

## **UN DESTILADOR SOLAR CON APOORTE DE ENERGÍA Y FLUJO FORZADO DE AIRE CALIENTE<sup>1</sup>**

Amílcar Fasulo y Luís Odicino

Laboratorio de Energía Solar – Departamento de Física  
Universidad Nacional de San Luis  
Chacabuco y Pedernera 5700 San Luis  
afasulo@unsl.edu.ar; odicino@unsl.edu.ar

**RESUMEN:** La propuesta de un nuevo dispositivo destinado a perfeccionar los destiladores solares convencionales es analizada en esta presentación. Partimos de una revisión de los principales factores que intervienen en el proceso de evaporación, en los sistemas que operan por debajo del punto de ebullición, como ocurre con los destiladores solares, para concluir en donde podríamos actuar para mejorar el proceso. El resultado es la incorporación de aire caliente y seco a la cámara de destilación y el arrastre de este mediante un sistema de trompa de agua, haciendo recircular el producto en su tanque de acumulación. Se presenta el dispositivo construido y las primeras experiencias efectuadas.

**Palabras claves:** Evaporación, presión atmosférica, propiedades del aire, destilación solar.

### **INTRODUCCIÓN**

Extensas zonas de las provincias de San Luis, Mendoza y la Pampa se encuentran bajo la influencia del río salobre llamado Desaguadero. Este, marca el límite entre las dos primeras recibe el aporte de los ríos Bermejo, San Juan, Tuluyama, El Salado, Mendoza. Y Atuel. Periódicamente, coincidente con las épocas de deshielo cordillerano vuelca sus aguas, formando lagunas llamados humedales. Este río se sumerge en parte del sur de San Luis y luego de recibir otros aportes reaparece en la región de la Pampa, terminando en un conjunto de lagunas. Lagunas que tuvieron en el pasado actividad económica con asentamientos permanentes. Estos desaparecieron debido a los desarrollos energéticos y agrícolas de las poblaciones próximas a la cordillera que al reducir los caudales de sus tributarios acentuaron su salinidad y redujeron sus lagunas. Toda esta extensa región posee aguas subterráneas salobres. De manera que esta característica limita fuertemente su desarrollo. La región posee abundante radiación solar durante la mayor parte del año, de manera que un apropiado aprovechamiento de esta permitiría su desarrollo económico y poblacional. Para ello es necesario disponer de dispositivos desalinizadores eficientes, de bajo costo y fácil mantenimiento.

Los destiladores solares convencionales que son relativamente simples de construir, pueden producir en promedio por día y por metro cuadrado: desde ½ litro en el periodo invernal a 5 litros en el verano. Requieren superficies extensas y permanente mantenimiento por personal entrenado, lo cual los hace costosos con relación a otros procedimientos de desalinización.

En el laboratorio de Energía solar iniciamos la búsqueda de alternativas superadoras de los destiladores convencionales, que conforme las mayoría de las aplicaciones actuales encontramos que las principales innovaciones se han registrado en diseño y materiales, en los cuales se modifican las formas y disposición de la cubierta semitransparente que encierra una cámara de destilación sobre la batea (Cancino et al 2002; Howe, 1980).

En el periodo moderno encontramos que unas de las más exitosas construcciones se llevo a cabo en el norte de Chile, donde hacia 1872 se construyo una planta de desalación, basada en destiladores solares tipo batea. Construidos con madera, cubrieron una superficie de 4700 metros cuadrados para una producción de 20 metros cúbicos diarios, durante el verano. La planta se mantuvo en funcionamiento hasta 1910 (Frick and Hirschmann, 1973).

Una innovación fue introducida por María Telkes en el 60 del siglo pasado, la que reemplazo las bateas por telas porosas ennegrecidas, dispuestas en planos inclinados, de manera que el agua salobre se desliza por estas. Lo que buscó con este procedimiento es reducir los efectos de la inercia térmica de las bateas, posibilitando que el dispositivo entre en funcionamiento más temprano y resulte menos afectado por periodos de nublados intermitentes. Es de destacar que empleando este principio se construyo en la provincia de la Rioja (El Cebollar) una planta experimental de destilación solar en la década del 70 (Linares y Souto, 1977). Entre las más recientes podemos destacar los destiladores livianos y desmontables, que al separar la batea de la cubierta superior, permiten simplificar y reducir los costos de mantenimiento (Follari 1994).

