

ANÁLISIS TÉRMICO DE UN DESTILADOR MULTIESTADIA

N. Salvo, C. Placco

nahuel@unsa.edu.ar, cplacco@gmail.com

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)
Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
Avenida Bolivia 5150 - C.P. 4400 – Salta – Tel. 54-387-4255424 – Fax 54-387-4255489

RESUMEN: En Argentina, existen extensas zonas que se encuentran en una situación delicada con respecto a la disponibilidad de agua potable. Por ejemplo, en la provincia de Salta y en particular en la zona de Puna o en lo que se denomina Chaco Salteño, el recurso "agua" no es recomendable para consumo humano debido a la presencia de arsénico y otras sales nocivas para la salud. En estas comunidades rurales los pobladores se ven obligados a desplazarse grandes distancias para obtener agua segura. Debido a que en estos lugares el recurso solar es importante resulta una alternativa válida obtener agua potable con equipos de desalinización solar.

En este trabajo se presenta el estudio de un sistema de destilación "multi-efecto" y se plantean las ecuaciones que intervienen en el modelo, como un primer paso para el diseño de un sistema que permita obtener agua potable y que pueda ser transferido a las poblaciones de las zonas mencionadas.

Palabras clave: destilación, transferencia de energía, energía solar

INTRODUCCIÓN

La escasez de agua potable es un problema actual en muchos lugares del planeta y en particular en muchas zonas de la Argentina en provincias como Salta, Jujuy, oeste del Chaco, entre otras. La falta de agua potable para consumo humano se debe a diversos factores, por ejemplo, desde el punto de vista económico en muchas poblaciones alejadas de las grandes ciudades es necesario invertir capital en ampliar e implementar redes de distribución agua. Por otro lado también hay zonas donde es posible obtener agua en proporciones importantes pero la misma no es apta para consumo humano porque por lo general se encuentra contaminada y es necesario realizar un tratamiento previo para que sea potable.

La necesidad mundial de contar con agua potable ha llevado a que en la actualidad existan muchas tecnologías para el tratamiento de agua (desalinización). La selección de la alternativa a implementar depende del volumen de agua necesario para consumo, la disponibilidad energética, el costo de la inversión inicial, etc. En general, el proceso de desalinización (purificación) de agua se resume en la figura 1

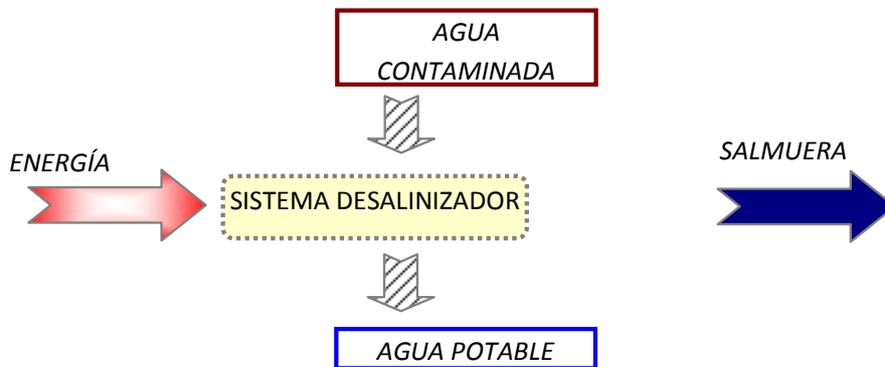


Figura 1: esquema de una planta para desalinización

El objetivo principal de un sistema de desalinización es lograr separar los minerales disueltos de aguas salobres y obtener como resultado agua destilada, la cual debe ser posteriormente tratada para que sea potable. El cuadro 1 resume, en términos generales, las diferentes tecnologías que existen en la actualidad para el tratamiento de agua contaminada; clasificándolas en función del principio de conversión de agua salada a dulce. Respecto a la clasificación mostrada, en el presente trabajo se estudia un proceso de cambio de fase con destilación múltiple efecto.

