días claros (cielo diurno totalmente despejado), días seminublados y días completamente nublados. Se determinaron las temperaturas de distintas partes del dispositivo, la producción y las variables del medio ambiente.

c. Determinación de la capacidad de captar y retener energía en el tanque de acumulación, operándolo como colector solar acumulador. Para esto se determinó la variación de la temperatura del tanque para distintos valores de temperatura inicial. Estos ensayos se realizaron en épocas del año con distintas características climáticas.

d. Cálculo de las pérdidas térmicas diarias del dispositivo, determinando el valor de éstas a través del tanque y a través del destilador, tanto diurnas como nocturnas. Para esto, con la utilización de energía eléctrica, se llevó la temperatura interior del dispositivo a valores altos para luego dejarlo enfriar hasta que se estabilizó el sistema. Estos ensayos también se realizaron en épocas del año de distintas características climáticas.

e. Formulación, a partir de un estudio analítico de balances de energía, de un modelo matemático que permitió evaluar la producción del DSCA en función de los parámetros que lo caracterizan.

f. Corrida de simulaciones numéricas, para determinar la producción del DSCA en función de sus características constructivas.

g. Definición a partir del modelo matemático obtenido de una nueva geometría del dispositivo que permitirá un mejor desempeño del mismo.

II. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Con el propósito de conocer el funcionamiento del DSCA con el mayor detalle posible y para validar el modelo matemático que se presenta en el capítulo IV, se realizó el estudio experimental del mismo.

Este estudio consistió en determinar la temperatura de los distintos componentes del dispositivo y la producción del destilador. Permitió también conocer las pérdidas térmicas, tanto diurnas como nocturnas, que se producen por el colector acumulador y por la cúpula del destilador y la capacidad del dispositivo de absorber radiación solar.

Para realizarlo se lo dividió en tres partes; en la primera parte se evaluó el comportamiento del dispositivo completo, es decir, del destilador junto al tanque colector-acumulador, determinándose las temperaturas en el interior del mismo, de la pared lateral y del fondo del tanque, de las cubiertas de policarbonato y del vidrio de la cúpula del destilador. Se determinó también la producción y se midieron los valores de las variables del medio ambiente.

En la segunda parte se evaluó solamente el funcionamiento del destilador incorporándole distintas cantidades de energía eléctrica al agua de la batea. Se midieron producción y temperatura de agua de batea y de vidrio. Posteriormente con estos datos se determinaron las pérdidas térmicas que se producen durante el periodo diurno y el nocturno por el destilador

La tercera parte consistió en el estudio del funcionamiento solo del tanque colector solar acumulador, midiéndose valores de temperaturas y de las variables del medio ambiente, a partir de los cuales se determinaron las pérdidas térmicas que se producen por el tanque, tanto diurnas como nocturnas.

Las tres partes del estudio experimental se realizaron utilizando dos DSCA de iguales características, uno ubicado en el laboratorio del Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto y el otro ubicado en Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Nacional de San Luis. La utilización de ambos dispositivos posibilitó la verificación de los distintos resultados que se exponen en el presente trabajo.

Para su evaluación se midieron en ambos dispositivos, la producción diurna, nocturna y diaria de agua destilada, m_d , en Kg, la radiación global horizontal, I , en W/m^2 , la temperatura ambiente, T_a , la del agua de la batea, T_w , y las de cuatro puntos del interior del tanque, T_i , en °C. También se midieron las temperaturas de la pared del

tanque y la de las placas de policarbonato, T_p , y del vidrio de la cubierta, T_g . Además se midió la humedad relativa, h , y la velocidad del viento, V , en m/seg.

Para la medición de temperatura en las distintas partes del destilador, se utilizaron termocuplas del tipo T, las que fueron conectadas al datalogger "FLUKE netdaq 2640". Se colocaron cuatro termocuplas en el interior del tanque distribuidas en forma uniforme, una en la batea y una en el vidrio. También se colocaron termocuplas en la pared del tanque y en las cubiertas de policarbonatos. En total se colocaron tres en la cara norte y tres en la cara sur, todas a la misma altura del tanque. Para medir la temperatura ambiente y la velocidad del viento se utilizó una estación meteorológica portátil-inalámbrica Pegasus.

Para la medición del producido por el destilador se utilizó un recipiente plástico el cual fue colocado sobre un balanza electrónica de tipo comercial, Kretz mod. 3200E, de capacidad 31 kg, la que fue adaptada en nuestro laboratorio para ser reconocida por el adquisidor de datos FLUKE. La producción en San Luís se midió por acumulación de destilado en periodos de tiempos establecidos.

Para medir la radiación global horizontal se utilizaron piranómetros fotovoltaicos.

En la figura 2.1, a y b, en donde se presenta un corte longitudinal y un corte transversal del DSCA, se puede observar la ubicación aproximada en el dispositivo de las termocuplas utilizadas para medir las temperaturas de cada uno de los componentes en las distintas experiencias.

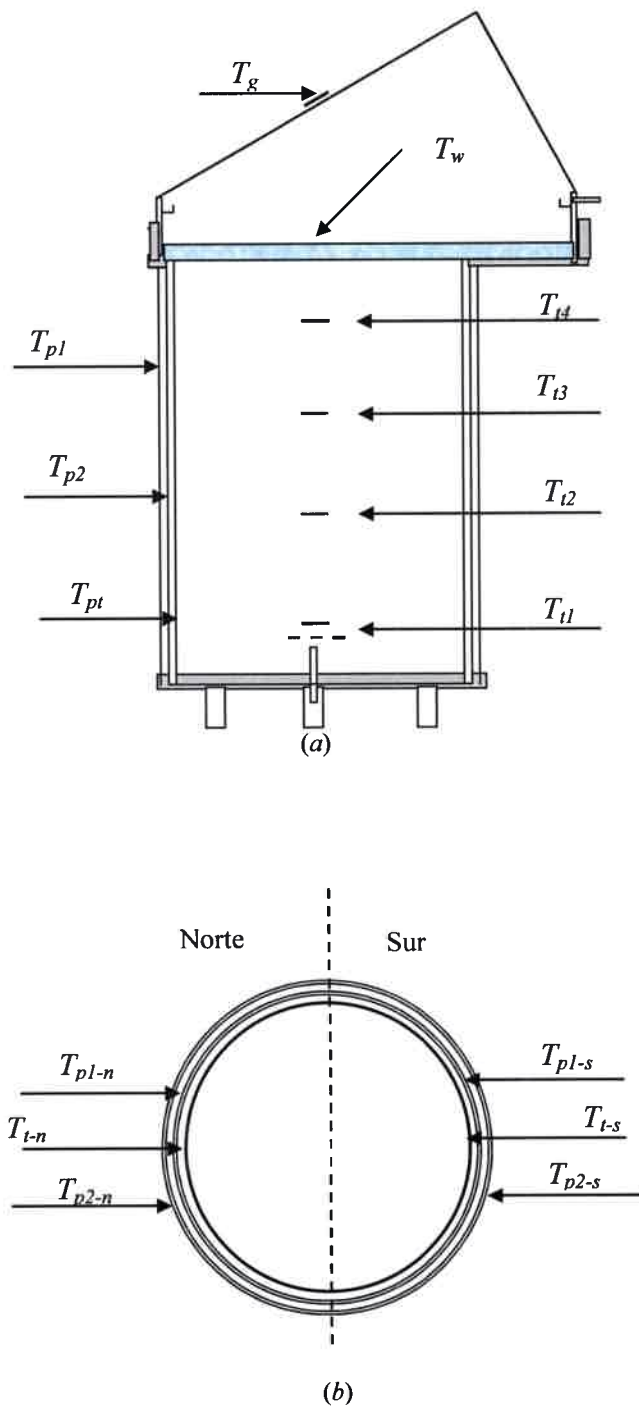


Figura 2-1: a) Corte longitudinal del DSCA. b) Corte trasversal del DSCA

II.1 Estudio del DSCA.

Consistió en la operación del DSCA por distintos períodos de tiempos que incluyeron días correspondientes a las cuatro estaciones del año. Esto permitió evaluar el funcionamiento del dispositivo para distintas condiciones climáticas. Se determinaron las temperaturas de los distintos componentes del dispositivo, la producción y las variables del medio ambiente.

Los gráficos que se muestran a continuación dan cuenta de las mediciones realizadas en las distintas experiencias enumeradas anteriormente.

En el gráfico 2.2 se puede apreciar la variación de las distintas temperaturas en el dispositivo medidas durante cinco días del mes de octubre, cuatro de los cuales se caracterizaron por tener buena radiación solar, mientras que uno estuvo nublado. Se observa en el mismo como la temperatura de la batea, T_w , sigue a la temperatura ambiente, T_a , mostrando algo de inercia térmica el agua de la batea, debido esto a la importante capacidad calorífica del agua.

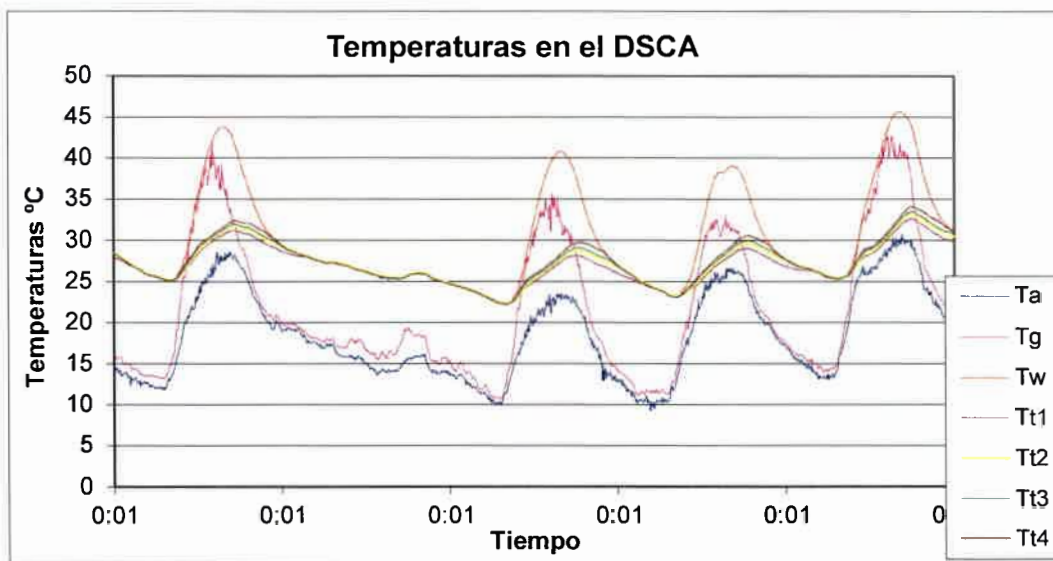


Figura 2-2: Temperaturas ambiente, del vidrio, del agua de la batea y del interior del colector acumulador

Por el contrario la temperatura del vidrio, T_g , aumenta en forma muy rápida por lo que alcanza la máxima temperatura antes que la ambiente. En el cuarto día, con vientos de mayor intensidad, se observa en la temperatura del vidrio una importante

disminución. Los valores de T_g durante la noche son ligeramente superiores a la temperatura ambiente debido a la transferencia de energía que se produce desde el agua de la batea al vidrio.

Lo más significativo se observa en las temperaturas interiores del colector acumulador. Por un lado la gráfica deja de manifiesto la gran inercia térmica que posee el agua contenida en el tanque, lo cual era previsible. Por otro lado se observa la poca estratificación que se produce en el mismo. Para mayor claridad se pueden observar estas temperaturas en la figura 2.3.

En esta figura queda de manifiesto que la diferencia entre la temperatura mayor, que es la medida por la termocupla más cercana a la batea, y la temperatura menor, medida próxima al fondo del tanque, nunca es superior a los 2 °C, diferencia que se presenta durante el día, mientras que durante la noche las temperaturas son prácticamente iguales. Este comportamiento se repite a lo largo de todo el año, es decir, la diferencias de temperatura en el tanque es prácticamente independiente de las condiciones ambientales de temperatura y viento, aunque no de la radiación solar. En días nublados, como se observa en el segundo día en la figura 2.3, las cuatro temperaturas medidas en el interior del tanque y la medida en la batea son prácticamente iguales, es decir que el dispositivo se comporta de igual manera que durante la noche.

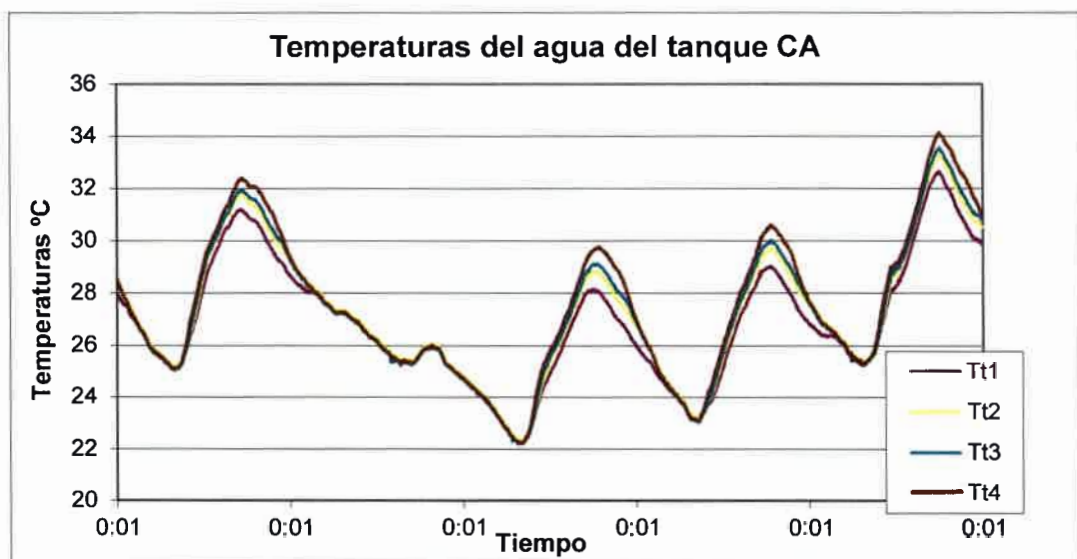


Figura 2-3: Temperaturas medidas por las cuatro termocuplas ubicadas en el interior del colector acumulador

Las gráficas 2.4 y 2.5 muestran las temperaturas medidas por las termocuplas ubicadas en la pared del tanque y en los policarbonatos así como también la temperatura ambiente.

En la figura 2.4 se observa como las temperaturas de los policarbonatos se mantienen en valores muy próximos a la ambiente sobre todo el policarbonato exterior, T_{p2} , no así la temperatura de la pared del tanque, T_{pt} , la cual se mantiene en niveles más altos producto de su contacto con el agua del tanque que se mantiene siempre más alta que la temperatura ambiente. La temperatura del policarbonato interior, T_{p1} , siempre se mantiene por encima de la ambiente, debido a que no está en contacto con el medio ambiente. Con la aparición del sol, la cara norte de los policarbonatos aumenta sus temperaturas rápidamente superando a la temperatura del tanque. Esto nos da la pauta que durante ese periodo las pérdidas que se producen por esa cara son pequeñas.

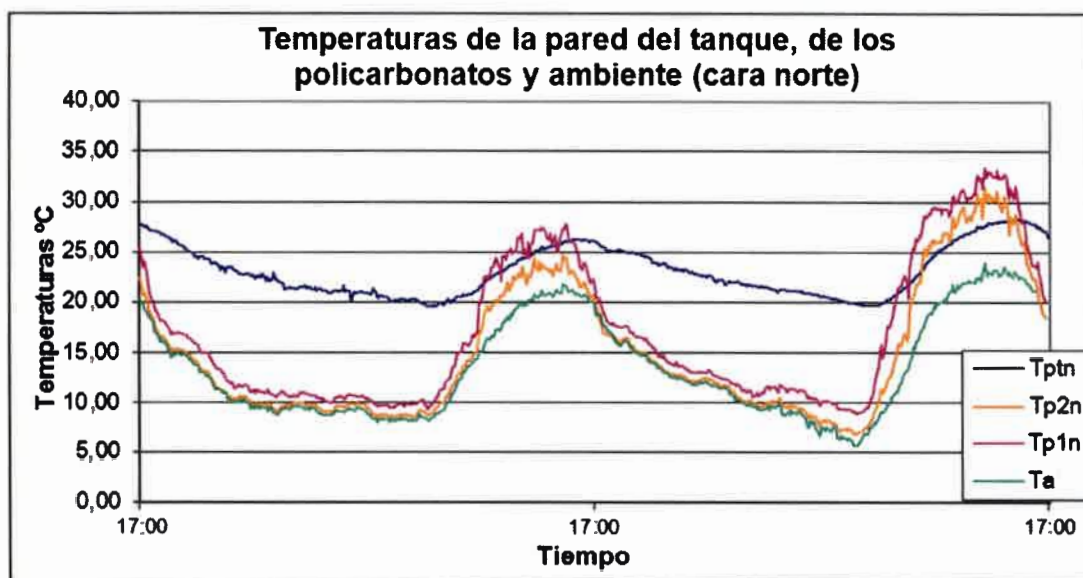


Figura 2.4: Temperaturas medidas en la cara norte del tanque

Por el contrario en la figura 2.5 se observa que las temperaturas de los dos policarbonatos en la cara sur nunca superan a la temperatura de la pared del tanque, por lo que la diferencia de temperaturas siempre existe lo que hace que las pérdidas que se producen por esta cara sean mayores que la que se producen por la cara norte.

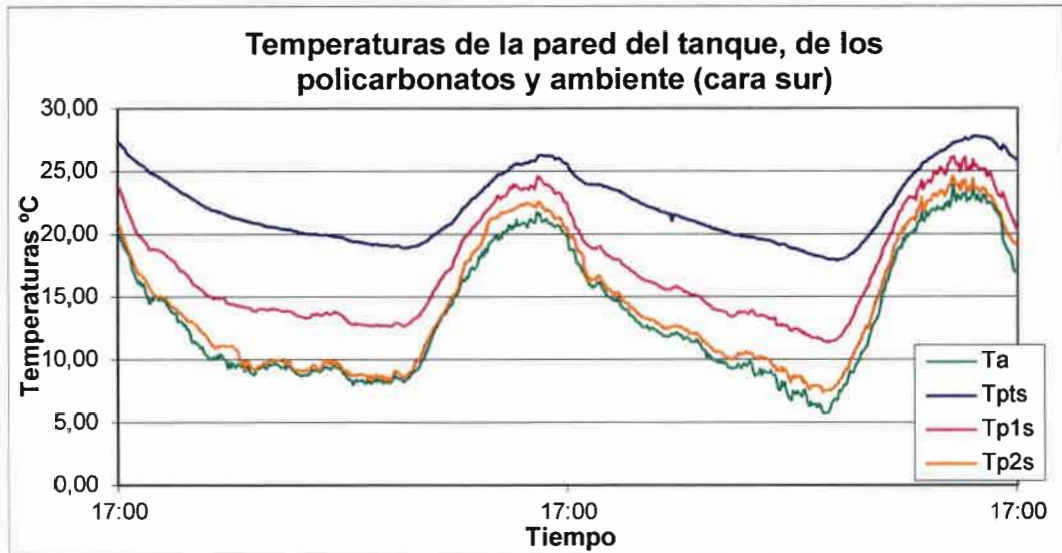


Figura 2.5: Temperaturas medidas en la cara sur del tanque.

La figura 2.6 nos muestra la relación entre las temperaturas de la cara norte y sur del tanque con la temperatura del agua contenida en el mismo, medida en el centro del tanque. Por un lado se puede notar la gran inercia térmica que presenta el agua y por el otro la escasa diferencia de temperatura que hay entre las cara norte y sur entre si y de estas con el agua. La diferencia entre la temperatura de la cara norte, T_{ptn} , y la temperatura de la cara sur, T_{pts} , nunca supera los $1,8^{\circ}\text{C}$ siendo el promedio de esta diferencia apenas superior al grado. Por otra parte la máxima diferencia con respecto al agua, T_i , apenas supera los 3°C .

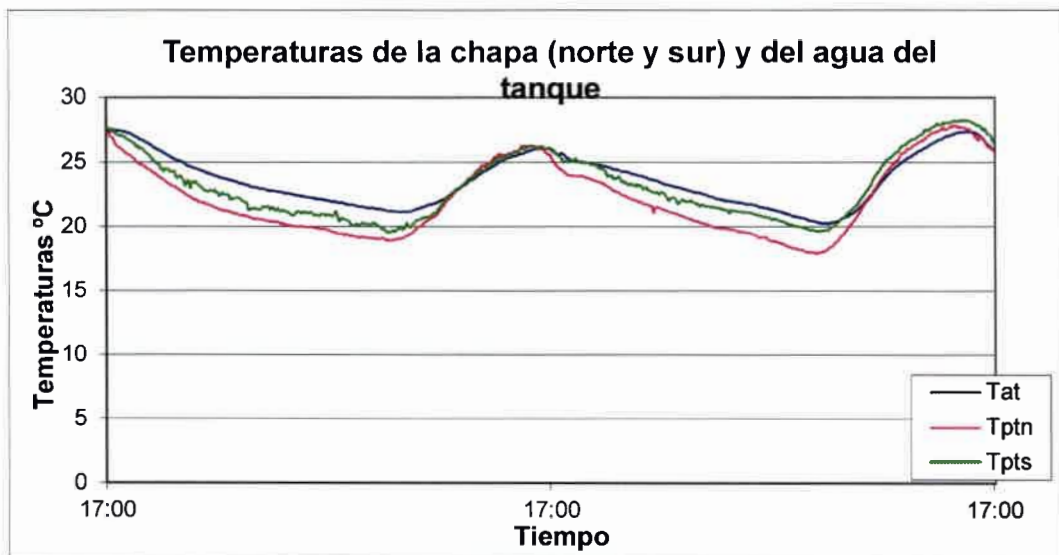


Figura 2.6: Temperaturas medidas en las caras norte y sur del tanque y en su interior.

Las figuras 2.7 y 2.8 nos muestran la distribución de temperaturas en los policarbonatos y la temperatura ambiente. Se observa como las temperaturas de los policarbonatos siguen a la temperatura ambiente, sobre todo en el policarbonato exterior, salvo en los periodos de radiación solar en donde la temperatura de la cara norte aumenta considerablemente con lo cual aumenta la diferencia con la cara sur.

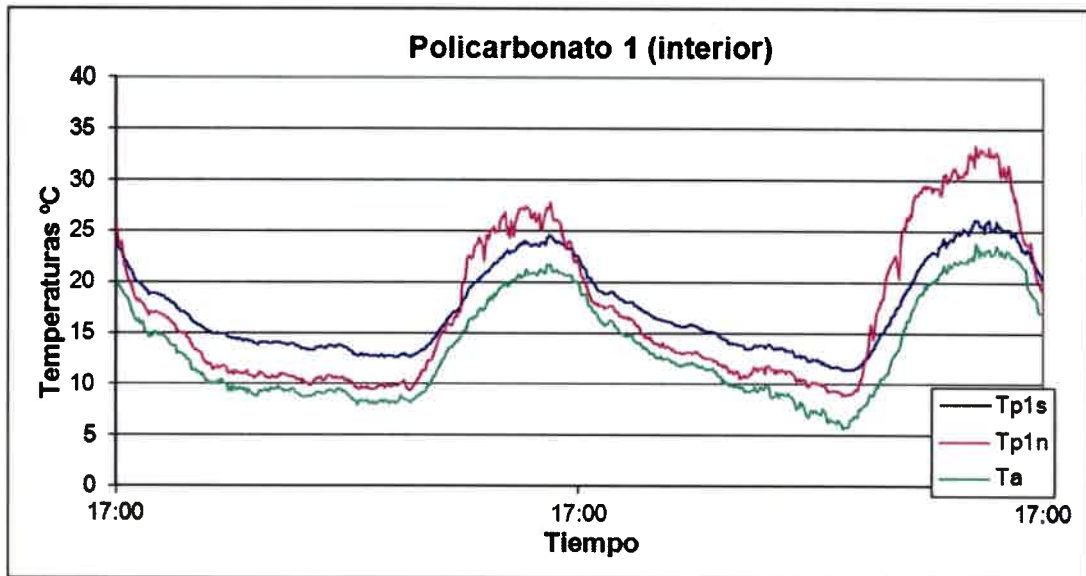


Figura 2.7: Temperaturas medidas en el policarbonato interior en caras norte y sur y la temperatura ambiente.

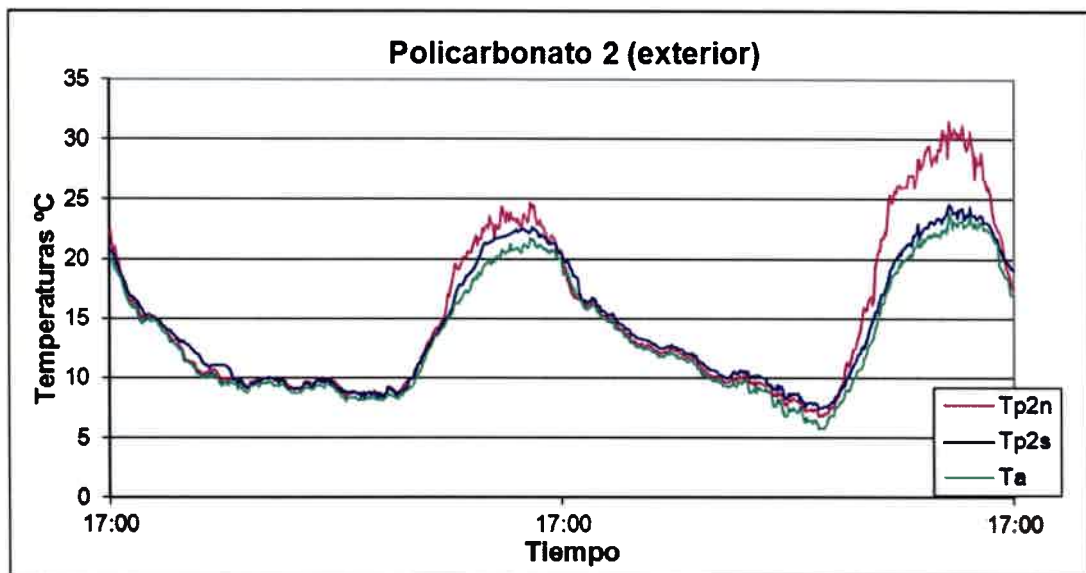


Figura 2.8: Temperaturas medidas en el policarbonato exterior en caras norte y sur y la temperatura ambiente.

Producción del DSCA

En cuanto a la producción del DSCA se pudo establecer a partir de los ensayos realizados, que en el periodo comprendido entre octubre y marzo la producción diaria promedio es de aproximadamente 5,5 litros, llegando excepcionalmente a los 8 litros diarios. Por el contrario entre los meses de abril y septiembre la producción diaria promedio es de aproximadamente 2,5 litros, siendo la producción más baja de 1,8 litros.

Es de destacar que las producciones máximas se producen luego de varios días sucesivos con mucha radiación solar y elevada temperatura ambiente y que las bajas producciones de agua destilada se dan luego de varios días consecutivos con muy baja radiación, días nublado, y bajas temperatura ambiente.

La producción anual se estima en los 1400 litros.

Comparación con el destilador de batea simple.

La importancia del aporte del tanque colector-acumulador queda de manifiesto si se compara la producción del DSCA con la de un destilador de batea simple, DS. El utilizado para realizar la comparación tiene la misma geometría y las mismas dimensiones que el destilador del DSCA.

Los resultados de los ensayos dan cuenta de la diferencia de temperaturas entre el agua de la batea en el DSCA y el agua de la batea del destilador simple. La figura 2.9 muestra la variación de temperaturas durante dos días consecutivos. Se puede observar en la misma que durante las horas de radiación solar la temperatura en la batea del DS (azul) es superior a la del DSCA (violeta), mientras que durante la noche la temperatura en la batea de este es superior a la del DS, quedando de manifiesto el aporte de energía del tanque colector-acumulador al destilador. Este aporte que se manifiesta durante las dos terceras partes del día, hace que la producción del DSCA sea superior a las del DS.

Sin embargo, cuando hay radiación solar, se observa que la temperatura en el agua de la batea en el DS es mayor que en el DSCA. Esto tendría dos explicaciones. En primer lugar la existencia de una pequeña transferencia de calor desde la batea hacia el tanque, debido esto a que la temperatura del agua de la batea es mayor que la temperatura del agua del tanque. En segundo lugar hay que considerar el hecho de que la batea del DS tiene una mayor superficie de acero inoxidable que la batea del DSCA, por lo que absorbe y transfiere al agua una mayor cantidad de energía.

Esta diferencia en la temperatura del agua de la batea se ve reflejada en la producción. La figura 2.10 muestra la producción del DSCA y del DS en los mismos días considerados en el gráfico 2.11. Se ve claramente el aporte de energía del colector acumulador en el periodo nocturno haciendo que los niveles de producción no decrezcan en forma abrupta como en el caso del DS, el cual no cuenta con ese aporte.

Se observa también que durante el periodo de radiación solar hay mayor producción en DS, debido esto a que, como se dijo, la temperatura en el agua de la batea en el DS es mayor que en el DSCA.

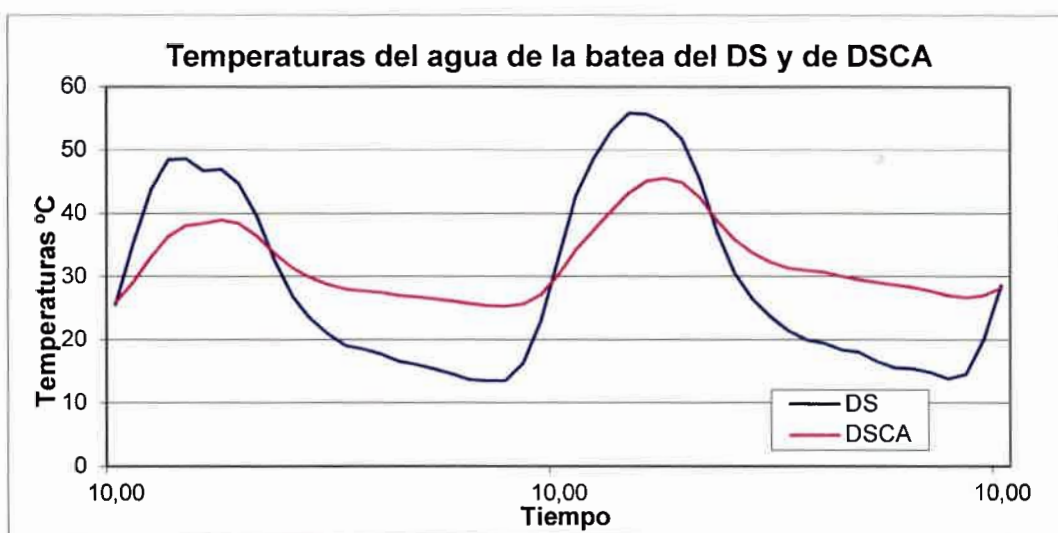


Figura 2.9: Temperaturas medidas en el agua de las bateas del DSCA y del DS.

