

## Tema 2 - Energía solar, aplicaciones agrícolas e industriales

### DISEÑO DE UNA PLANTA DE DESTILACIÓN SOLAR DE AGUA PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS ECONÓMICO SOCIALES EN VILLA MERCEDES, SAN LUIS, EVALUACIÓN DE COSTOS

**J. Carletto, L. Rodrigo, V. Rodrigo**

Laboratorio de Energías Alternativas – Universidad Nacional de San Luis -  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales  
Avda. 25 de Mayo 384 - 7530 Villa Mercedes - San Luis - Argentina  
Tel - Fax: 054 2657 434545 - e-mail: jcarlet@fices.unsl.edu.ar

**RESUMEN:** Se presenta en este trabajo el diseño de una planta de destilación solar de agua para la Facultad de ingeniería y Ciencias Económico Sociales en Villa Mercedes provincia de San Luis, que abastecerá de agua a los laboratorios de química general y analítica de dicha facultad, pertenecientes a la carrera de ingeniería química, utilizando destiladores del tipo de batea liviana. Se presenta el análisis de la necesidad, una descripción de los destiladores de tipo de batea liviana a utilizarse, y el análisis económico y de amortización para la construcción de dicha planta.

**Palabras Claves:** desalación, destilación solar.

#### INTRODUCCIÓN:

La Facultad de ingeniería y Ciencias Económico Sociales (FICES) perteneciente a la Universidad Nacional de San Luis, cuenta con varios laboratorios que utilizan grandes cantidades de agua destilada para sus prácticas ya sean de tipo académica, investigación o servicios. Esta, es comprada en el mercado, o a veces, producida en los propios laboratorios.

Para esta producción en laboratorio, se dispone para de equipos compactos operados con energía eléctrica y refrigeración con agua de la red. El costo de ésta por litro es del orden de 1 KWh y de 20 a 25 litros de agua potable, que normalmente es arrojada a la red cloacal. Este último costo, para regiones como la de San Luis, que posee escasos recursos de agua, es sumamente elevado e irracional. (Fasulo et. al 2004)

Por otra parte, estos equipos que operan con un vaporizador de dimensiones pequeñas que contienen en su base agua que se mantiene en ebullición, arrastran hacia la masa de vapor pequeñas cantidades de sales, obteniéndose un producto cuya conductancia eléctrica está alrededor de 4 microsiemens. (Fasulo et. al 2004)

En aquellos casos donde se necesite agua destilada de mejor calidad, se recurre a una segunda destilación en general utilizando material de vidrio, lo que aumenta el costo de producción.

La ventaja de los destiladores solares es que trabajan a bajas temperaturas, y al no llegar al punto de ebullición, no arrastran residuos en cantidades detectables. Gracias a esto, la conductancia del agua destilada solar es de 1 microsiemens y en algunos casos menor. (Fasulo et. al 2004).

Con estas consideraciones previas, construir una planta para una producción de unos 800 litros mensuales, necesarios para abastecer los laboratorios de química orgánica y analítica de nuestra facultad, no solo producirá un ahorro económico importante, sino que además producirá un ahorro de agua utilizada para la refrigeración de los destiladores convencionales realmente importante.

#### DESTILADORES SOLARES DE BATEA LIVIANA

Los destiladores solares de batea son utilizados desde el siglo XVII y prácticamente no han cambiado. Una batea, con superficie de color negro, contiene el agua salobre. Su parte superior está cubierta con un techo a dos aguas de un material de alta transmitancia a la radiación solar y alta conductividad térmica. El techo desagua en canaletas situadas a ambos lados de la bandeja, Los rayos solares atraviesan la cubierta y son absorbidos por el fondo ennegrecido de la batea, que contiene de 2 a 5 cm del agua cruda a destilar. A medida que se calienta el agua su presión de vapor sube, el vapor de agua condensa en la cara inferior del techo formándose una película uniforme de líquido que corre hacia las canaletas, que conducen el agua destilada a un tanque de almacenamiento. El destilador funciona como una trampa de calor, ya que el techo es transparente a la luz solar incidente, pero opaco a la radiación infrarroja emitida por el agua caliente. El techo impide que se escape el vapor y que el viento enfríe el agua salada. (Esteban et. al. 2000)

