

UN ESTUDIO SOBRE EL POTENCIAL EMPLEO DE LA ENERGÍA SOLAR COMO FUENTE DE CALOR COMPLEMENTARIA EN AGROINDUSTRIAS

Enrique D. Albizzati, Alicia H. Arese

Instituto de Estudios de la Energía (INIDE)
Facultad de Ingeniería Química - U.N. del Litoral
Santiago del Estero 2829 (3000) SANTA FE

RESUMEN

Los establecimientos agroindustriales son un campo potencial para el aprovechamiento de la energía solar y pueden caracterizarse por su demanda térmica total y el nivel de temperatura de la misma, con el objeto de analizar las posibilidades técnico-económicas del calentamiento de agua en circuitos abiertos.

En este estudio se proponen tres modelos de demanda, determinándose en cada caso el valor de las fracciones mensuales y de la fracción anual de energía térmica aportada con energía solar. Asimismo se realiza su evaluación económica, calculando la diferencia entre el valor presente del costo del combustible a sustituir y el costo de inversión inicial más el valor presente de los costos de mantenimiento; se computa el valor del área óptima de colección, definida como aquella que maximiza el ahorro en la vida útil, y se comparan los resultados obtenidos en los modelos de demanda mediante parámetros derivados de la performance térmica y económica de las instalaciones.

1. INTRODUCCION

El consumo de energía por fuentes en la República Argentina muestra en los últimos años que el porcentaje de participación de los derivados de petróleo decrece, mientras que el gas natural y la hidroelectricidad crecen en forma sostenida. Una tendencia similar se observa en el sector industrial donde actualmente se promueve la sustitución de los combustibles líquidos por gas, en concordancia con las elevadas reservas comprobadas.

En lo que respecta a los usos finales el 53% de los recursos energéticos se consumen en el sector industrial como energía térmica (1). Las industrias alimenticia y química son las que pose

en mayor demanda, pero en particular en la industrialización de los productos del agro se presenta un gran consumo de calor indirecto a menos de 300°C, que representa el 22% del consumo total de calor indirecto y calor directo a temperaturas mayores de 300°C. (Figura 1.)

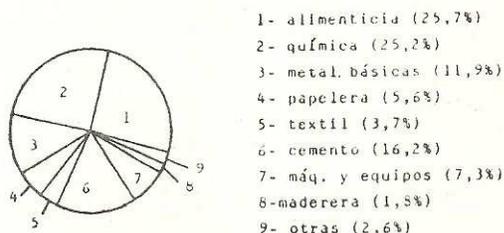


Fig. 1. Consumo de energía térmica en la industria argentina.

Paralelamente un número elevado de procesos y servicios en este tipo de industria requieren bajos niveles térmicos. (Cuadro 1.) Aunque no se cuenta con datos correspondientes a nuestro país, tomando como referencia el relevamiento realizado en la industria alimenticia australiana (2), donde el 70% de la demanda de energía térmica se halla por debajo de los 100°C, puede decirse que en este campo se presentan las mayores posibilidades para aplicación de la energía solar. A esto se suma el hecho de que las tecnologías disponibles para su aprovechamiento han alcanzado un apropiado desarrollo en dicho rango de temperatura.

En la Provincia de Santa Fe existe una importante gama de plantas agroindustriales (frigoríficas, lácteas, cerveceras, aceiteras, dulces y golosinas, etc.) y la energía solar constituye un recurso apreciable en la región.

UN ESTUDIO SOBRE EL POTENCIAL EMPLEO DE LA ENERGÍA SOLAR COMO FUENTE DE CALOR COMPLEMENTARIA EN AGROINDUSTRIAS

Enrique D. Albizzati, Alicia H. Arese

Instituto de Estudios de la Energía (INIDE)
Facultad de Ingeniería Química - U.N. del Litoral
Santiago del Estero 2829 (3000) SANTA FE

RESUMEN

Los establecimientos agroindustriales son un campo potencial para el aprovechamiento de la energía solar y pueden caracterizarse por su demanda térmica total y el nivel de temperatura de la misma, con el objeto de analizar las posibilidades técnico-económicas del calentamiento de agua en circuitos abiertos.

