

Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas

Conceptual design of Pilot Scale Solar Dryer for Seaweeds

Liset Roche-Delgado, lisetr@uclv.cu, Juan Pedro Hernández-Touset, Agustín García-Rodríguez

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

Resumen

El secado de biomasa algal con el uso de la radiación solar, constituye una opción económica y ambientalmente compatible. El objetivo del trabajo consistió en diseñar un secador solar indirecto con circulación natural de aire para el secado de algas marinas. El equipo admite discretas cantidades de biomasa húmeda y está protegido de las situaciones ambientales que puedan dañar el producto; no necesita energía eléctrica para su funcionamiento y son bajos los costos de construcción y operación. Está compuesto por un colector de placas de cobre por las que circula el aire calentado con la radiación solar, un cristal que cubre las placas y bandejas de secado con una estructura de madera. El secador se diseñó para obtener 0,3 kg/día de biomasa seca. La metodología permite la construcción y operación de un secador solar flexible en diferentes condiciones de operación para investigaciones con algas marinas. En correspondencia con las condiciones ambientales y de operación, el diseño incluyó la estimación del tiempo de secado y el cálculo del área de secado, número de bandejas, flujo de aire que circula desde el colector hasta las bandejas, dimensionamiento del colector; área de transferencia de calor, temperatura que alcanza el aire y eficiencia del colector.

Palabras clave: *algas marinas, diseño secador solar.*

Abstract

Drying algal biomass with the use of solar radiation is an economical and environmentally compatible option. The aim of this work was to design an indirect solar dryer with natural air circulation for seaweeds drying. The equipment supports discrete quantities of wet biomass and is protected from environmental situations that may damage the product; it does not need electricity to operate and the construction and operating costs are low. This comprises a collector made of copper plates for air circulation, heated by solar radiation, a glass cover and drying trays with a wooden structure. The dryer was designed to obtain 0,3 kg / day of dry biomass. The methodology allows construction and operation of a flexible solar dryer in different operating conditions for research on seaweeds. Correspondingly with environmental and operating conditions the design included estimation of drying time, the determination of drying area, number of trays, air flow from the collector to the trays, collector sizing; heat transfer area, temperature reached by air and collector efficiency.

Keywords: *seaweed, design solar dryer.*

Introducción

Las energías de fuentes alternativas como la solar, que contrarresten el uso intensivo de la biomasa forestal o de combustibles fósiles, constituyen una innovación técnica muy importante para frenar el proceso de deforestación que amenaza la sostenibilidad y la biodiversidad en el planeta [1] y aunque la práctica del secado con energía solar es muy antigua, los primeros trabajos, fundamentalmente de carácter práctico, se reportan desde 1940. El desarrollo teórico y experimental del tema se observa a partir de 1960, donde, además, se aprecia el avance en el diseño de los secadores solares [2].

La preservación de productos alimentarios es esencial para mantenerlos por largo tiempo sin un deterioro posterior de la calidad del producto. Varias tecnologías de procesos han sido utilizadas a escala industrial para preservar estos productos. Entre estas, el secado se ajusta especialmente a países en desarrollo con pocas instalaciones de procesamiento térmico y a bajas temperaturas [3].

El uso de los sistemas térmicos solares para conservar vegetales y otras cosechas ha mostrado que es una opción práctica, económica y ambientalmente compatible. Los sistemas de calentamiento solar pueden mejorar la calidad del producto, a la vez que reduce desechos y combustibles tradicionales, mejorando la calidad de vida. La tecnología de secado solar ofrece una alternativa que puede procesar los vegetales en condiciones limpias, higiénicas y sanitarias con las normas nacionales e internacionales. Esta ahorra energía, tiempo, ocupa menor área, mejora la calidad del producto, hace más eficiente el proceso y protege al medio ambiente [4,5].