La calidad del agua destilada que producen los equipos que se describen a continuación, se puede demostrar experimentalmente, que es totalmente equivalente a los destiladores convencionales, la conductividad específica, parámetro que nos permite determinar la calidad, está comprendida entre 3 y 4  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . (Fasulo et al., 1987)

#### *Descripción del destilador a utilizar.*

Por razones de practicidad, economía y movilidad, se utilizará un modelo de destilador solar que se describe a continuación, el cual fue probado para el grupo de investigación sobre energías solar perteneciente a la facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales de nuestra universidad.

El dispositivo consta de dos partes separables, por un lado la batea propiamente dicha, y por otro la cubierta que contiene el condensador vidriado, los canales colectores de agua destilada y laterales de apoyo y cierre con la batea. Como se observa en la figura 1

La batea está constituida por una superficie rectangular plana de 2 metros de largo por 1 metro de ancho, construida de la siguiente manera:

- 1- Un rectángulo de las dimensiones indicadas de hierro ángulo de 1" y ½ por 3/16".
- 2- Una malla de Hierro de construcción con rectángulos de 100 mm x 100 mm y 3 mm de espesor soldada al marco 1.
- 3- Cuatro patas que permiten mantener elevada sobre el terreno, unos 50 a 60 cm, el rectángulo antes mencionado. Estas patas están constituidas por dos trozos de caño estructural de distintas secciones rectangulares, de manera tal que una de ellas encastre en el interior de la otra. El de mayor sección de 30 x 30 mm y 1.2 mm de espesor y de unos 50 cm de largo va soldado, sobre los laterales de 2 metros de longitud, del rectángulo de hierro ángulo y a unos 25 a 30 cm del vértice de cada esquina. En la parte inferior de este tubo se practica un agujero y se suelda una tuerca de manera tal que un tornillo pasante, girando en esta, permite apretar el caño estructural de menor sección que se aloja en el interior, permitiendo de esta forma regular la altura de la superficie de la batea. El caño de menor sección, unos 25 cm de largo de 25 x 25 mm e igual espesor, lleva soldada en su extremo inferior una planchuela de unos de 4" x 4" y 3/16" espesor. (cuya finalidad es aumentar la superficie de apoyo de la pata sobre el terreno).
- 4- Los laterales de la batea se construyen con chapa de hierro galvanizada del 18, (1.41 mm) de espesor. Se cortan dos tiras de 2 metros de largo por 16 cm en un extremo y 14 cm en el otro. Se les practica a cada una dos dobladuras de 90° sobre lateral mayor (el que se encuentra a escuadra con sus cortes laterales) y 4 cm del borde. Una segunda dobladura, en el mismo sentido que la anterior y a continuación de esta de 1 cm de ancho. Se constituyen así dos molduras en forma de L que serán ligadas mediante remaches a los laterales del marco de hierro ángulo, dejando las cavidades de las molduras hacia el interior del rectángulo. Cuidando que el filo inferior de chapa coincida con el borde inferior del marco de hierro ángulo, el borde superior de estas molduras presentarán un desnivel del 1%, cuando el plano de la batea sea instalada en posición horizontal. Dos tiras de 1 metro de largo y 16 cm de ancho uno y 14 la otra dobladas de la misma forma, y ligadas al marco de Hierro ángulo de igual manera, permitirán el cierre del contorno de la batea, este desnivel es necesario para permitir el desplazamiento, hacia uno de los extremos del dispositivo, del agua destilada colectada por los canales que se apoyarán sobre estas molduras.
- 5- Un refuerzo en hierro ángulo de 1 metro de largo, y de las mismas características que el empleado en el marco, será soldado por la parte inferior del marco justo en su centro y uniendo los laterales largos. La finalidad de este refuerzo, que tendrá un orificio de ½" en su punto medio, es permitir fijar un punto de apoyo que permitirá mantener ajustada al fondo de la batea, el dispositivo de entrada de agua al destilador (tubo de polipropileno con rosca y tuerca para salida de tanque de agua de ½"). Este refuerzo se extiende (perpendicularmente) unos 10 cm sobre los laterales, soldados al marco de hierro, evitando que las molduras de chapa se desplacen hacia el exterior.
- 6- Placas de poliestireno expandido de alta densidad (20 kg por metro cúbico) de 3 cm de espesor, son aplicadas sobre todo el fondo de la batea (1m por 2m) dos 13 cm de ancho x 1 metro de largo y 2 de 13 cm de ancho por dos metros de largo, son alojadas en el interior de las molduras de chapa que forma los laterales de la batea.
- 7- Dos láminas de cartón corrugado son aplicadas inmediatamente sobre las anteriores placas de poliestireno expandido. Las cuales tienen como finalidad de estas es proteger las placas de poliestireno expandido, ante eventuales recalentamientos de la superficie de la batea.
- 8- Una lámina de polietileno negro de 200 micrones de espesor es desplegado en el interior de la batea cubriendo los laterales de esta, llegando a los bordes superiores y desbordando hacia fuera de estos en varios centímetros. Constituye la superficie impermeable que contendrá el agua cruda. Previamente a su instalación se le practica un orificio circular de ½ pulgada por donde se pasará el tubo de polipropileno el cual se sellara a la lamina de polietileno y se ajustará por medio de la tuerca correspondiente que la apretará al fondo de la batea, sostenida por el travesaño de refuerzo descrito en 5. Este sector será la zona mas baja de toda la superficie horizontal de la batea.