En este estudio se proponen tres modelos de demanda, determinándose en cada caso el valor de las fracciones mensuales y de la fracción anual de energía térmica aportada con energía solar. Asimismo se realiza su evaluación económica, calculando la diferencia entre el valor presente del costo del combustible a sustituir y el costo de inversión inicial más el valor presente de los costos de mantenimiento; se computa el valor del área óptima de colección, definida como aquella que maximiza el ahorro en la vida útil, y se comparan los resultados obtenidos en los modelos de demanda mediante parámetros derivados de la performance térmica y económica de las instalaciones.

1. INTRODUCCION

El consumo de energía por fuentes en la República Argentina muestra en los últimos años que el porcentaje de participación de los derivados de petróleo decrece, mientras que el gas natural y la hidroelectricidad crecen en forma sostenida. Una tendencia similar se observa en el sector industrial donde actualmente se promueve la sustitución de los combustibles líquidos por gas, en concordancia con las elevadas reservas comprobadas.

En lo que respecta a los usos finales el 53% de los recursos energéticos se consumen en el sector industrial como energía térmica (1). Las industrias alimenticia y química son las que pose

en mayor demanda, pero en particular en la industrialización de los productos del agro se presenta un gran consumo de calor indirecto a menos de 300°C, que representa el 22% del consumo total de calor indirecto y calor directo a temperaturas mayores de 300°C. (Figura 1.)

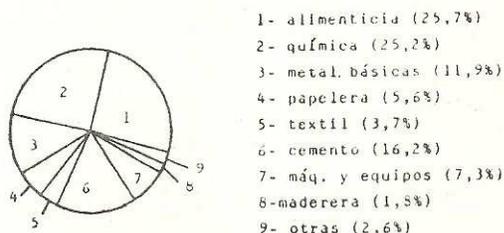


Fig. 1. Consumo de energía térmica en la industria argentina.

Paralelamente un número elevado de procesos y servicios en este tipo de industria requieren bajos niveles térmicos. (Cuadro 1.) Aunque no se cuenta con datos correspondientes a nuestro país, tomando como referencia el relevamiento realizado en la industria alimenticia australiana (2), donde el 70% de la demanda de energía térmica se halla por debajo de los 100°C, puede decirse que en este campo se presentan las mayores posibilidades para aplicación de la energía solar. A esto se suma el hecho de que las tecnologías disponibles para su aprovechamiento han alcanzado un apropiado desarrollo en dicho rango de temperatura.

En la Provincia de Santa Fe existe una importante gama de plantas agroindustriales (frigoríficas, lácteas, cerveceras, aceiteras, dulces y golosinas, etc.) y la energía solar constituye un recurso apreciable en la región.

Proceso o servicio	Temperatura (°C)
Lavado y limpieza	40 - 70
Pre calentamiento	30 - 90
Pasteurización y esterilización	60 - 120
Concentración y evaporación	40 - 120
Cocción	90 - 170
Secado	70 - 220
Refrigeración por absorción	120 - 180

Cuad. 1. Requerimientos de energía térmica en la industria alimenticia.

Debe considerarse sin embargo que los planes oficiales tienden a restringir la eventual utilización de las fuentes de energía no convencionales debido a la instalación de redes de gas natural y a la promoción económica de su consumo. Entonces, si los planes se cumplen, el uso de la energía solar se limitaría a establecimientos de pequeño y mediano tamaño ubicados lejos de las redes de provisión de gas, incluyendo entre los mismos a los de producción primaria que suministran las materias primas a la industria. Por ello, con el fin de analizar el potencial empleo de la energía solar como fuente de calor complementaria, se proponen tres modelos de consumo de energía para el calentamiento de agua en circuitos abiertos (Figura 2.) aplicables en el campo antes descrito, caracterizándolos mediante la demanda térmica total y el nivel de temperatura de la misma. (Cuadro 2.)

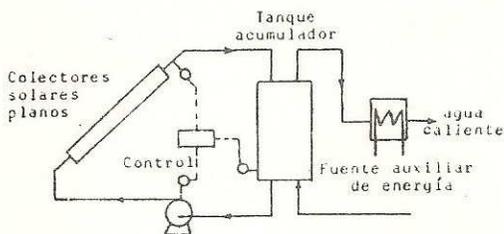


Fig. 2. Esquema de la instalación solar para calentamiento de agua.