---

<sup>1</sup> Trabajo parcialmente financiado por el FONCYT, PICT 2003 15077

Otro avance de importancia lo constituyen los destiladores de múltiples etapas. Estos reemplazan la cubierta vidriada, destinada a eliminar el calor para producir la condensación del vapor, por una o varias bandejas inclinadas consecutivas que permiten producir mas evaporación (Franco et al, 1988). La mayor dificultad de estos dispositivos yace en que la radiación solar no llega a la batea y se deben incorporar calentadores, requieren una bomba para mover el fluido, aunque existen propuestas para que trabajen en convección natural (Saravia et al 1998).

Iniciamos la búsqueda de de nuevas posibilidades para mejorar la destilación solar, partiendo de un análisis físico de cada una de las partes que intervienen en el proceso. De este resultado concluimos en la necesidad de incrementar apropiadamente el aporte de energía a la batea y acelerar el mecanismo de desaturación del medio contenido en la cámara de destilación. Como resultado surge la propuesta de calefaccionar la batea con colectores solares y hacer circular aire caliente y seco por la cámara de destilación rasante a la superficie del agua. Propuesta sobre la cual no conocemos antecedentes y que fundamentaremos en este trabajo.

## PROCESO DE EVAPORACIÓN

Todos sabemos que si tenemos agua pura a una temperatura de 100° C y la presión es de 1013 HPa., (presión atmosférica normal) se produce evaporación masiva (ebullición). Si la presión es menor, 930 HP (como ocurre en San Luís, 750 m sobre el nivel del mar) este evento ocurre a unos 93° C. Es decir que bajar la presión en el recinto en el que se produce vapor permite bajar el punto de ebullición. En consecuencia un procedimiento para mejorar la eficiencia de un destilador sería bajar la presión en la cámara de evaporación. Por este medio es posible ahorrar 230 kJ. por litro de agua producida (Armenta, 2004).

Ahora bien, si tenemos un líquido en estado de ebullición, este se mantendrá mientras continúe el aporte de energía al fluido, en cuanto se suspenda la ebullición cesará, es decir el fluido se enfriará. Como ocurre siempre en los cambios de estado, se requiere el intercambio de cierta cantidad de energía para que la evaporación se produzca. Aunque el calor de vaporización,  $C_v$ , varía con la temperatura:

$$C_v = 3,1615 \times 10^6 - (2,40741 \times 10^3) T \text{ (J/Kg.)} \quad (1)$$

Donde T es la temperatura en grados Kelvin, (Fernández and Chargoy, 1990). Un valor muy empleado (Howe, 1980) es de 2,5 MJ/kg. Para llevar ese kg. de agua de 0° C a 100° C solo se requieren 416 kJ., esto es aproximadamente 1/6 del calor de vaporización. Obsérvese que de acuerdo a la expresión de Fernández y Chargoy este valor aceptado corresponde a una temperatura de 0°C. y que a 50°C., temperatura a la que funcionan los destiladores solares, el valor del coeficiente de evaporación es aproximadamente un 5% menor, y a 93° C es aproximadamente un 9% menor. Esto explica, en parte, el incremento de eficiencia observada en los destiladores solares con el aumento de la temperatura del agua en la batea, mencionado por varios autores. Aunque en el proceso de evaporación intervienen numerosos factores, tales como la geometría de la cámara de evaporación (Irene de Paúl et al, 1997). Si bien estos efectos son importantes para un destilador solar que opera entre 40° a 60° C., son secundarios con relación a la temperatura del agua. En efecto, esto lo podemos verificar poniendo a prueba el potencial de condensación de las cubiertas de los destiladores solares, nuestra propia experiencia nos ha mostrado que con un mismo dispositivo que bajo radiación solar produce, en las mejores condiciones de radiación, unos 5 litros de destilado por día, se lo puede llevar a producir entre 50 y 60 litros por día con solo aportar la energía suficiente, para que la temperatura de la batea se eleve a unos 80° C. (Fasulo et al, 2007).