La cubierta vidriada se construirá de la siguiente manera:

- 1- Marco de acero inoxidable austenítico 304 (Conocido en el comercio como opaco). Se cortan tiras de 10 cm de ancho por 2 m de largo y se construyen con estas perfiles que contendrán:
  - a- El canal colector de agua destilada.
  - b- El canal invertido, cuya función es alojar una placa de 10 cm de ancho por 2 m de largo y unos 4 a 6 mm de espesor. Esta placa, preferentemente de material aislante (Vidrio o Policarbonato-vidrio) Permitirá extender y separar a la vez la cubierta vidriada del fondo de la batea sobre la cual se asentará.
  - c- El soporte para la placa de vidrio que cierra el espacio superior.
  - d- El bota-agua. Este perfil requiere seis quiebres o dobladuras. El marco se construye practicando cortes en los extremos de cada perfil a 45° y uniéndolos, mediante soldadura por fusión del material, efectuada bajo atmósfera inerte (sin oxígeno para evitar la oxidación del metal)
- 2- Seis cortes de vidrio común de 4 mm de espesor y según las siguientes dimensiones.
  - a- Dos placas de vidrio de 1m por 1,24m.
  - b- Dos placas de 1m por 0,84m y
  - c- Dos placas triangulares (cierres laterales) de 1m por 0.84 por 1,24.
- 3- Cuatro cortes de vidrio de 6 mm de espesor: dos de 2 metros de largo por 8,5 cm en un extremo y 6,5 en el otro. Dos rectangulares de 1 m de largo por 8,5 cm de ancho uno y 6,5 cm el otro.
- 4- Dos pomos de pegamento incoloro flexible para vidrios de 750 cm<sup>3</sup>. que se emplearán para ligar los vidrios de la cubierta entre si y estos con el marco de acero inoxidable. También los vidrios al canal invertido del marco y entre ellos. El conjunto formado por los vidrios superiores el marco de acero y los vidrios inferiores deberán formar un cierre perfecto. Esto es necesario para asegurar el vapor de agua que se forma dentro del destilador no escape hacia el exterior. Este cierre se completa con el agua contenida en la batea.