MODELO	Energía térmica (GJ/año)	Demanda de agua caliente (kg/día)	Temperatura (°C)
A	618,945	15000	45
B	962,803	15000	60
C	947,521	10000	80

Cuad. 2. Modelos de demanda de energía térmica.

2. DISEÑO DE LAS INSTALACIONES SOLARES

El sistema solar para calentamiento de agua se localiza en todos los casos en la Ciudad de Rafaela (31°17'S, 61°03'0) determinándose en principio el valor de las fracciones mensuales y luego la fracción anual de la demanda aportada con energía solar, contemplando el recurso solar disponible, la inclinación y la orientación de los colectores solares planos adoptados.

La técnica de cálculo empleada es una versión mejorada del método \bar{H} , f-chart (3) que no impone restricciones a los valores de temperatura de agua caliente demandada, temperatura de agua fría de reposición y coeficiente de pérdidas de calor del tanque acumulador. Este método puede aplicarse tanto en circuitos abiertos como en circuitos cerrados, y se lo ha verificado con el programa de simulación TRNSYS (4), siendo apto para las necesidades que surgen en el diseño de procesos industriales.

La radiación solar global diaria promedio mensual incidente sobre el plano inclinado del colector se estima (5, 6, 7) a partir del dato resultante de las mediciones efectuadas en el lugar, sobre el plano horizontal (8).

En la computación de la fracción de la demanda térmica mensual con que contribuye la energía solar se utiliza un procedimiento iterativo donde están involucradas, entre otras variables, la temperatura promedio en el tanque acumulador y la utilizabilidad máxima promedio diaria del colector (9, 10).

En el tratamiento de los modelos de demanda A y B los parámetros del colector plano (11) refieren a los colectores comerciales con simple vidrio; en cambio en el modelo C se adopta el colector con doble vidrio. Las restantes variables corresponden a los colectores solares planos y al tanque de acumulación. (Cuadro 3.)

Colectores solares	Tanque acumulador
$\beta = -31,25^\circ$	$\gamma = 150^\circ$
$\beta = 40^\circ$	$\rho = 0,20$
$\alpha_c = 63,5 \text{ kg/hm}^2$	$r = 2$
$T_{\text{in}}(\text{av.}) = -0,570 \text{ (s.v.)}$ $-0,535 \text{ (d.v.)}$	$U_a = 0,75 \text{ W/m}^2\text{C}$
$T_{\text{in}} = 6,95 \text{ W/m}^2\text{C (s.v.)}$ $-5,02 \text{ W/m}^2\text{C (d.v.)}$	$T_f = 18^\circ\text{C}$
	$V_a = 0,055 \text{ m}^3/\text{m}^2$
	$C_a = 260 \text{ kJ/m}^2\text{C}$

Cuad. 3. Variables de diseño de las instalaciones.

Los resultados obtenidos en el programa de computación desarrollado (figura 3.), se aproximan numéricamente mediante una subrutina de regresión lineal cuya forma general es:

$$F = 1 - a \exp(-bA_c) \quad (1)$$

siendo a y b constantes, válidas para un cierto rango del área de colección. (Cuadro 4.)

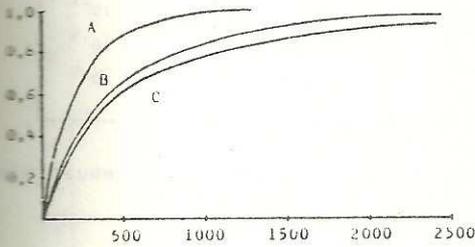


Fig. 3. Fracción de la demanda aportada con energía solar vs. área de colección.

MODELO	$a \times 10$	$b \times 10^{+3}$
A	$0 < A_c < 100$	10
	$100 < A_c < 500$	9,2549
	$A_c \geq 500$	9,6038
B	$0 < A_c < 200$	10
	$200 < A_c < 1000$	7,6160
	$A_c \geq 1000$	5,8449
C	$0 < A_c < 300$	10
	$300 < A_c < 2000$	6,9315
	$A_c \geq 2000$	4,7541

Cuad. 4. Constantes de la fórmula de aproximación F vs. A_c .