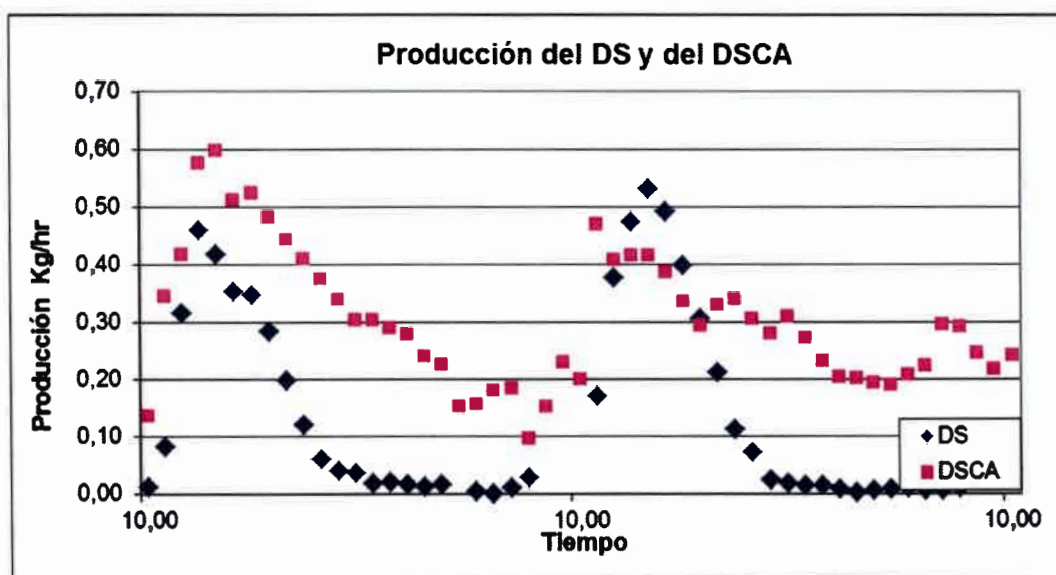


Figura 2.10: Producción de dos días del DSCA y del DS.

En la figura 2.11 se observa la producción de varios días del destilador simple y del destilador solar colector acumulador. Queda en evidencia la importancia del aporte de energía del tanque colector acumulador. Esteban (2002) señala que la producción en el DSCA supera, en promedio, en un 77% lo producido por el DS.

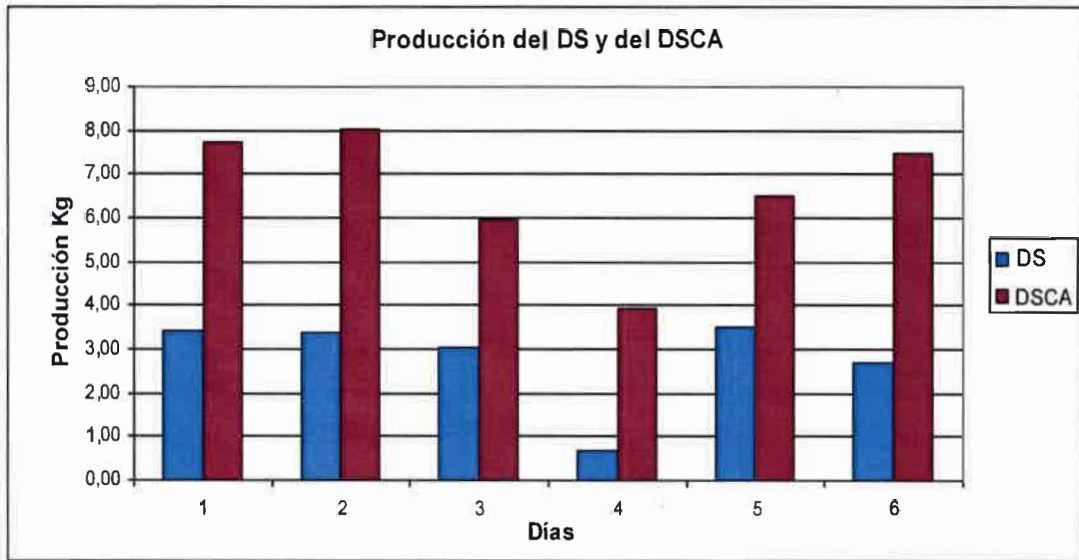


Figura 2.11: Producción del destilador simple y del destilador solar colector acumulador de 6 días del mes de octubre.

II.2 Estudio del destilador.

Con la premisa de determinar la producción y las pérdidas del destilador funcionando a distintas temperaturas se incorporaron al dispositivo distintas cantidades de energía mediante una resistencia eléctrica.

La experiencia se desarrolló entre los meses de julio y agosto.

La experiencia se realizó en cuatro etapas, se desarrollaron al aire libre y consistieron en el agregado de energía eléctrica al agua. En la primera etapa se midió la producción operando el dispositivo solo con energía solar. En la segunda etapa se adicionaron en forma uniforme a lo largo de todo el día un total de 15 MJ. En la tercera etapa se adicionaron 30 MJ y en la cuarta 60 MJ.

Se midieron las temperaturas de batea, del vidrio y la ambiente así como también de radiación solar y producción. La obtención de estos datos permitió calcular

las pérdidas térmicas que se producen a través del destilador, lo que será presentado en el capítulo III.

La figura 2.12 muestra los valores de producción de destilado en función de la energía recibida por el dispositivo. Se observa en la misma cuatro grupos de puntos bien diferenciados. El primer grupo, que está en torno a los 30 MJ, corresponde a la primera etapa donde la experiencia fue realizada solo con el aporte de radiación solar, es decir sin aporte de energía eléctrica. El segundo grupo de puntos corresponde a la segunda etapa de la experiencia descrita en donde se incorporan 15 MJ suplementarios a través de una resistencia eléctrica. Los otros dos grupos corresponden a la tercera y cuarta etapa de la experiencia en donde fueron incorporados 30 y 60 MJ respectivamente.

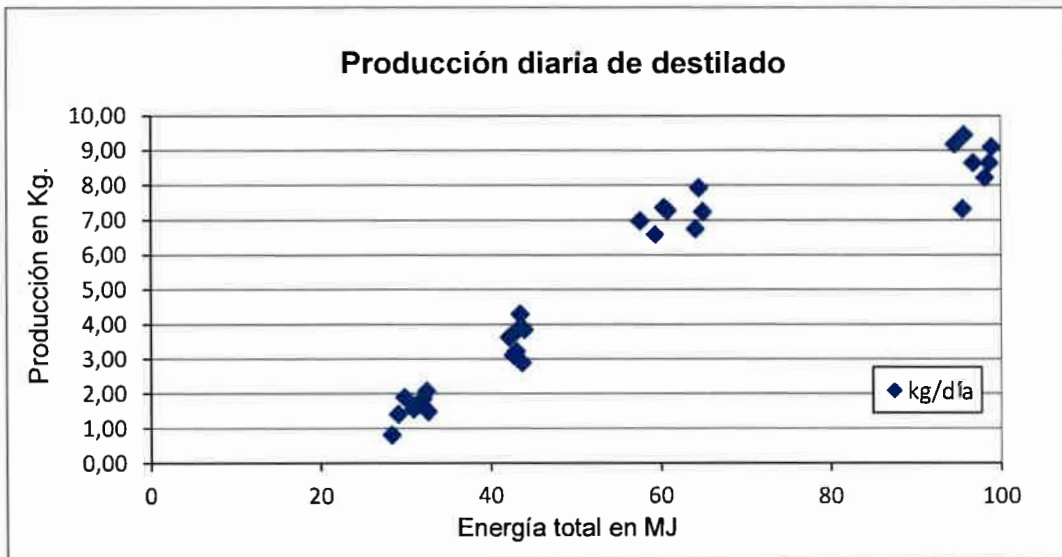


Figura 2.12 Producción diaria de destilado en función de la energía recibida por el dispositivo.

La figura 2.13 muestra las temperaturas medias nocturnas del vidrio, del agua de la batea, la ambiente y la energía recibida por el dispositivo durante el día. Estos valores junto a los valores de producción mostrados anteriormente permitieron determinar las pérdidas térmicas nocturnas que se producen por el destilador.

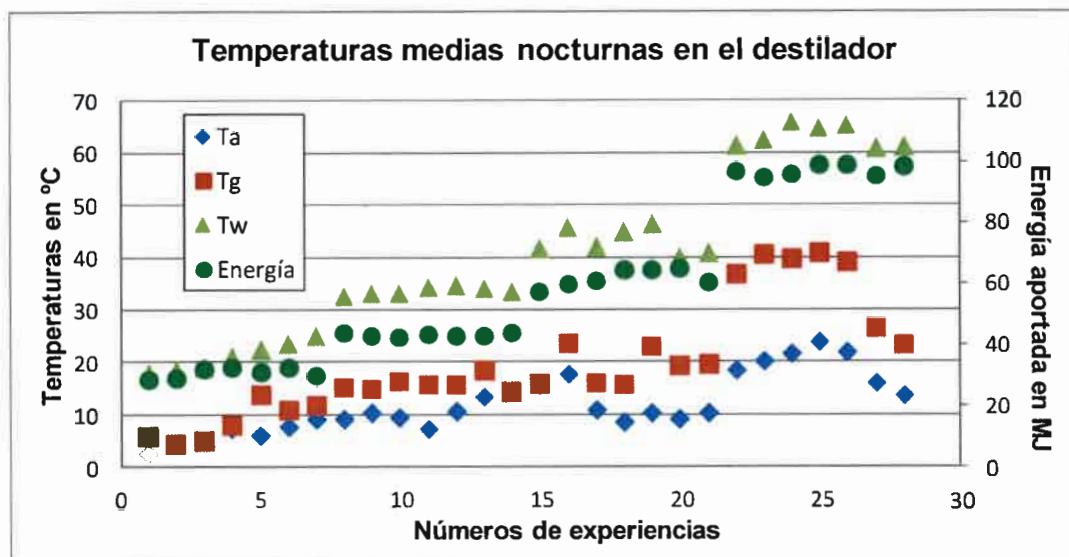


Figura 2.13 Temperaturas medias nocturnas del vidrio, del agua de la batea, del ambiente y energía aportada al dispositivo.

II.3 Estudio del colector acumulador

Para evaluar solamente el funcionamiento del colector-acumulador se quitó la cúpula destiladora y en su lugar se aplicó una plancha de poliestireno expandido de 0,1 m de espesor. Se incorporó un resistor de 1500 vatios de potencia en el interior del acumulador, a unos 0,2 m de distancia del borde superior. También, usando las conexiones de entradas de fluido que posee el acumulador en sus extremos superior e inferior, se instaló un conducto con una pequeña bomba eléctrica para hacer recircular el fluido. En la figura 2.12, a y b, se presenta un esquema de lo realizado.

Para medir las temperaturas de los distintos componentes se instalaron, como se observa en la figura, cuatro termocuplas en el interior del tanque, dos en cada uno de los policarbonatos (uno al sur y otra al norte) y dos en la pared del tanque. Estas mediciones fueron muy importantes ya que permitieron comprender el comportamiento del tanque.

El experimento consistió en conectar el resistor a 220 voltios mientras se mantenía en recirculación el agua del acumulador, hasta que la temperatura en su interior alcanzó unos 70 °C. A partir de este instante se desconectaron la resistencia y la bomba y se dio inicio el periodo de estudio de enfriamiento del acumulador. Esta experiencia se realizó tanto en el laboratorio del G.E.S. en Río Cuarto como en el laboratorio del L.E.S. en San Luis, obteniéndose resultados muy similares.

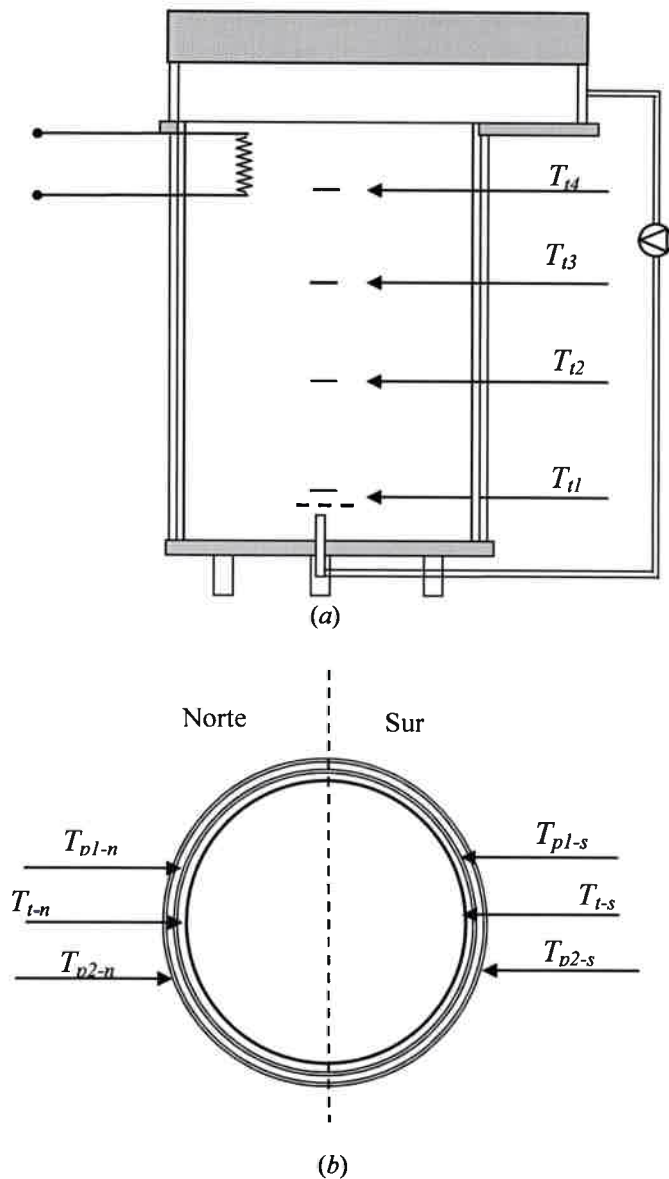


Figura 2.14: Corte longitudinal, (a), y transversal, (b), del colector acumulador con la bomba de circulación y la resistencia eléctrica.

La figura 2.15, que se presenta a continuación corresponde a la experiencia desarrollada en Río Cuarto. Esta se presenta solo con el objetivo de señalar de donde se obtuvieron los datos que luego fueron utilizados para calcular las pérdidas térmicas por el colector-acumulador.

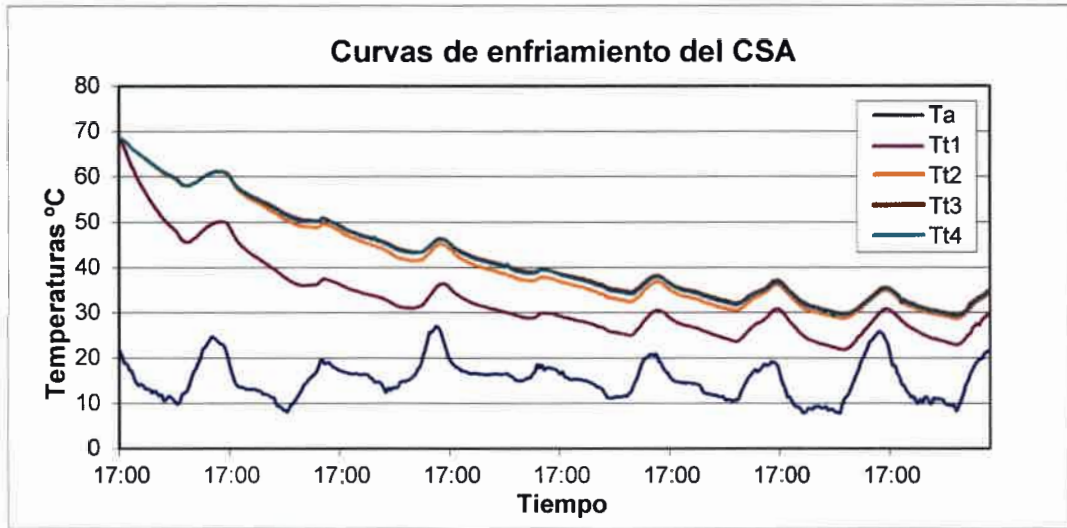


Figura 2.15: Curvas de enfriamiento del colector solar acumulador.

Las curvas representan las temperaturas medidas con las 4 termocuplas en el interior del tanque y la temperatura ambiente. Se puede observar como la temperatura medida por la termocupla 1, en fondo del tanque, baja rápidamente y se “separa” de las otras que por el contrario permanecen con valores muy parecidos. Probablemente esta disminución de la temperatura se debe a la poca aislación que tiene el tanque en el fondo y a la convección natural que se produce en el interior del mismo.

Debe observarse que la diferencia de temperaturas entre la termocupla 1 y el resto de las termocuplas no se aprecia cuando el dispositivo trabaja completo, es decir con el destilador colocado en el tanque, lo cual queda de manifiesto en la figura 2.2 anteriormente presentada.

Se observa también que después de 5 o 6 días el sistema se estabiliza y los valores de las temperaturas de las termocuplas 2, 3 y 4 se mantienen muy parecidos, variando estas temperaturas a lo largo del día entre los 30 °C y 35 °C.

Para la obtención de las pérdidas térmicas, sin embargo, no se utilizó toda la curva. Los períodos diurnos, establecidos de 10 hs, se descartaron y se consideraron solamente los períodos nocturnos. De cada periodo se obtuvo la variación de la temperatura media del tanque y la temperatura media ambiente, con las cuales se establecieron las pérdidas térmicas del colector-acumulador, es decir, se repitió

sistemáticamente la experiencia para distintos rangos de temperatura final e inicial del agua.

Esta forma de obtención de la curva de pérdidas térmicas presupone un error que está relacionado con el hecho de que la temperatura media ambiente de los distintos períodos nocturnos considerados no tenía siempre el mismo valor. Pero al ser estas diferencias relativamente pequeñas se menospreciaron los errores que se pudieron haber cometido.

Este análisis se desarrollará con mayor detenimiento en el siguiente capítulo.

III. EVALUACIÓN DEL DSCA

Para evaluar el funcionamiento del DSCA se dividió el estudio en dos partes. Por un lado se evaluó el funcionamiento solamente del destilador determinándose la producción y la eficiencia del mismo y por otro lado se evaluó el dispositivo en su conjunto, es decir, funcionando simultáneamente como destilador y como colector-acumulador de energía, definiéndose distintos coeficientes que caracterizan su funcionamiento.

III.1 Evaluación del destilador

Para caracterizar el funcionamiento del destilador se calcula la producción y la eficiencia del mismo. En el caso de destiladores que tienen calentamiento auxiliar, en este caso producido por el tanque colector-acumulador, se suele caracterizar el rendimiento a través de la ganancia o GOR (Gained Output Ratio), que representa el calor necesario para evaporar el agua producida en un cierto intervalo de tiempo respecto a la energía recibida en ese mismo intervalo de tiempo.

La expresión del GOR dada por Howe y Tleimant, (1980) es:

$$G.O.R. = \Delta h \cdot m_d / H^d \quad (III.1)$$

dónde: Δh es el cambio de entalpía desde el agua fría a vapor. Este se consideró constante e igual a 2,5 MJ/Kg, que es el valor más comúnmente aceptado según lo señala Howe.

m_d es la masa de destilado en Kg./día.,

H^d es la radiación solar diaria total recibida por el dispositivo en MJ.

El producto $\Delta h \cdot m_d$ representa el calor necesario para evaporar agua a una cierta temperatura.

Para la determinación de este coeficiente se calculó la radiación recibida por todo el dispositivo y se midió los kilogramos de destilado obtenido.

Para la determinación de la radiación recibida se midió la radiación global horizontal horaria, H , en MJ/m² y se contó además para esta experiencia con un

pirheliómetro de incidencia normal para medir la radiación directa, H_b . Con esta última y la radiación global se obtuvo la radiación difusa, H_d , y la radiación incidente sobre la superficie vertical del colector, $H_{(90)}$:

$$H_d = H - H_b \cos \theta_z \quad (\text{III.2})$$

$$H_{(90)} = H_b \text{sen} \theta_z + 0,5 \cdot H_d \quad (\text{III.3})$$

En la ecuación III.3, el primer término del segundo miembro representa la radiación directa perpendicular al colector. En el segundo término el valor 0,5 es un factor de vista que tiene en cuenta que el colector ve solamente “medio” cielo.

La radiación total diaria recibida por el dispositivo, en MJ/m^2 , esta dada por:

$$H^d = A_b \cdot \Sigma H + 0,5 \cdot A_t \cdot \Sigma H_d + A_t \cdot \Sigma H_{(90)} \quad (\text{III.4})$$

En esta expresión A_t representa la superficie de la sección rectangular media del colector y A_b la superficie de la batea, todas en m^2 y Σ significa que es sobre todas las horas con sol del día. Entonces, el primer término representa la radiación recibida por la batea y los otros dos términos la radiación recibida por el colector.

En la tabla III.1 se observan los resultados obtenidos con las mediciones realizadas en el mes de julio. La misma da cuenta de mediciones efectuadas desde el 10 al 27 de julio. En la columna dos se observa los valores de producción, en la columna tres los valores de temperatura media ambiente diaria, en la columna cuatro la radiación recibida por todo el dispositivo durante el día y por último en la columna cinco los valores de G.O.R. diarios calculados con la ecuación III.1.

Tabla III.1: Producción diaria, temperatura ambiente media diaria, radiación total y eficiencia

| Día | Producción Kg/día | Tam °C | Rad. diaria MJ | GOR % |
|-----|----------------------|-----------|-------------------|----------|
| 10 | 1,85 | 6,6 | 23,69 | 19,52 |
| 11 | 1,7 | 11,5 | 29,09 | 14,63 |
| 12 | 1,89 | 11,9 | 29,3 | 16,1 |
| 13 | 2,33 | 6,3 | 30,49 | 19,11 |
| 14 | 1,48 | 10,6 | 26,27 | 14,08 |
| 15 | 1,59 | 10,4 | 22,09 | 18,01 |
| 16 | 2 | 11,9 | 29,49 | 16,94 |
| 17 | 1,67 | 12,9 | 23,9 | 17,42 |
| 18 | 1,37 | 14 | 27,78 | 12,32 |
| 19 | 1,11 | 13,8 | 17,31 | 16,03 |
| 20 | 1,07 | 11,5 | 11,79 | 22,75 |
| 21 | 0,81 | 5,6 | 8,05 | 25,28 |
| 22 | 1,41 | 1,3 | 28,05 | 12,53 |
| 23 | 1,85 | 3,7 | 31,46 | 14,7 |
| 24 | 1,48 | 8,3 | 32,06 | 11,54 |
| 25 | 1,55 | 9,1 | 30,29 | 12,83 |
| 26 | 2,07 | 10,5 | 31,8 | 16,29 |
| 27 | 1,89 | 11,8 | 29,03 | 16,25 |

De la tabla III.1 se obtiene los gráficos 3.1 y 3.2.

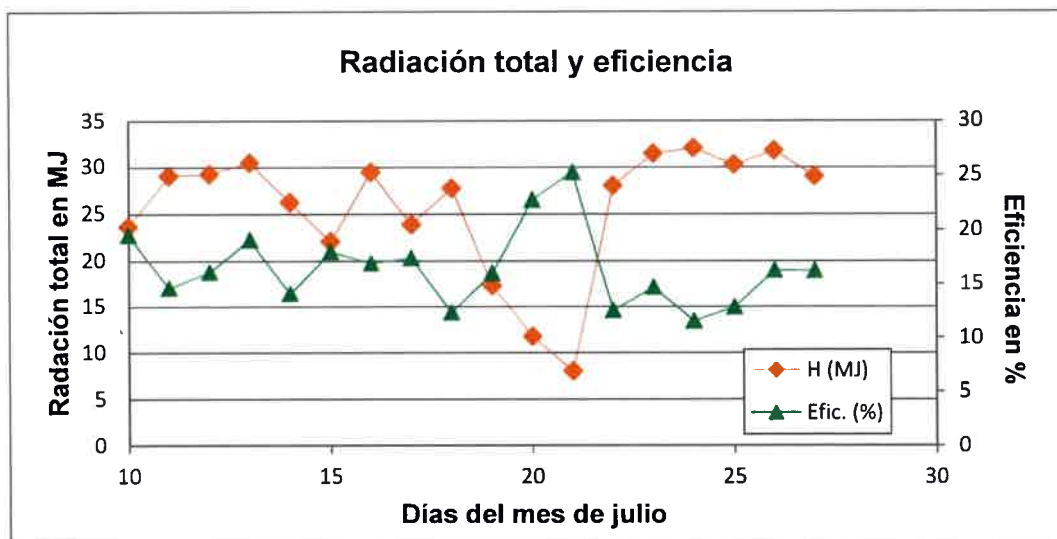


Figura 3.1: Radiación total en MJ y eficiencia en %

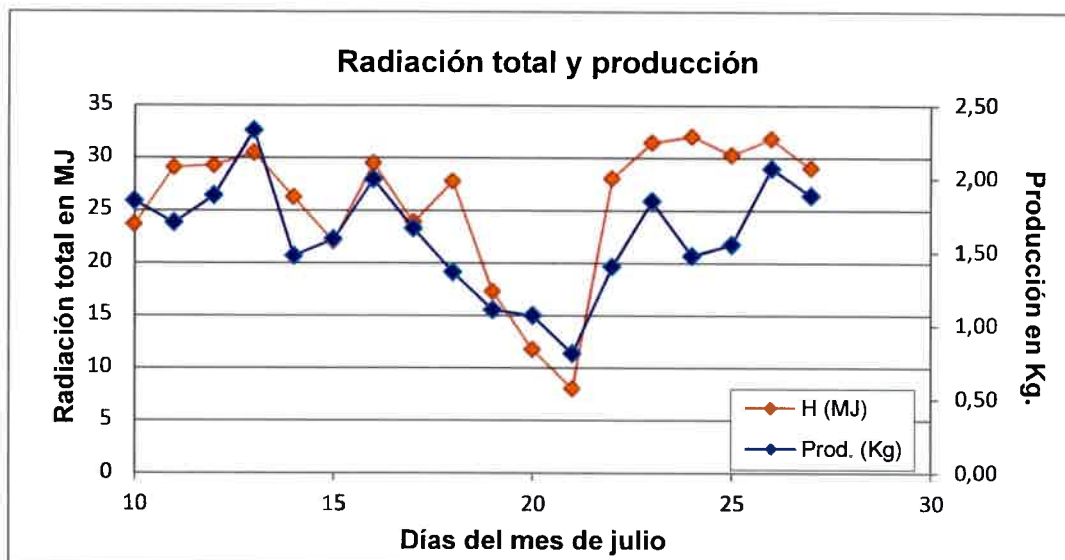


Figura 3.2: Radiación total en MJ y producción en Kg.

En el gráfico 3.1 se observa que la eficiencia crece fuertemente luego de que a una secuencia de días soleados le sigue un día nublado. Esto se entiende que es así debido a que la producción continúa a costa de la energía acumulada en el tanque en esos días soleados.

En el gráfico 3.2 se observa como la producción sigue en general a la radiación. En los cuatros primeros días medidos, la producción se eleva casi en forma exponencial producto de una suba permanente en la radiación y luego a partir del quinto día donde la radiación disminuye en forma permanente lo mismo ocurre con la producción. Sin embargo las pequeñas fluctuaciones de la producción no acompañan en la misma proporción las fluctuaciones de la radiación, esto debido a la inercia que presenta el sistema. También hay que tener en cuenta que existen otras variables climáticas, como el viento, que tienen influencia sobre la producción.

III.2 Evaluación del dispositivo como acumulador de energía y destilador.

Se plantea en este punto una evaluación del dispositivo en sus dos funciones, es decir, como colector-acumulador de calor y como destilador. La importancia de este análisis radica en determinar en forma experimental la capacidad del dispositivo para coleccionar y acumular energía.

Se utilizan para ello los datos obtenidos en el mes de julio por cuanto esta representa la condición más desfavorable para el funcionamiento del mismo.

Para alcanzar este objetivo se propone un balance de energía simplificado que tome en cuenta las ganancias y las pérdidas térmicas del dispositivo.

III.2.1. Balance de energía simplificado. Cálculo de las pérdidas térmicas y del factor de eficiencia óptica.

Para realizar una evaluación del dispositivo, tanto como colector-acumulador y como destilador, se plantea un balance energético simplificado, a partir de las temperaturas internas del acumulador y de la producción del destilado [Fasulo *et al.*, 2009a].

$$Fe \cdot H^d = \Delta h \cdot m_d + c_p \cdot M_i \cdot (\Delta T_i) + P \quad (III.5)$$

En esta ecuación Fe es un coeficiente que se denominó factor de eficiencia óptica que establece cuanto de la energía incidente sobre el dispositivo completo es absorbida por este y que se manifiesta en un aumento de la energía interna en el acumulador y en producción de destilado; el último término P , representa las pérdidas térmicas que se producen en todo el DSCA. Se desprecia por ser insignificante la energía absorbida por el material, lo cual solo tiene alguna importancia al comenzar a trabajar el dispositivo.

Entonces primero se calculan las pérdidas para luego con la ecuación III.5 calcular el factor Fe .

Para realizar estos cálculos se consideraron tres periodos de evaluación: Diurno, que cubre las horas del día con radiación solar; nocturno que considera las horas del día sin radiación y por último diario que contiene los dos anteriores.

III.2.1.1. Pérdidas térmicas nocturnas

Para determinar las pérdidas térmicas nocturnas del dispositivo completo se midieron los cambios de temperatura en el acumulador y la cantidad de agua destilada producida en ese periodo.

El cálculo de las pérdidas se realizó utilizando la ecuación III.5, la cual queda, para $H^d = 0$, de la siguiente manera:

$$0 = \Delta h \cdot m_d + c_p \cdot M_t \cdot (\Delta T_w) + P \quad (\text{III.6})$$

Para la obtención de las pérdidas que se producen solo por el tanque durante el período nocturno se utilizaron los datos recogidos durante dicho periodo en la experiencia descrita en el punto II.3. Dicha experiencia consistió en retirar la cúpula del destilador y tapar la abertura del tanque con material aislante, luego calentar el agua hasta una temperatura de 70 °C y finalmente dejarlo enfriar.

En la gráfica 2.15, obtenida en esta experiencia, se puede ver la evolución térmica del acumulador, en función del tiempo.

A partir de la ecuación III.6, y considerando que no hay producción por lo expresado anteriormente, se obtienen las pérdidas que se producen solo por el colector-acumulador con esta nueva expresión:

$$0 = c_p \cdot M_t \cdot (\Delta T_w) + P_{CA} \quad (\text{III.7})$$

Las pérdidas térmicas nocturnas, P_{CA} , obtenidas con esta última ecuación en función de la diferencia de la temperatura media del agua en el acumulador y la temperatura media del ambiente, se muestran en el gráfico 3.3. En este gráfico cada punto representa las pérdidas térmicas que se producen en cada período nocturno considerado. Estas están expresadas en MJ.