Desde el punto de vista del modelo molecular, simplificamos diciendo que, en el seno de un líquido a una dada temperatura las moléculas chocan entre sí, transfiriendo unas a otras energía y cantidad de movimiento. Si aumentamos la temperatura del líquido esta transferencia aumenta. Si el proceso lo observamos en el interior del líquido las cantidades que ceden y las que reciben en cada choque es la misma. Esto cambia para las moléculas que se encuentran en la superficie, ya que las que están cerca del límite de esta, pueden adquirir una energía cinética suficiente para pasar a la fase gaseosa. Las moléculas que quedan en la fase líquida pierden así, parte de su energía, no recibieron nada de la molécula que abandona el líquido y al quedar con menos energía cinética, la energía media del líquido es menor.

Desde el punto de vista de la estructura molecular de la materia, la evaporación puede ser explicada aceptando que las moléculas que se encuentran cerca de la superficie del líquido pueden adquirir energía cinética suficiente como para salir de el. Las moléculas que salen del líquido pasan al estado de vapor. Que solo algunas de las moléculas adquieran la energía suficiente para escapar de las fuerzas de ligadura del líquido, implica que no todas las moléculas poseen la misma energía. Cuando sumergimos un termómetro en un líquido este nos marca una temperatura (esta es una determinación de la energía del fluido, es un valor medio de los componentes microscópicos). Esa energía media es el resultado de valores de energía mayores y menores, distribuidos en torno del medido por el termómetro. Esta distribución se extiende, en población decreciente, hasta valores muy altos y muy bajos de energía respectivamente (distribución en forma de campana, con el máximo en el valor medio que mide el termómetro). Esto nos da la explicación sobre la evaporación a bajas temperaturas, esto es 40 a 50 ° C. como ocurre en los destiladores solares (esto es se evaporan las moléculas que se encuentran energéticamente ubicadas en la cola decreciente, del lateral de mayor energía de la distribución). Esta distribución energética de la población de moléculas en el seno del líquido nos indica que es más numerosa la cantidad de individuos que poseen la energía justa para desprenderse de las ligaduras del fluido que aquellas que la poseen en exceso.

Si la temperatura de las cubiertas superiores (vidrio en los destiladores solares) se encuentra a la misma o es inferior a la temperatura del agua en la batea, tendremos que la distribución de la población de moléculas en estado gaseoso será mas numerosa en las proximidades de la superficie del líquido, existirá un estado de saturación en la capa de aire justo por encima de la superficie del líquido, que decrecerá continuamente a medida que nos alejemos de esta. En estas condiciones son tantas las moléculas que salen como las que retornan al estado líquido. Esta es la situación cada vez que la producción de un destilador solar cae a valores ínfimos o es nula.

Por otra parte si la temperatura de la batea es superior a la cubierta, la convección natural llevará las moléculas hacia la cubierta y el proceso de destilación se pondrá en marcha. Este será mas intenso, cuanto mayor sea esta diferencia de temperaturas. Entre esta situación sin saturación y la previa, seguramente se dan todas las intermedias posibles. Es en estas condiciones intermedias en las que pretendemos evaluar experimentalmente la posibilidad de extraer mayor producción a un destilador solar.

La rapidez de la evaporación depende de la rapidez con que se repona energía al fluido, la presión y del movimiento del aire. Cuanto mayor es la velocidad del aire, más rápido se produce la evaporación. El modelo molecular puede explicar esta situación. Las moléculas que pasaron al estado gaseoso, son arrastradas por el aire en movimiento dejando condiciones alejadas de la saturación. Lo cual facilita y consecuentemente incrementa la evaporación.