3. EVALUACION ECONOMICA DE LAS INSTALACIONES

Para la evaluación económica del sistema solar se compara el valor presente del costo del combustible a sustituir en la vida útil con el costo de inversión inicial más el valor presente de los costos de mantenimiento (12). Al efecto se incluyen las tasas reales anuales de crecimiento del precio del combustible y de retorno de la inversión; la primera de ellas se calcula deflacionando los precios nominales con el índice de precios mayoristas agropecuarios.

En la expresión del ahorro se considera el pago directo inicial de la inversión y un valor residual nulo de la instalación.

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad (2)$$

$$C_1 = F Q C_F (1+e) P_1$$

$$C_2 = (C_A A_c + C_E) P_2$$

donde:

$$P_1 = P_1(n, e, d)$$

$$P_2 = P_2(m, n, d)$$

El área óptima de colección, definida como aquella que maximiza el ahorro, se determina hallando el máximo absoluto de la función representada por la ecuación (2). Si se realiza la derivación parcial de la función aproximada mediante la ecuación (1) y se reemplaza en:

$$\frac{\partial \Delta C}{\partial A_c} = 0 \quad (3)$$

$$Q C_F (1+e) P_1 \frac{\partial F}{\partial A_c} = C_A P_2$$

se obtiene luego el área óptima:

$$A_{co} = \frac{1}{b} \ln \frac{C_A P_2}{a b Q C_F (1+e) P_1} \quad (4)$$

La ecuación anterior posibilita una computación rápida y sólo cuando el valor obtenido no se encuentra en el rango de validez de los parámetros a y b se recurre a una aproximación parabólica de la función ΔC vs. A_c para determinar el área óptima.

Si bien se pueden efectuar cálculos para diferentes situaciones resultan de interés industrial aquellas que parten

MODELO	Area óptima (m ²)	V.P. ahorro máximo (\$a/m ²)	% aportado a la demanda	V.P. ahorro / V.P. inversión	GJ aportados / V.P. inversión
A	277,6	35861,5	73,84	1,179	5,412 10 ⁻⁵
B	262,6	39606,3	51,04	1,302	5,718 10 ⁻⁵
C	307,8	29946,0	50,56	0,9153	4,757 10 ⁻⁵

Cuad. 6. Performance térmica y económica de las instalaciones para el área óptima de colección.

Tasa real (e)	Area óptima (m ²)	V.P. ahorro máximo (\$a/m ²)	% aportado a la demanda	V.P. ahorro / V.P. inversión	GJ aportados / V.P. inversión
0	0,82	-2,520 10 ⁵	0,47	-0,894	1,253 10 ⁻⁵
0,05	83,7	5876,5	37,96	0,183	8,730 10 ⁻⁵
0,10	153,5	18784,9	53,97	0,605	7,016 10 ⁻⁵
0,15	277,6	35861,5	73,84	1,179	5,412 10 ⁻⁵
0,20	408,0	64402,9	85,55	2,134	4,300 10 ⁻⁵
0,25	536,3	112206,9	91,88	3,733	3,527 10 ⁻⁵

Cuad. 7. Influencia de la tasa real de crecimiento del precio del combustible (Modelo A).

La referida relación ha sido propuesta como elemento de comparación económica entre instalaciones de distintos tamaños y demandas térmicas (13).

Con el objeto de analizar la incidencia de la tasa real de crecimiento del precio del combustible se toma a modo de ejemplo el modelo A, ya que a igualdad de inversión se obtiene mayor participación en la demanda. En estos casos (Figura 5.) se mantienen los valores de las variables antes usados, excepto e, y se estima la performance térmica-económica de las instalaciones (Cuadro 7.) Se nota que hay un cierto valor de la tasa de crecimiento del precio del combustible, comprendido entre 0 y 0,05, a partir del cual el valor presente de combustible a sustituir supera el valor presente del costo de inversión, y que sólo un crecimiento de dicha tasa superior a 0,10 permitiría cubrir una relativamente elevada fracción de la demanda térmica.

4. CONCLUSIONES

Las metodologías empleadas han permitido el diseño térmico y la evaluación económica de instalaciones solares para calentamiento de agua en circuitos abiertos, que se caracterizan por su aplicabilidad en el área agroindustrial.