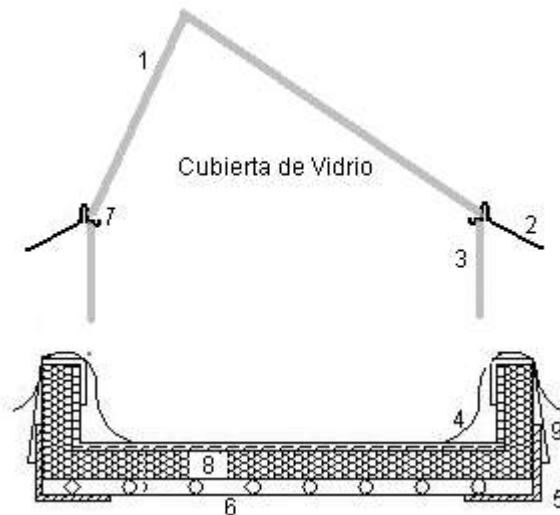


Figura 1: Corte del destilador solar de batea liviana: 1 cubierta de vidrio – 2 Perfiles de chapa acero inoxidable que sostiene la cubierta de vidrio. 3 – soportes de vidrio que apoyan sobre el fondo de la batea cerrando el receptáculo. 4 Polietileno negro. 5 Marco de hierro ángulo. 6 malla de acero de construcción. – 7 canales de agua destilada. 8 aislante térmico (Poliestireno expandido mas cartón corrugado) – 9 perfiles de chapa galvanizada que cierran la batea.

### DISEÑO DE LA PLANTA DE DESTILACIÓN

Para este tipo de destiladores, se calcula experimentalmente un rendimiento que oscila entre 0.88 litros/día.m<sup>2</sup> para los días de menor radiación y 3.94 litros/día.m<sup>2</sup> para los días de mayor radiación, dando como promedio 2.34 litros/día.m<sup>2</sup> (Fasulo et al., 1987)

Si bien esta experiencia realizada por Fasulo et al en 1987 fue en la ciudad de San Luís, los datos de radiación solar para ambas ciudades (San Luís y Villa Mercedes) distantes 100 km son similares, por lo que realizaremos nuestro cálculo sobre la base de este rendimiento experimental.

El laboratorio de química analítica junto con el laboratorio de química general, consumen para sus prácticas académicas, de investigación y servicios en el orden de 800 lts. máximos de agua destilada por mes. Realizando el siguiente cálculo simple

$$\frac{\text{lts}}{\text{día}} = \frac{800 \frac{\text{lts}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}}}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}}} \quad (1)$$

obtenemos un consumo promedio de 26.3 lts/día.

Si tenemos en cuenta los valores experimentales promedio de 2.34 litros/día.m<sup>2</sup> podemos calcular en forma muy sencilla la cantidad de metros cuadrado de destilador y consecuentemente la cantidad de destiladores de dos metros cuadrados.

$$\frac{26.3 \frac{\text{lts}}{\text{día}}}{2.34 \frac{\text{lts}}{\text{día.m}^2}} = 11.24 \text{m}^2 \quad (2)$$

Nos da como resultado 11.24 metros cuadrados de destilador solar con lo que se decide realizar una planta de 6 destiladores de 2 m<sup>2</sup> cada uno para un total de 12 m<sup>2</sup> de destilador.

### ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE DESTILACIÓN PROPUESTA.

#### Costo de construcción de cada destilador

Se detallan a continuación la lista de materiales necesarios para la construcción del destilador de batea liviana, con una superficie de batea de 2 mts<sup>2</sup>. La primer columna indica el material a utilizar, la segunda, el tamaño comercial correspondiente a los distintos materiales, luego el costo unitario, (valor promedio de distintos comercios minoristas). La siguiente columna, representa un factor multiplicador que representa la cantidad necesaria de cada elemento para la

construcción del destilador de 2 metros de largo por uno de ancho. Por último, el costo total por ítem. Los costos se calculan teniendo en cuenta un desperdicio mínimo, que se producirá al construir los 6 destiladores.