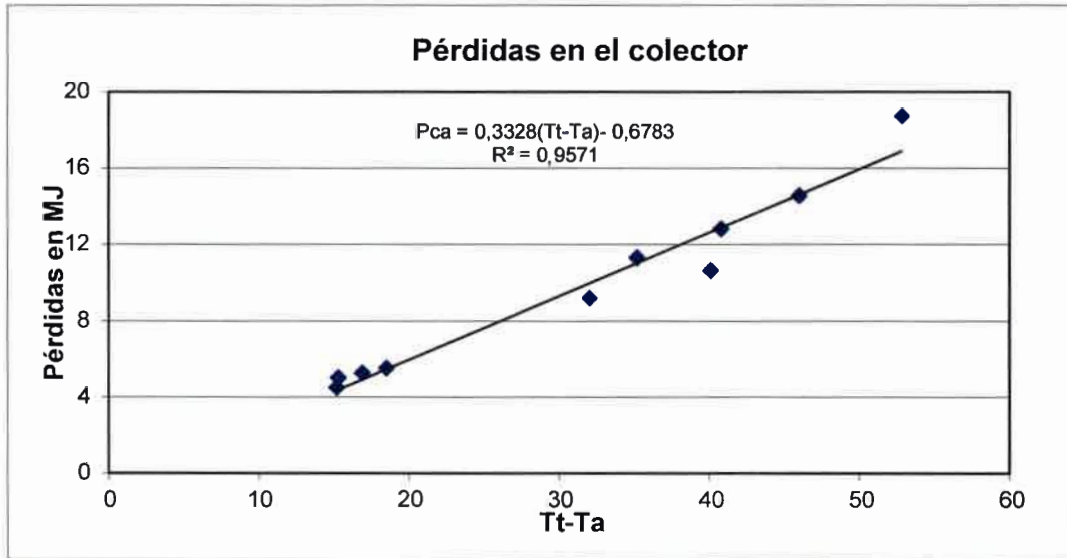


Figura 3.3: Las pérdidas térmicas nocturnas del acumulador en función de la diferencia entre la temperatura media el agua y la temperatura media ambiente.

Como resultado de esta experiencia se obtiene por correlación lineal simple la ecuación de las pérdidas térmicas del colector-acumulador del DSCA.

$$P_{CA} = 0,3328 \cdot (T_t - T_a) - 0,68 \quad \text{(III.8)}$$

A partir de esta relación se puede calcular las pérdidas que se producen por el tanque actuando el dispositivo completo, es decir como colector-acumulador y destilador.

Si a las pérdidas totales del DCSA, P , obtenidas con la ecuación III.6 se le resta las obtenidas con las ecuaciones III.7 o III.8, P_{CA} , se obtiene las pérdidas que se producen solo a través del destilador, P_D . Con esto ya se tiene las pérdidas totales nocturnas del dispositivo discriminando cuales son las que se producen a través del colector y cuales a través del destilador, notándose que estas últimas representan en promedio, el 66% de las pérdidas totales, como se puede ver en la tabla III. 2

Tabla III.2: Determinación de las pérdidas nocturnas del colector, del conjunto colector-destilador y totales

| Días | ΔT_t °C | T_{am} °C | T_{tm} °C | $T_{tm}-T_{am}$ °C | H MJ | P MJ | P_{CA} MJ | P_D MJ |
|--------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| 22 | -4,94 | -0,1 | 17,71 | 17,81 | 28,05 | 11,03 | 4,34 | 5,8 |
| 23 | -4,62 | 2,8 | 18,33 | 15,53 | 31,46 | 10,04 | 4,01 | 5,56 |
| 24 | -4,04 | 7,3 | 20,04 | 12,74 | 32,06 | 8,86 | 3,62 | 5,31 |
| 25 | -4,38 | 6,1 | 21,09 | 14,99 | 30,29 | 8,51 | 3,5 | 4,21 |
| 26 | -5,14 | 7,4 | 22,19 | 14,79 | 31,8 | 10,24 | 4,08 | 6,01 |
| 27 | -4,68 | 9,1 | 22,88 | 13,78 | 29,03 | 9,55 | 3,85 | 5,65 |
| Prom. | -4,63 | 5,43 | 20,37 | 14,94 | 30,45 | 9,705 | 3,9 | 5,42 |

Con el propósito de confirmar los cálculos obtenidos de la pérdidas nocturnas por el destilador y además, con el objetivo de obtener una curva que representen los mismos, se realizan otra serie de experiencias auxiliares las cuales consistieron en incrementar los valores de la temperatura del agua del tanque mediante la incorporación de energía térmica por medio de la energía eléctrica. Con esto se generaron tres nuevas experiencias. En la primera, se incorporó una cantidad de energía del orden de la mitad de la energía solar diaria que llega al DSCA, esto es unos 15 MJ diarios, aportados en forma homogénea durante las 24 hs del día. En la segunda, se llevó esa cantidad al doble, esto es unos 30 MJ por día y en la tercera se duplicó nuevamente la energía aportada, esto es unos 60 MJ.

Las pérdidas térmicas nocturnas en cada una de las etapas se obtuvieron nuevamente a partir de un balance de energía simplificado representado por la ecuación III.9:

$$E_e = \Delta h \cdot m_d + c_p \cdot M_t \cdot (\Delta T_w) + P \quad (\text{III.9})$$

Esta ecuación, que corresponde a un balance de energía para el dispositivo completo es muy similar a la ecuación III.6, salvo que en el primer miembro aparece el aporte de energía eléctrica.

Conocido el aporte eléctrico se calculan las pérdidas nocturnas del dispositivo completo a partir de la ecuación III.9. Utilizando la ecuación III.8 calculamos las pérdidas por el colector-acumulador y por último con la diferencia de ambas se obtienen las pérdidas por el destilador.

En el gráfico 3.4 se observa las pérdidas térmicas nocturnas por el destilador en función de la diferencia de temperaturas entre el agua de la batea y la ambiente.

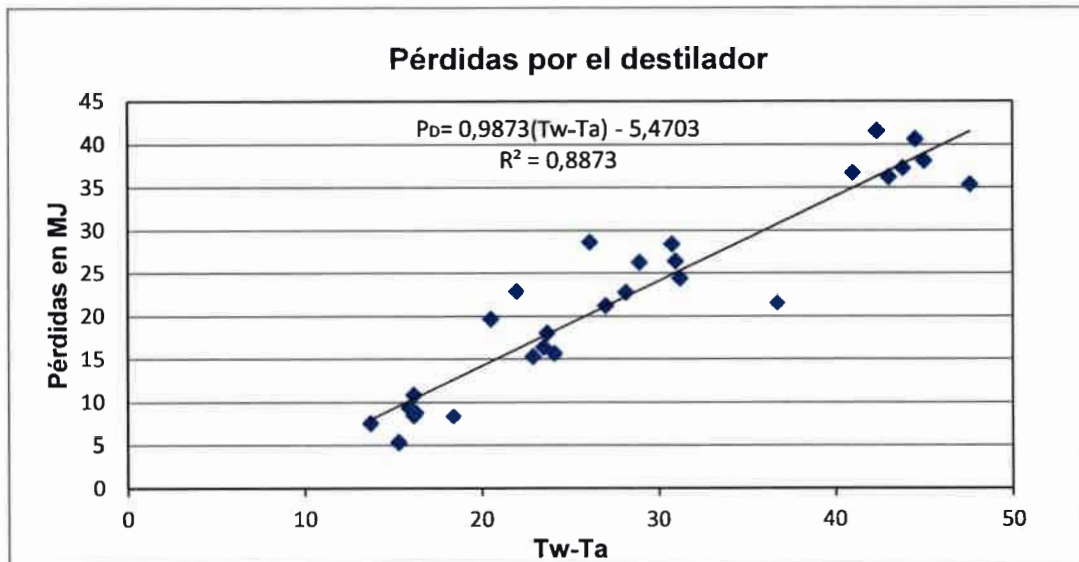


Figura 3.4: Las pérdidas térmicas nocturnas en el destilador en función de la diferencia entre la temperatura media del agua de la batea y la temperatura ambiente.

Cada punto en la gráfica representa las pérdidas de cada periodo nocturno considerado expresadas en MJ.

La ecuación de la curva obtenida es:

$$P_D = 0,9873 \times (T_w - T_a) - 5,4703 \quad (\text{III.10})$$

III.2.1.2. Pérdidas térmicas diurnas y cálculo de F_e

Considerando que la temperatura exterior del colector-acumulador es prácticamente igual a la ambiente, tanto en el periodo diurno como en el nocturno, se utilizó la ecuación III.8 para el cálculo de las pérdidas diurnas por el colector. Para las pérdidas diurnas por el destilador se utilizó la ecuación III.10.

Hay que resaltar que los resultados obtenidos para el período diurno son aproximados, ya que como se mencionó, las ecuaciones utilizadas se obtuvieron para el período nocturno; sin embargo estos cálculos se realizaron con el objetivo de conocer en forma aproximada el valor de las pérdidas diurnas y con ello poder calcular el factor de eficiencia óptico presente en la ecuación III.5.

Entonces, utilizando la ecuación III.5 se obtuvo el factor de eficiencia óptico, cuyos valores se muestran en la tabla III.3.

Tabla III.3: Determinación de las pérdidas diurnas del colector-acumulador, del destilador, de todo el dispositivo y del factor de eficiencia Fe.

| Prod. Kg | Tam °C | Ttm °C | Tt-Ta °C | H. MJ | Δ Tt °C | P_{CA} MJ | P_D MJ | P MJ | Fe |
|--------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------|-------------|
| 0,85 | 2,7 | 18,15 | 15,45 | 28,05 | 4,06 | 4,46 | 7,87 | 12,34 | 0,88 |
| 1,22 | 4,5 | 17,94 | 13,44 | 31,46 | 5,4 | 3,79 | 7,04 | 10,84 | 0,87 |
| 0,96 | 9,4 | 18,96 | 9,56 | 32,06 | 5,86 | 2,5 | 5,22 | 7,73 | 0,78 |
| 0,56 | 12,2 | 20,08 | 7,88 | 30,29 | 5,34 | 1,94 | 6,79 | 8,74 | 0,78 |
| 1 | 13,5 | 21,51 | 8,01 | 31,8 | 5,86 | 1,99 | 6,63 | 8,62 | 0,81 |
| 1 | 14,5 | 22,42 | 7,92 | 29,03 | 5,6 | 1,96 | 5,80 | 7,77 | 0,84 |
| 0,93 | 9,47 | 19,84 | 10,38 | 30,45 | 5,35 | 2,77 | 6,56 | 9,34 | 0,83 |

En la tabla III.3 se observan los resultados obtenidos. Estos indican valores para Fe entre 78% y 88%, con una media del 83%.

Básicamente significa que el 83% de la energía recibida por el dispositivo es absorbida y gran parte de esta es utilizada para la producción de destilado y para el calentamiento del agua en el colector. Sin embargo si se observan los valores de producción se concluye que solo una pequeña parte de la energía almacenada se utiliza para la producción de destilado. Se observa también que las pérdidas por el destilador son más importantes que por el colector a pesar de que este posee una gran superficie en contacto con el medio ambiente. Para los días considerados, en promedio para el período diurno, el 71% de las pérdidas se producen por el destilador y solo el 29% por el colector.

IV. ESTUDIO TEÓRICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL DSCA

Con el fin de desarrollar un modelo matemático que represente el funcionamiento del DSCA se realiza este estudio teórico de los distintos componentes del mismo.

Se divide el sistema DSCA en dos subsistemas: el destilador solar propiamente dicho y el tanque colector-acumulador. A su vez, el estudio de ambos subsistemas consta de dos partes, una referida a la ganancia de energía y la otra referida a las pérdidas de energía.

IV.1. Estudio del destilador solar

Principio de funcionamiento

La figura 4.1 nos muestra un esquema del destilador y el diagrama de flujos de energía en el mismo, donde se incluye el flujo de energía aportado por el tanque colector-acumulador. Los distintos flujos de calor que se presentan en el funcionamiento del destilador están representados por \dot{q} , la radiación solar recibida es I , R , representa la fracción de radiación solar reflejada por los distintos componentes del destilador y α' la fracción de radiación absorbida por los mismos.

La figura 4.2 representa el circuito térmico característico de un destilador solar al que se le acopla un tanque colector-acumulador. En esta, las h_c , h_r , h_k , h_e , representan los distintos coeficientes de transferencia de calor, T las temperaturas de los distintos componentes del destilador y C la energía acumulada en el vidrio y en el agua de la batea.

La radiación solar que llega a la cubierta de vidrio es en parte absorbida y en parte reflejada por ésta. El resto de la radiación es transmitida hacia el agua de la batea que a su vez absorbe y refleja una parte y la otra la transmite a la batea propiamente dicha. La atenuación del flujo solar depende de la absorción del agua y de la profundidad de la batea. Una gran parte de la energía térmica que absorbe la batea pasa por convección al agua de la batea y también a la del tanque, mientras que una pequeña parte se pierde a la atmósfera por conducción a través de la base de la batea. Parte de la energía que absorbe el agua de la batea se transfiere a la cubierta de vidrio por

convección, radiación y evaporación y otra parte pequeña se pierde por conducción a la atmósfera por las paredes laterales de la batea. Los procesos de convección y evaporación son procesos simultáneos y relacionados entre sí. El agua que se evapora se condensa en el vidrio y le transfiere su energía. El agua condensada, que ya es agua destilada, es colectada por un canal y depositada en un recipiente. La energía térmica recibida por la cubierta de vidrio por radiación, convección y evaporación se pierde hacia la atmósfera por convección y radiación. En el periodo del día en que el destilador no recibe radiación directa la energía térmica es aportada por el tanque colector acumulador. En este periodo los procesos de transferencia, salvo los referidos a la radiación solar, son los mismos que los descritos.

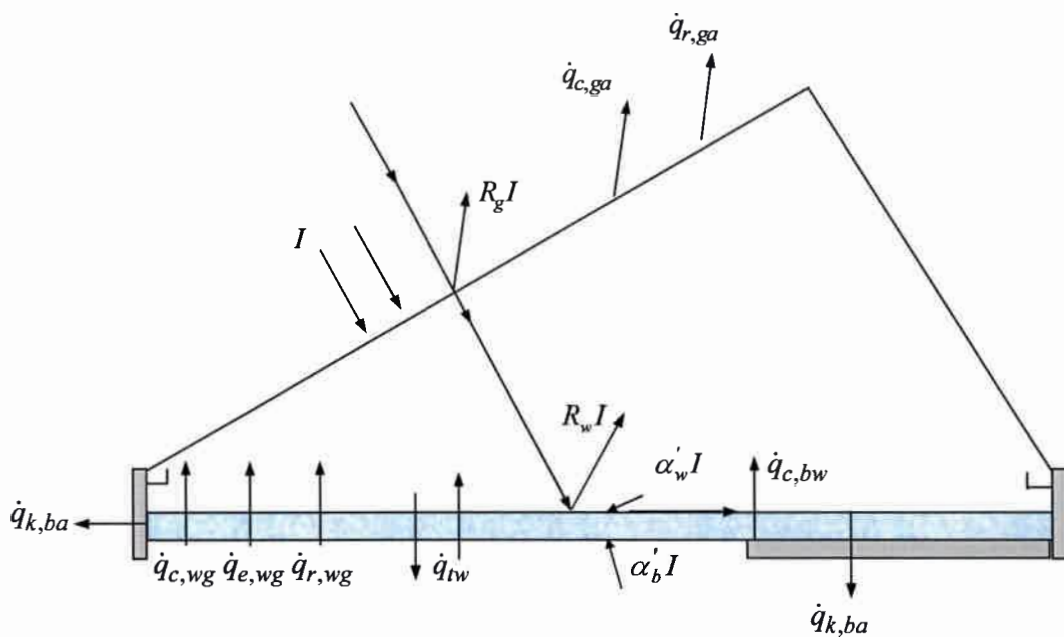


Figura 4.1: Diagrama de flujos de energía de un destilador solar acoplado al colector solar acumulador

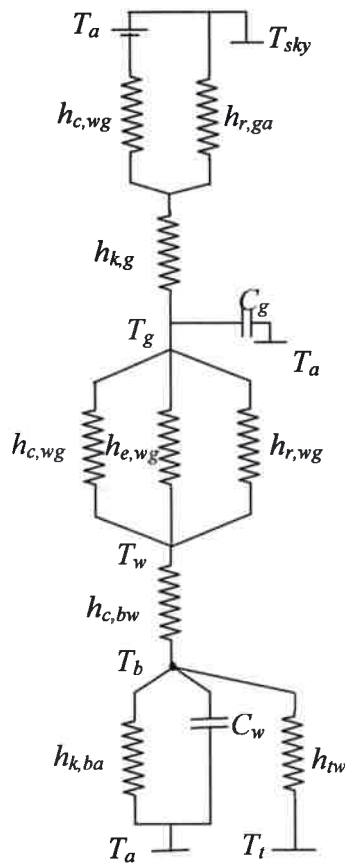


Figura 4.2: Diagrama de un circuito térmico de un destilador solar acoplado al colector solar acumulador

En el análisis del destilador que se realiza a continuación se plantea por un lado el estudio de las ganancias de energía del mismo a partir del análisis de la radiación absorbida y por otro lado el estudio de todos los procesos de transferencia de calor que se producen, lo cual nos permitirá establecer las pérdidas del dispositivo y la cantidad de agua evaporada que se convierte en destilada.

IV.1.1. Ganancia de energía. Absorción de la radiación solar.

Como se mencionó la ganancia de energía se refiere a la radiación absorbida por los distintos componentes del destilador, esto es, el vidrio, el agua de la batea y la batea. Conocida la radiación global horizontal se puede establecer la radiación absorbida por

cada componente del destilador a partir de las propiedades físicas de éstos, como son la absorptancia, la emitancia y la reflectancia del vidrio, del agua y del plástico de la batea. También en la determinación de la radiación absorbida juega un rol preponderante la profundidad del agua de la batea. Se desprecia en este modelo la variación que sufren estas propiedades con el ángulo de incidencia de los rayos solares, ya que esta variación no influye de manera significativa en los cálculos.

En la figura 4.1 se observa la fracción de radiación solar que es absorbida o reflejada por cada componente. Tiwari G. y Tiwari A. (2008) proponen las siguientes expresiones para determinarlas:

La radiación absorbida por la cubierta de vidrio:

$$\alpha'_g I = (1 - R_g) \cdot \alpha_g \cdot I \quad (\text{IV.1})$$

dónde: α'_g = Fracción de energía absorbida por el vidrio.

α_g = Absortividad del vidrio

R_g = Reflectancia del vidrio

I = Radiación global horizontal, en W/m^2

La radiación reflejada por la masa de agua es:

$$R'_w I = (1 - R_g) \cdot (1 - \alpha_g) \cdot R_w \cdot I \quad (\text{IV.2})$$

dónde: R'_w = Fracción de energía reflejada por la masa de agua

R_w = Reflectancia del agua

La radiación absorbida por la masa de agua es:

$$\alpha'_w I = \alpha_w \cdot (1 - R_g) \cdot (1 - \alpha_g) \cdot (1 - R_w) \cdot I \quad (\text{IV.3})$$

dónde: α'_w = Fracción de energía absorbida por la masa de agua

α_w = Absortividad del agua

La radiación absorbida por la batea es:

$$\alpha'_b I = \alpha_b \cdot (1 - R_g) \cdot (1 - \alpha_g) \cdot (1 - R_w) \cdot (1 - \alpha_w) \cdot I \quad (\text{IV.4})$$

dónde: α'_b = Fracción de energía absorbida por la batea

α_b = Absortividad de la batea.

Eventualmente se puede considerar un factor de atenuación que depende de la profundidad del agua de la batea. En el caso en estudio la profundidad es de 0,02 m. Tiwari establece que para esa profundidad el factor de atenuación es 0,6756, con lo cual si se considera la atenuación los valores obtenidos de radiación absorbida por el agua y por la batea quedan como:

$$\alpha'_w I = (1 - 0,6756) \cdot (1 - R_g) \cdot (1 - \alpha_g) \cdot (1 - R_w) \cdot I \quad (\text{IV.5})$$

$$\alpha'_b I = 0,6756 \cdot \alpha_b \cdot (1 - R_g) \cdot (1 - \alpha_g) \cdot (1 - R_w) \cdot (1 - \alpha_w) \cdot I \quad (\text{IV.6})$$

Además, deben considerarse dos factores más que atenúan la radiación solar. Uno es la atenuación producida por la malla antigranizo que cubre la plataforma en donde se ubican los destiladores y el otro es el que considera el polvo que se deposita diariamente sobre la cúpula de vidrio. Se estima que la radiación disminuye aproximadamente un 10% debido a estos dos factores. Estos factores quedan representados por un coeficiente, cuyo valor es 0,90, que debe premultiplicar al segundo miembro de la ecuación IV.1 con la que se obtiene la radiación absorbida por la cubierta de vidrio.

IV.1.2 Flujos de transferencia de calor en el destilador

Para la determinación de la producción y de las pérdidas que se producen desde el destilador hacia el medio ambiente se debe realizar un estudio de las transferencias de calor que se producen en este. Tiwari clasifica las de transferencias de calor que se producen en un destilador en: Internas y externas.

Las transferencias de calor internas que se producen desde la batea al agua de la batea son de naturaleza convectivas y las que se producen desde el agua al vidrio son gobernadas por la radiación, la convección y la evaporación. Las transferencias de calor externas se producen desde el vidrio y desde la batea hacia el ambiente y están gobernadas por la conducción, la convección y la radiación.

Las expresiones para su cálculo, presentes en el modelo propuesto por Tiwari, son las que a continuación se detallan.

IV.1.2.1 Transferencia de calor internas

Transferencia por radiación desde el agua de la batea al vidrio

Para su cálculo se considera que el factor de vista es igual a la unidad ya que la inclinación de la cobertura de vidrio es muy pequeña. Se considera además que la temperatura de la cubierta de vidrio es uniforme.

El valor del flujo de la transferencia de calor por radiación, $\dot{q}_{r,wg}$, está dado por:

$$\dot{q}_{r,wg} = h_{r,wg}(T_w - T_g) \quad \text{en } W/m^2 \quad (\text{IV.7})$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el agua y el vidrio, $h_{r,wg}$, se lo obtiene considerando el caso de planos infinitos paralelos:

$$h_{r,wg} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot \left[(T_w - T_g)^2 + (T_g + 273)^2 \right] \cdot (T_w + T_g + 546) \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (\text{IV.8})$$

La emitancia efectiva entre el agua y la cubierta de vidrio, ε_{eff} , es:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{(1/\varepsilon_w) + (1/\varepsilon_g) - 1} \quad (\text{IV.9})$$

dónde: T_w = Temperatura del agua de la batea, en $^\circ C$

T_g = Temperatura del vidrio, en $^\circ C$

ε_{eff} = Emitancia efectiva

ε_w = Emitancia del agua

ε_g = Emitancia del vidrio

Transferencia por convección desde el agua de la batea al vidrio

La transferencia de calor por convección natural se produce debido a la diferencia de temperatura entre el agua de la batea y la cubierta de vidrio. El valor de esta transferencia de calor convectiva está dada por:

$$\dot{q}_{c,wg} = h_{c,wg} \cdot (T_w - T_g) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.10)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección, $h_{c,wg}$, depende de la diferencia de temperatura entre la superficie de evaporación y la de condensación, las propiedades físicas del fluido, las características del flujo y la geometría de la cubierta de condensación. Para su cálculo son varios los modelos que se han desarrollado. Uno de los más utilizados es de Dunkle (1961), el cual si bien presenta algunas limitaciones, éstas no representan un obstáculo para el caso en estudio, por lo que es el utilizado.

Las limitaciones que presenta este modelo son las siguientes:

- a. Es válido únicamente para temperaturas normales de operación en destiladores solares, aproximadamente 50 °C, y diferencia de temperaturas entre superficies no mayores de 17 °C.
- b. Es independiente del volumen de la cavidad o del espacio entre las superficies de condensación y evaporación.
- c. Es válido únicamente para flujos de aire caliente ascendentes en espacios de aire horizontales encerrados por superficies de evaporación y condensación paralelas.

El destilador en estudio funciona a temperaturas menores a los 50 °C y las diferencia de temperatura entre las superficies nunca superan los 17 °C, por lo que, como ya se dijo, las limitaciones mencionadas no son tales para este caso.

Además, estudios de Dwivedi y Tiwari (2010) confirman que para sistemas de destilación solar pasivos este modelo es el que tiene mejor aproximación para una

profundidad del agua de la batea que varía entre los 0,01 y 0,03 m. Si consideramos que este dispositivo se comporta como tal durante el día ya que no recibe energía auxiliar del tanque y que la profundidad del agua de la batea del mismo es de 0,02 m, esto convalida aún más la utilización del modelo.

El coeficiente de transferencia de calor por convección depende no sólo de la temperatura del agua y del vidrio sino que también depende de las presiones parciales del vapor saturado a la temperatura del vidrio y del agua de la batea. Dunkle propone para su cálculo la ecuación:

$$h_{c,wg} = 0,884 \cdot \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273)}{(0,2689 - P_w)} \right] \text{ en } W/m^2 \text{ } ^\circ C \text{ (IV.11)}$$

El mismo autor propone las expresiones para obtener las presiones parciales del vapor las que se obtienen en función de las temperaturas del agua de la batea y el vidrio:

$$P_w = \exp \left[25,317 - \left(\frac{5144}{273 + T_w} \right) \right] \text{ en } N/m^2 \text{ (IV.12)}$$

$$P_g = \exp \left[25,317 - \left(\frac{5144}{273 + T_g} \right) \right] \text{ en } N/m^2 \text{ (IV.13)}$$

Transferencia por evaporación desde el agua de la batea al vidrio

La transferencia de calor por evaporación está dada por:

$$\dot{q}_{e,wg} = h_{e,wg} \cdot (T_w - T_g) \text{ en } W/m^2 \text{ (IV.14)}$$

Dunkle propone para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por evaporación la siguiente expresión:

$$h_{e,wg} = 0.016273 \cdot h_{c,wg} \cdot \left[\frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right] \text{ en } W/m^2 \text{ } ^\circ C \text{ (IV.15)}$$

Transferencia de calor entre la batea y el agua de la batea.

Otra transferencia de calor es la que se produce desde el fondo de la batea hacia el agua de la batea. Esta se calcula a partir de:

$$\dot{q}_{c,bw} = h_w \cdot (T_b - T_w) \quad \text{en } W/m^2 \quad (\text{IV.16})$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección desde el fondo de la batea al agua está dado por la expresión propuesta por Mc Adams:

$$h_{c,bw} = \frac{k_w}{X_w} C (Gr \cdot Pr)^n \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (\text{IV.17})$$

dónde: k_w = Conductividad térmica del agua, en $W/m \cdot ^\circ C$

X_w = Longitud característica del destilador entre la base y la superficie del agua

(0,02 m)

$C = 0,54$

$n = 0,25$

Gr = Número de Grashof

Pr = Número de Prandtl

El número de Grashof se calcula mediante la expresión:

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \rho_w \cdot \beta \cdot (T_b - T_w) \cdot d^3}{\nu^2} \quad (\text{IV.18})$$

Con: ρ_w = Densidad del agua

β = Coeficiente de expansión volumétrica.

ν = Viscosidad cinemática en m^2/s .

d = Profundidad de la batea, en m

y el número de Prandtl con la expresión:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k_w} \quad (IV.19)$$

Con μ = Viscosidad dinámica en $N s/m^2$.

IV.1.2.2. Transferencias de calor externas

Transferencia de calor por la cubierta.

El coeficiente de transferencia de calor por conducción a través del vidrio es:

$$h_{k,ga} = \frac{k_g}{L_g} \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.20)$$

dónde: k_g = Coeficiente de conductividad térmica del vidrio, en $W/m \cdot ^\circ C$.

L_g = Espesor del vidrio, en m .

Este flujo de energía que se transfiere al ambiente por convección y radiación, tiene por expresión:

$$\dot{q}_{t,ga} = h_{t,ga} \cdot (T_g - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.21)$$

donde el coeficiente de transferencia es:

$$h_{t,ga} = h_{c,ga} + h_{r,ga} \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.22)$$

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección esta dado en función de la velocidad del viento por la expresión:

$$h_{c,ga} = 2,8 + (3 \cdot V) \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.23)$$

donde V representa la velocidad del viento en m/s .

El coeficiente de transferencia por radiación es:

$$h_{r,ga} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_g \cdot \left[(T_g + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right]}{T_g - T_{sky}} \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.24)$$

Con $T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$ (temperatura de cielo)

Transferencia de calor por los laterales y el fondo.

La transferencia de calor total a través del poliestireno que cubre la base de la batea y los laterales por conducción está dada por:

$$\dot{q}_{k,ba} = h_{t,ba} \cdot (T_b - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.25)$$

Donde el coeficiente de transferencia por conducción es:

$$h_{k,ba} = \frac{k_p}{L_p} \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.26)$$

dónde: k_p = Coeficiente de conductividad térmica del poliestireno expandido,

en $W/m \cdot ^\circ C$

L_p = Espesor de la aislación, en m

Esta energía se transfiere luego al ambiente por convección y radiación. Por no contar con los valores de temperaturas de la pared exterior de la aislación del destilador, el cálculo del coeficiente de transferencia de calor que involucra tanto la transferencia de calor por radiación como por convección esta dado en función de la velocidad del viento por la siguiente expresión general:

$$h_{cr,ba} = 5.7 + (3.8 \cdot V) \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.27)$$

dónde V representa la velocidad del viento en m/s .

IV.1.3. Transferencia de calor desde el agua del tanque colector hacia la batea.

La transferencia de calor entre el agua del colector y la base de la batea se produce en ambos sentido. Durante el periodo en que la radiación solar incide sobre el agua de la batea, la temperatura de ésta se mantiene superior a la temperatura del agua del tanque por lo que se produce una transferencia de calor desde la batea al tanque. Sin embargo debido a la convección que se produce dentro de éste, esta transferencia de calor no se manifiesta en un aumento de la temperatura media del agua del tanque, por lo que esta transferencia se desprecia.

A partir del momento en que la radiación deja de incidir sobre la batea, la temperatura del agua de la batea disminuye hasta igualarse con el agua del tanque. Esto se observa en la figura 4.3 la cual presenta los valores medidos de las temperaturas del agua de la batea y la del agua del tanque de cinco días del mes de octubre.

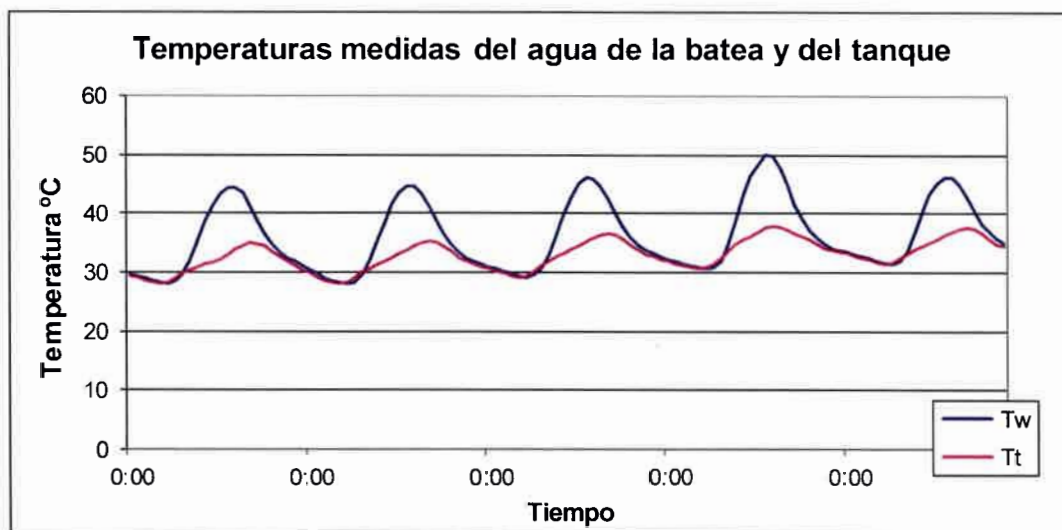


Figura 4.3: Temperaturas del agua de la batea y del agua del tanque

A pesar del equilibrio térmico alcanzado es evidente que hay un aporte de energía desde el tanque hacia la batea, ya que de no existir este aporte la batea tendría una temperatura igual a la ambiente como ocurre en un destilador de batea simple. Para calcular esta transferencia de calor se utiliza la información que provee el gráfico.