La etapa de secado de la biomasa algal es una de las que más influyen en el costo de operación de procesos de obtención de biomasa de algas si no se utiliza energía solar como medio de calentamiento del aire para el secado [6]. Los secadores pueden ser de continuos y discontinuos los, pero en este tipo de proceso a pequeña escala se recomienda utilizar secadores discontinuos. Dentro de estos se encuentran los secadores de bandeja, de estantes al vacío, por congelado y solares [7]. Estos últimos no necesitan de energía eléctrica para su funcionamiento, y los materiales para su construcción son de fácil acceso, como la madera o plástico para asegurar un aislamiento adecuado en la cámara de secado y los materiales de la superficie captadora de la energía de la radiación solar son el vidrio, cobre, etcétera, por lo que su costo de

construcción, operación y mantenimiento son mucho menores que los secadores anteriormente mencionados [2].

Existen distintos tipos de secaderos solares, los cuales se clasifican en secadores solares directos, indirectos y un híbrido de ambos, de acuerdo a la forma en que se transfiere el calor; y de acuerdo a la forma en que la energía solar es utilizada y la circulación del aire dentro del mismo se clasifican en sistemas de secadores con energía solar activa y pasiva, que son los secadores con circulación natural y forzada [6, [8].

En los secadores solares directos la energía solar que recibe el material es directa de los rayos de sol. En los indirectos la energía solar que recibe el material es de forma indirecta a través del aire, el cual recibe directamente la energía directa de los rayos de sol para aumentar su temperatura; estos presentan un colector, el cual se encarga de calentar el aire por medio de la energía de radiación solar.

En los secadores de energía solar activa el aire que interactúa con el material a secar presenta una circulación forzada en su interior, mientras que en los secadores de energía solar pasiva el aire circula de forma natural en su interior [9].

Para evitar que el material a secar, se deteriore, es conveniente utilizar secadores solares indirectos con circulación natural o con energía solar pasiva.

Lanchas [10] utiliza secadores solares directos tipo sauna, en los que se alcanza una temperatura de entre 35-50 °C, mientras que en los secadores indirectos se alcanzan temperaturas entre 30 y 80 °C [6].

Las plantas cuyas partes comestibles son las hojas son valorados debido a su contenido de minerales y sales [11], tal es el caso del alga marina *Ulva Lactuca*, conocida como lechuga de mar. El cambio más común que ocurre en los vegetales verdes durante el procesamiento térmico y almacenamiento es el cambio de color de verde brillante a carmelita [12,13]. Un pre tratamiento previo a la operación de secado puede ayudar a la retención de la clorofila. Varios métodos de pre tratamiento pueden ser usados, conjuntamente con el proceso de secado para mantener o mejorar la calidad de producto secado, siendo el blanqueo el más común [12-18].

Los principios del secado para productos agrícolas y marinos se aplican en general al secado mecánico convencional y aquí con respecto principalmente al

secado solar. Sin embargo, en general, se debe apuntar que los principios del secado convencional y los fenómenos son independientes del tipo de energía utilizada [19]. La velocidad de secado depende solamente de las propiedades del material a secar, la temperatura del aire de secado y el contenido de humedad. Sobre esto, hay muchas investigaciones en estudios experimentales y modelación matemática del proceso de secado solar de varios vegetales y frutas [20-26].

Como un ejemplo, se formula una ecuación empírica que predice el tiempo de secado, la cual es válida para secado solar en temperaturas desde 60-80 °C hasta 140 °C para secado convencional e híbrido [27].

El secado convectivo con aire caliente es el método más popular aplicado para reducir el contenido de humedad en frutas y vegetales [28]. El coeficiente de difusión del agua que refleja la total complejidad del transporte de agua se refiere como un coeficiente efectivo. Generalmente es difícil predecir los valores de los coeficientes de difusión teóricamente, por tanto, se pueden usar técnicas experimentales basadas en la cinética sorción/desorción, distribución del contenido de humedad o porosidad [29]. Para vegetales con contenido de humedad altamente significativo se asume que la difusión másica se determina por las condiciones externas de la transferencia de masa. La velocidad del movimiento de la humedad durante el secado se describe bien por el valor de la difusividad efectiva (Def) [30].