La propuesta aquí presentada hace uso de todos estos conceptos al producir un arrastre del vapor (rasante a la superficie del agua en la batea) por medio de la trompa de agua, hace ingresar aire caliente y seco y simultáneamente reponer la energía perdida por la fase líquida debida a la evaporación por medio de la energía solar y eventual apoyo de energía convencional.

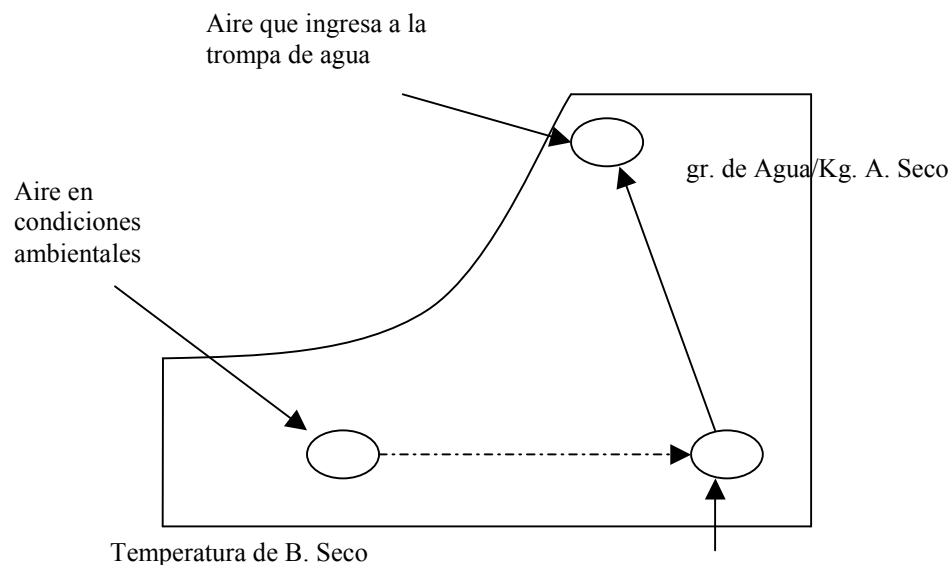


Figura 1 Diagrama psicrométrico de el aire en condiciones normales de presión.

En el esquema se representan las coordenadas usuales de una grafica psicrométrica, en este caso para el aire y en las condiciones de presión atmosféricas que existen en la ciudad de San Luis situada a 744 m sobre el nivel del mar dando una presión atmosférica media de 930 Hpa. El eje horizontal se grafican las temperaturas de bulbo seco, en el eje vertical de la derecha la cantidad de gramos de agua por kg. de aire seco y la línea curva representa el 100% de humedad relativa o curva de saturación, por simplicidad no se marcan las líneas de temperatura de bulbo húmedo ni las curvas correspondientes a distintos valores de humedad relativa. Como podemos ver en la figura (círculo de la izquierda) el aire ingresa en las condiciones ambientales existentes al calentador solar de aire. Este lo lleva a la salida a la condición indicada por la trayectoria horizontal dada por la flecha segmentada (círculo a la derecha). Cuando el aire ingresa a la cámara de destilación toma humedad, disminuyendo algo su temperatura, alcanzando un estado próximo a la saturación como se indica siguiendo la trayectoria de la flecha de trazo continuo (Círculo superior). Para que este proceso se lleve a cabo el aire que ingresa deberá permanecer en la cámara un tiempo que deberemos determinar y estará definido por el caudal de la succión que efectúe la trompa de vacío. Parámetro que dependerá de las condiciones climáticas y definirá el dimensionamiento del sistema.

## CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

Para llevar a cabo la propuesta empleamos un destilador solar con acumulador térmico, dos colectores solares de agua de dos metros cuadrados de superficie cada uno y un colector solar calentador de aire de dos metros cuadrados de superficie.