Material	Tamaño	Costo	Cant. Nec	Costo
Hierro ángulo 1 y 1/2 x 3/16	6 metros	\$ 78,75	1,16666667	\$ 91,88
Malla acero de construcción 100 x 100 mm (hierro 3 mm)	1,2 x 3 metros	\$ 28,99	0,66666667	\$ 19,33
Caño estructural 30 x 30 mm 1,2 mm de espesor.	6 m	\$ 39,25	0,33333333	\$ 13,08
Caño estructural 25x25x1,2	6m	\$ 33,56	0,16666667	\$ 5,59
Planchuela 4"x3/16"	6m	\$ 131,99	0,08333333	\$ 11,00
Chapa de hierro galvanizado 18	1x2	\$ 118,68	0,48	\$ 56,97
Chapa de Acero Inoxidable 304 (conocido en el mercado como acero opaco) 1 mm	1x2	\$ 397,91	0,3	\$ 119,37
Conexión Tanque ½"		\$ 6,11	1	\$ 6,11
Poliestireno expandido de alta densidad (TERGOPOL) 20 kg/m3 de 3 cm de espesor.	1x1	\$ 11,20	2,8	\$ 31,36
Cartón corrugado.	1,2*30	\$ 27,51	0,09333333	\$ 2,57
Polietileno Negro 200 micrones.	1x3	\$ 7,70	1,5	\$ 11,55
Vidrio de 4 mm		\$ 65,00	5,2016	\$ 338,10
Vidrio de 6 mm		\$ 85,00	0,32	\$ 27,20
Pomo de pegamento incoloro flexible para vidrio de 750 cm3 (tipo fastix o juntaflex)		\$ 11,90	2	\$ 23,80
Tornillos - remaches - electrodos - etc				\$ 55,00
Mano de obra y desperdicios				\$ 400,00
<b>Costo total para 2 mts<sup>2</sup></b>				<b>\$ 1212,91</b>

Tabla1.: Detalle de materiales para la construcción de destilador de batea liviana de 2 mts<sup>2</sup>.

Los costos de mano de obra, incluyen la construcción total del destilador, incluyendo molduras de chapa, soldado y armado de todas las estructuras metálicas, y armado de la cubierta de vidrio. Esta mano de obra, será realizada en talleres especializados que se dedican a tal fin, por lo que también incluyen cargas sociales, seguros e impuestos tanto de la empresa como del personal de la misma.

Un dato interesante es un análisis comparativo del costo de construcción por metro cuadrado en la actualidad (\$606.45) con el costo calculado en agosto del 2006 (un año de diferencia) (\$454.65) (Carletto, et. al. 2006) un aumento de casi un 34 % de los materiales se ve reflejado en el costo final de destilador solar.

#### Costo de instalación de la planta

Además de los destiladores, es necesario tener en cuenta los costos extras de instalación de la planta, como cañerías, tanques de depósitos, etc. Realizando un análisis simple, podemos ver que en los meses de mayor producción diciembre, enero y febrero, coinciden con los meses de menor consumo, debido al receso de actividades, generalmente comprendido entre finales de diciembre y principios de febrero.

Realizando una aproximación algo grosera aunque previsor, podemos decir que durante esos 90 días, los destiladores están produciendo a su máximo rendimiento (3.94 litros/día.m<sup>2</sup>), y podemos decir también, que durante el mes de enero no se consumirá agua destilada, y tal vez, en el mes de febrero se consuma solo el 60% con respecto al resto de los meses, del año. Es decir, que realizando cálculo obtenemos que:

$$3.94 \frac{\text{lbs}}{\text{día.m}^2} \times 60 \text{días} \times 12 \text{m}^2 - 800 \frac{\text{lbs}}{\text{mes}} \times 1 \text{meses} \times 60\% = 2356.8 \text{lbs} \quad (3)$$

Necesitaríamos un depósito capaz de almacenar estos 2356.8 lbs de agua. Obviamente el hecho de suponer que durante esos 60 días el rendimiento es máximo es bastante absurdo, por lo que suponemos que con dos depósitos de 1100 lbs. cada uno vamos a estar cubierto.