A partir del mismo, se puede suponer que la energía que el tanque le cede a la batea, \dot{q}_{tw} , es igual a la suma de la energía que la batea cede al ambiente por el fondo y los laterales de la misma, \dot{q}_{ba} , más la energía que el agua de la batea cede al ambiente por la cubierta, \dot{q}_{wa} , situación representada por la ecuación IV.28:

$$\dot{q}_{tw} = \dot{q}_{ba} + \dot{q}_{wa} \quad (IV.28)$$

Es decir que, esta ecuación nos señala que las pérdidas que sufre el tanque por la parte superior son iguales a la suma de las pérdidas que se producen en el destilador desde la batea y desde el agua de la batea hacia el medio ambiente. Tanto \dot{q}_{ba} como \dot{q}_{wa} son determinados en el punto siguiente.

Se define a \dot{q}_{tw} como “calor útil”, expresión que habitualmente se utiliza para nombrar a la energía que aporta un colector solar al destilador. Con el objetivo de ser consistente con esta terminología, se simboliza a este calor con \dot{q}_u , por lo que:

$$\dot{q}_u = \dot{q}_{tw} \quad (IV.29)$$

Este calor útil, es el que permite que durante la noche se mantenga una diferencia de temperatura entre el agua de la batea y el vidrio, lo que permite que el dispositivo siga produciendo agua destilada en este periodo.

En el capítulo VI del presente trabajo, en donde se presenta la simulación del funcionamiento del DSCA, se presenta la expresión matemática que cuantifica este calor útil.

IV.1.4. Pérdidas térmicas en el destilador

Coficiente de pérdidas térmicas por la cubierta

La pérdida total de calor que se produce desde el agua de la batea al ambiente por la cubierta del destilador está dada por la ecuación:

$$\dot{q}_{wa} = U_t \cdot (T_w - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.30)$$

El coeficiente de pérdidas por la cubierta U_t está dado por la expresión:

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{l,wg}} + \frac{1}{h_{k,ga}} + \frac{1}{h_{t,ga}} \right]^{-1} \quad (IV.31)$$

Con $h_{l,wg} = h_{c,wg} + h_{r,wg} + h_{e,wg}$

dónde $h_{l,wg}$ es el coeficiente total de transferencia de calor desde el agua de la batea al vidrio y los coeficientes $h_{c,wg}$, $h_{r,wg}$, $h_{e,wg}$ son los determinados por las ecuaciones (IV.8), (IV.11) y (IV.15).

Coefficiente de pérdidas térmicas por la base

Las pérdidas térmicas desde la batea al ambiente por la base y los laterales de la batea del destilador están dadas por la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{ba} = U_b \cdot (T_w - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.32)$$

Donde el coeficiente de pérdidas por la base y los laterales es:

$$U_b = \frac{1}{h_{c,bw}} + \frac{1}{h_{k,ba}} + \frac{1}{h_{cr,ba}} \quad (IV.33)$$

Los coeficientes $h_{c,bw}$, $h_{k,ba}$, $h_{cr,ba}$ son los determinados por las ecuaciones (IV.17), (IV.26) y (IV.27).

Coefficiente de pérdidas térmicas totales del destilador

La tasa de pérdidas de calor en Watt por metro cuadrado desde el agua hacia el ambiente través de la cubierta de vidrio y del fondo y los laterales está dada por:

$$\dot{q}_{td} = U_D \cdot (T_w - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.34)$$

Donde el coeficiente total de transferencia de calor es $U_D = U_i + U_b$.

IV.1.5. Balances de energía en el destilador

Determinados los coeficientes de transferencia de calor se plantean las ecuaciones de balance de energía en la cubierta, en el agua de la batea y en la batea misma.

Las siguientes suposiciones se realizan para plantear los balances de energía en los tres componentes del destilador simple:

- a. No se producen fugas de vapor en el destilador y por ende de energía que este contiene.
- b. El nivel del agua se mantiene constante.
- c. La superficie del agua de la batea y la cubierta de vidrio se consideran paralelas. Esta consideración es la misma que la que plantea Dunkle al establecer los coeficientes de transferencia de calor en el destilador.
- d. Las temperaturas de la cubierta de vidrio, tanto externa como interna son aproximadamente las mismas ya que el espesor del mismo es pequeño.
- e. No se produce estratificación vertical u horizontal en el agua de la batea.
- f. La capacidad calorífica de la cubierta de vidrio y de la batea se desprecian. Esta consideración adoptada por Tiwari en su modelo, simplifica los cálculos y no modifica en forma apreciable los resultados ya que como se señala en Duffie y Beckman la capacitancia del vidrio y en este caso de la batea son pequeñas comparadas con la del agua.

Balance de energía en la cubierta

Teniendo en cuenta que se desprecia la capacidad calorífica de la cubierta del vidrio, la ecuación del balance de energía en la misma es:

$$\alpha'_g I(t) + \dot{q}_{r,wg} + \dot{q}_{c,wg} + \dot{q}_{e,wg} = \dot{q}_{r,ga} + \dot{q}_{c,ga} \quad (\text{IV.35})$$

Donde α'_g es la fracción de energía absorbida por el vidrio y está dada por la ec. IV.1 e I la radiación solar global horizontal, la que se utiliza debido a que desprecia la inclinación de la cubierta. El término $\alpha'_g I(t)$ representa la tasa de energía absorbida por el vidrio.

Balance de energía en la base de la batea

Considerando que también se desprecia la capacidad calorífica de la batea, el balance en la base de la batea está dado por la siguiente ecuación:

$$\alpha'_b \cdot I(t) + \dot{q}_u = \dot{q}_{k,ba} + \dot{q}_{c,bw} \tag{IV.36}$$

El factor α'_b representa la fracción de energía absorbida por la batea y está determinada por la ecuación IV.4. El término $\alpha'_b I(t)$ representa la tasa de energía absorbida por la batea.

Balance de energía en el agua de la batea

En el primer miembro de esta ecuación figura la energía recibida por el agua debida a la radiación solar y a la aportada por la base de la batea, mientras que en el segundo miembro esta la variación de temperatura del agua más la energía transferida por el agua al vidrio por convección, evaporación y radiación.

$$\alpha'_w \cdot I(t) + \dot{q}_w = m_w \cdot c_p \cdot \frac{dT_w}{dt} + \dot{q}_{r,wg} + \dot{q}_{c,wg} + \dot{q}_{e,wg} \tag{IV.37}$$

El factor α'_w representa la fracción de energía absorbida por el agua de la batea y está determinada por la ecuación IV.3. El término $\alpha'_w I(t)$ representa la tasa de energía absorbida por el agua de la batea.

Las tres ecuaciones que representan el balance de energía del vidrio, la batea y el agua de la batea, forman un sistema de ecuaciones que permiten, conocida la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento, determinar el valor de la

temperatura del agua de la batea y la temperatura del vidrio, lo que permite luego calcular la producción del destilador.

Reemplazando las expresiones de todos los flujos de energía \dot{q} , en las ecuaciones IV.35, IV.36 y IV.37., se obtiene el siguiente sistema:

$$\alpha'_g I(t) + h_{r,wg}(T_w - T_g) + h_{c,wg} \cdot (T_w - T_g) + h_{e,wg} \cdot (T_w - T_g) = h_{t,ga} \cdot (T_g - T_a) \quad (\text{IV.38})$$

$$\alpha'_b \cdot I(t) + \dot{q}_u = h_{k,ba} \cdot (T_b - T_a) + h_{c,bw} \cdot (T_b - T_w) \quad (\text{IV.39})$$

$$\alpha'_w \cdot I(t) + h_{c,bw} \cdot (T_b - T_w) = m_w \cdot c_p \cdot \frac{dT_w}{dt} + h_{r,wg} \cdot (T_w - T_g) + h_{c,wg} \cdot (T_w - T_g) + h_{e,wg} \cdot (T_w - T_g) \quad (\text{IV.40})$$

Los coeficientes de transferencia de calor presentes en estas ecuaciones están determinados por las expresiones dadas en el punto IV.1.2 del presente capítulo. Como se observa en las mismas, estos coeficientes son función de las temperaturas de los distintos elementos entre los cuales se producen los intercambios de energías.

IV.1.6 Producción de destilado

La producción de agua destilada se puede calcular a partir del coeficiente de transferencia de evaporación y de la diferencia de temperatura entre el agua de la batea y la cubierta de vidrio. La expresión más utilizada, que da los kilogramos de destilado por hora obtenidos, es la siguiente:

$$\dot{m}_d = \frac{\dot{q}_{e,wg}}{L} \cdot 3600 = \frac{h_{e,wg} \cdot (T_w - T_g)}{L} \cdot 3600 \quad \text{en Kg/hr} \quad (\text{IV.41})$$

Donde L es el calor latente de vaporización en J/Kg. Para el cálculo de L se utiliza la expresión presentada por Fernandez y Chargoy (1990), la que expresa el calor latente de vaporización en función de la temperatura del agua de la batea:

$$L = 2,4935 \times 10^6 \left[1 - 9,447 \times 10^{-4} T_w + 1,3132 \times 10^{-7} T_w^2 - 4,7974 \times 10^{-9} T_w^3 \right] \quad (\text{IV.42})$$

Esta expresión es válida para temperaturas de agua de la batea menores a los 70°C, que son las temperaturas de funcionamiento del DSCA. A los fines de facilitar los cálculos se suele utilizar también un valor constante de L igual 2,5 MJ/kg.

La expresión IV.41 que pone en evidencia las principales variables de las cuales depende la producción, no es aconsejable utilizar en destiladores solares activos debido a que generalmente no es muy precisa. Es práctica común que para cada destilador se establezca una expresión que determine la producción del mismo a partir de los datos experimentales. En este caso se obtuvo la expresión a partir del método input-output propuesta por Voropoulos *et al.* (2001). Esta expresión que se obtuvo mediante correlaciones lineales múltiples, será presentada en el capítulo de simulación.

IV.2 Estudio del tanque colector acumulador.

IV.2.1 Ganancia de energía.

Para el cálculo de la radiación absorbida por el tanque se modeliza el mismo como una superficie cilíndrica de sección hexagonal y se considera entonces formada por seis colectores solares planos verticales, como se esquematiza en la figura 4.4.

Para el cálculo de la radiación absorbida por cada uno de los colectores se utiliza el modelo propuesto por Duffie y Beckman (1991). En este modelo la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada, usando el modelo isotrópico, está dada por la siguiente expresión:

$$S = (\tau\alpha)_b R_b I_b + \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (\tau\alpha)_d I_d + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) (\tau\alpha)_p \rho_g I \quad (\text{IV.43})$$

El primer término del segundo miembro de esta expresión da la radiación absorbida debido a la radiación directa, el segundo debido a la radiación difusa y el tercero a la radiación reflejada.

Los distintos factores representan:

$(\tau\alpha)_b$ = Producto transmitancia-absortancia debido a la radiación directa,

$(\tau\alpha)_d$ = Producto transmitancia-absortancia debido a la radiación difusa.

$(\tau\alpha)_\rho$ = Producto transmitancia-absortancia debido a la radiación reflejada.

R_b = Factor geométrico.

$\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right)$ = Factor de vista desde el colector hacia el cielo.

$\left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$ = Factor de vista desde el colector hacia la tierra.

I_b = Radiación directa en W/m^2

I_d = Radiación difusa en W/m^2

I = Radiación global horizontal en W/m^2

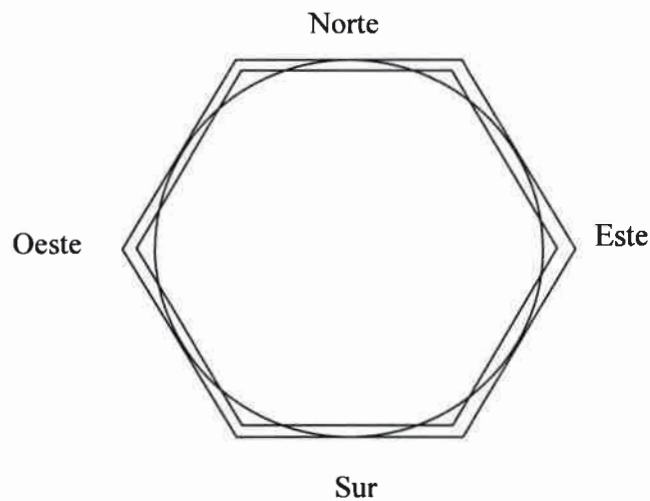


Figura 4.4: Esquema del tanque colector acumulador aproximado por un cilindro de sección hexagonal

Utilizando la geometría solar se calculan los coeficientes de transmitancia-absortancia para radiación directa, difusa y reflejada así como el factor geométrico R_b y con esto la radiación absorbida por cada uno de los 6 colectores planos verticales.

Calculo del factor geométrico R_b

El factor geométrico es la razón entre la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada y la radiación solar incidente en una superficie horizontal. Para su determinación es necesario calcular el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre

las placas colectoras. Dada una cierta inclinación de estas superficies, en el caso en estudio son superficies verticales ($\beta = 90^\circ$), este ángulo depende de la hora y del día solar, por lo que se hace necesario el cálculo de distintos parámetros que determinan la posición del sol según la fecha del calendario y la hora del día.

Declinación solar (δ)

Es el ángulo entre una línea que une los centros del sol y de la tierra y el plano ecuatorial, el cual cambia cada día. Para su determinación hay varias propuestas matemáticas, sin embargo la más precisa es la propuesta por Spencer:

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \Gamma + 0,070257 \cdot \sen \Gamma - 0,006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000907 \sen 2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \sen 3\Gamma) \cdot (180 / \pi) \quad (\text{IV.44})$$

dónde Γ es el ángulo día y se calcula con la expresión:

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1) / 365 \quad (\text{IV.45})$$

siendo d_n el día Juliano.

Angulo horario (ω)

Es el que se mide sobre la trayectoria solar, entre el plano definido por la línea Zenit-Nadir (Z-N) y la línea Sur-Norte del observador. Cero grado sexagesimal corresponde al norte y 15° de recorrido equivalen a una hora, tomando valores negativos en el amanecer y positivos al atardecer. La expresión para calcular el ángulo horario es la siguiente:

$$\omega = -172 + (t \cdot 15) \quad (\text{IV.46})$$

con t que varía entre 0 y 23.

Angulo azimut solar (ψ)

Es el ángulo entre línea horizontal Sur-Norte y la proyección sobre el plano horizontal de la radiación directa. Es negativo hacia el este y positivo al oeste.

Azimut solar de la superficie (γ)

Es la desviación respecto al meridiano local de la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie en estudio, siendo cero al sur, negativo al este y positivo al oeste. Varía entre -180 y 180.

Los colectores considerados en el estudio tienen los siguientes ángulos azimutales: -120, -60, 0, 60, 120 y 180.

Altitud solar (α_s)

Es el ángulo entre la horizontal y la línea entre el observador y el sol. Es el complemento del ángulo azimutal.

Distancia cenital (θ_z)

La distancia o ángulo cenital es el ángulo entre la línea Z-N y los rayos del sol que van al observador. Para su cálculo Iqbal (1983) obtuvo la expresión:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega = \text{sen} \alpha \quad (\text{IV.47})$$

dónde ϕ es la latitud del lugar.

Angulo de incidencia (θ)

Es el ángulo entre los rayos incidentes y la normal a la superficie. Iqbal propone para superficies verticales la siguiente expresión:

$$\cos \theta = -\cos \phi \cdot \cos \gamma \cdot \text{sen} \delta + \text{sen} \phi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \sin \omega \quad (\text{IV.48})$$

Obtenido el ángulo de incidencia y el ángulo cenital se calcula el factor geométrico, dado por:

$$R_b = \frac{I_{ob}}{I_o} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{IV.49})$$

Siendo: I_o = Radiación global horizontal extraterrestre en W/m^2 .

$I_{o\beta}$ = Radiación global extraterrestre incidente sobre una superficie inclinada en W/m^2 .

Transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar

Parte de la radiación directa que llega a una superficie es reflejada, parte es absorbida y finalmente lo que resta es transmitida. Para su estudio se comienza considerando la reflexión sin considerar absorción (Siegel y Howell, 1981). El análisis que sigue a continuación se aplica a radiación solar directa.

Para el estudio de los fenómenos de reflexión es necesario conocer la desviación que sufre un rayo de radiación directa cuando deja un medio material y comienza a atravesar otro.

La ley de Snell plantea la siguiente relación:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\theta_2}{\text{sen}\theta_1} \quad (\text{IV.50})$$

dónde: n_1 y n_2 índices de refracción del medio 1 y 2 respectivamente, según el esquema presentado en la figura 4.5.

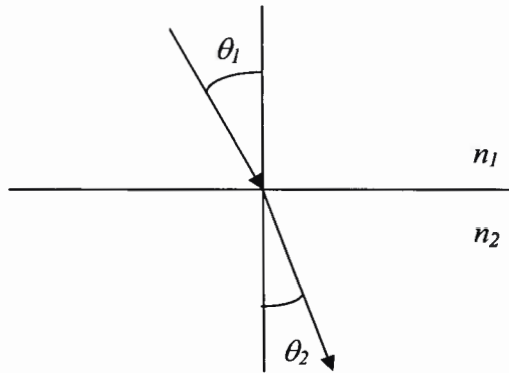


Figura.4.5. Refracción del rayo al atravesar medios de distintos índices de refracción

Para superficies lisas, Fresnel obtiene expresiones para las componentes paralelas y perpendiculares de la radiación no polarizada y con ellas obtiene la expresión para la radiación reflejada relativa.

Luego, la componente perpendicular, r_{\perp} , es:

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{IV.51})$$

La componente paralela, r_{\parallel} , es:

$$r_{\parallel} = \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{IV.52})$$

dónde: θ_1 = Angulo de incidencia

θ_2 = Angulo de refracción

La radiación reflejada relativa se expresa como:

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} \cdot (r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (\text{IV.53})$$

dónde I_r es la radiación directa reflejada e I_i es la radiación directa incidente.

Evidentemente aquí se plantea una simplificación ya que el recorrido de los rayos al atravesar las placas de policarbonato es mucho más complejo. En este sentido, Barral *et al.*, (2001), presenta una descripción detallada de las múltiples reflexiones que sufren los rayos al atravesar estas placas.

En aplicaciones solares la transmisión de radiación se da través de una placa o película de material por lo que hay dos interfaces en donde se producen pérdidas por reflexión. Si se considera solamente la componente perpendicular de polarización y considerando una radiación unitaria, la que llega a la segunda interface es $(1 - r_{\perp})$, de esta $(1 - r_{\perp})^2$ pasa a través de la segunda interface y $r_{\perp}(1 - r_{\perp})$ es reflejada a la primera.

Así se llega a la expresión de la transmitancia por la componente perpendicular de polarización:

$$\tau = (1 - r_{\perp})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n} = \frac{(1 - r_{\perp})^2}{1 - r_{\perp}^2} = \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \quad (\text{IV.54})$$

Exactamente la misma expresión se obtiene para la componente paralela de polarización. Luego la transmitancia de la radiación inicialmente no polarizada es el promedio de las dos componentes:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (\text{IV.55})$$

El subíndice r establece que solo han sido consideradas las pérdidas por reflexión.

Para un sistema de dos cubiertas como es el caso en estudio un análisis similar conduce a la siguiente expresión:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + 3 \cdot r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + 3 \cdot r_{\perp}} \right) \quad (\text{IV.56})$$

La transmitancia por reflexión para los distintos materiales de las cubiertas va a estar dada en función del ángulo de incidencia y el número de cubiertas.

Por otro lado la absorción de radiación de un medio parcialmente transparente es descrito por la ley de Bouguer's, el cual está basado en la suposición que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad local del medio y a la distancia que la radiación debe recorrer en el medio:

$$dI = -IKdx \quad (\text{IV.57})$$

Donde K es la constante de proporcionalidad, llamado coeficiente de extinción el cual es constante para todo el espectro solar. Integrando a lo largo de todo el recorrido por el medio se obtiene:

$$\tau_a = \frac{I_{transmitada}}{I_{incidente}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right) \quad (IV.58)$$

El subíndice a indica que en la expresión anterior solo se consideran las pérdidas por absorción.

Las propiedades ópticas de los sistemas de cubierta como la transmitancia, la reflectancia y la absortancia van a estar dadas en función de los dos tipos de pérdidas descritas anteriormente. Considerando la componente perpendicular se obtiene las expresiones de transmitancia, reflectancia y absortancia:

$$\tau_{\perp} = \frac{\tau_a(1-r_{\perp})^2}{1-(r_{\perp} \cdot \tau_a)^2} = \tau_a \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \cdot \left(\frac{1-r_{\perp}^2}{1-(r_{\perp} \cdot \tau_a)^2}\right) \quad (IV.59)$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} + \frac{(1-r_{\perp})^2 \cdot \tau_a^2 \cdot r_{\perp}}{1-(r_{\perp} \cdot \tau_a)^2} = r_{\perp} \cdot (1 + \tau_a \cdot \tau_{\perp}) \quad (IV.60)$$

$$\alpha_{\perp} = (1-\tau_a) \cdot \left(\frac{1-r_{\perp}}{1-r_{\perp} \cdot \tau_a}\right) \quad (IV.61)$$

Similares resultados se obtienen para las componentes paralelas de polarización. Luego, para la radiación incidente no polarizada, las propiedades ópticas se hallan mediante el promedio de las dos componentes.

En las ecuaciones precedentes, despreciando términos, por ser sus órdenes de magnitud muy pequeños, se llega a las siguientes ecuaciones simplificadas que son satisfactorias para los materiales y ángulos de incidencia de interés práctico en aplicaciones solares.

$$\tau \cong \tau_a \cdot \tau_r \quad (IV.62)$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (IV.63)$$

$$\rho = 1 - \alpha - \tau \quad (IV.64)$$

$$\rho \cong \tau_a \cdot (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau \quad (IV.65)$$

Estas ecuaciones que fueron derivadas para cubiertas simples también se pueden aplicar para cubiertas múltiples idénticas.

Transmitancia para la radiación difusa y la reflejada por el suelo

En las aplicaciones solares es necesario considerar tanto la radiación difusa como la reflejada por el suelo. El cálculo de ambas es muy complejo porque habría que integrar todos los aportes y la distribución angular con que inciden en la superficie es difícil de determinar. Se puede obtener una simplificación del mismo si, considerando radiación isotrópica, se define un ángulo de incidencia equivalente en función del ángulo de inclinación de la superficie. Así se considera que toda la radiación transmitida en distintos ángulos puede considerarse como una radiación equivalente que atraviesa la superficie con este ángulo equivalente.

Este problema fue analizado por Brandemuehl y Beckman en 1980, quienes realizaron la integración anteriormente mencionada para un amplio rango de cubiertas y propusieron las siguientes ecuaciones en donde θ_e , tanto para radiación difusa como para reflejada es función de β :

$$\theta_{ed} = 59,7 - 0,1388 \cdot \beta + 0,001497 \cdot \beta^2 \quad (\text{IV.66})$$

$$\theta_{er} = 90 - 0,5788 \cdot \beta + 0,002693 \cdot \beta^2 \quad (\text{IV.67})$$

Producto transmitancia-absortancia

Las superficies utilizadas para la absorción de energía solar presentan una absortancia dependiente del ángulo de incidencia. La siguiente ecuación polinomial, válida para ángulos de incidencia entre 0° y 90°, permite calcular la absortancia en función del ángulo de incidencia.

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} = 1 + 2,0345 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 1,990 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 + 5,324 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3 - 4,799 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^4 \quad (\text{IV.68})$$

Con la determinación de la absorptancia es posible calcular el producto transmitancia-absorptancia, necesario para cualquier análisis de una placa absorbente bajo una cubierta transparente. En el caso en estudio la placa absorbente es la pared del tanque colector-acumulador. Para obtener la expresión de la misma hay que tener en cuenta que la radiación que atraviesa la cubierta es en parte reflejada y en parte absorbida por la placa, lo que genera una serie de reflexiones interna que hay que considerar. Del análisis por la técnica del trazado de rayos se obtiene la siguiente expresión:

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha) \cdot \rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha) \cdot \rho_d} \quad (\text{IV.69})$$

Donde la cantidad ρ_d se refiere a la reflectancia del sistema de cubierta para radiación difusa incidente desde abajo y puede estimarse como la diferencia entre τ_a y τ en un ángulo de 60° .

Para obtener el producto $(\tau\alpha)_b$ para radiación directa debe usarse el ángulo de incidencia θ utilizado para el cálculo de R_b . Para el cálculo del producto transmitancia-absorptancia para la radiación difusa, $(\tau\alpha)_d$ y la reflejada, $(\tau\alpha)_g$ se deben utilizar las ecuaciones anteriores pero utilizando los ángulos equivalentes.

Cálculo de la radiación difusa

Debido a que se cuenta solamente con mediciones de radiación global horizontal se hace necesario calcular la radiación difusa. Para ello se utilizan las correlaciones propuestas por Erbs (Duffie and Beckman, 1991) que se basan en el índice de claridad. Este es la relación entre la radiación global horizontal y la radiación horizontal extraterrestre.

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (\text{IV.70})$$

Las correlaciones propuestas por Erbs son las siguientes:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T & \text{para } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 & \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,80 \\ 0,165 & \text{para } k_T > 0,80 \end{cases} \quad (\text{IV.71})$$

La radiación global horizontal es medida y la radiación extraterrestre normal se obtiene con la expresión:

$$I_0 = I_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot d_n}{365} \right) \quad (\text{IV.72})$$

con $I_{sc} = 1367$ en W / m^2 (Constante solar).

Obtenida la radiación difusa, I_d , la radiación directa se obtiene como la diferencia de la global y la difusa:

$$I_b = I - I_d \quad (\text{IV.74})$$

Cálculo de la radiación absorbida

Conocidas las radiaciones global, directa y difusa, conocidos también los productos transmitancia-absortancia y el factor geométrico R_b se puede determinar la radiación absorbida por cada uno de los 6 colectores que conforman la superficie colectora.

La radiación absorbida por cada colector, considerando que los colectores son verticales ($\beta = 90^\circ$), está dada por:

$$S_c = A_c \cdot I_b \cdot R_b \cdot (\tau\alpha)_b + \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot I_d \cdot (\tau\alpha)_d + \frac{1}{2} \cdot A_c \cdot \rho_g \cdot I \cdot (\tau\alpha)_g \quad \text{en } W \quad (\text{IV.75})$$

Esta última expresión está dando la ganancia de energía de cada uno de los seis colectores que forman el tanque colector solar acumulador.

IV.2.2 Pérdidas de energía en el tanque por los laterales y el fondo

Se plantea un balance de energía donde en los distintos términos que lo componen están presentes los distintos parámetros físicos característicos del tanque colector acumulador, como por ejemplo el área de la superficie colectora, el volumen del tanque, propiedades de los materiales, etc.

Esto tiene por objetivo poder plantear un modelo matemático que permita evaluar el funcionamiento del DSCA al modificar alguno de estos parámetros.

Tanto las pérdidas como la radiación recibida están dadas en función de las dimensiones y las características de los materiales del dispositivo.

El modelo que se plantea es un modelo simplificado. Se desprecia la estratificación en el tanque y la convección natural que se produce en el mismo.

Respecto a la primera simplificación propuesta, se analizó las alternativas de considerar un solo volumen o dividir a este en partes considerando la estratificación que se produce. Sin embargo, teniendo en cuenta que en las numerosas mediciones que se efectuaron se verificó que la diferencia de temperatura entre la sección inferior del tanque y la superior, no supera los 2 °C, y que además si se considera que el volumen del tanque es importante, 600 litros, se decidió considerar que la temperatura del mismo es uniforme en todo su volumen por lo que no se tiene en cuenta la estratificación en el mismo. A los fines del cálculo se considerará la temperatura promedio.

Como se mencionó otra simplificación es que se considera que no hay convección natural dentro del mismo aun cuando contradiga la no existencia de estratificación ya que esto último es producto de la mezcla que produce los movimientos convectivos en el seno del líquido.

Estas simplificaciones sin embargo no afectan al funcionamiento del modelo ya que los resultados obtenidos con el mismo, como se verá más adelante, son validados por los resultados experimentales.

En la figura 4.6 se muestra un esquema del tanque colector-acumulador y un diagrama de todos flujos de energía presentes en dispositivo.

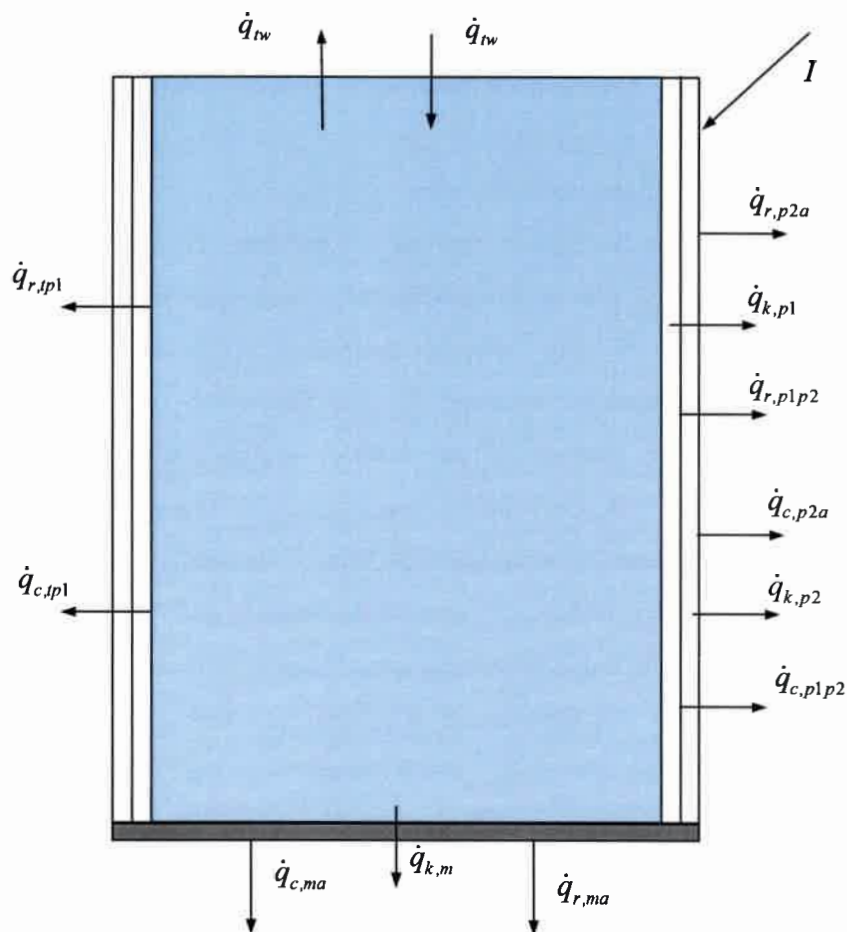


Figura 4.6 Diagrama de flujos de energía en tanque colector-acumulador.