El destilador solar con acumulador está constituido por una batea de acero inoxidable eustenítico de 1 mm. de espesor, de 1m cuadrado de superficie (0,70m de ancho por 1,25 de largo) con una cubierta desmontable asimétrica. La batea, posee una perforación en su parte central (a unos 10 cm. de uno de los laterales menores) de 70 cm. de diámetro. Por el borde de este corte circular su suelda una placa de acero inoxidable de las mismas características, que se extiende 50 cm. hacia la parte inferior de la batea, para constituir el tanque de acumulación. Este tanque está protegido térmicamente del medio ambiente por capa de material aislante de 10 cm. de espesor (poli estireno expandido), una delgada cubierta metálica lo contiene y protege.

La cubierta desmontable se construye a partir de un marco de acero inoxidable eustenítico de 0.8 mm. de espesor, plegado adecuadamente para que contenga hacia su interior los canales colectores de agua destilada, seguido de una pestaña extendida hacia el parte exterior (un cm.) y superior (un cm.) que tiene la función de alojar las cubiertas de vidrio de la cúpula. Estos son ligados y sellados mediante resinas flexibles entre si y al marco. El marco posee a continuación de canal colector otro invertido que permite alojar placas de material aislante de unos 18 cm. de altura. La chapa del marco se continúa hacia el exterior, formando un pequeño ángulo con la horizontal, de forma que evite que ingrese a la batea el agua de lluvia.

Las placas de material aislante alojadas y selladas mediante resinas cumplen la función de separar la cubierta vidriada del fondo de la batea, sobre la cual se apoyará. El agua contenida en la batea hará de sello entre la cubierta desmontable y la batea. El destilador se instala con su lateral menor (de la batea) enfrentando el norte. En la parte superior de la placa de material aislante que separa la cúpula de la batea se practica una serie de perforaciones en la que se instalan ventanas adecuadas para conectar la salida del colector plano de aire con el interior de la cámara de evaporación. Por la parte posterior del marco desmontable un tubo de acero inoxidable permite extraer desde el canal colector el destilado que se almacena en un tanque. Un segundo tubo conecta la atmósfera de la cámara de destilación con una trompa de vacío.

La trompa de vacío funciona mediante la circulación en circuito cerrado de un tanque pequeño, liviano que contiene agua destilada y se instala sobre una balanza. Una bomba liviana está adosada mediante abrazaderas al tanque y tiene por función hacer circular en circuito cerrado el agua contenida en el tanque. La balanza nos permite controlar la cantidad de agua contenida en el tanque. En la Figura 2 podemos ver un esquema del dispositivo.