Actualmente es escasa la información sobre el secado de algas marinas en las condiciones ambientales del país, lo que conduce a diseñar y evaluar instalaciones piloto para el escalado de los resultados a estaciones de secado industriales.

El objetivo del trabajo consiste en diseñar un secador solar indirecto con circulación pasiva de aire para el secado de algas marinas. El equipo admite discretas cantidades de biomasa húmeda y está protegido de las situaciones ambientales que puedan dañar el producto, además no necesita energía eléctrica para su funcionamiento, con bajos costos de construcción y operación.

Materiales y métodos

De los tipos de secadores solares mencionados, se selecciona el secadero solar indirecto con circulación pasiva de aire, atendiendo a factores técnicos y económicos para el proceso de secado del alga en estudios a nivel piloto, ya que las cantidades de biomasa húmeda son pequeñas y además está protegido de las situaciones ambientales que puedan dañar el producto [31]. La figura 1 muestra los secadores indirectos para dos formas de circulación del aire.



Fig. 1 Secadores solares indirectos.

La biomasa algal a secar es la macroalga marina *Ulva Lactuca*, especie que crece en la bahía y litoral sur de la provincia de Cienfuegos, la cual presenta aproximadamente 98% de humedad [32], [33].

Sobre esta base se realizan los cálculos de los parámetros del secador y su diseño se basa en las metodologías de Treybal [7] y de Weiss [6].

1- Masa de sólido a secar (L_s).

La masa de sólido que se requiere obtener diariamente es 0,3 kg/día de sólido seco, por tanto:

$$L_s = 0,3 \frac{kg}{día} \text{ de sólido seco}$$

Para obtener esta cantidad de sólido seco diaria es necesario poner a secar como mínimo una cantidad de 26 kg/día de biomasa húmeda.

2- Tiempo total de secado (θ_T).

Para calcular el tiempo de secado se tienen en cuenta dos zonas: la zona de velocidad constante θ_I y la zona de velocidad decreciente θ_{II} .

La zona de velocidad constante se calcula por la siguiente ecuación

$$\theta_1 = \frac{Ls(x_1 - x_c)}{A Nc}$$

donde:

Ls - masa de sólido seco.

A - superficie que ocupa el sólido en la bandeja.

Ls/A - flujo superficial del sólido.

Nc - régimen de secado.

X1 - contenido de humedad inicial del sólido.

XC - contenido de humedad crítica.

$$\frac{Ls}{A} = \rho_{sol} * z$$

donde:

ρ_{sol} - densidad del sólido

Z altura del sólido en la bandeja

Para calcular el tiempo de secado en la zona de velocidad constante es necesario conocer primeramente el régimen de secado Nc por la siguiente ecuación:

$$Nc = ky(Ys - Y)$$

donde:

Ys - humedad de saturación del gas.

Y- humedad del aire a la entrada.

Estas humedades se obtienen en la carta psicométrica del sistema aire- vapor de agua ubicada en la figura 7.5 (a) [7].

Ky - coeficiente de transferencia de masa, que se calcula despejándolo de la siguiente ecuación.

$$\frac{hc}{ky} = Cs \rightarrow \text{Para el sistema aire - vapor de agua.}$$

donde:

h_c - coeficiente de transferencia de calor por convección asumiendo que el flujo de gas es paralelo a la superficie del sólido.