Para la determinación de las pérdidas se propone un modelo térmico, el cual consta de dos circuitos, uno para las pérdidas por las paredes laterales y otro ligado a las pérdidas por el fondo del tanque [Zizzias *et al.*, 2012a]

En el circuito que se muestra en la figura 4.7 que representa las pérdidas laterales, se consideran las distintas transferencias de calor que se producen entre la superficie del tanque y las superficies de los dos policarbonatos.

Si bien en el circuito se representan las transferencias de calor por conducción a través de los policarbonatos, estas pueden ser despreciadas en los cálculos debido a que son muy pequeñas.

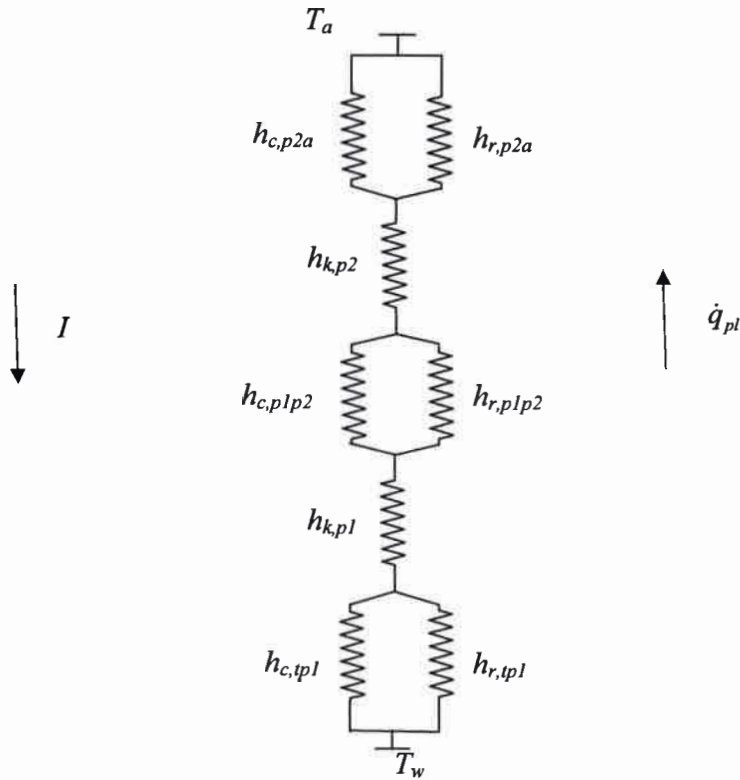


Figura 4.7: Diagrama de un circuito térmico que representa las pérdidas por la pared lateral del tanque colector-acumulador

En la figura siguiente se representan las pérdidas por el fondo del tanque.

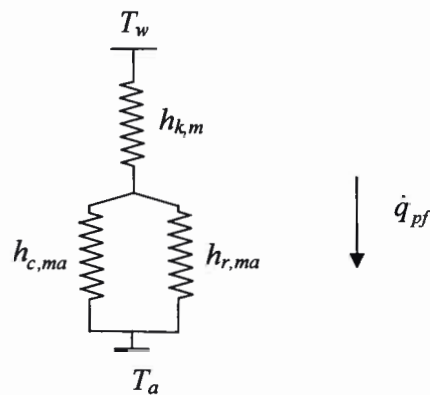


Figura 4.8: Diagrama de un circuito térmico que representa las pérdidas por el fondo del tanque colector acumulador

Se observa también en esta figura la dirección del flujo de energía producto de las pérdidas desde el fondo del tanque al ambiente.

En ambas figuras las h_c , h_r , h_k representan las transferencias de calor convectivas, radiativas y conductivas respectivamente y T las temperaturas de los distintos componentes.

Las expresiones que se detallan a continuación son las que permiten calcular los coeficientes de transferencias de calor presentes en los dos circuitos térmicos presentados y que serán necesarios para el cálculo de las pérdidas.

Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por radiación.

Los coeficientes de radiación entre el tanque y el primer policarbonato y entre ambos policarbonatos se determinan con la siguiente expresión dada por Mills (1995) para superficies paralelas infinitas:

$$h_r = \frac{\sigma \cdot \left[(T_i + 273)^4 - (T_j + 273)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \frac{1}{T_i - T_j} \text{ en } W/m^2 \text{ } ^\circ C \text{ (IV.76)}$$

dónde: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Constante de Stefan Boltzmann en $W/m^2 K^4$.

T_i y T_j = Temperaturas de pared del tanque y de las placas interior y exterior en $^\circ C$.

ε_1 y ε_2 = Emitancias del policarbonato y de la superficie selectiva que recubre el tanque inoxidable.

Se considera esta relación que es la propuesta para placas paralelas infinita ya que el modelo para calcular la radiación absorbida por el tanque está dado por 6 colectores planos (Mills, 1995). Sin embargo debido a la poca diferencia que hay entre los diámetros de cada una de las placas, si se utiliza la expresión para calcular los coeficientes prevista para cilindros concéntricos los resultados son semejantes.

Para calcular el coeficiente de radiación entre el policarbonato 2 y el medio ambiente se propone la expresión:

$$h_{r,p2a} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \left[(T_{p2} + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right]}{T_{p2} - T_a} \text{ en } W/m^2 \cdot ^\circ C \text{ (IV.77)}$$

En donde T_{p2} es la temperatura del policarbonato 2 y T_a es la temperatura ambiente en este caso.

Calculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Los coeficientes de convección entre el tanque y el primer policarbonato y entre ambos policarbonatos se calcularon siguiendo las expresiones que a continuación se muestran:

Se calcula el número de Grashof:

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \beta_v \cdot (T_i - T_j) \cdot d_p^3}{\nu^2} \text{ (IV.78)}$$

dónde: T_i y T_j = Temperaturas de ambas placas en $^\circ C$.

β_v = Coeficiente de expansión volumétrica en $^\circ C^{-1}$.

d_p = Distancia entre placas en m .

ν = Viscosidad cinemática en m^2/s .

Por tabla se obtienen los valores del número de Prandtl y con éste y el de Grashof se obtiene el número de Rayleigh dado por la expresión:

$$Ra = Gr \cdot Pr \text{ (IV.79)}$$

Para los valores del número de Rayleigh que se obtienen a partir de los valores experimentales, menores a 10^3 , las correlaciones obtenidas por Hollands y colaboradores presentadas por Mills (1995) establecen para paredes verticales un número de Nusselt aproximadamente igual a 1, por lo cual se toma este valor. Este valor del Nusselt nos está indicando que la transferencia de calor se realiza por conducción. El coeficiente de transferencia es de la forma:

$$h_c = Nu \cdot \frac{k_a}{d_p} \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.80)$$

donde k_a es el coeficiente de conductividad térmica del aire obtenido por tablas para la temperatura que es el promedio de las temperaturas de las placas y d_p la distancia entre placas.

En el caso de la convección entre el segundo policarbonato y el medio ambiente se utilizó la relación:

$$h_{c,p2a} = 2,8 + 3 \cdot V \quad \text{en } W/m^2 \cdot ^\circ C \quad (IV.81)$$

Donde V es la velocidad del viento en m/s, la cual se la considero uniforme en toda la periferia del tanque.

La expresión para calcular el coeficiente total de pérdidas por los laterales, U_L , es siguiente:

$$U_L = \left[\frac{1}{h_{c,pl1} + h_{r,pl1}} + \frac{1}{h_{c,pl1p2} + h_{r,pl1p2}} + \frac{1}{h_{c,pl1a} + h_{r,pl1a}} \right]^{-1} \quad (IV.82)$$

Como se observa se desprecia la conducción a través del policarbonato por ser numéricamente insignificante su aporte.

Entonces las pérdidas de calor por los laterales serán:

$$\dot{q}_{pl} = U_L \cdot (T_i - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (IV.83)$$

Para el cálculo del coeficiente total de pérdidas por la base del tanque, U_f , se tiene la expresión:

$$U_f = \left[\frac{1}{h_{cr,ca}} + \frac{L_m}{k_m} \right]^{-1} \quad (IV.84)$$

Dónde: k_m = Conductividad de la madera en $W/m \cdot ^\circ C$.

L_m = Espesor de la madera en m .

$h_{cr,ca}$ = Coeficiente de transferencia por convección y radiación dada por la ecuación IV.27, en W/m^2 .

Las pérdidas por la base del tanque están dadas por:

$$\dot{q}_{pf} = U_f \cdot (T_t - T_a) \quad \text{en } W/m^2 \quad (\text{IV.85})$$

IV.2.3 Pérdidas de energía por la parte superior del tanque.

Las pérdidas de energía por la parte superior del tanque están definidas en el punto IV.1.3 por medio de la ecuación IV.28. El análisis que se efectúa en este punto es el inverso al efectuado al analizar las transferencias de calor que se producen en el destilador. Lo que para el destilador significa ganancia para el tanque colector significa pérdidas y viceversa.

Esta transferencia de energía es la más importante ya que es la que representa el aporte de energía del colector solar acumulador al destilador.

IV.2.4 Balance de energía en el colector solar acumulador

Establecidas las ganancias y pérdidas de energía del tanque, así como también las pérdidas superiores del tanque, que significan el aporte de éste al destilador, se plantea el balance de energía en el tanque colector acumulador. Como se mencionó en el cálculo de pérdidas se considera que no hay estratificación en el tanque, por lo tanto el balance se plantea para un único volumen. Este es el siguiente:

$$S_t = M_t \cdot c_p \cdot \frac{dT_t}{dt} + A_L \cdot U_L \cdot (T_t - T_a) + A_f \cdot U_f \cdot (T_t - T_a) + A_a \cdot \dot{q}_{rw} \quad \text{en } W \quad (\text{IV.86})$$

dónde: S_t = Radiación total absorbida por el colector-acumulador en W .

M_t = Masa del agua del tanque en Kg .

c_p = Calor específico del agua en $J/Kg \text{ } ^\circ C$.

\dot{q}_{tw} = Pérdidas por la parte superior del tanque dado por la ecuación IV.28, en W/m^2 .

A_L = Área de las paredes laterales del tanque en m^2 .

A_f = Área del fondo del tanque en m^2 .

A_a = Área de la abertura que une el tanque con la batea de destilador en m^2 .

El primer miembro representa la ganancia de energía debida a la radiación solar. En el segundo se presenta el primer término que corresponde a la variación de energía interna del tanque dada por la variación de temperatura del mismo, en el segundo y tercer término figuran las pérdidas laterales y por el fondo respectivamente y el cuarto término representa la energía que transfiere el tanque al destilador.

Se completa el modelo con los balances de energía en las dos cubiertas de policarbonato:

Balance de energía en la cubierta de policarbonato interior, p_1 ;

$$h_{c,p1} \cdot (T_t - T_{p1}) + h_{r,p1} \cdot (T_t - T_{p1}) = h_{c,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) + h_{r,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) \quad (IV.87)$$

Balance de energía en la cubierta de policarbonato exterior, p_2 ;

$$h_{c,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) + h_{r,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) = h_{c,p2a} \cdot (T_{p2} - T_a) + h_{r,p2a} \cdot (T_{p2} - T_a) \quad (IV.88)$$

Estas tres ecuaciones junto a las otras tres que se obtuvieron del análisis del funcionamiento del destilador, ecuaciones IV.38, IV.39, y IV.40, conforman un sistema de seis ecuaciones el cual constituye el núcleo del modelo matemático que describe el funcionamiento del DSCA [Zizzias *et al.*, 2012b]. La resolución de este sistema se desarrollará en el capítulo VI correspondiente a la simulación.

V. ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y PÉRDIDAS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los cálculos de los coeficientes de transferencia de calor presentes en todo el dispositivo y un análisis de la variación de los mismos con la temperatura.

Además, a partir de estos resultados y con los datos experimentales obtenidos y analizados en el capítulo III, se procede a evaluar si los modelos matemáticos presentados en el desarrollo teórico del funcionamiento del dispositivo verifican dichos resultados. Para ello se comparan las pérdidas tanto del tanque colector-acumulador como las del destilador, calculadas ambas mediante los modelos matemáticos respectivos, con las obtenidas mediante experimentación, las cuales están representadas por las ecuaciones III.8 y III.10.

V.1. Verificación de pérdidas térmicas en el destilador

En el capítulo IV se presentó el modelo matemático de un circuito térmico que representan las transferencias de calor que se producen en el destilador. También se presentaron las ecuaciones para calcular todos los coeficientes de transferencia de calor incluidos en el mismo, como así también, los coeficientes globales de pérdidas térmicas que se producen por la cúpula de vidrio y por el fondo de la batea.

Con los datos que arrojan las mediciones de temperatura del vidrio, del agua de la batea y del ambiente, y las ecuaciones mencionadas, se calculan mediante una planilla de cálculo los coeficientes de transferencia de calor por radiación, convección y evaporación desde el agua de la batea al vidrio y por convección y radiación desde el vidrio al ambiente. Por último con estos resultados se obtienen los valores de las pérdidas térmicas los que son cotejados con los resultados experimentales presentados en el capítulo III.

V.1.1. Cálculos de los coeficientes de transferencias de calor

En la gráfica 5.1 se muestran los coeficientes transferencia de calor por radiación, convección, y evaporación entre el agua de la batea y el vidrio, los cuales han sido calculados con las ecuaciones IV.8, IV.11 y IV.15 respectivamente. También se

muestran la temperatura del agua de la batea y la temperatura del vidrio. Se puede observar en la misma como el coeficiente de convección disminuye su valor al reducirse la diferencia entre las temperaturas y como el de radiación aumenta durante el día siguiendo el aumento de las mismas. El coeficiente de evaporación si bien sigue la variación de ambas temperaturas, manifiesta una dependencia más estrecha con las presiones parciales, calculadas con las ecuaciones IV.12 y IV.13, tal como lo muestra la figura 5.2. Ambas gráficas corresponden a dos días del mes de julio.

La figura 5.1 confirma lo expuesto por Cooper (1973) en cuanto a cómo la fracción de energía transferida por evaporación se hace mucho más importante que las fracciones de energía transferida por convección y radiación al aumentar la temperatura del agua de la batea, haciendo que aumente la eficiencia del destilador.

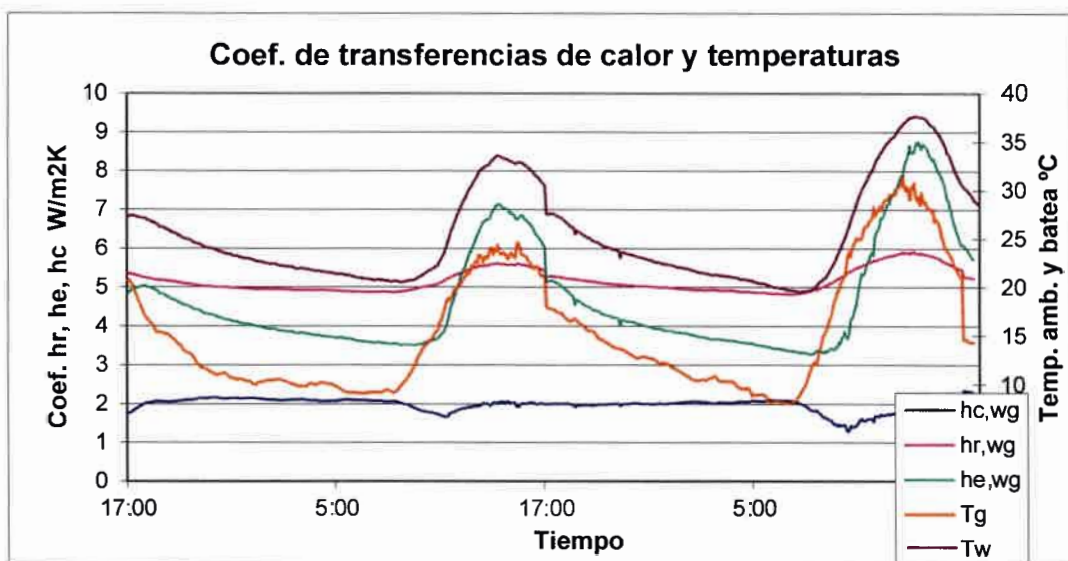


Figura 5.1: Variación de los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección, radiación y evaporación entre el agua de la batea y el vidrio, en función de las temperaturas de vidrio y agua de la batea.

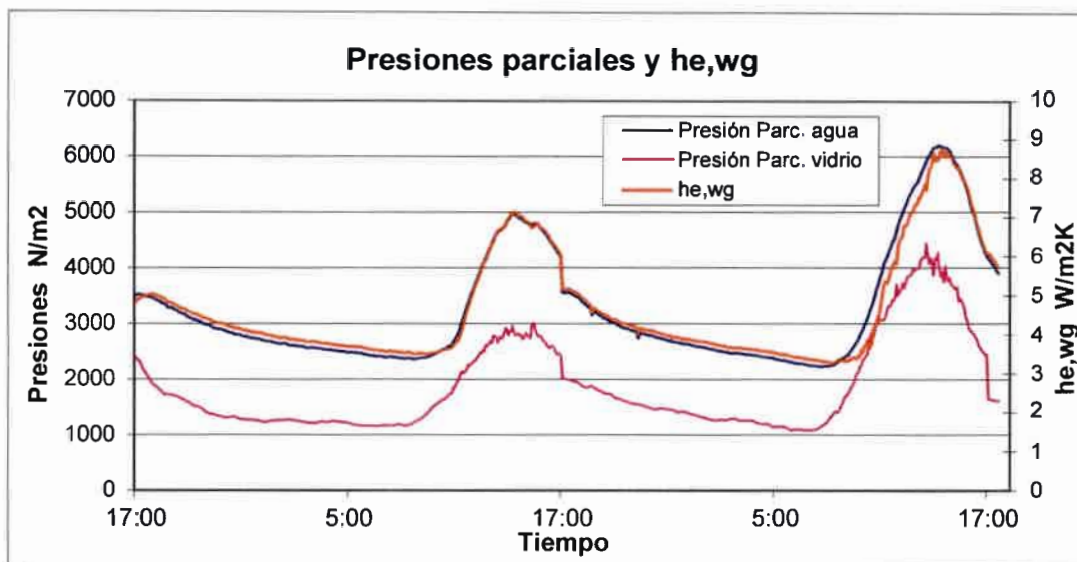


Figura 5.2: Relación entre las presiones parciales del vapor de agua a temperatura del agua y del vidrio, y el coeficiente de transferencia de calor por evaporación.

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor externos se utilizó la ecuación IV.22 para la convección y radiación desde el vidrio hacia el ambiente, la IV.27 para la convección y radiación desde la base y la pared lateral de la batea hacia el ambiente y la IV.26 para la conducción a través de los laterales y la base del destilador. Para estos cálculos se consideraron valores medios diarios del viento.

Por último, con los valores de los coeficientes obtenidos se calcularon los coeficientes de transferencia globales por la cúpula y por la base utilizando las ecuaciones IV.31 y IV.33 respectivamente. Con la suma de estos coeficientes se obtuvo el coeficiente global total y a partir de la ecuación IV.34 se obtuvo las pérdidas totales del destilador.

La figura 5.3 muestra las pérdidas, en vatios, obtenidas a través del modelo matemático y las obtenidas experimentalmente. Para estas últimas se utilizó la aproximación lineal dada por la ecuación III.10, la cual tiene validez solo para el período nocturno, ya que se obtuvo a partir del cálculo de pérdidas para ese período. Para obtener una gráfica completa se interpola estos resultados para el periodo diurno. Se observa una muy buena similitud de ambas curvas durante el período nocturno, no así durante el período diurno, lo cual era de esperar por lo expresado anteriormente. La

mayor diferencia se observa a partir del momento en que el agua de la batea comienza a aumentar su temperatura. Sin embargo en promedio, la diferencia no supera el 10%, por lo que se puede considerar válido el modelo utilizado.

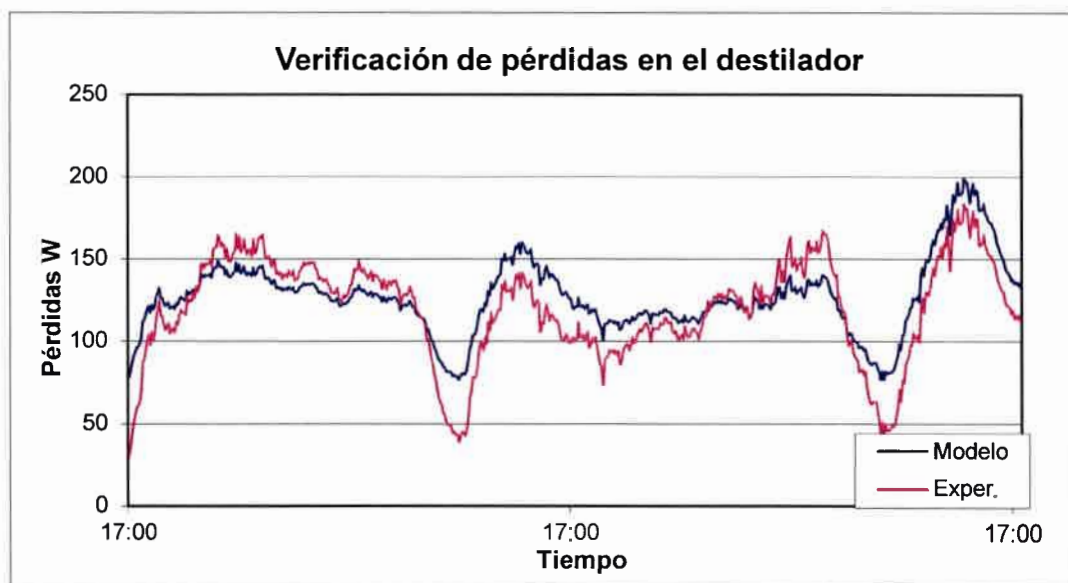


Figura 5.3: Pérdidas en el destilador obtenidas a partir del modelo matemático y experimentalmente.

V.2. Verificación de las pérdidas térmicas en el tanque colector

También en el capítulo IV del presente trabajo se desarrolló un modelo matemático para la determinación de las ganancias y pérdidas térmicas del tanque colector acumulador del DSCA. En el capítulo III se presenta el estudio experimental del mismo a partir del cual se determina, con el auxilio de un análisis teórico simplificado, una curva que representa las pérdidas nocturnas en el tanque en función de las temperaturas del mismo y la temperatura ambiente.

En este capítulo se verifica a partir de los resultados obtenidos del estudio experimental el modelo matemático planteado para dichas pérdidas nocturnas.

V.2.1. Cálculos de los coeficientes de transferencias de calor

Con los datos de temperaturas de la pared del tanque y los policarbonatos presentados en las figuras 2.4 y 2.5 del capítulo II y utilizando las ecuaciones propuestas en el capítulo IV, se calculan los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación que se presentan entre la pared del tanque y las cubiertas de policarbonato y entre estos y el ambiente. También los coeficientes de transferencia por convección y radiación desde la base del tanque y el ambiente.

Para el cálculo de los coeficientes por radiación entre el tanque y la primer cubierta y entre ésta y la cubierta exterior se utiliza la ecuación IV.76 y para el coeficiente entre esta y el ambiente la ecuación IV.77.

En las figuras 5.4 y 5.5 se observan los valores de los coeficientes de transferencia de calor por radiación para ambas caras del tanque colector acumulador. Se puede notar valores muy similares de los coeficientes, lo cual era previsible debido a la poca variación de temperatura que se presenta entre las dos caras. Se observa además la importancia de la superficie selectiva ya que, debido a su baja emisividad, los valores de los coeficientes desde la pared del tanque al primer policarbonato son muy inferiores a los otros dos.

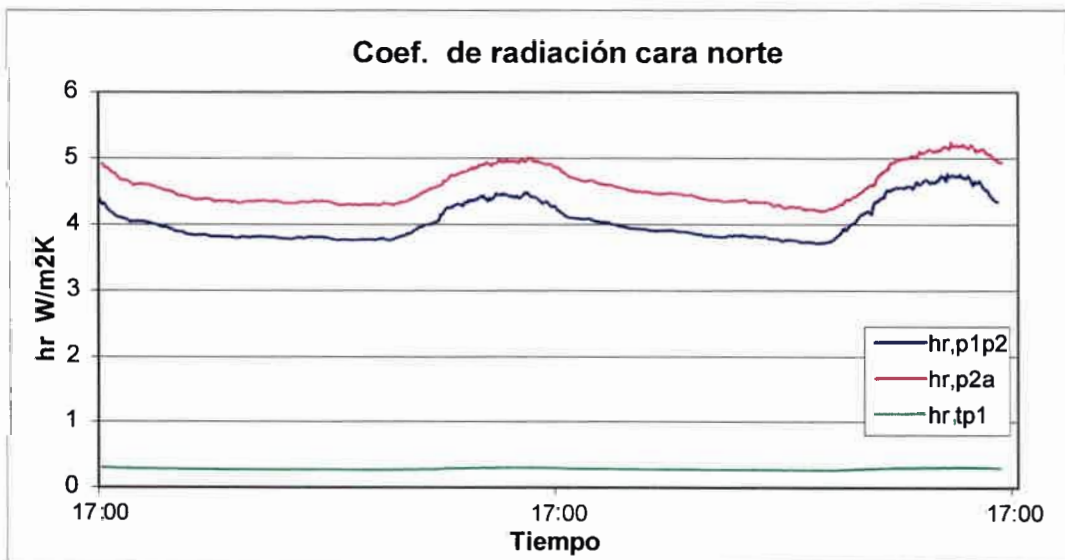


Figura 5.4: Coeficientes de transferencias de calor por radiación de la cara norte calculados con las temperaturas medidas.

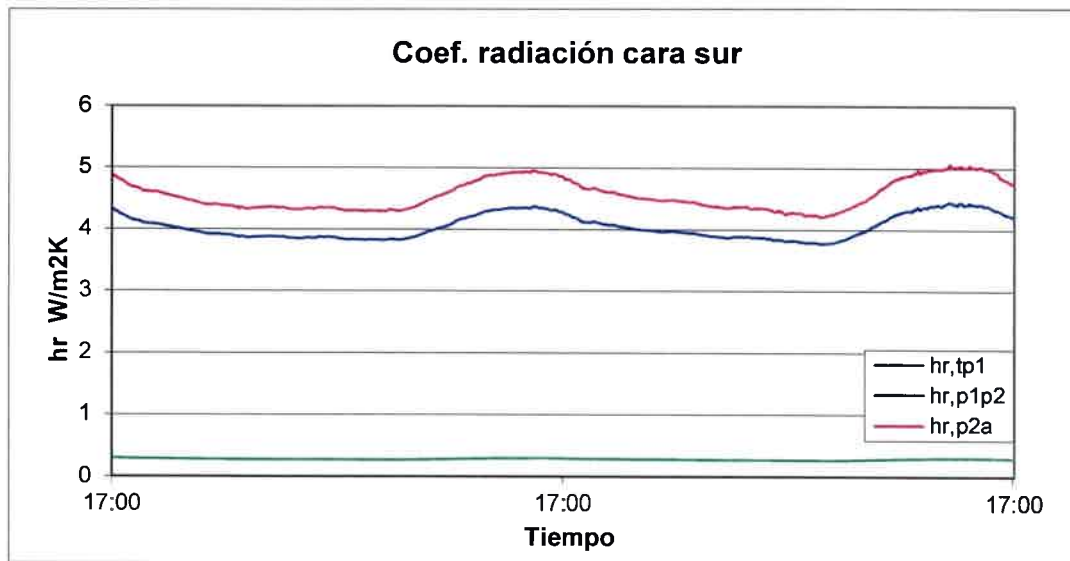


Figura 5.5: Coeficientes de transferencias de calor por radiación de la cara sur calculados con las temperaturas medidas.

En las figuras 5.6 y 5.7 se presentan los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección. Para el cálculo del número de Prandtl, de la viscosidad cinemática y del coeficiente de expansión volumétrica que determinan estos coeficientes, se utilizó como temperatura del aire que hay entre las placas, la temperatura promedio de éstas.

Al igual que en la transferencia por radiación, los valores de los coeficientes de convección no presentan variaciones marcadas entre ambas caras. En la cara norte son algo superiores debido a que la temperatura en esa cara es algo superior a la de la cara sur.

Se destaca, en cambio, la gran diferencia que hay entre el coeficiente de transferencia de calor del policarbonato exterior al ambiente, influenciado por el viento, con respecto a los otros dos coeficientes de transferencias entre placas los cuales no están en contacto con el ambiente. Hay que tener en cuenta que los valores del viento utilizados son los mismos para ambas caras.

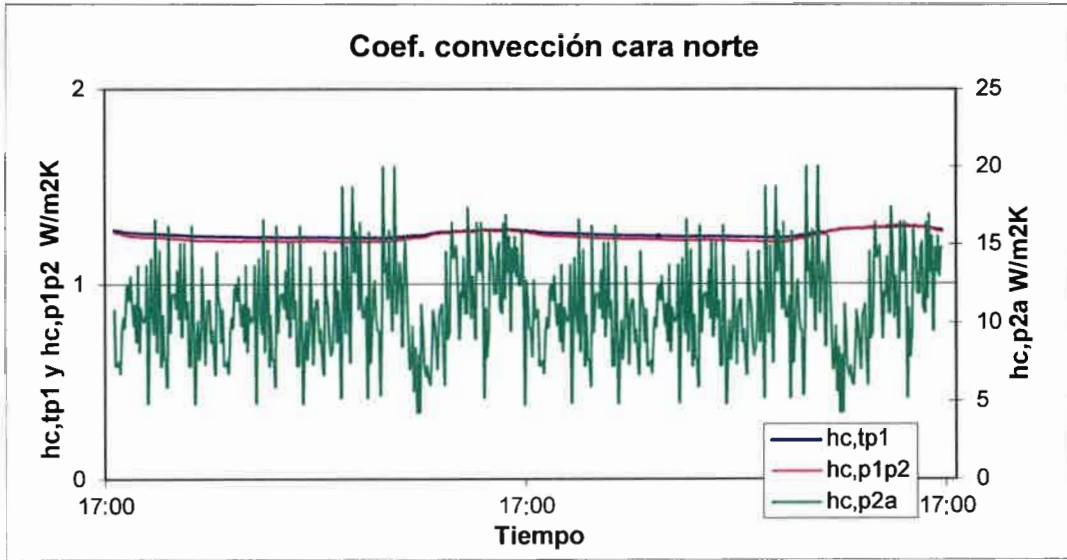


Figura 5.6: Coeficientes de transferencias de calor por convección de la cara norte calculados con las temperaturas medidas.