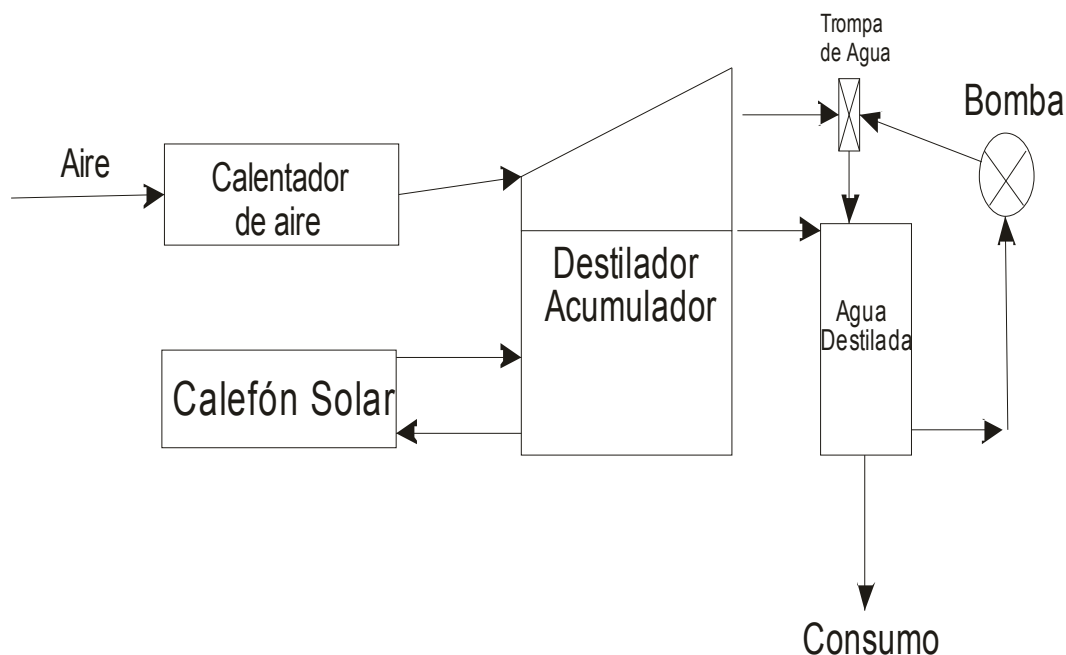


Figura 2 Esquema del dispositivo constituido por un destilador solar con acumulador, colectores solares que acoplados al acumulador del destilador constituyen un calefón solar. Un calentador de aire conectado con la cámara de destilación, Tanque de acumulación del producto, bomba de circulación en circuito cerrado aplicada al tanque de acumulación y trompa de agua en línea con el circuito cerrado con su entrada de succión conectada a la cámara de destilación.

## EXPERIENCIAS

Las experiencias las llevamos a cabo comparando la producción de dos destiladores solares que indicaremos con D1 y D4. Ambos de similares características en lo que respecta a forma y tamaño de sus bateas, forma tamaño y aislantes de sus acumuladores y cubiertas vidriadas desmontables.

El D4 posee además dos colectores solares de placa plana de dos metros cuadrados cada uno conectados para operar como un calefón solar con el acumulador del destilador y posee un calentador de aire de placa plana de dos metros cuadrados, con entrada libre y salida en su parte superior hacia la cámara de destilación. La salida hacia la cámara de destilación posee deflectores, tales que hacen que el flujo de fluido se dirija hacia la superficie del agua.

Por encima de estos deflectores se extiende una manta de tela absorbente que se instala de forma tal que parte de ésta permanezca sumergida en el agua de la batea y parte por encima, de manera tal que el flujo de aire caliente sea rasante a la superficie del agua y no se entienda hacia la parte superior de la cámara. Los tres colectores solares planos se dispusieron en aproximadamente un mismo plano inclinados 45° al norte y delante del destilador que se ubica elevado desde el piso 1.20 m.

Durante una semana se siguió la producción diaria de ambos dispositivos, con recolección de datos cada 24 horas, a continuación se instaló y puso a funcionar un segundo tanque acumulador en el D4 el cual, como se indicó en la sección anterior posee una bomba que hace circular el agua desde la base a la entrada superior, donde se encuentra la trompa de vacío.

En la tabla 1 podemos ver los caudales obtenidos durante el periodo previo y posterior a la instalación del succionador a la cámara de destilación. En quinta columna determinamos la relación de producción entre ambos destiladores.

En quinta columna determinamos la relación de producción entre ambos destiladores. Podemos ver de su lectura que la instalación del succionador no afectó esta relación, es decir que no afectó la cantidad de vapor de agua condensado en los vidrios del D4. En la sexta columna el agua destilada obtenida vía succión desde la cámara de destilación.

### Producción de: D1 y D4 en litros de agua destilada

Día	hora	D1	D4	D4/D1	D4+Abs
12/08	12:00	-----	-----	-----	-----
13	12:00	1,4	5,2	0,27	
14	12:00	1,4	5,7	0,24	
15	12:30	1,6	4,7	0,35	
16	Día nublado				
17	12:30	2,1	5,0	0,41	
18	12:00	0,7	1,3	0,52	
19	19:30	1,4	2,4	0,58	
20	Día completamente nublado				
21	09:00	1,7	5,8	0,30	
	21:00	1,2	3,4	0,34	
22	09:00	0,6	2,3	0,28	0,12
	21:00	1,2	3,5	0,34	0,1
23	09:00	0,5	2,3	0,20	0,09
	21:00	1,3	3,6	0,35	0,13
24	09:00	0,8	2,3	0,32	0,12
	20:00	0,9	2,4	0,39	0,14

Tabla 1 Datos de la producción de dos destiladores solares con acumulación similares, Uno simple el D1 y el otro D4 con dos colectores solares planos de 2 m<sup>2</sup> cada uno acoplados al acumulador y un colector de aire plano de 1m<sup>2</sup> acoplado a la cámara de destilación. Datos de la producción diaria de ambos cada 24 horas y cada 12 horas a partir del día 21/08/07. Se han resaltado los periodos diurnos.