C_s - calor específico del gas

Estos parámetros se calculan por las siguientes ecuaciones.

$$h_c = 0,0572(G')^{0.8}$$

G' - flujo superficial del aire

$$G' = \rho_{\text{aire}} * \omega$$

ω - velocidad del aire que según [34], para la circulación natural de los gases debe ser de 2 – 4 m/s

ρ_{aire} - densidad del aire que está en función del volumen húmedo de este.

$$v_H = (0,00283 + 0,00456 Y')(t_G + 273)$$

t_G -temperatura del gas

$$C_s = 1005 + 1884 Y'$$

La zona de velocidad decreciente se calcula por la siguiente ecuación.

$$\theta_{II} = \frac{Ls(x_c - x^*)}{ANc} \ln \frac{(x_c - x^*)}{(x_2 - x^*)}$$

donde

$x^* = 0$ y x_2 - humedad del sólido a la salida.

3- El área de secado se calcula por la siguiente ecuación

$$A = \frac{Ls}{Ls/A}$$

4- Número de bandejas

El cálculo del número de bandejas se calcula por la siguiente ecuación y los resultados se muestran en la tabla 2.7.

$$\# \text{ de bandejas} = \frac{\text{Area de secado}}{\text{Area de una bandeja}}$$

El área de una bandeja se calcula según las dimensiones de la bandeja por la siguiente ecuación:

$$A = L \cdot a$$

donde:

L - largo de la bandeja.

a - ancho de la bandeja.

El área libre se calcula por la siguiente ecuación:

$$A_{\text{libre}} = lb(\# \text{de bandejas} - 1)e$$

Lb - Longitud de la bandeja.

e - Espacio libre entre bandejas para la circulación y flujo de aire.

El flujo de aire se calcula por la ecuación:

$$Q = v * A_{\text{libre}}$$

5- Dimensionamiento del colector de temperatura.

El diseño del secador está condicionado por diferentes factores como lo son: diferencia de temperatura, condiciones climatológicas (humedad del aire, nubosidad), el área de transferencia de calor y la velocidad del aire atmosférico, por lo que el diseño conceptual del colector de temperatura está condicionado por las siguientes consideraciones:

Área de transferencia de calor constante para todas las situaciones atmosféricas que pueden ocurrir.

La temperatura disminuye en la medida que la irradiación solar disminuye.

Velocidad del aire constante.

El diseño del secador para condiciones desfavorables requiere mayor nivel de análisis para obtener valores adecuados de eficiencia de secado.

El colector de temperatura se construye de materiales de fácil acceso como madera, vidrio y cobre. Este consiste en una especie de gaveta que en su interior presenta dos placas metálicas de cobre doblada de forma tal que da la impresión de un haz de tubos, Esta se pinta de color negro para formar una especie de cuerpo negro el cual absorbe una gran cantidad de energía que emite la irradiación solar. Este gavetero se cubre con una lámina de vidrio para cerrar la superficie y hacer pasar la energía solar. La abertura de este gavetero es por donde pasa el aire para aumentar su temperatura antes de entrar a la cámara de secado.

6- Área del colector

Para estos cálculos se utiliza la metodología utilizada por Weiss [6] y se considera el espacio entre placas como un haz de tubos, uno al lado del otro, de 1 pulgada de diámetro exterior y una longitud de 80 cm. Los datos de los tubos y las dimensiones de la placa se obtienen de la tabla 10 de la página 94 [35].

El número de tubos se obtiene por la siguiente ecuación:

$$\# \text{ de tubos} = \frac{L_c}{DI}$$

L_c - Longitud de la abertura del colector.

DI - Diámetro interior del tubo.

7- Flujo de aire en el colector.

El flujo de aire se calcula por la siguiente ecuación.

$$F = v \cdot A_{st}$$

F - Flujo de aire en el colector.

v - Velocidad del aire en el colector 3m/s [34]

A_{st} - Área de la sección transversal del colector.

El área de la sección transversal del colector es la diferencia entre el área de la sección transversal del conducto del aire y el área que ocupa la sección transversal de las placas.

8- Eficiencia del colector de aire.

La eficiencia del colector de aire está dada por la expresión.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_{st} \cdot G}$$

A_c - Área del colector.