Por otro lado, podemos realizar el caso contrario, podemos suponer que durante los meses con menor radiación digamos mayo, junio, julio y agosto, el rendimiento es el mínimo 0.88 litros/día.m<sup>2</sup>. y el consumo es de 800 lbs. por mes. Vemos los cálculos

$$0.88 \frac{\text{lbs}}{\text{día.m}^2} \times 120 \text{días} \times 12 \text{m}^2 - 800 \frac{\text{lbs}}{\text{mes}} \times 4 \text{meses} = -1932.8 \text{lbs} \quad (4)$$

El signo negativo significa que voy a consumir mas cantidad de la que se está produciendo. Nuevamente vemos que con un deposito de 2200 lbs, que pueden haber quedados acumulados desde el verano estaríamos cubiertos.

La circulación de agua, se realizará por gravedad, por lo que no se tendrá en cuenta ningún tipo de bombeo, y solo se sumará al costo de los destiladores, los propios de la instalación, cañerías, depósitos, etc, según se detalla en la siguiente tabla.

Material	Tamaño	Costo	Cant. Nec	Costo
Tanque de agua	1100 lts	\$471.00	2	\$ 942.00
Caño polipropileno ½"	6 mts	\$ 14.70	6	\$ 11,55
Accesorios de conexión – codos – T – Cupla – llaves de paso, etc.			c/n	\$140.00
<b>Tanque de agua 500 lts</b>				<b>\$ 1093.55</b>

Tabla2.: Detalle de materiales y costos para la instalación de los 6 destiladores.

El costo total de la instalación será entonces de \$1093.55 mas el costo de los 6 destiladores de 2 m<sup>2</sup> c/u (\$4877.46) lo que da un costo total para la implementación de este diseño de **\$5971.01**.

#### Amortización de la instalación

Actualmente, el agua destilada, comprada a granel y tiene un valor de \$0.60 por litro entonces podemos sacar la siguiente relación:

$$\frac{\$5971.01}{0.60 \frac{\$}{lts}} = 9951.68lts \quad (5)$$

Lo que significa que cuando los destiladores produzca 9951.68 lts de agua destilada estará amortizado el valor de la planta, si calculamos el tiempo de consumo de estos litros, a razón de 800 lts por mes tenemos que:

$$\frac{9951.68lts}{800 \frac{lts}{mes}} = 12.44meses \quad (6)$$

Entonces en poco más de un año, estaría amortizada la inversión.

#### CONCLUSIONES

El análisis del presente trabajo muestra que la construcción de esta planta de destilación solar, ahorrará un valor aproximado de \$480 por mes considerando un valor comercial del litro de agua destilada a \$0.60. A eso le podemos sumar el impresionante ahorro de agua de enfriamiento que se consumen para producir el agua destilada. Podemos analizar también, que si bien el costo de instalación es un tanto elevado, en aproximadamente un año, se recuperaría la inversión, y a partir de ahí se obtendría una ganancia importante.

#### REFERENCIAS

- Fasulo, follari, Adaro, Marchesi, Odicino, Monasterollo (2004) Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 8, Nº 1, 2004. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Esteban C., Franco J. y Fasulo A. (2000) Destilador Solar Asistido Con Colector Solar Acumulador. Actas de Asades
- Fasulo A. , Cortinez V. Y Odicino L (1987) . Planta de destilación solar de agua para la Facultad de Química Bioquímica y Farmacia de la UNSL. Actas de ASADES
- Carletto, Rodrigo, Calderon, Fasulo (2006) Desalación solar de agua para la bomba neumática en paralelo, alimentada con energia solar – análisis de costo – ASADES 2006

**ABSTRACT:** this work shown the design of a solar water distillers sistme to the Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales in Villa Mercedes – San Luis city, that will provide water to the general and analytical chemistry laboratories, using light tray distillers. It'll be presents the analysis of the necessity, a brief distillers description and the economic analysis and amortization for the construction of this system.

**Keywords:** brackish water, solar distiller,