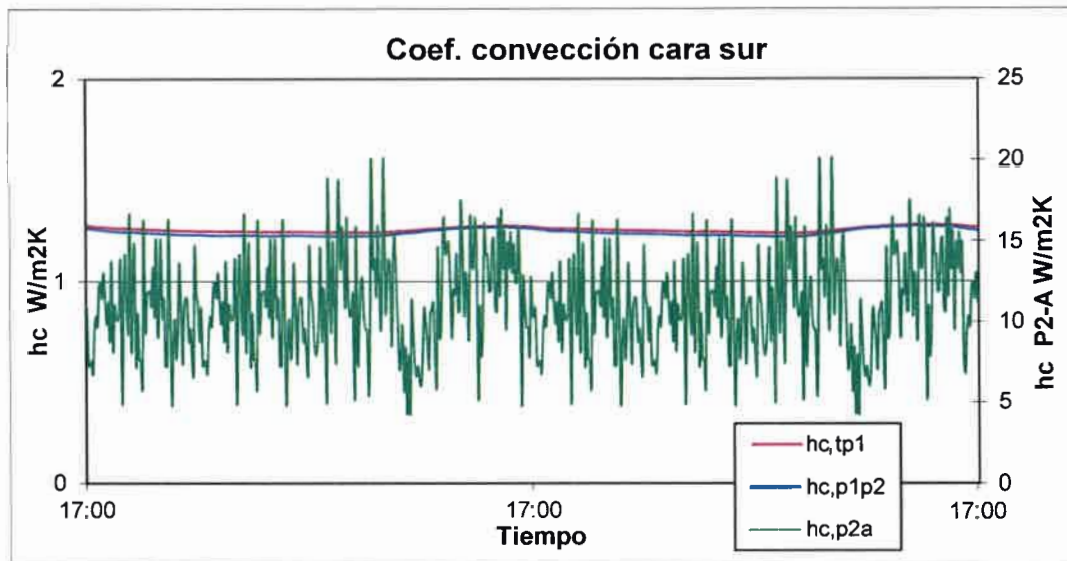


Figura 5.7: Coeficientes de transferencias de calor por convección de la cara sur calculados con las temperaturas medidas.

La transferencia de calor por conducción a través de los policarbonatos es despreciada por su bajo valor.

Con la ecuación IV.82 se calcula para cada cara del tanque colector el coeficiente de pérdidas por la pared lateral del tanque.

A estas pérdidas se le suman las que se producen por el fondo del tanque, las cuales se calculan considerando las pérdidas por conducción y las pérdidas por convección y radiación que se obtienen utilizando nuevamente la ecuación IV.27.

Con la ecuación IV.84 se calcula el coeficiente de pérdidas por el fondo que sumado al coeficiente de pérdidas por los laterales se obtiene el coeficiente de pérdida total del tanque colector acumulador. Con este último se obtiene las pérdidas totales del mismo.

La figura 5.8 presenta los valores instantáneos de las pérdidas que se producen, tanto por la pared lateral como por el fondo del tanque, las que se obtuvieron a partir del modelo matemático y se las compara con las pérdidas obtenidas experimentalmente, expresadas por la ecuación III.8. Si bien estos resultados corresponden al período nocturno, se extienden luego al período diurno con el objetivo de conocer en forma aproximada, cuál es su variación en este período. Se puede observar en la figura 5.8 que durante el período nocturno existe una muy buena aproximación entre ambas curvas, presentándose una pequeña diferencia durante el período diurno con lo cual se considera validado el modelo.

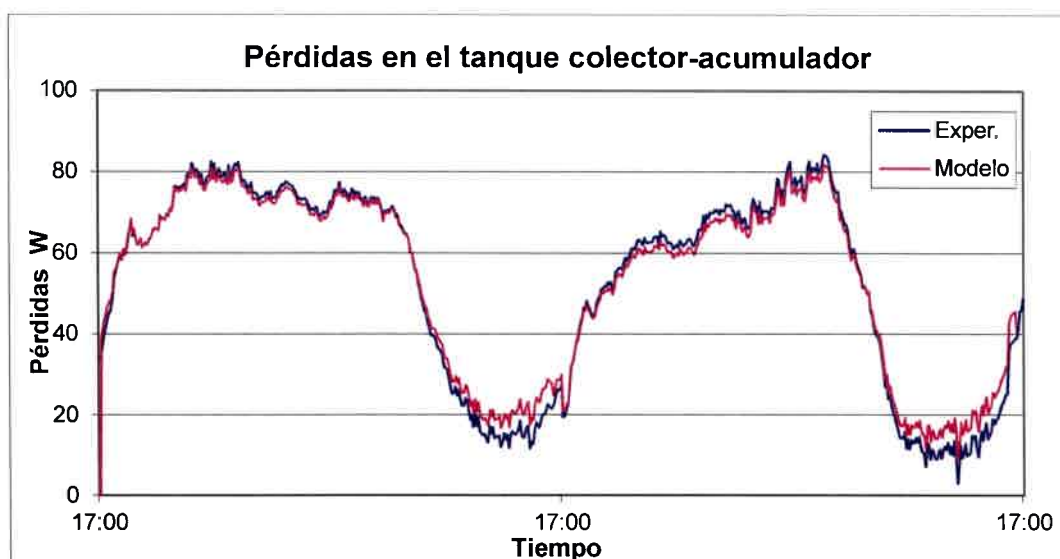


Figura 5.8: Pérdidas en el tanque colector acumulador obtenidas a partir del modelo matemático y experimentalmente.

Por último en la figura 5.9 se comparan las pérdidas que se producen por el tanque y por el destilador. Se observa que durante la noche los valores de las pérdidas por la cúpula del destilador y por el tanque son muy parecidos, esto es en parte debido a que durante ese periodo las temperaturas del agua de la batea y del tanque son prácticamente iguales. No ocurre esto durante el día. Con la salida del sol el agua de la batea incrementa considerablemente su temperatura lo que hace que la diferencia con la temperatura ambiente sea superior a la diferencia de temperatura entre el agua del tanque y la ambiente, por lo que las pérdidas por la cúpula son muy superiores a las pérdidas por las paredes y el piso del tanque.

Confirma la gráfica lo calculado en el capítulo III en cuanto a que las pérdidas por el destilador, en un día completo, son muy superiores a las pérdidas por el tanque.



Figura 5.9: Comparación de pérdidas por el tanque colector-acumulador y por el destilador obtenidas experimentalmente.

VI. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL DSCA

Se realiza utilizando el software EES, Engineering Equations Solver de F-Chart Software.

La simulación del DSCA se ha dividido en dos partes; un primer programa calcula la radiación absorbida solamente por el tanque colector la cual se obtiene a partir del modelo de cielo isotrópico propuesto por Duffie y Beckmann (1991), ya desarrollado en el capítulo IV.

El segundo programa simula el comportamiento del dispositivo completo, el DCSA. Este programa utiliza como datos entrada la radiación absorbida por el tanque colector-acumulador obtenida con el primer programa y además los datos de la temperatura ambiente, la radiación global horizontal y la velocidad del viento. Como salida se obtienen las temperaturas que caracterizan el funcionamiento del mismo y a partir de estas las pérdidas del DSCA, el calor útil que aporta el colector acumulador al destilador y la producción de agua destilada.

Consideraciones

El dispositivo ensayado presenta algunas características en su construcción que debieron ser tenidas en cuenta en la simulación. Por ejemplo, la batea del destilador proyecta sombra sobre el tanque colector acumulador, la cual se torna importante cerca del mediodía solar sobre todo en primavera y verano. Por este motivo a la radiación absorbida por el colector se la afecta con un coeficiente que representa la porción del área del tanque que realmente recibe radiación solar directa. El valor del coeficiente, el cual varía en función de la hora y el día del año, se estimó a partir de observaciones realizadas a lo largo del año. Por otro lado el DSCA está bajo la cubierta de un tejido antigranizo lo que disminuye la radiación recibida tanto por el tanque colector-acumulador como por el destilador, siendo éste el más perjudicado, ya que según mediciones realizadas la radiación disminuye en aproximadamente un 5% en el plano horizontal. A esto hay que sumarle el polvo que se deposita en la cubierta del destilador lo que también representa una disminución en la radiación recibida por éste. Estas situaciones quedan plasmadas en el cálculo a través de coeficientes que multiplican a los coeficientes de absorción del vidrio, del agua de la batea y la batea.

VI.1. Cálculo de la radiación absorbida por el tanque colector-acumulador

Como se mencionó en el capítulo IV, el tanque colector-acumulador se modelizó como una superficie cilíndrica de sección hexagonal, tal cual se observa en la figura 6.1. Esta muestra que la cara norte queda conformada por las superficies verticales planas S_1 , S_2 y S_3 , mientras que la cara sur queda formada por las superficies verticales planas S_4 , S_5 y S_6 .

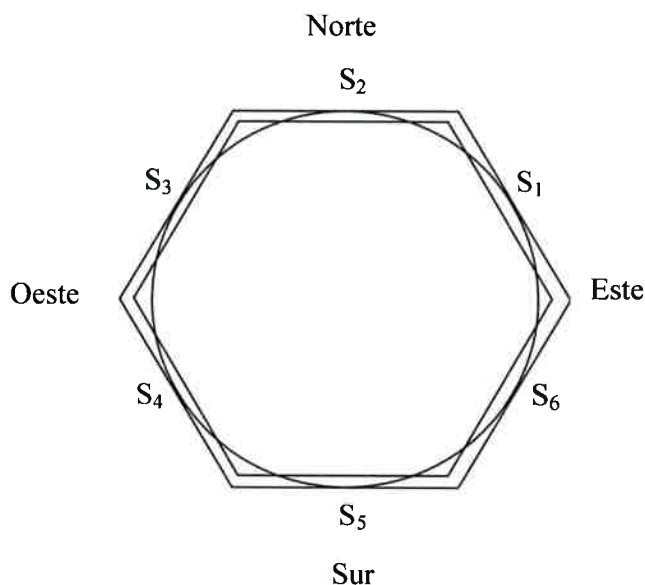


Figura 6.1: Esquema del tanque colector acumulador aproximado por un cilindro de sección hexagonal

El programa que calcula la radiación absorbida por el colector-acumulador utiliza como datos de entrada los valores promedio horarios de radiación global horizontal, mientras que los resultados que se obtienen a la salida corresponden a la radiación solar horaria absorbida por el mismo. Se considera que sólo recibe radiación directa la cara norte del tanque, debido esto a la sombra que proyecta sobre el tanque colector otros dispositivos que se encuentran a su alrededor. Entonces, las superficies S_4 , S_5 y S_6 solo reciben radiación difusa y las superficies S_1 , S_2 y S_3 , además de radiación directa, reciben difusa y reflejada.

El programa principal está formado por dos subprogramas los cuales calculan la radiación absorbida por la cara norte y la sur. Estos subprogramas usan como datos de entradas la latitud, el ángulo horario, la declinación, el día juliano, el azimut solar, la

radiación global horizontal y la radiación difusa previamente calculada. También utilizan el coeficiente de transmitancia, el factor geométrico y ángulo zenital, todos calculados anteriormente en procesos realizados en el programa principal. Como datos de salida se obtienen la radiación absorbida por cada superficie vertical en W/m^2 . Luego el programa principal calcula la radiación absorbida por cada uno de los 6 colectores y la total absorbida por todo el tanque colector en vatios. La resolución comienza con un valor propuesto y luego los valores de cada variable son ajustados hasta que la diferencia entre el paso anterior y el paso actual este de acuerdo al criterio de convergencia del programa.

El gráfico 6.2 muestra la radiación absorbida por la cara norte, formada por las superficies S_1 , S_2 y S_3 del cilindro hexagonal, para nueve días del mes de octubre. Se observa como la radiación absorbida durante la mañana y la tarde es superior a la del medio día, lo cual se debe a que la superficie S_1 que da al noreste y la S_3 que da al noroeste absorben mayor cantidad de radiación que la cara S_2 que da al norte debido a que la altitud del sol en esa época del año hace que la componente de la radiación sobre la superficie vertical sea menor durante el mediodía solar. Se observa también que los valores de la radiación difusa que recibe la cara sur formada por las superficies S_4 , S_5 y S_6 son importantes.

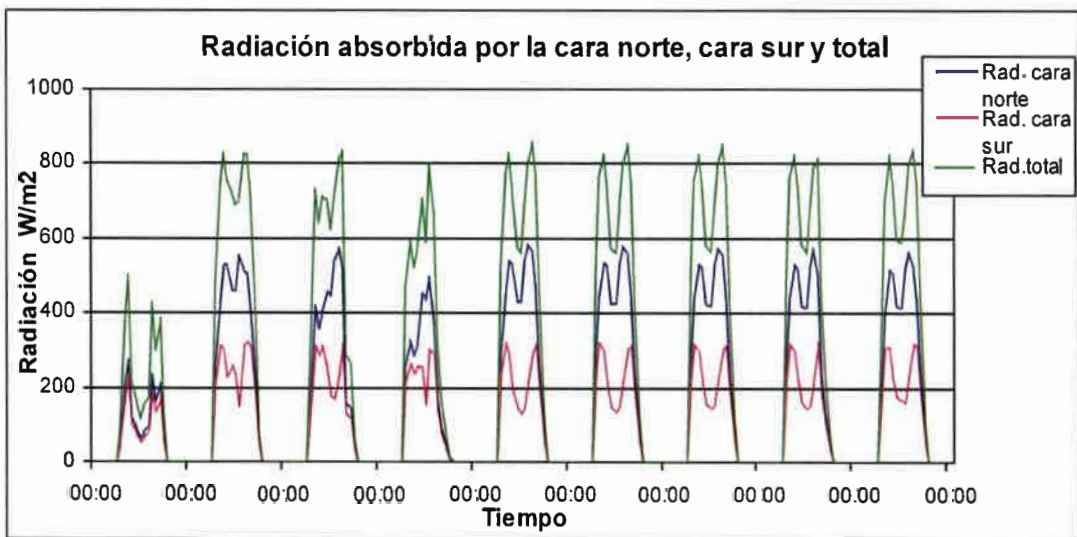


Figura 6.2: Radiación absorbida por las caras norte, sur y la total del cilindro hexagonal que aproxima al tanque para nueve días del mes de octubre

VI.2. Cálculo de temperaturas

El software elaborado para este cálculo, está basado principalmente en las ecuaciones y correlaciones propuestas en los modelos matemáticos presentados en el capítulo IV. Se basa en un sistema de seis ecuaciones, de las cuales cuatro de ellas representan los balances de energía en las dos cubiertas de policarbonato, el vidrio y la batea y las otras dos, que son ecuaciones diferenciales, representan la variación de temperatura del agua del tanque y del agua de la batea. Además hay que mencionar que las seis ecuaciones están conformadas por coeficientes de transferencia de calor variables con las temperaturas. Las ecuaciones diferenciales son resueltas por el método de Crank-Nicolson, que utiliza la media entre la temperatura anterior y la actual. Este es un método implícito ya que la temperatura actual todavía no ha sido determinada. Este método muestra una mejor aproximación que el método de Euler también disponible en el EES, que es un método explícito que solo usa la temperatura anterior para evaluar la parte derecha de la ecuación diferencial.

En este segundo programa, la radiación absorbida por el tanque colector calculada por el programa descrito en el punto anterior, más la radiación global horizontal, la temperatura ambiente y la velocidad del viento sirven como datos de entrada para el cálculo de las temperaturas de los distintos componentes del dispositivo, como temperatura del agua de la batea, del agua del tanque, de la batea, de la cúpula de vidrio y de las cubiertas de policarbonatos. Todos estos datos corresponden a valores horarios medios.

Con estas temperaturas, como se mencionó anteriormente, se obtienen las pérdidas térmicas de todo el dispositivo, el calor útil aportado por el tanque y la producción. También se obtienen todos los valores de los coeficientes de transferencias utilizados en el modelo, lo cual permitió realizar una verificación previa al compararlos con los valores previstos en la teoría de destiladores solares [Tiwari G. y Tiwari A., 2008].

Hay que recordar que como hipótesis se considera que la temperatura de la pared del tanque es la misma que la del agua de éste.

La validación de esta simulación se la realizó comparando punto a punto la evolución de los resultados obtenidos por ésta con los obtenidos experimentalmente.

VI.2.1 Expresión matemática del calor útil

En el capítulo IV se planteó la dificultad que se presenta para calcular el aporte de energía desde el tanque a la batea del destilador. Esta dificultad se presenta debido a que se hace imposible cuantificar la transferencia de calor del tanque a la batea en función de un salto térmico ya que el sistema alcanza durante la noche el equilibrio térmico, es decir, se igualan la temperatura del agua del tanque y del agua de la batea. Es importante resaltar nuevamente que a pesar del equilibrio térmico alcanzado es evidente que hay un aporte de energía desde el tanque hacia la batea, ya que de no existir este aporte, la batea tendría una temperatura igual a la ambiente como ocurre en un destilador de batea simple.

Para encontrar la expresión del calor útil se utiliza como una primera aproximación la relación entre las pérdidas térmicas que se producen por el destilador y por el tanque. Esta relación, obtenida experimentalmente en el capítulo III y confirmada por el modelo matemático, capítulo V, expresa que aproximadamente un 70% de las pérdidas totales del dispositivo se produce por el destilador, lo que significa que las pérdidas del tanque por la parte superior son aproximadamente el doble que las que se producen por las paredes laterales y el fondo. Según esto se puede establecer la siguiente relación:

$$\dot{q}_{tw} \cong 2 \cdot \dot{q}_{ta} \quad (\text{VI.1})$$

donde \dot{q}_{tw} son las pérdidas del tanque hacia la batea y \dot{q}_{ta} son las pérdidas del tanque hacia el ambiente por los laterales y por el fondo.

Las pérdidas térmicas del tanque hacia la batea, \dot{q}_{tw} , representan para el destilador una ganancia de energía por lo que se la renombra como “calor útil”, \dot{q}_u , por lo tanto se puede expresar:

$$\dot{q}_u = \dot{q}_{tw} \cong 2 \cdot \dot{q}_{ta} \quad (\text{VI.2})$$

Esta expresión se utilizó para realizar una primera corrida del programa que simula el comportamiento del DSCA. Luego con la premisa de presentar una expresión

sencilla del calor útil en función del salto térmico entre la temperatura del tanque y la ambiente, se obtuvo por correlación lineal simple una nueva expresión del calor útil:

$$\dot{q}_u = 9,2975 \cdot (T_t - T_a) + 15,332 \quad (\text{VI.3})$$

Esta expresión, que como se dijo da la energía que aporta el tanque colector a la batea, es la que finalmente se utiliza en el programa de simulación.

En los puntos siguientes de este capítulo se muestran los gráficos con las temperaturas obtenidas por la simulación y las obtenidas experimentalmente para un periodo seleccionado de cinco días del mes de octubre.

Temperaturas en el tanque colector acumulador

En las gráficas que a continuación se muestran se comparan los resultados experimentales con los obtenidos mediante la simulación.

Se observa en la figura 6.3 las temperaturas media del tanque, experimental y simulada, la cuales muestran una buena similitud. La diferencia más marcada se observa en el enfriamiento del tanque aunque ésta nunca llega al 8%.

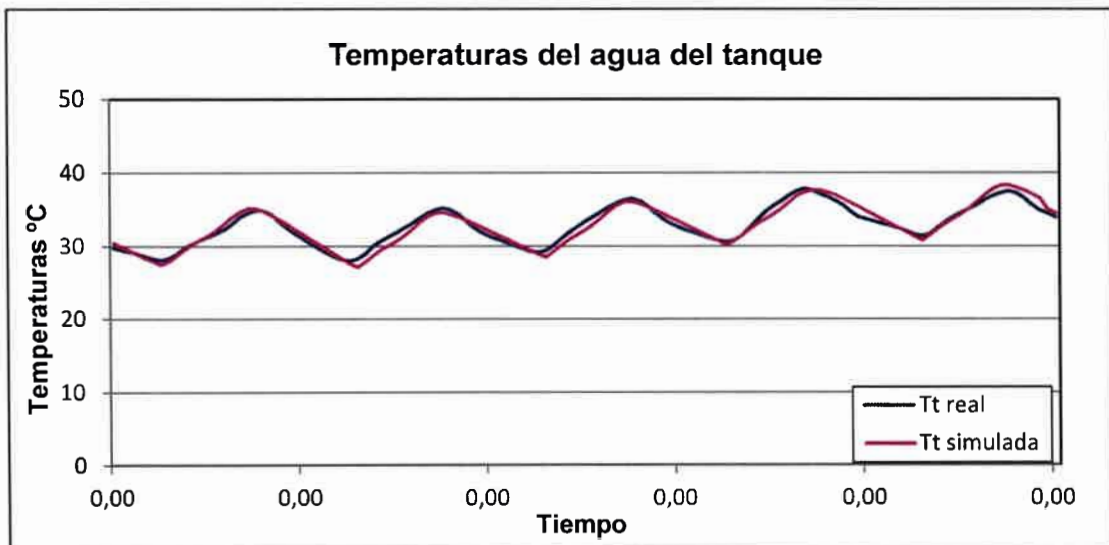


Figura 6.3: Temperaturas medias reales y simuladas de 5 días de octubre del agua del tanque colector-acumulador

Temperaturas en el destilador

Se presentan ahora los gráficos de las temperaturas que caracterizan el funcionamiento de un destilador solar, esto es, temperaturas de vidrio y del agua de la batea.

En el gráfico 6.4 se presentan las temperaturas del vidrio, tanto las obtenidas a partir de las mediciones realizadas como las obtenidas mediante simulación. Se observa una buena aproximación entre ambas y se puede notar además la influencia del viento en la variación de esta temperatura lo cual no ocurre con las temperaturas del tanque y del agua de la batea.

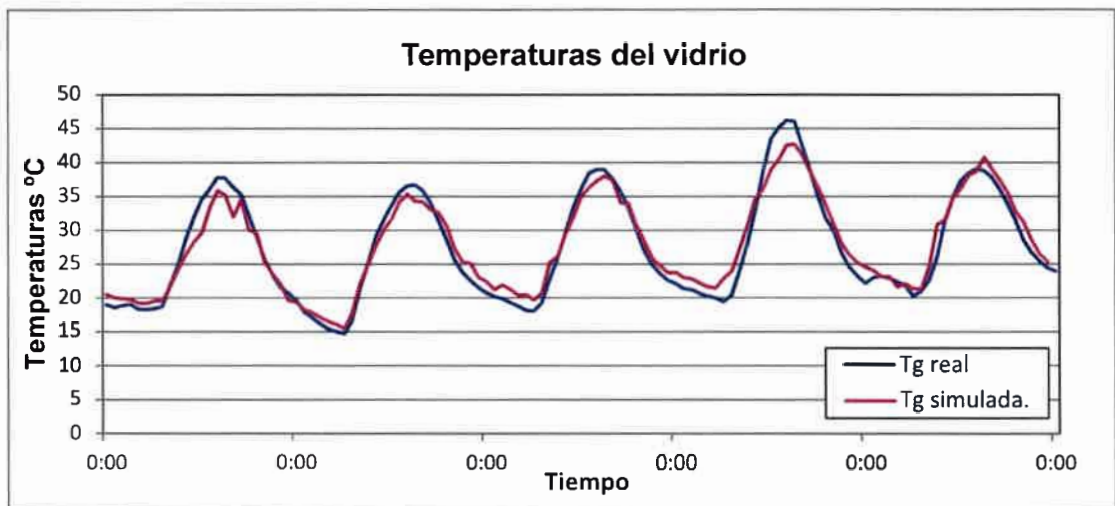


Figura 6.4: Temperaturas reales y simuladas del vidrio del destilador.

En el gráfico 6.5 se presentan las temperaturas reales y simuladas del agua de la batea, las cuales también presentan una buena aproximación.

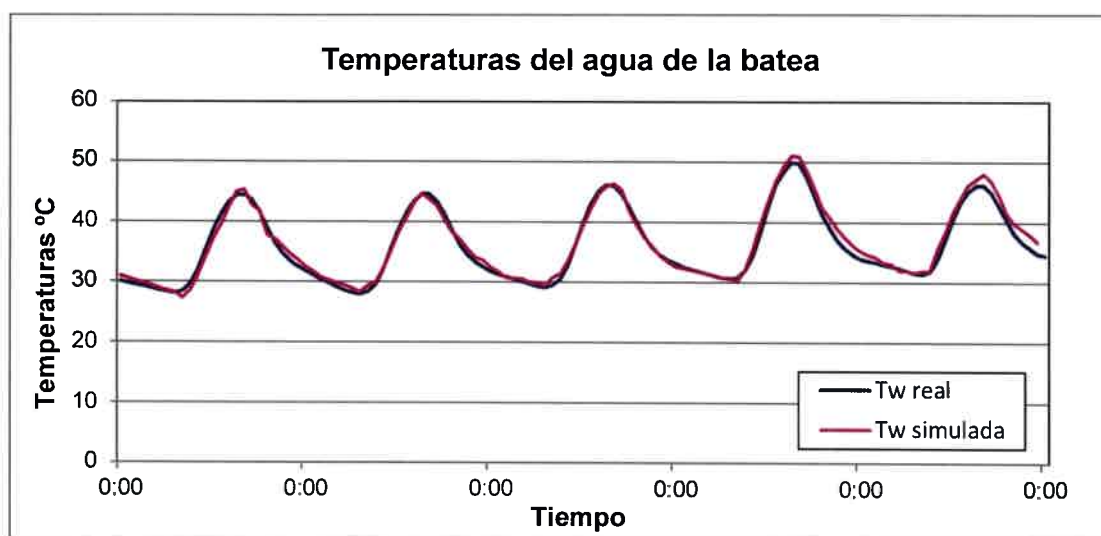


Figura 6.5: Temperaturas reales y simuladas del agua de la batea del destilador.

VI.4. Determinación de la producción de destilado

Si bien el capítulo IV se presenta la expresión más general que da la producción de un destilador solar, esta no se ajusta a la producción del DSCA. Aquella expresión da la producción en función de la temperatura de vidrio y la del agua de la batea y es proporcional al coeficiente de transferencia por evaporación.

La experiencia indica que la producción de un destilador solar, en especial los asistidos térmicamente, dependen en gran medida de las características constructivas del mismo, por lo que generalmente para cada destilador se obtiene una correlación para determinar su producción.

En este trabajo se presentan tres expresiones que permiten calcular la producción horaria de agua destilada en función de los distintos parámetros que caracterizan el funcionamiento del DSCA. Estas expresiones se basan en el método “input-output” verificada por Voropoulos *et al.* (2002).

Estas expresiones se obtienen por correlación lineal múltiple a partir de los datos de producción obtenidos experimentalmente.

La primera expresión encontrada es muy similar a la planteada en el capítulo IV ya que está en función de los mismos parámetros:

$$Pe = -0,104272 - 0,000476 \cdot (T_w - T_a) + 0,038679 \cdot h_{e,wg} \quad (VI.4)$$

Con la intención de hacer un mejor ajuste se consideran otros parámetros que influyen en la producción como la radiación absorbida por el tanque y la radiación global horizontal. La expresión que se obtienen es la siguiente:

$$Pe = -0,024745 - 0,013676 \cdot (T_w - T_a) + 0,0562805 \cdot h_{e,wg} - 0,0000622 \cdot S - 0,0001285 \cdot H \quad (VI.5)$$

La última expresión propuesta agrega el calor útil con el cual estamos considerando indirectamente la temperatura del tanque:

$$Pe = -0,138177 - 0,0134124 \cdot (T_w - T_a) + 0,06792 \cdot h_{e,wg} - 0,0003869 \cdot S - 0,000211 \cdot H - 0,000343 \cdot \dot{q}_u \quad (VI.6)$$

La siguiente gráfica muestra dos curvas de producción. La azul representa la producción obtenida experimentalmente y la verde es la que se obtuvo a partir de los programas de simulación, utilizando la ecuación VI.6, utilizando como datos de entrada la temperatura ambiente, el viento y la radiación global horizontal. Están representados cuatro días, dos de baja radiación solar. Se observa en estos una buena aproximación con un error que promedia el 10%. En los otros dos días se observa que durante las horas de mayor radiación solar el modelo predice una menor producción que la real.

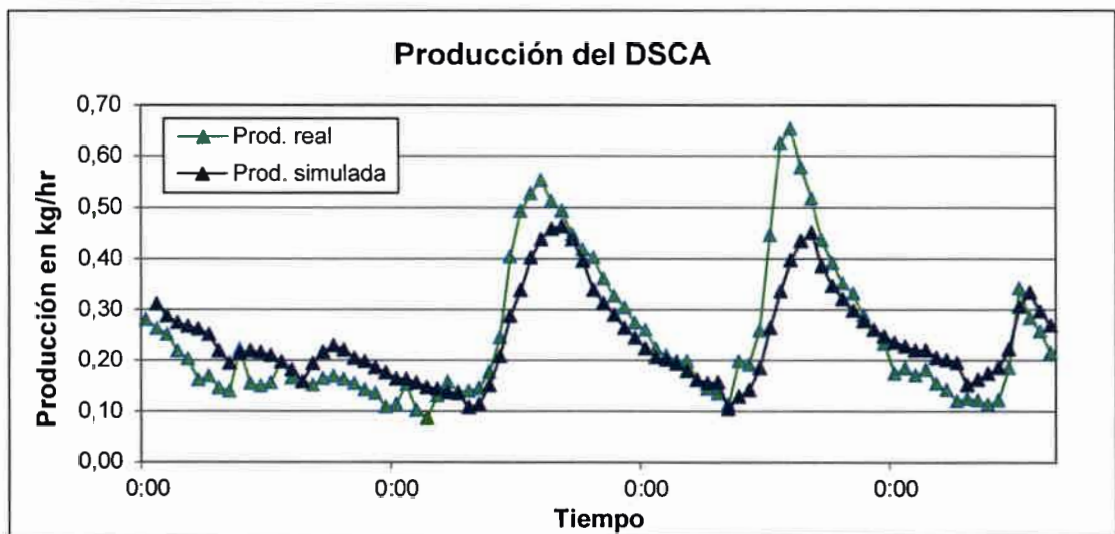


Figura 6.6: Producción de destilado medida experimentalmente y simulada.

VII. PROPUESTAS DE MEJORAS EN EL DSCA

Como se mencionó anteriormente, el motivo de este trabajo es optimizar el funcionamiento del DSCA. Más precisamente, lo que se pretende optimizar es el aporte que el tanque colector acumulador le hace al destilador, ya sea aumentando el llamado calor útil, que es el aporte de energía del tanque al destilador, o bien manteniendo este calor en los valores actuales pero reduciendo el tamaño y con esto el costo del tanque colector-acumulador.

A partir del análisis de los datos obtenidos en las mediciones realizadas surgen propuestas de modificaciones en el diseño del DSCA. Estas modificaciones son evaluadas utilizando los programas de simulación realizados. A continuación se detallan los cambios propuestos y las conclusiones sobre su conveniencia o no [Zizzias *et al.*, 2012c].

VII.1. Reemplazo de la superficie colectora por aislación en la mitad sur del tanque.

Debido a que la cara sur del tanque no recibe radiación directa sino que recibe solamente radiación difusa se hace un análisis sobre la conveniencia o no de cubrir este sector del tanque con aislación. Para esto se compara la energía absorbida por el tanque, es decir la energía que aporta la radiación difusa, con las pérdidas que se producen solo por esa parte del tanque. Se utilizan las mediciones realizadas en el mes de julio, ya que éstas se consideran las más desfavorables debido a la menor radiación diaria que recibe el tanque colector y a la menor temperatura ambiente la cual produce mayores pérdidas de energía [Zizzias *et al.*, 2011].

Utilizando los dos programas desarrollados se determinan los valores de radiación absorbida y las pérdidas que se producen por la cara sur.

La tabla VII.1 que se muestra a continuación, da los valores de pérdidas y ganancias de energía mencionados para cinco días del mes de julio, los cuales se caracterizaron por presentar bajas temperaturas ambiente y además en dos de estos días la radiación solar fue muy baja.