Como resultado de los cálculos realizados ha sido posible utilizar una relación funcional entre la fracción aportada por la energía solar a la demanda y el área neta de colección, y con dicha expresión determinar el área óptima, la performance térmica y la performance económica de las instalaciones. Puesto que éstas se localizaron en el mismo lugar geográfico, se manifiesta la importancia del modelo de demanda propuesto, de la fracción cubierta con energía solar y del tipo de colector plano adoptado, en las relaciones entre el valor presente del ahorro y de la energía aportada, y el valor presente de

Se considerará la sustitución del combustible gas oil, cuyo costo efectivo es relativamente elevado. Por otra parte se especifican las variables económicas: tasa real de crecimiento del precio del combustible y de retorno de la inversión en base a su reciente evolución, y los costos de inversión fijo y variable y el costo efectivo del combustible son estimados para los primeros días del mes de agosto de 1984. (Cuadro 5.)

$n = 20$	$d = 0,05$
$e = 0,15$	$m = 0,015$
$C_E = 175000 \text{ Sa}$	$C_F = 677,4 \text{ Sa/GJ}$
$C_A = 25000 \text{ Sa/m}^2 \text{ (s.v.)}$	
$= 27000 \text{ Sa/m}^2 \text{ (d.v.)}$	

Cuad. 5. Variables para la evaluación económica de las instalaciones.

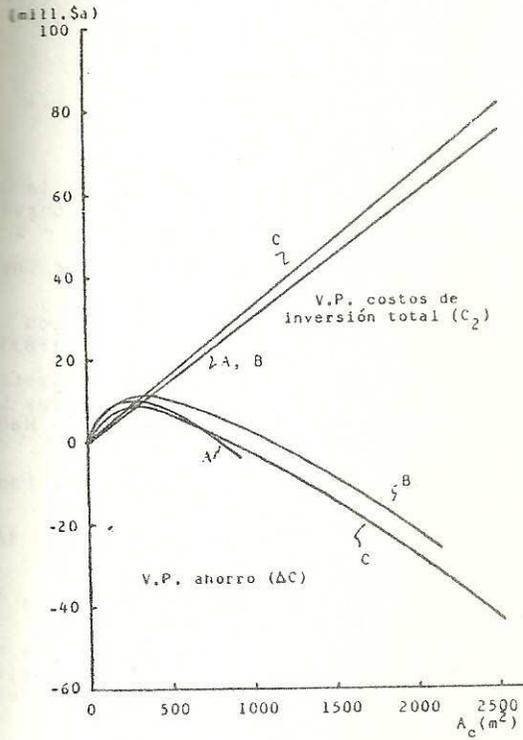


Fig. 4. Valor presente de los costos de inversión total y del ahorro.

Los valores computados para tal circunstancia (Figura 4.) posibilitan listar el área óptima de colección de cada modelo, el ahorro en la vida útil y el porcentaje anual aportado a la demanda térmica. También las relaciones entre el valor presente del ahorro y de la energía solar aportada, y el valor presente de la inversión, que representan la performance térmica y económica de las instalaciones.

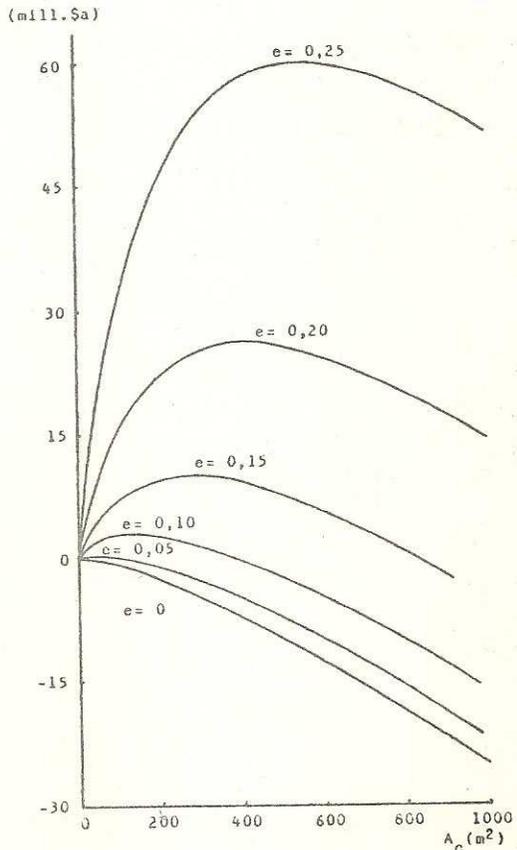


Fig. 5. Valor presente del ahorro (Modelo A).