G - Irradiación solar global. Depende de la nubosidad y sus valores son reportados por Weiss (2014) [6].

Q_u - Ganancia en el colector y se calcula por la ecuación siguiente.

$$Q_u = m C_p (T_0 - T_1)$$

m - flujo másico de aire que pasa por el colector.

C_p - Calor específico del aire.

T_0 y T_1 - temperaturas en el exterior y el interior del colector respectivamente. Los valores de la temperatura en el interior del colector se estiman a partir de datos reportados por Weiss [6].

Resultados y discusión

El tiempo de secado del alga en el secador resultó ser de 5h para las condiciones de humedad ambiental. Los resultados del cálculo del tiempo de secado se muestran en la tabla 1. El área de secado para un total de 0,3 kg de biomasa por día de sólido seco resultó ser de 1,76 m². El cálculo del número de bandejas y las dimensiones del secador correspondiente a esa área se muestra en la tabla 2.

Tabla 1
Resultados del cálculo del tiempo de secado

Parámetros	Unidad	Resultado
Tiempo total (θ_T)	h	5
Tiempo a velocidad constante (θ_1)	h	3,37
Flujo superficial de sólido (Ls/A)	kg/m ²	0,17
Densidad del sólido (ρ_{sol})	kg/m ³	1,7
Espesor del sólido en la bandeja (Z)	m	0,1
Humedad del sólido a la entrada (x_1)	kg de agua/kg de sólido seco	0,89
Humedad crítica del sólido (X_C)	kg de agua/kg de sólido seco	0,10
Régimen de secado (N_C)	kg de vapor de agua/hm ²	0,20
Humedad del aire a la entrada (Y_s)	kg vap de agua/kg de aire seco	0,026
Humedad de saturación del aire (Y)	kg vap de agua/kg de aire seco	0,024
Coefficiente de transferencia de masa (K_y)	kg de aire/hm ²	102,64
Coefficiente de convección para superficie que se está secando (flujo de aire paralelo a la superficie del sólido) (h_c)	kJ/hm ² °C	107,79
Flujo superficial del gas (G')	kg aire/m ² h	12416,9
Densidad del aire (ρ_{aire})	kg/m ³	1,14
Volumen húmedo del aire (v_H)	m ³ /kg de aire seco	0,89
Temperatura del aire (t_G)	°C	30
Velocidad del aire (ω)	m/s	3
Calor específico del aire (C_s)	kJ/kg aire seco °C	1,05
Tiempo de secado para velocidad decreciente (θ_2)	h	1,58
Humedad del sólido en equilibrio (x^*)	Kg agua/Kg solido seco	0
Humedad del sólido a la salida (x_2)	Kg agua/Kg solido seco	0,04

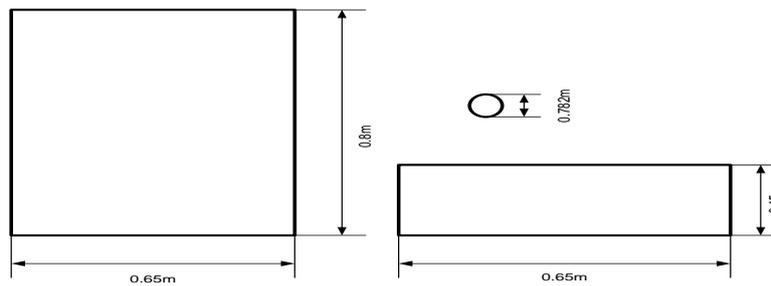
Tabla 2
Resultados del cálculo del número de bandejas

Parámetros	Unidad	Resultado
Número de bandejas		4,52 \approx 5
Área de una bandeja (A_b)	m ²	0,39
Largo (L)	m	0,6
Ancho (A)	m	0,65

Se determina un área libre para el flujo de aire (A_{libre}) de $0,11\text{m}^2$ con un espacio entre bandejas (e) de $0,05\text{m}$ para lograr un flujo de aire en el secadero de $0,34\text{ m}^3/\text{s}$.