Como podemos ver desde los resultados la propuesta funciona, aunque el aporte desde la succión es demasiado pequeño. Dos factores debemos tomar en cuenta para dar una explicación de este magro resultado y buscar en consecuencia una solución para mejorarlo: a) la succión de la trompa de vacío resultó con un caudal muy pequeño, si bien probamos la capacidad de vacío que permite elevar hasta 1,20 m una columna de agua, esto no implica un caudal apropiado, y la prueba de que este no fue suficiente lo pudimos observar en las gotas de condensación del vapor, formadas en el tubo que conecta la trompa de vacío con la cámara de destilación. b) la experiencia se efectúa durante el periodo invernal cuando el aporte de energía solar es bajo.

## CONCLUSIONES

La propuesta de obtener destilado mediante succión desde la atmósfera de la cámara de destilación por el procedimiento sencillo de usar una trompa de vacío que hace circular el agua destilada dentro del tanque de acumulación del producto es factible.

En las magnitudes de caudal operado no se observó que el efecto succión afectara la condensación del vapor sobre los vidrios del destilador y con esto la producción normal del dispositivo.

Se deberá repetir la experiencia en periodos de mayor radiación solar y empleando una trompa que provea un mayor caudal de succión o en su defecto un nuevo sistema de succión que permita marcar los límites de efecto sobre el funcionamiento normal del destilador.

## REFERENCIAS

- Fernandez J. L. y Chargoy N. 1990; Multistage, indirectly heated solar still; *Solar Energy*, 44, pp. 215 a 223.
- Linares J. J. y Souto J. A. 1977; Proyecto de una planta experimental de destilación de agua mediante la energía solar para pequeñas comunidades aisladas; *Actas de la 3ra Reunión de Trabajo de ASADES* pp. 175 a 189.
- Saravia L. R.; Franco J. y Esteban S. (1998). Destilador regenerativo de ciclo cerrado a presión atmosférica; *Energías Renovables y Medio Ambiente*; Vol.4, pp33 a 40.
- Follari J. 1994; Un destilador solar desmontable; *Actas de la 17ma Reunión de Trabajo de ASADES*; Vol. I, pp. 45 a 49.
- Franco J.; Perpiñal S. y Saravia L. (1988). Destilador multietapa pasivo; *13ra Actas de la Reunión de Trabajo de ASADES*; VI, pp81 a 86.
- Armenta-Deu, C. 2004; Purificación de agua bajo vacío; *Actas del VII Congreso Ibero Americano de Energía Solar*; Vol. 1, pp. 651 a 656.
- Irene de Paúl, Daniel Hoyos, Luís Saravia; 1997; Productividad de un destilador tipo batea en función de diferentes parámetros; *AVERMA*, Vol. 1 N° 1 1997, pp. 97 a 100.
- Fasulo A y Odicino L. 2007; Agua destilada para los laboratorios de la U.N.S.L. Presentación ante ASADES.

## ABSTRACT:

In this work we present a new device that optimizes conventional solar distillers. On the basis of a revision of the main factors involved in the evaporation process and of the systems that operate under boiling point –as is the case of solar distillers- we analyze the critical points at which the process can be improved. We propose the incorporation of hot dry air to the distillation chamber and the flow of this air by means of a system of water pump, recirculating the product in the storage tank. We present a model of the device and the results of the first set of experiments.

**Key words:** Evaporation, atmospheric pressure, properties of the air, solar still