Tabla VII.1: Pérdidas y ganancias térmicas de la cara sur del tanque colector

| Pérdidas totales diarias por la cara sur en MJ | Ganancias (radiación absorbida por la cara sur del tanque) en MJ |
|---|---|
| 2,6825 | 5,9532 |
| 2,9114 | 2,3346 |
| 2,4821 | 5,6357 |
| 2,7214 | 1,7340 |
| 2,7575 | 6,7110 |

Se observa que para los días de buena radiación solar, días 1, 3 y 5, la ganancia de energía es muy superior a las pérdidas que se producen durante todo el día, mientras que en los días de baja radiación solar, 2 y 4, las pérdidas son algo superior.

Se observa que, en promedio, la radiación absorbida es mayor que las pérdidas térmicas lo que significa que es conveniente que la cara sur siga siendo colectora y no cubrirla con material aislante, más aún si se tiene en cuenta las características climáticas de los días considerados, muy desfavorables para el funcionamiento del DSCA.

VII.2. Aumento en la aislación en el fondo del tanque

Si se compara las pérdidas que se producen por la pared lateral del tanque con las del fondo se concluye que por éste las pérdidas si bien son menores en valores absolutos no lo son en valores relativos al área de las superficies por donde se producen estas pérdidas. Esto se debe básicamente a que la superficie selectiva que cubre la pared lateral del tanque posee una muy baja emitancia, lo que disminuye notablemente la transferencia por radiación y también se debe a que las dos cubiertas de policarbonato que rodean al tanque disminuyen el coeficiente global de transferencia de calor que caracteriza las pérdidas por esa pared.

Por otro lado, el fondo del tanque posee solo como aislación la placa de madera en donde se asienta el mismo. Se propone entonces cubrir la base con aislación de poliestireno expandido de 0,10 m de espesor al cual se lo cubriría con chapa galvanizada.

La gráfica 7.1 compara las temperaturas medias del tanque con su conformación original y las temperaturas medias del mismo considerando el agregado de aislación mencionado, obtenidas ambas por simulación.

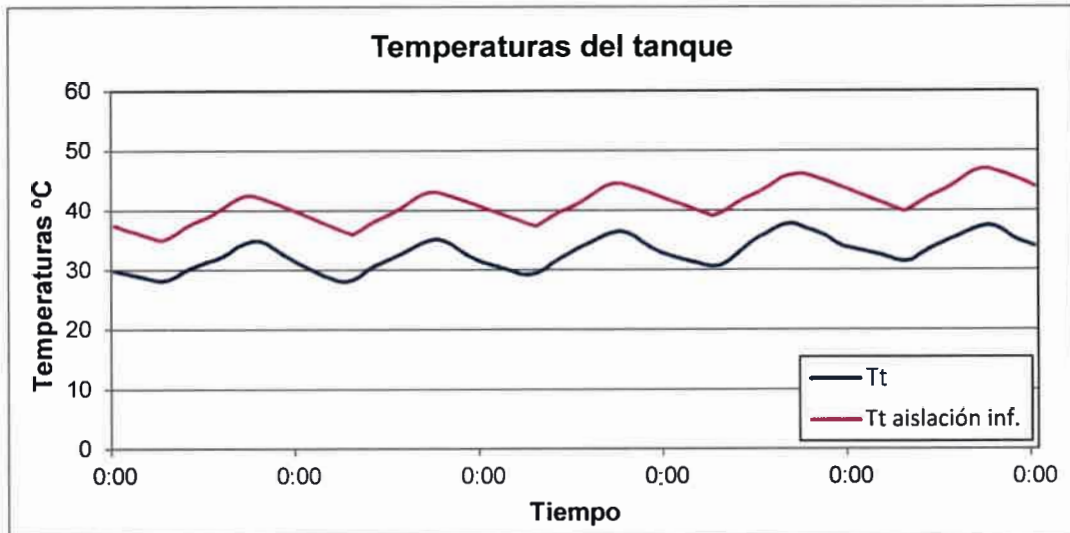


Figura 7.1: Temperaturas simuladas del agua del tanque con la configuración actual y con el agregado de la aislación de poliestireno expandido en la base

Se observa un aumento en la temperatura del agua del tanque de unos 5 °C, lo cual muestra la importancia que tendría el agregado de aislación.

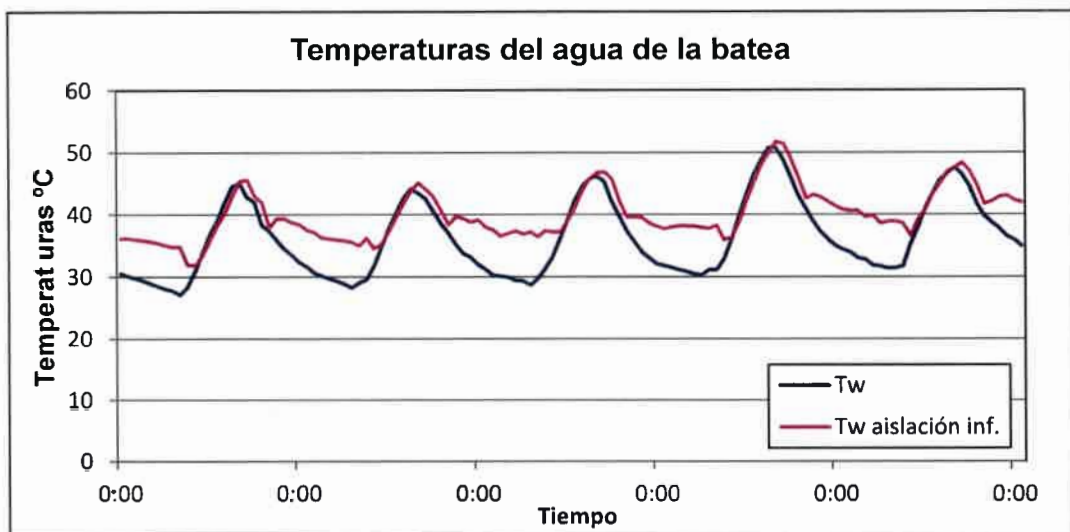


Figura 7.2: Temperaturas simuladas del agua de la batea con la configuración actual y con el agregado de la aislación de poliestireno expandido en la base

En la figura 7.2 se observa que durante la noche la temperatura del agua de la batea disminuye en forma menos pronunciada cuando se agrega la aislación, mejorando la performance del DSCA al menos durante este periodo.

La mejora en las temperaturas logradas durante la noche en la batea no se evidencia durante el día, ya que en este periodo la temperatura del agua del tanque nunca supera a la temperatura del agua de la batea. La mejora lograda durante la noche en la temperatura del agua de la batea se ve reflejada en el aumento de la producción durante este periodo como se observa en la figura 7.3.

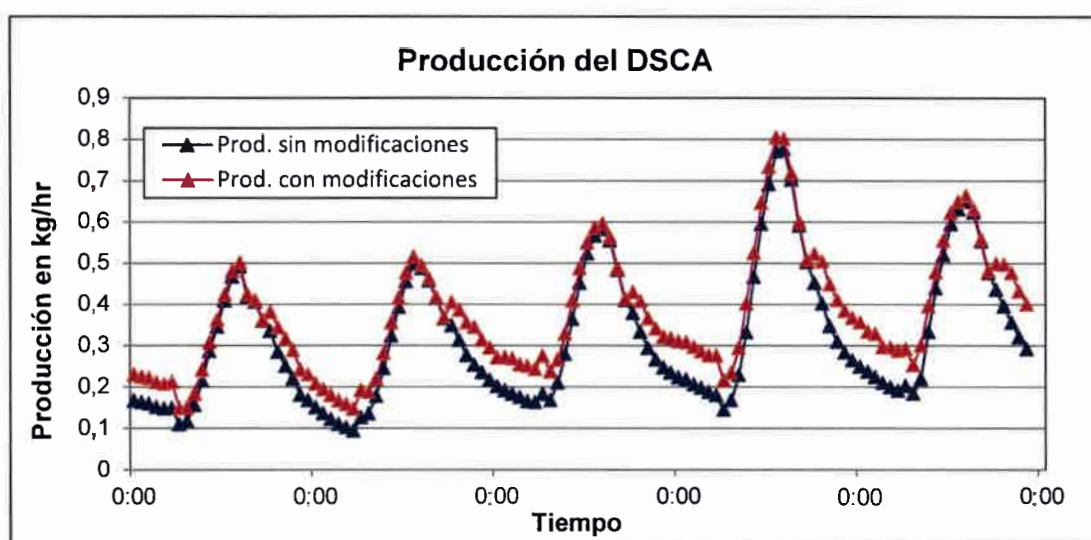


Figura 7.3: Producción simulada de destilado con la configuración actual y con el agregado de la aislación de poliestireno expandido en la base

VII.3. Separación de las placas de policarbonatos.

Debido a que los coeficientes de transferencia de calor con el cual obtenemos las pérdidas por la pared lateral del tanque dependen de la separación entre las placas, es decir la separación entre la pared del tanque y los policarbonatos, se realizaron simulaciones con el programa modificando dicha separación.

Las distintas corridas del programa realizadas evidenciaron que si se disminuye la separación, las pérdidas son mayores y por el contrario si la separación entre placas aumenta las pérdidas disminuyen. Sin embargo, a partir de una separación mayor a los 0,03 m entre placas, la disminución de las pérdidas se hace insignificante. Por otro lado, hay que considerar que aumentar la separación entre placas implica aumentar el

costo en policarbonato. A partir de estos dos aspectos considerados se concluye que una separación entre el tanque y las dos placas de 0,03 m optimiza la relación costo-disminución de pérdidas.

Los resultados para 0,02 m, que es la distancia original y para 0,03 m, que es la distancia propuesta de separación entre cada par de placas, son mostrados en las figuras 7.4 y 7.5. En ellas se pueden comparar las temperaturas del agua tanque y del agua de la batea para las distintas separaciones.

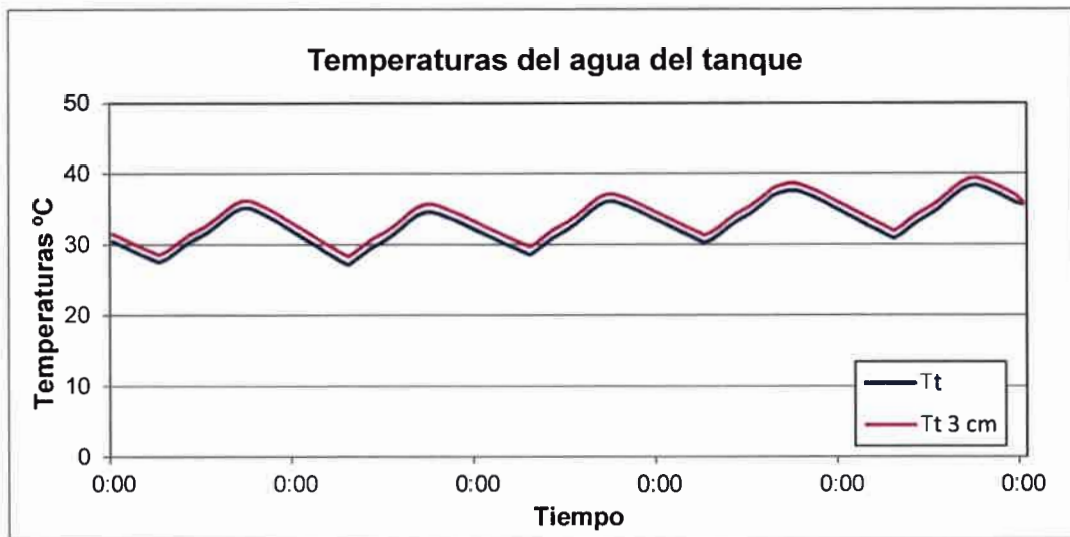


Figura 7.4: Temperaturas simuladas del agua del tanque considerando dos distancias distintas entre placas, 0,02 y 0,03m

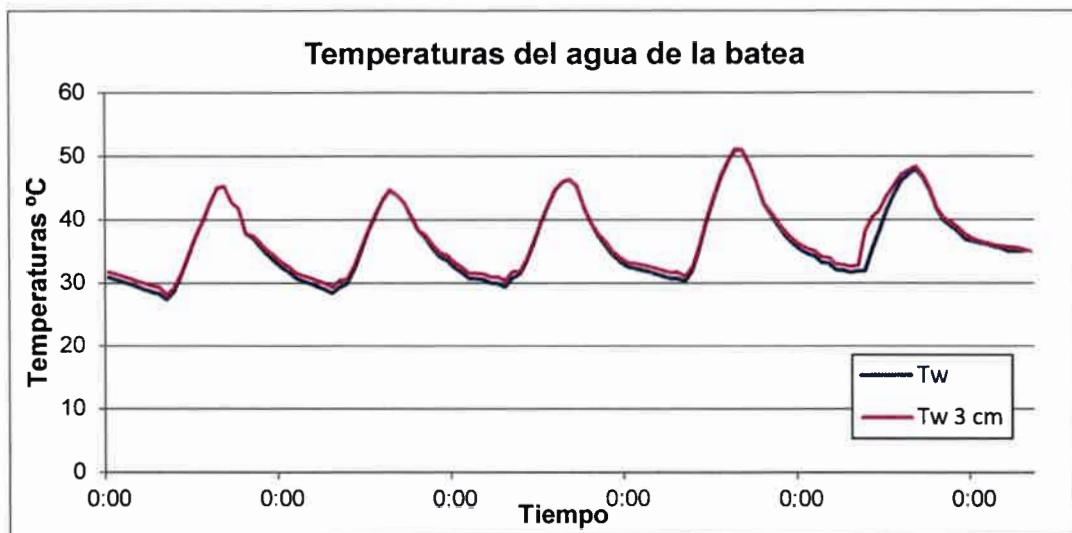


Figura 7.5: Temperaturas simuladas del agua de la batea considerando dos distancias distintas entre placas, 0,02 y 0,03 m

Si bien se nota en el tanque un aumento de la temperatura del agua de aproximadamente 2 °C, este aumento casi no se traslada al agua de la batea, la cual aumenta su temperatura menos de 1 °C durante la noche. Esto significa una mejora muy pequeña en la producción de destilado, tal cual se observa en la figura 7.6.

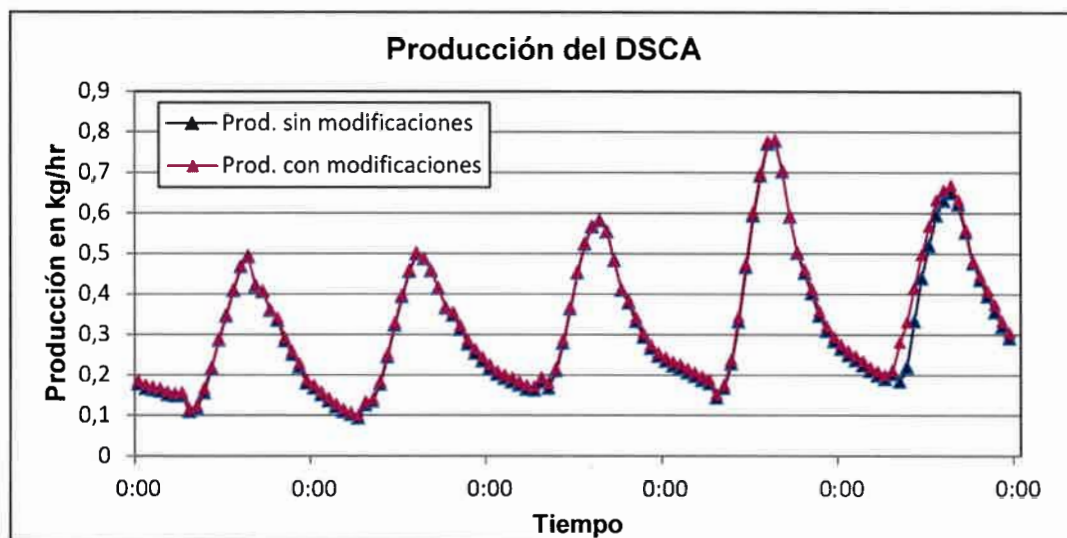


Figura 7.6: Producción simulada de la producción de destilado considerando aislación de madera o aislación de poliestireno expandido en la base

VII.4. Disminución de la sombra proyectada por el destilador sobre el tanque

Otro punto de análisis y evaluación lo constituyó la sombra que la batea del destilador proyecta sobre el tanque. Como se mencionó anteriormente el tamaño de esta sombra varía según la época del año, haciéndose importante durante el verano y casi imperceptible durante el invierno.

Para evaluar la importancia que tendría la disminución de la sombra en la performance del DSCA se analiza el comportamiento del dispositivo mediante simulaciones utilizando datos del mes de octubre. Mediante observaciones realizadas durante varios días de este mes se estableció que la sombra proyectada representa en promedio un 20% aproximadamente de la superficie del colector. Si se desplaza la batea hasta el borde mismo del tanque se estima que la sombra disminuirá considerablemente representando un 5% del total de la superficie.

A partir de estas estimaciones se realiza una simulación cuyos resultados se observan en la figura 7.7.

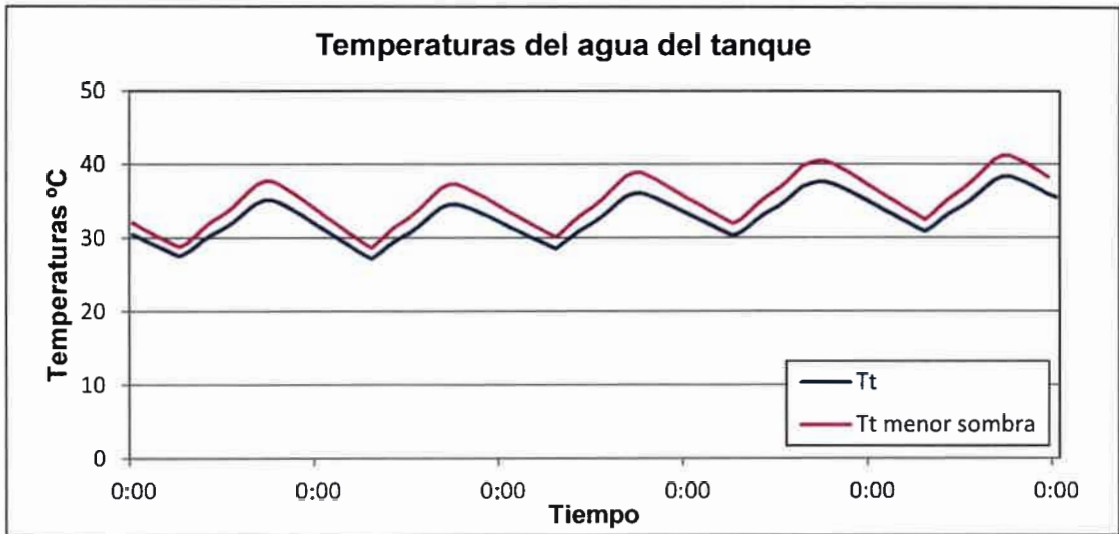


Figura 7.7: Temperaturas simuladas del agua del tanque considerando el desplazamiento de la batea

En esta figura se aprecia un aumento de la temperatura del tanque de aproximadamente 2 °C. Este aumento se traslada, solo durante la noche, al agua de la batea aunque aquí el aumento es más pequeño, según se observa en la figura 7.8.

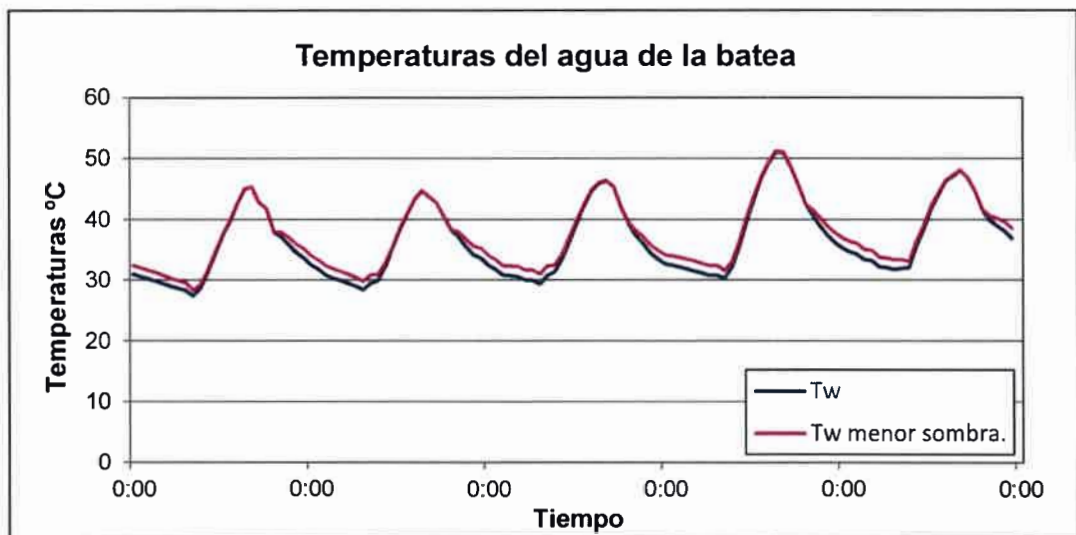


Figura 7.8: Temperaturas simuladas del agua de la batea considerando el desplazamiento de la batea

Como era de esperar el aumento en la producción de destilado es también pequeño. Esto se muestra en la figura 7.9.

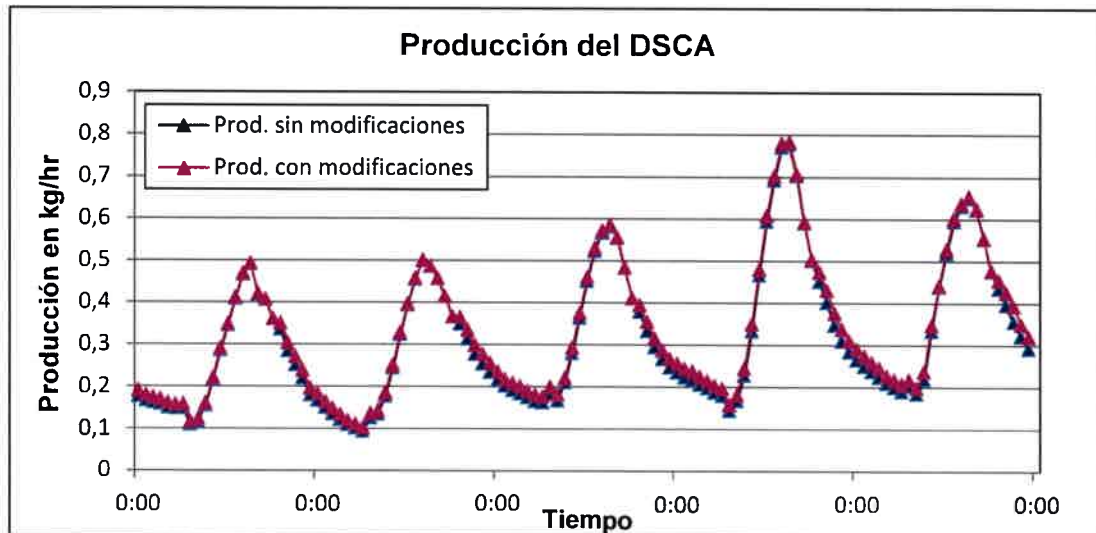


Figura 7.9: Producción simulada de destilado considerando el desplazamiento de la batea

VII.5. Tamaño y forma del tanque.

Si bien la característica principal del DSCA es la gran inercia térmica que representa el importante volumen de agua almacenado en el tanque, es conveniente analizar si un menor tamaño del mismo u otra geometría es capaz de aumentar el calor útil o en su defecto mantener los valores del calor útil pero disminuir los costos del dispositivo.

Se realizaron varias corridas del programa modificando el tamaño del tanque. Se optó por modificar la altura del mismo para mantener la misma superficie de contacto entre el tanque y la batea. Así mismo se consideró que achicar el diámetro, manteniendo la misma altura, produciría una sombra mayor sobre el tanque y además, al disminuir la abertura del tanque y con ello la superficie de contacto con la batea, aumentaría las pérdidas térmicas desde la batea al ambiente.

Los resultados que se muestran a continuación son de tres corridas. La primera con el volumen actual, la segunda con la mitad del volumen y la tercera con un volumen que representa la cuarta parte del volumen original.

Lo que se observa es una disminución de la temperatura del agua del tanque, la que disminuye a medida que disminuye el tamaño del tanque. Esto se debe fundamentalmente a que se hacen comparativamente más importantes las pérdidas por el fondo del tanque, ya que el tamaño relativo de este, frente al tamaño de la pared lateral, aumenta considerablemente. Es decir, a medida que achicamos el tamaño del tanque la disminución de la superficie que colecta energía es proporcionalmente mayor que la disminución de la superficie que pierde energía.

Las variaciones de las temperaturas se muestran en las figuras 7.10 y 7.11 y la variación en la producción de destilado se muestra en la figura 7.12.:

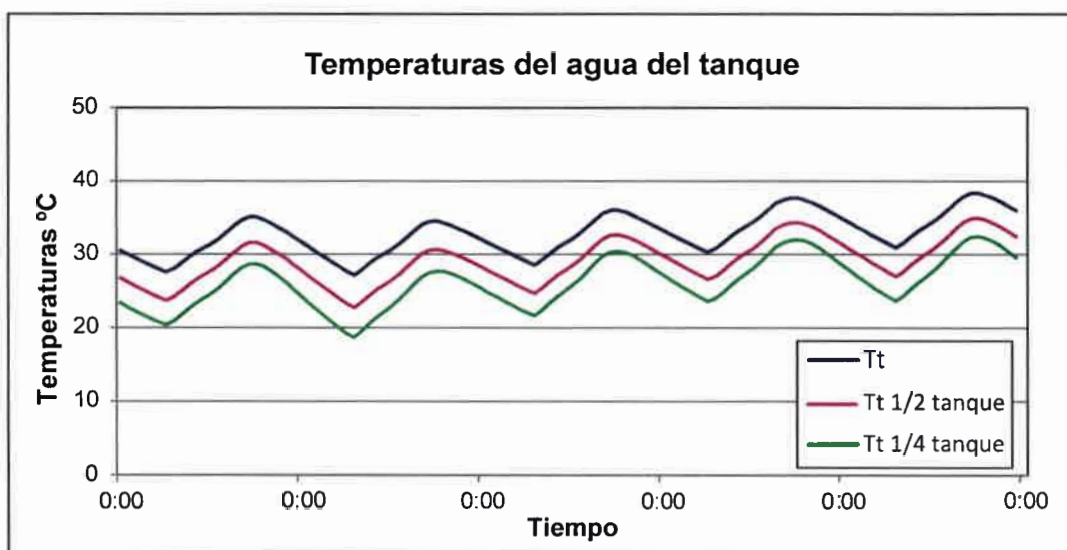


Figura. 7.10: Temperaturas simuladas del agua del tanque para distintos tamaños del mismo

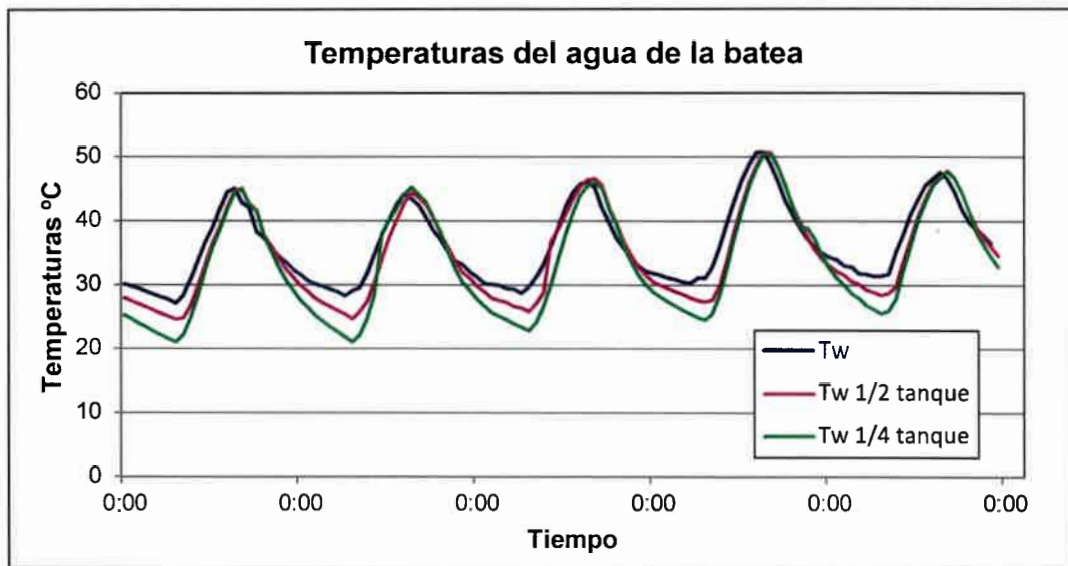


Figura 7.11: Temperaturas simuladas del agua de la batea tanque para distintos tamaños del tanque

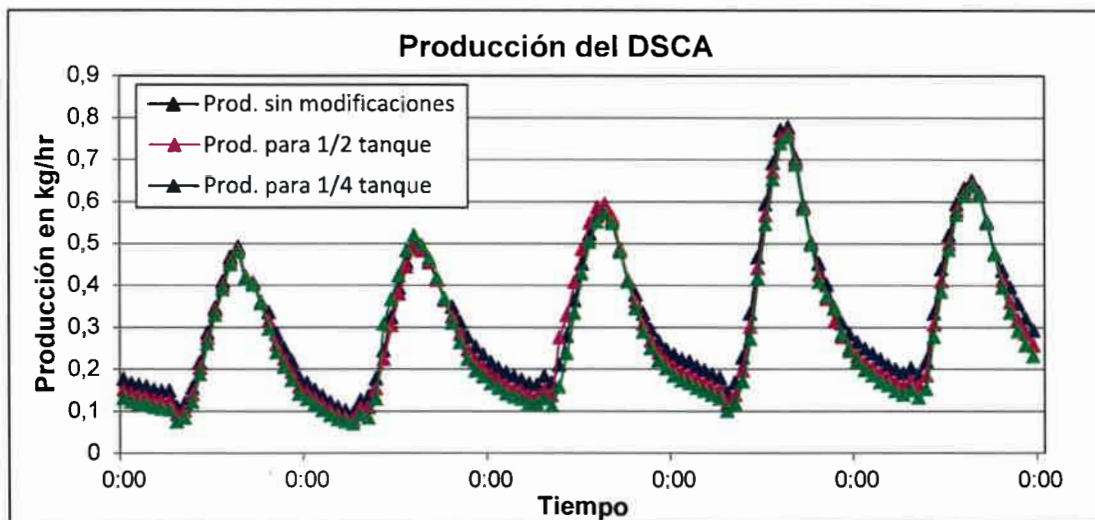


Figura 7.12: Producción simulada de destilado para distintos tamaño del tanque

VII.6. Combinación de las modificaciones propuestas

Después de analizar los resultados obtenidos con la simulación de las distintas modificaciones parciales propuestas, se estudia una combinación de estas modificaciones.

Con el objetivo de reducir costos se reduce el tamaño del tanque a la mitad. Conjuntamente con esto, se mejora la aislación del fondo del tanque agregando una plancha de poliestireno expandido de 0,10 m. Se propone además ampliar la separación de las cubiertas de policarbonato 0,01 m más que la actual separación y desplazar la batea del destilador hasta el borde del tanque de tal forma que la sombra que proyecta sobre el mismo sea lo más pequeña posible.