Las dimensiones que se fijan en el colector de temperatura, sobre las cuales se determinan los parámetros de transferencia de calor y la temperatura que pudiera alcanzar el aire en el secadero se muestran en la figura 2, mostrándose allí el ancho, el largo y la altura de la cobertura del colector conjuntamente con las dimensiones de los conductos por los que pasaría el aire para aumentar su temperatura en el colector. Los cálculos del área del colector se muestran en la tabla 3.

Las dimensiones del colector y secador se muestran en las Figuras 2 y 3, respectivamente.



**Fig. 2 Dimensiones del colector de temperatura
Vista frontal y superior.**

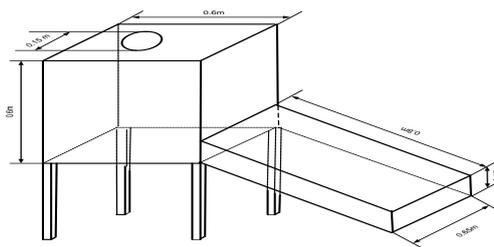


Fig. 3 Dimensiones del secador solar.

Los resultados del dimensionamiento del colector, incluyendo el flujo de aire con un valor de $0,28\text{ m}^3/\text{s}$, se muestran en la tabla 4.

Tabla 3
Datos de los tubos y dimensiones de las placas para el colector

Parámetros	Unidad	Resultado
Diámetro exterior del tubo	m	0,025
BWG		12
Número de tubos		33
Área de flujo de la placa	m ²	0,015
Espesor	m	0,0027
DI del tubo	m	0,019
Longitud del tubo	m	0,8
Área de transferencia de calor (de las placas) externa	m ²	2,089
Área de transferencia de calor (de las placas) interna	m ²	1,63
Superficie o área de transferencia de calor (de un tubo) externa	m ²	0,063
Área de transferencia de calor (de un tubo) interna	m ²	0,049
Área de transferencia de calor (de las placas) total	m ²	3,72

Tabla 4
Dimensionamiento del colector

Parámetros	Unidad	Resultado
Sección transversal		
largo	m	0,65
ancho	m	0,15
Área (total)	m ²	0,0975
Área interna	m ²	0,0003
Diámetro externo	m	0,022
Área externa	m ²	0,0004
Área ocupada por un tubo	m ²	0,0000924
Área ocupada por las placas	m ²	0,003
Área de la sección transversal	m ²	0,094
Flujo del aire en el colector		
Velocidad	m/s	3
Flujo volumétrico	m ³ /s	0,28

El flujo másico es de 0,36kg/s, obtenido al multiplicar el flujo volumétrico por la densidad del aire (1,29kg/m³) [34].

Para el cálculo de la eficiencia de transferencia de calor en el colector se toman valores de irradiación solar correspondientes a las condiciones climatológicas que ocurren en el país. El rango de estas a su vez corresponde a las temperaturas extremas que puedan existir en las estaciones del año. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Eficiencia del colector

Parámetros	Unidad	Resultados					
Nubosidad		Cielo despejado		Cielo con algunas nubes		Cielo nublado	
Rangos de irradiación solar global (G)	W/m ²	600-1000		200-400		50-150	
Irradiación solar global (G)	kW/m ²	1	0,6	0,4	0,2	0,15	0,05
Ganancia del colector (Qu)	kW	2,72	1,53	0,92	0,35	0,17	0,043
Flujo másico de aire (m)	kg/s	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Calor específico del aire (Cp)	kJ/kg K	1,005 6	1,005 6	1,0056	1,005 6	1,005 6	1,005 6
Temperatura del exterior (T ₁)	°C	30	28	27	25	24	22
Temperatura del interior (T ₀)	°C	60	55	50	45	40	35
Área del colector (Ac)	m ²	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72
Eficiencia	%	0,73	0,68	0,61	0,47	0,31	0,23

El comportamiento de la eficiencia que se espera obtener en el secador se corresponde al cálculo de la misma y para visualizar mejor este comportamiento se muestra un gráfico de este parámetro con respecto a la irradiación solar. Como se puede observar en la Figura 4, la eficiencia aumenta con la irradiación solar por lo que los menores valores de eficiencia esperados son los que se alcanzan cuando el cielo está nublado y a temperaturas inferiores a los 22°C.