Se observa que en el modelo A (Cuadro 6.) se presenta la participación más significativa de la energía solar en la demanda térmica, pero en relación con el valor presente de la inversión, la performance económica del modelo B es superior. El modelo C posee una performance inferior aún a la del modelo A y en el mismo la relación entre el valor presente del ahorro y el valor presente de la inversión es menor que uno.

la inversión.

Dicha fracción de la demanda podrá ser satisfecha en forma económicamente conveniente si se mantiene un crecimiento real significativo del precio del combustible a sustituir durante la vida útil de las instalaciones evaluadas.

5. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Sr. Daniel Delgado su colaboración en la realización de los programas computacionales usados en este trabajo.

6. NOMENCLATURA

- a, b : constantes de la fórmula de aproximación F vs. A_c .
- A_c : área neta de colección (m^2).
- A_{co} : área neta óptima de colección (m^2).
- C_a : capacidad de acumulación por unidad de área efectiva de colector ($kJ/m^2\text{OC}$).
- C_A : costo de inversión variable por unidad de área de colector ($\$/m^2$).
- C_E : costo de inversión fijo de la instalación ($\$$).
- C_F : costo efectivo del combustible ($\$/GJ$).
- ΔC : ahorro en la vida útil de la instalación ($\$$).
- C_1 : valor presente del costo del combustible a sustituir en la vida útil de la instalación ($\$$).
- C_2 : costo de inversión inicial más valor presente de los costos de mantenimiento ($\$$).
- d : tasa real anual de retorno de la inversión.
- e : tasa real anual de crecimiento del precio del combustible.
- F : fracción anual de la demanda térmica aportada con energía solar.
- F_{RU} : factor de remoción de calor por coeficiente de pérdida de calor del colector ($W/m^2\text{OC}$).
- $F_R(\bar{\epsilon}_a)$: factor de remoción de calor por producto transmitancia-absorbancia efectivo del colector.
- m : fracción de la inversión inicial destinada a mantenimiento de la instalación.

- \dot{m}_c : flujo másico de agua en el colector (kg/hm^2).
- n : años de vida útil de la instalación.
- P_1 : relación entre el valor presente del costo del combustible a sustituir y el costo del combustible en el primer año de operación.
- P_2 : relación entre el valor presente de la inversión total y la inversión inicial en la instalación.
- Q : demanda anual de energía térmica (GJ).
- r : relación longitud/diámetro del tanque acumulador.
- T_f : temperatura del agua fría de reposición.
- U_a : coeficiente de pérdida de calor del tanque acumulador ($W/m^2\text{OC}$).
- V_a : volumen de acumulación por unidad de área efectiva de colector (m^3/m^2).
- β : inclinación del colector ($^\circ$).
- γ : azimut ($^\circ$).
- θ : latitud ($^\circ$).
- ρ : reflectancia del suelo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- Secretaría de Planeamiento de la Nación - Opto de Producción y Servicios (1981).
- 2- Proctor D. y Morse R.N., Solar Energy, 19, 1, 63 (1977).
- 3- Braun J.E., Klein S.A. y Pearson K.A., Solar Energy, 31, 6, 597 (1983).
- 4- TRNSYS Program - A transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin - Madison (1976).
- 5- Liu B.Y.H. y Jordan R.C., Solar Energy, 7, 53 (1963).
- 6- Klein S.A., Solar Energy, 19, 325 (1977).
- 7- Collares - Pereira M. y Rabl A., Solar Energy, 22, 155 (1979).
- 8- Boletines de la Red Solarimétrica Nacional 1979 - 1983, Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales - (CNIIE).
- 9- Klein S.A., Solar Energy, 21, 393 (1978).
- 10- Theilacker J.C., Thesis M.S., Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of

Wisconsin - Madison (1980).

- 11-Rapallini A. et al, "Banco de pruebas de colectores solares: resultados obtenidos en el período 1979 - 1981", Actas de la 7ma. Reunión de Trabajo ASADES (1981).
- 12-Brandemuehl M.J. y Beckman W.A. , Solar Energy, 23, 1, 1 (1979).
- 13-Bakker - Arkema F.W. y Rippen A.L. "Solar energy applications in food processing", Dept of Energy - Michigan State University Cooperative Research Project (1980).