Se realiza la simulación con las modificaciones propuestas y se obtienen los resultados que se muestran en las figuras 7.13 y 7.14. En ellas T_i representa la temperatura original y $T_{i,comb}$ la temperatura que resultaría de las modificaciones propuestas. Se observa en estas un aumento promedio de la temperatura del tanque de 8 °C y un aumento promedio de la temperatura del agua de la batea de 5 °C durante el periodo nocturno.

También se puede observar que la temperatura máxima del agua de la batea no se incrementa con ninguna de las modificaciones propuestas. Esto es debido a que la temperatura del agua del tanque es, durante el día, muy inferior a la del agua de la batea ya que esta adquiere su elevada temperatura debido principalmente a la absorción de la radiación solar incidente en la batea. Esto indica que durante el período diurno no se logra mejorar la producción de destilado.

Por el contrario durante el período nocturno, el aumento de temperatura que se logra en el agua de la batea, va a repercutir en un aumento de la producción del destilado, con lo cual estaríamos obteniendo, de confirmarse experimentalmente estos resultados, dos importantes mejoras; por un lado el aumento de la producción y por el otro una disminución del costo del equipo por el menor tamaño del tanque colector-acumulador.

Se presentan a continuación las gráficas con las temperaturas del agua del tanque y del agua de la batea, figuras 7.13 y 7.14. Se presentan también las gráficas que comparan la producción sin considerar las modificaciones propuestas y considerando dichas modificaciones, figura 7.15.

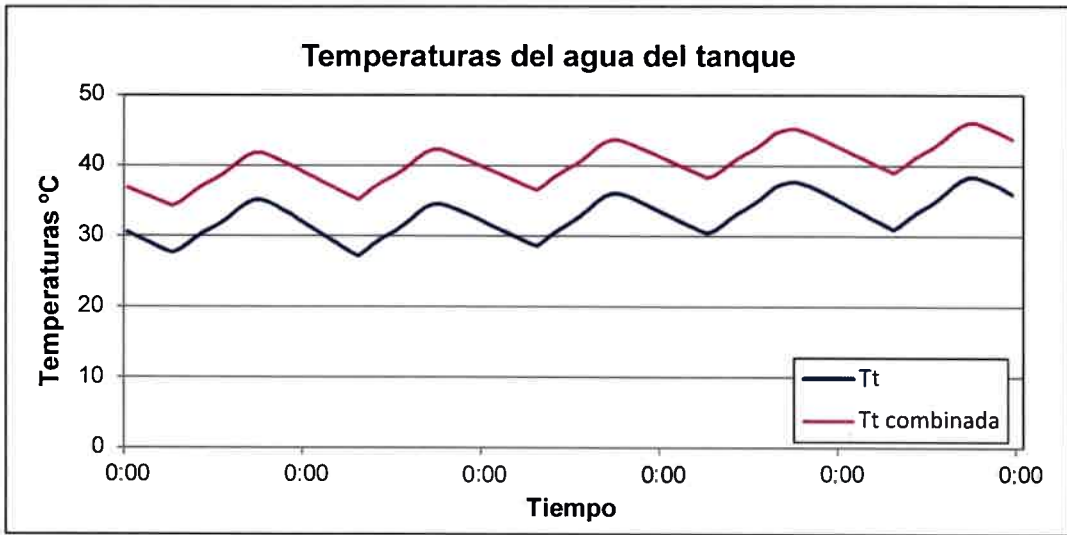


Fig. 7.13: Temperaturas simuladas del agua del tanque con la geometría actual del tanque y con las modificaciones propuestas.

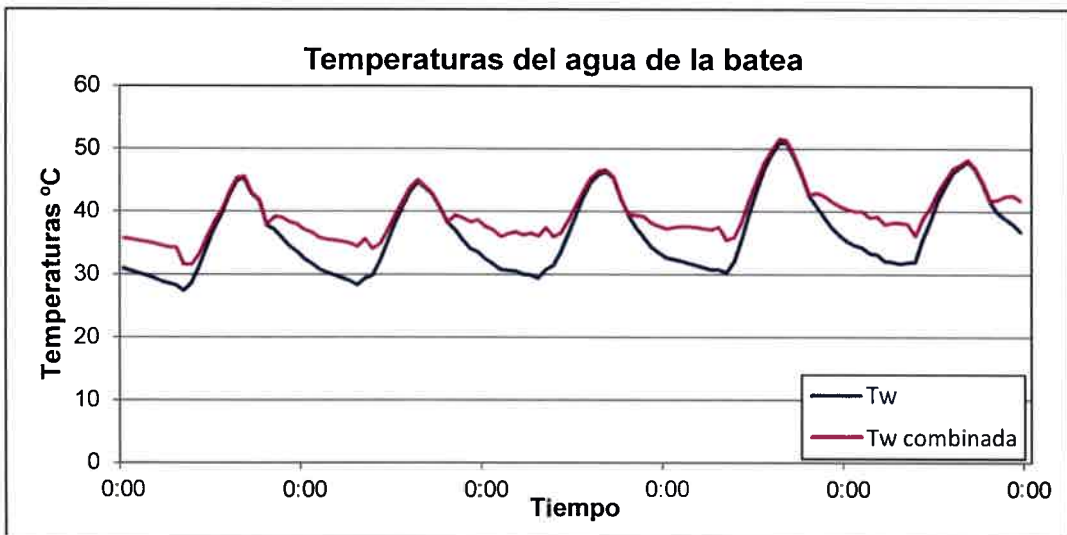


Figura 7.14: Temperaturas simuladas del agua de la batea con la geometría actual del tanque y con las modificaciones propuestas.

Por último en la figura 7.15 se pueden observar dos gráficas. En azul la que representa la producción simulada con la configuración actual y en rosa la obtenida también por simulación pero considerando las modificaciones propuesta en este capítulo.

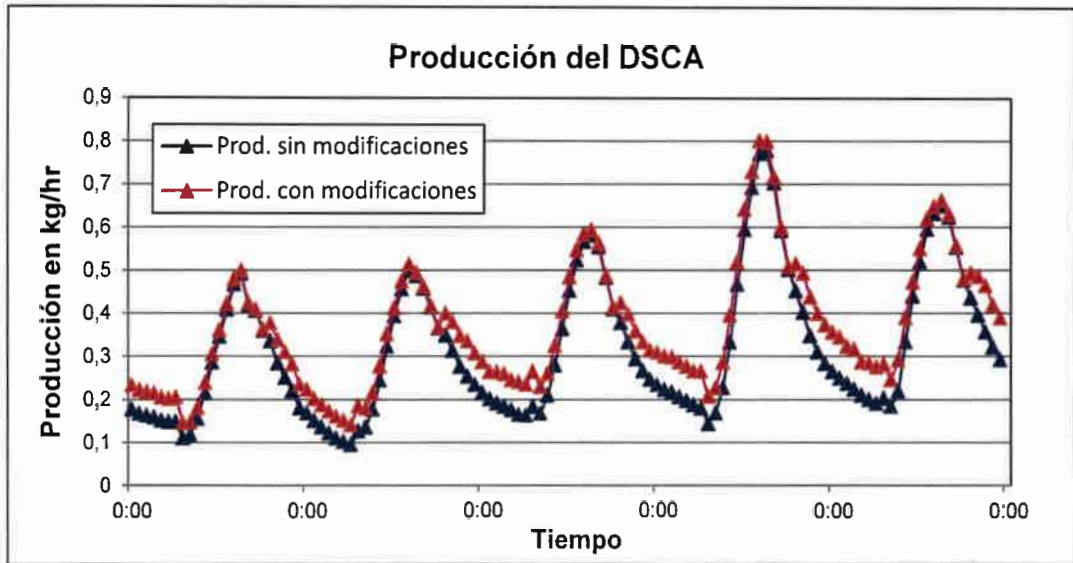


Figura 7.15: Producción de destilado del DSCA simulada sin mejoras y simulada considerando las mejoras propuestas.

Según puede observar en esta gráfica la producción mejoraría considerablemente durante el periodo nocturno. Para los cinco días considerados la producción estaría aumentando un 13% aproximadamente. A esta mejora hay que sumarle otra que tiene que ver con el hecho de que el tanque tiene la mitad de altura que el original, lo cual significaría un importante ahorro en material de acero inoxidable.

VIII. ANALISIS DE COSTOS

En este capítulo se realiza un cálculo sobre la variación que sufre el costo del litro del agua destilada y el tiempo de recuperación de la inversión con el nuevo diseño del DSCA.

Para esto se plantea una evaluación económica donde se tiene en cuenta la inversión inicial de capital, el costo de mantenimiento, que incluye la reposición de material con desgaste, la depreciación del capital y el interés (Tiwari, 2008).

Esta evaluación se la realiza para el diseño original y para el nuevo diseño, de tal forma de poder comparar los respectivos costos de producción de destilado.

Tiwari plantea que la evaluación sobre la factibilidad económica de la producción de agua destilada por medio de un destilador solar se la realiza considerando fundamentalmente el costo por litro de agua destilada y el periodo de recuperación de la inversión.

VIII.1. Costo por litro de agua destilada

Para calcular el costo por litro de agua destilada se utiliza el valor anualizado de la inversión con el que se considera un costo anual constante. La expresión dada por Tiwari es la siguiente:

$$CA = C_i \cdot F_{CR} + C_i \cdot F_{CR} \cdot M - R \cdot F_{SR} \quad (\text{VIII.1})$$

Dónde: CA = Valor anualizado de la inversión.

C_i = Capital inicial.

R = Capital residual para el tiempo considerado N .

M = Gastos de mantenimiento en porcentaje.

F_{CR} = Factor que anualiza la inversión inicial.

F_{SR} = Factor que anualiza el capital residual.

En esta ecuación CA representa el costo anualizado, el primer término del segundo miembro representa el valor anualizado del capital inicial, el segundo término

el valor anualizado del mantenimiento y el tercer término el valor residual del destilador solar para una determinada cantidad de años, valor que también está anualizado.

Los factores F_{CR} y F_{SR} dependen del interés anual para préstamos de inversión productiva. Las expresiones para obtener los mismos son las siguientes:

$$F_{CR} = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{VIII.2})$$

$$F_{CS} = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{VIII.3})$$

La determinación de los datos de la ecuación VIII.1. se detallan a continuación::

Capital inicial

En la tabla VIII.1 se observa el costo de los materiales y la mano de obra para la construcción del DSCA original y en la tabla VIII.2 lo mismo pero para el nuevo diseño del DSCA

Tabla VIII.1. Capital inicial para el diseño original del DSCA

| Concepto | Cantidad | Costo |
|--|---------------------|---------------|
| Chapa de acero inoxidable AISI 304 de 1 mm | 4,30 m ² | \$1889. |
| Membrana plástica para batea | 1,20 m ² | \$10. |
| Poliestireno expandido 100 mm | 0,6 m ² | \$30. |
| Vidrios 3 mm | 2.65 m ² | \$370. |
| Adhesivo de silicona | 150 ml | \$30. |
| Policarbonato aereolar 4 mm | 6,50 m ² | \$694. |
| Chapa de acero galvanizado 1 mm | 0,80 m ² | \$240. |
| Lamina de superficie selectiva | 3 m ² | \$210. |
| Madera | 0,66 m ² | \$30. |
| Otros materiales (para instalación) | | \$100. |
| Mano de obra e instalación | 20 hs | \$1000. |
| Total | | \$4603 |

Tabla VIII.2. Capital inicial para el nuevo diseño del DSCA

| Concepto | Cantidad | Costo |
|--|---------------------|---------------|
| Chapa de acero inoxidable AISI 304 de 1 mm | 2,80 m ² | \$1230. |
| Membrana plástica para batea | 1,20 m ² | \$10. |
| Poliestireno expandido 100 mm | 1 m ² | \$50. |
| Vidrios 3 mm | 2.65 m ² | \$370. |
| Adhesivo de silicona | 150 ml | \$30. |
| Policarbonato aereolar 4 mm | 3,50 m ² | \$355. |
| Chapa de acero galvanizado 1 mm | 0,80 m ² | \$240. |
| Lamina de superficie selectiva | 1,50 m ² | \$105. |
| Otros materiales (para instalación) | | \$100. |
| Mano de obra e instalación | 20 hs | \$1000. |
| Total | | \$3490 |

Tasa de interés (*i*).

Se toma como dato la ofrecida por el Banco de la Nación Argentina destinada a las Pymes. Su valor actual es del 15% anual aproximadamente.

Costo de mantenimiento (*M*)

El mantenimiento del destilador solar requiere de las siguientes acciones:

- El policarbonato tiene una duración aproximada de 10 años por lo que se aconseja su reemplazo al cabo del tiempo indicado, tanto del policarbonato que sirve de apoyo de la cubierta de vidrio como de las dos placas que envuelven al tanque colector-acumulador.
- La corrosión de la chapa de acero galvanizado que recubre la aislación del destilador puede ser importante, por lo que puede ser necesario su reemplazo.
- La limpieza regular de la batea y eventual reemplazo del plástico que la recubre.
- La limpieza regular de la cubierta de vidrio.

Debido a que la batea y el tanque son de acero inoxidable, no se tiene en cuenta su mantenimiento.

Se considera en este modelo que el mantenimiento representa un porcentaje de del capital inicial anualizado. Tiwari considera que este porcentaje varía entre el 8 y el 16%. En este caso, debido a la necesidad de reemplazar el policarbonato, cuyo tamaño implica un importante gasto, y además la posible corrosión de la chapa galvanizada, rotura del plástico de la batea o incluso la rotura de algún vidrio se tomará como porcentaje el 15%.

Valor residual

El valor residual del destilador solar será una cantidad que representará el valor del mismo después de los años vida útil establecidos, es decir el “precio chatarra”.

Este valor residual depende en general del material con el cual está fabricado y de las condiciones del mismo al finalizar su vida útil.

Se considerará que el capital residual a los 20 años será el 30% del capital inicial.

Producción de agua destilada

La producción anual estimada del DSCA original es de 1400 litros, según experiencias realizadas a lo largo del año, tanto en Río Cuarto como en la ciudad de San Luis.

Por otro lado la producción del nuevo diseño del DSCA se obtuvo a partir de la simulación realizada. Según se observa en la figura 7.15, la producción del nuevo diseño durante esos cinco días considerados, es aproximadamente un 13% mayor que el del diseño original. Suponiendo que esta situación se mantiene constante a lo largo del año la producción anual del nuevo DSCA sería de 1582 litros.

Calculo del litro de agua destilada

A partir de las consideraciones enumeradas anteriormente se calcula el costo del litro de agua destilada realizado, para los dos casos, el cociente entre la producción anual y el costo anualizado.

$$CLD = \frac{PA}{CA} \quad \text{(VIII.4)}$$

Dónde: *CLD*: Costo del litro de agua destilada

PA: Producción anual

CA: Costo anualizado

Para el diseño original el costo del litro de agua destiladas es de \$ 0,59, mientras que para el nuevo diseño es de \$0,39, lo cual implica una reducción significativa en el costo.

VIII.2. Recuperación de la inversión

Se realiza un análisis sencillo para determinar el periodo mínimo necesario para recuperar la inversión. A este periodo se lo puede considerar como el mínimo período que debe durar el proyecto para que el proyecto no sea deficitario.

Generalmente, el periodo de recuperación de la inversión para un sistema de ahorro de energía es calculado como el cociente entre el costo de inversión dividido por el ahorro anual de energía.

Un análisis para un cálculo más sencillo, es considerar que el período de recuperación de la inversión se obtiene como el cociente entre el costo de inversión realizada y el costo del agua a producir por el destilador a lo largo del año, a valores con los que se la obtiene esta cantidad de agua en el comercio.

$$\text{Período de recuperación (años)} = \frac{\text{Capital inicial}}{\text{Costo anual del agua}} \quad (\text{VIII.5})$$

Para este cálculo se consideró el valor del agua bidestilada, ya que esta es la calidad del agua obtenida por el destilador solar. El valor considerado es de \$ 45 el bidón de 19 litros, es decir \$ 2,36 el litro. Es importante aclarar que el valor del agua bidestilada con certificación según normas, realizada esta a partir de ensayos físicos-químicos y microbiológicos, es de aproximadamente \$ 270 los 50 litros.

Para el diseño original el período de recuperación de la inversión, según la ecuación VIII.5 es de 1,39 años, mientras que para el nuevo diseño es de 0,93 años.

VIII.3. Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio experimental del Destilador solar colector-acumulador. Para realizarlo se lo dividió en tres partes; en la primera parte se evaluó el comportamiento del dispositivo completo, es decir, del destilador junto al tanque colector-acumulador, determinándose la producción y las temperaturas de funcionamiento de las distintas partes del mismo.

En la segunda parte se evaluó solamente el funcionamiento del destilador. Se midieron producción y temperatura de agua de batea y de vidrio. Estos datos permitieron determinar las pérdidas térmicas que se producen por el destilador.

La tercera parte consistió en el estudio del funcionamiento solo del tanque colector solar acumulador, midiéndose valores de temperaturas y de las variables del medio ambiente, a partir de los cuales se determinaron las pérdidas térmicas que se producen por el tanque.

Con estos resultados se pudo establecer que las pérdidas que se producen por el destilador son por lo menos el doble que las pérdidas que se producen por el colector-acumulador. También se pudo determinar que las pérdidas por el fondo del tanque son en proporción al tamaño de las superficies, más importantes que las pérdidas por la pared lateral del mismo.

Además se ha establecido un coeficiente, llamado factor de eficiencia óptico, que permitió evidenciar la importante capacidad que tiene el dispositivo para absorber la energía proveniente del sol. Según pudo establecerse a partir de los datos experimentales, en promedio, un 80% aproximadamente de la radiación solar recibida por el DSCA es absorbida por éste.

Estos estudios experimentales han permitido establecer que si bien la energía absorbida y acumulada por el colector-acumulador es importante, solo una parte relativamente pequeña de ésta es convertida en destilado.

Por otro lado, se ha presentado un modelo matemático con el cual se han determinado también las pérdidas térmicas y las ganancias del DSCA. El mismo se validó a partir de la experimentación descrita y sirvió de base para lograr la simulación del funcionamiento del dispositivo.

Esta validación se logra a pesar de que el modelo presenta varias simplificaciones ya que el mismo fue concebido como una primera aproximación.

Se han podido determinar los valores de los coeficientes de transferencias de calor, así como también los flujos de energía presentes en el dispositivo, siendo lo más significativo la determinación del aporte de calor del colector-acumulador al destilador, llamado calor útil.

A partir de la simulación se han estudiado posibles modificaciones en la geometría del tanque colector, con el objetivo de optimizar el funcionamiento del DSCA. Lo que se buscó fue lograr un mejor aprovechamiento de la energía que es capaz de acumular el colector-acumulador, para que de esta manera se consiga aumentar la producción del mismo.

Se analizó el agregado de aislación en la cara sur del tanque, el aumento de la aislación en la base del mismo, el corrimiento de la batea, el aumento en la separación de las placas de policarbonato y la reducción en la altura del tanque. La modificación que produce la mejora más significativa en la producción del DSCA, según las simulaciones efectuadas, fue el aumento de la aislación en el fondo del tanque colector-acumulador. Según estas simulaciones se optimiza aún más el funcionamiento del dispositivo si, al aumento de la aislación, se la combina con un pequeño aumento en la separación de las cubiertas de policarbonato y se reduce a la mitad el tamaño del tanque colector. Esta combinación de modificaciones produce por un lado un aumento considerable en la producción y por el otro una reducción en la inversión inicial necesaria para la construcción del DSCA. En este sentido se observa en el estudio económico realizado, que esta combinación de mejoras implica una disminución sustancial en el costo del litro de agua destilada y una disminución también en el período de recuperación de la inversión.

Estos resultados deberán ser analizados con mayor profundidad y confirmados experimentalmente.

El modelo sin embargo, a causa de las simplificaciones del mismo, no permite hacer un análisis de otro tipo de modificaciones. El modelo no considera la convección natural interna que se produce en el tanque, la cual debe ser importante ya que la poca estratificación que hay indica que hay mezcla en el fluido y esto se produce como consecuencia de la convección. Una mayor estratificación podría significar un aumento en la temperatura de la parte superior del tanque y por ende en la batea pero la confirmación de esto significa, en principio, profundizar los estudios completando el modelo teniendo en cuenta la convección. Este es un trabajo que se plantea a futuro.

REFERENCIAS

- Armenta-Deu, C. (2004) Purificación de agua bajo vacío; Actas del VII Congreso Ibero-Americano de Energía Solar; Vol. I, pp. 651-656
- Barral J., Morichetti G., Galimberti P., Fasulo A., (2001) Evaluación de la energía absorbida por un colector acumulador integrado monotanque con cubiertas de policarbonato alveolar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 5, pp. 03.31-03.36.
- Baum B. y Bairamov (1964) Heat and mass transfer processes in solar stills of hotbox type; Solar Energy, Vol.VIII, pp. 78-82.
- Belessiotis V., Voropoulos K. and Delyannis E. (1995) Experimental and theoretical method for the determination of the daily output of a solar still; Desalination, Vol. 100, pp. 99-104.
- Blarasin M, y Cabrera A, (2003) Año Internacional del agua dulce, Aguas subterráneas y Ambiente. Cartilla de divulgación. Editorial UNRC.
- Brandemuehl, M. J. y Beckman W. A. (1980) Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings. Solar Energy Vol. 24, pp 511-513.
- Cooper P. I. (1969) Digital Simulation of Transient Solar Still Processes. Solar Energy, Vol. 12, pp. 313-331.
- Cooper P. I. (1973a) Digital Simulation of Experimental Solar Still Data. Solar Energy Vol. 14 pp. 451-468.
- Cooper P. I. (1973b) The maximum efficiency of single-effect solar still; Solar Energy, Vol. 15, pp. 205-217.
- Delyannis E. (2003) History Background of desalination and renewable energies; Solar Energy, Vol. 75 pp. 357-366.

- De Paul I. (2000) Coeficiente de Transferencia Convectivo H en el Interior de un Destilador Tipo Batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4, pp. 03.27-03.32.
- De Paul I., (2002) New Model Of a Basin-Type Solar Still. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 124, pp. 311-314.
- De Paul I., Quintana J. M. (2003) Características del funcionamiento no estacionario de un destilador solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 7, pp. 03.18-03.24.
- De Paul I., Quintana J. M. (2004) Peculiaridades del Funcionamiento No Estacionario de un Destilador Solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 8, pp. 03.01-03.06.
- Ducculi E, Marchesi J, Barral J, y Fasulo A (2008) Simulación numérica de un destilador solar asistido con un colector acumulador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 12, pp. 3.149-3.156.
- Duffie J. and Beckman W. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*; Second Edition, Jhon Willey & Sons, Inc. New York.
- Dunkle R. V. (1961) *Solar Water Distillation: The Roof Type Still and Multiple Effect Diffusion Still*. Commonwealth Scientific and Industril Research Organization Victoria, Australia
- Dwivedi V.K. y Tiwari G.N. (2010) Experimental validation of thermal model of double slope active solar still under natural circulation mode. *Desalination*, Vol. 250, pp. 49-55
- Esteban C., Franco J. y Fasulo A. (2000) Destilador solar asistido con colector solar acumulador; *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 1, pp. 3.34-3.37

- Esteban C., Franco J. y Fasulo A. (2002) Evaluación experimental de un destilador colector solar acumulador; *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 6, N°1, pp. 6.81-6.85
- Esteban C., Fasulo A y Franco J. (2004) Pérdidas térmicas del destilador solar asistido con colector solar acumulador, Libro de Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Ibero-Americano de energía solar, Vigo España, pp. 361-366.
- Esteban C., Fasulo A. y Franco J. (2005) Construction and performance of solar assisted distiller. *Desalination*, Vol. 173, pp. 249-255.
- Esteban, Carmen (2006) Tesis de Maestría: Destilador solar asistido con colector solar acumulador; Maestría en Energías Renovables de la Universidad Nacional de Salta.
- Fasulo A, Perello D y Follari J. (1997) Un colector solar acumulador; *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 1, pp. 93-96.
- Fasulo A., Follari J. and Barral J. (2001) Comparison Between a Simple Solar collector accumulator and a Conventional Accumulator. *Solar Energy*, Vol. 71, N° 6 pp. 389-401.
- Fasulo A., Follari J. y Barral J. (2002) Un nuevo colector solar acumulador. *Energías renovables y medio ambiente*, Vol. 10, pp. 43-49.
- Fasulo A, Follari J, Adaro J, Marchesi J, Odicino L y Monasterollo R. (2004) Planta experimental de destilación solar-eléctrica en la UNLS. Primera parte y primeros resultados, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 8, N° 1, pp. 07-13.
- Fasulo A., Esteban C., Odicino L. y Follari J. (2006) Pequeña planta de destilación solar; *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 10, pp. 03. 61-3.68.

- Fasulo A. (2007); Colector solar acumulador; AR032180B1, patente otorgada por 20 años por el INPI.
- Fasulo A., Esteban C. y Franco J.(2008a) Acta N° 20060100875 Un nuevo dispositivo para producir agua destilada con radiación solar. Patente en trámite, estado actual, con publicación Boletín Oficial N° 498/08.
- Fasulo A., Odicino L., Adaro J., Marchesi J. y Ducculi E. (2008b) Destilador Solar con acumulador de energía; Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 12, pp. 03.25-03.32.
- Fasulo A, Odicino L, Marchesi J. y Adaro J. (2009a) Balance energético desde el acumulador en dos destiladores solares, uno sin y otro con aporte de energía desde colectores solares planos, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 13, pp. 35-42.
- Fasulo A., Odicino L. y Marchesi J. (2009b) INPI, Exp. N° 20090104979. Un dispositivo para producir agua destilada con energía solar, que opera en múltiples etapas, recuperando en cada una de ellas la energía de condensación; (en etapa de evaluación).
- Fasulo A., Zizzias J., Odicino L., Marchesi J. (2011) y Fasulo A., Evaluación de un destilador colector solar acumulador operado en condiciones térmicas extremas. CAyER 2011, pp. 566-576.
- Fernández J. L. y Chargoy N. (1990) Multi – stage, indirectly heated solar still, Solar Energy, Vol. 44, pp. 215 -223
- Follari J. (1994) Un destilador solar tipo invernadero desmontable; Actas de la 17ma. Reunión de trabajo de ASADES Tomo I, pp. 45-50.
- Follari J., Odicino L. y Fasulo A. (2005) Mejoras en el rendimiento de destiladores solares tipo batea utilizando espejos planos fijos. Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 17.

- Follari J. y Odicino L. (2005) Mejoras constructivas de destiladores solares tipo batea. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 17.
- Franco J. y Saravia L. (1992) Ensayo y simulación de un destilador de efecto múltiple. *Actas de la 15ta Reunión de ASADES*, pp. 403-408
- Frick G. y Hirschmann (1973) Theory and experience with solar still in Chile, *Solar Energy*, Vol. 14, pp. 405-413.
- Guofeng Y., Zhifeng W., Hongyong L. y Xing L. (2011) Experimental study of a solar desalination system based on humidification–dehumidification process. *Desalination*, Vol. 277, pp. 92-98.
- Howe E. D. y Tleimat B. W. (1980) *Fundamentals of Water Desalination*, Solar Energy Engineering, A. A. M. Sayingh, Academic Press, Cap 20.
- Imed H., Mahmoud B., Amanallah G., y Mohammed M. (2006) Pilot plant testing of a new solar desalination process by a multiple-effect-humidification technique. *Desalination*, Vol. 196, pp. 105-124.
- Kumar S. y Tiwari G. (1996) Performance evaluation of an active solar distillation system. *Energy*, Vol. 21 N°9, pp. 805-808.
- Linares J. y Souto J. (1977) Proyecto de una planta experimental de destilación de agua mediante la energía solar para pequeñas comunidades aisladas; *Actas de la Tercera reunión de Trabajo de ASADES*, pp. 175-189.
- Marchesi J., Ducculi E, Adaro J. y Fasulo A. (2007) Sistematización de las mediciones de producción y temperaturas de destiladores solares en la UNRC. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 03.123-03.130.
- Marchesi J, Ducculi E, Adaro J. y Fasulo A. (2008) Comparación del rendimiento de un destilador solar de batea básico respecto de un destilador asistido

térmicamente. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 12, pp. 63-70.

Mills A. F., (1995); *Transferencia de calor*. Mac Graw-Hill/Irwin.

Siegel R. y Howell J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*, 2nd ed., Mc Graw Hill, New York, 1981.

Sampathkumar K, Arjunan T. V, Pitchandi P. y Senthilkumar (2010) Active solar distillation-A detailed review; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 1503-1526.

Tiris C, Tiris M, Erdalli Y. y Sohmen M. (1998) Experimental studies on a solar still coupled with a flat-plate collector and a single basin still. *Energy Conversion and Management*, Vol. 39 N°8, pp. 853-856.

Tiwari G.N., Singh H.N. y Rajesh Tripathi (2003) Present status of solar distillation. *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 367-373.

Tiwari G.N. y Tiwari A.K. (2008) *Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems*. Anshan Tunbridge Wells UK.

Tiwari G. N., Dimri V. y Chel Ar. (2009) Parametric study an active and pasive solar distillation system: Energy and exergy analysis. *Desalination*, Vol. 242, pp. 01-18.

Torchia-Núñez J. C., Pora Gándara M. A. y Cervantes de Gotari J. G. (2010) Análisis de exergía en estado permanente de un destilador solar simple. *RIIT Vol. XI* pp. 25-34 FI-UNAM

Voropoulos K., Mathioulakis E. y Belessiotis V. (2001) Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors,. *Desalination*, Vol. 138, pp. 103-110

- Voropoulos K., Mathioulakis E. y Belessiotis V. (2002) Analytical simulation of energy behavior of solar stills and experimental validation. *Desalination*, Vol.153, pp. 87-94.
- Yadav Y y Prasad S. (1995) Performance analysis of a high temperature solar distillation system; *Energy Conversion and Management*, Vol. 36 N°5, pp. 365-374.
- Zizzias J., Fasulo A., Venier F., Marchesi J., Odicino L. (2010) Evaluación detallada de un destilador solar colector acumulador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.14, pp. 03.63-03.69.
- Zizzias J., Marchesi J., Venier F., Adaro J., Fasulo A. (2011) Determinación de Ganancias y pérdidas y térmicas en un tanque colector solar acumulador integrado a un destilador solar. *CAYER 2011*. pp. 275-283.
- Zizzias J., Marchesi J., Fasulo A., Venier F., (2012) Verificación de un modelo matemático propuesto para la determinación de pérdidas en un dispositivo formado por un destilador solar acoplado a un tanque colector- acumulador. XV Congreso Ibérico y X Congreso Ibero-Americano de energía solar, Vigo España, pp. 365-370.
- Zizzias J., Stoll R., Marchesi J., Fasulo A., Venier F. (2012) Simulación numérica del comportamiento de un destilador solar integrado a un tanque colector acumulador. *Anales del III Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Área temática L, N° 4*. ISBN: 978-987-1063-94-9. Buenos Aires.
- Zizzias J., Stoll R., Marchesi J., Fasulo A., Venier F. (2012) Evaluación mediante simulación de modificaciones propuestas en un destilador solar asistido por un tanque colector acumulador integrado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Rosario. Vol.16, pp. 03.63-03.70