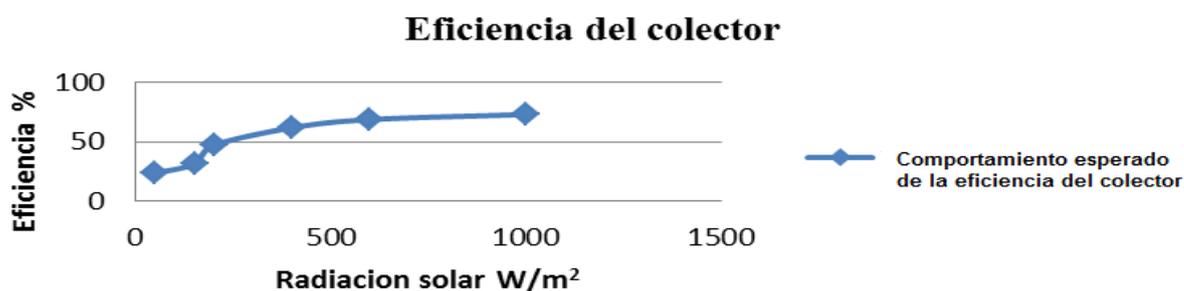


Fig. 4 Comportamiento esperado de la eficiencia en el colector.

Conclusiones

- 1. La metodología aplicada para el diseño, permite la construcción y operación de un secador flexible para diferentes condiciones de operación.**

2. **En correspondencia de las condiciones de operación para las cuales se realiza el diseño, las principales especificaciones técnicas del secador solar para el alga *Ulva Lactuca* son: 1,76 m² de área de secado, 5 bandejas y un colector solar con un área de transferencia de calor de 3,72 m².**
3. **La eficiencia de la transferencia de calor en el colector del secador varía según las condiciones ambientales y climatológicas desde 23 % hasta 73%.**

Bibliografía

1. BANOUT, J. *et al*, Uso de secadores solares para el procesamiento de cultivos en la Amazonía peruana. Suscripciones LEISA. Revista Agroecología. 2005, Vol. 21, No. 1.
2. <http://www.agriculturesnetwork.org/magazines/latin-america/energia-en-la-finca/uso-secadores-solares-para-el-procesamiento-de-cultivos-en-la-amazonia-peruana>
3. CORP, S.; LUGONES, B. Método gráfico para el diseño de secadores solares.2016.
4. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo01.htm>
5. MUJUMDAR, A.S. *et al*. Global R & D needs in Drying. *Drying Technology*.2007, Vol.25, N° 4, p. 647-648
6. ZHANG, M. *et al*. "Trends in Microwave Related Drying of Fruit and Vegetables". *Trends in Food Science & Technology*.2006, Vol.17, p. 524-534
7. FUNEBO, T.; OHLSSON, T. "Microwave-Assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom". *Journal of Food Engineering*.1998, Vol. 38, p. 353-367
8. WEISS, W.; BUCHINGER, J. Solar Drying Austrian Developmen Cooperation. 2016. <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien553.pdf>
9. TREYBAL, R. E. "Operaciones con transferencia de masa". Segunda Edición, Universidad de Rhode Island. McGraw-Hill, 1977, 218 -715
10. LIK, C. Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations. 2016. http://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/Solar\%20Drying_Fundamentals_Applications_and_Innovations.pdf