Proceso con cambio de fase (destilación)	Evaporación súbita por efecto flash (MSF)
	Destilación múltiple efecto (MED)
	Compresión de vapor
	Destilación Solar
	Congelación
Procesos con membranas	Ósmosis inversa
	Electrodialisis
Procesos químicos	Intercambio iónico
	Formación de hidratos

Cuadro 1: Diferentes procesos de purificación de aguas

EL PROCESO DE DESTILACIÓN MÚLTIPLE EFECTO (MED)

Un esquema de una planta de destilación por múltiple efecto puede apreciarse en la figura 2. Si bien, en este gráfico, se muestra la etapa inicial y dos etapas más, en una instalación real se suman hasta siete o más etapas de destilación (efectos). En este tipo de destilación, en el primer efecto (etapa inicial), se añade energía (punto [1]) al agua que ingresa al sistema (punto [2]) logrando que una porción del líquido que ingresa se evapore. El fluido que no se evapora pasa a la otra etapa impulsado por una bomba de circulación y el vapor pasa de una etapa a otra debido a la existencia de un sistema que reduce la presión en cada etapa. Por sencillez no se han graficado las bombas necesarias para hacer circular la salmuera y los sistemas reductores de presión. Como puede observarse en la figura 2 la transferencia de energía, en todas las etapas, se realiza por medio de intercambiadores de calor (Callen 1985; Incropera et al. 1999).

El vapor producido en la etapa inicial es atrapado por una tubería (punto [3]) y enviado hacia un intercambiador de calor en el segundo efecto. El agua que permaneció en fase líquida se la hace circular al otro contenedor el que se encuentra a una presión menor al anterior (puntos [4] [4']). Esta salmuera, que está a menor temperatura se la pone en contacto, a través de un intercambiador de calor, con el vapor que circula desde la etapa inicial (puntos [3] [5]).

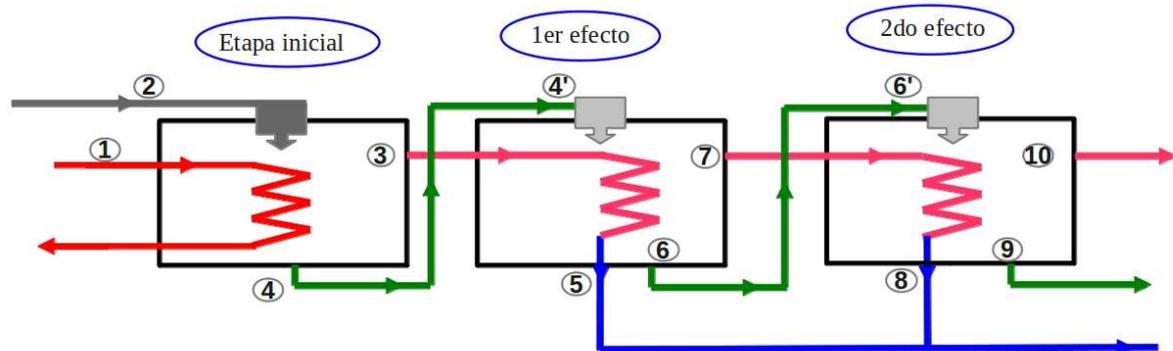


Figura 2: planta para desalinización por múltiple efecto (MED)

El vapor que circula a mayor temperatura y que se encuentra dentro de la tubería cede su calor latente (condensa) y hace que se evapore el líquido que ingresa por el punto [4'] produciéndose vapor. En esta etapa (primer efecto) sucede lo siguiente: el vapor generado en el intercambiador de calor se lo hace circular hacia la próxima etapa (punto [7] [8]); por otro lado el vapor generado en la etapa anterior y que ha condensado en el intercambiador se extrae por el punto [5] y es agua destilada.

En las próximas etapas se repite el proceso anterior y de acuerdo a la figura 2, para el segundo efecto, el vapor ingresa por el punto [7], se condensa y se obtiene nuevamente agua destilada en el punto [8]. El líquido que no se evaporó pasa a través de [6] [6'] al segundo efecto que se encuentra a una presión menor. Nuevamente el vapor generado se transfiere a una próxima etapa (punto [10]) y el líquido que no se evaporó se lo hace circular por el punto [9].

El aporte de energía necesaria para que se produzca vapor en la etapa inicial del circuito (punto [1]) puede ser obtenida por medio de un sistema de concentración solar.

Otro tema importante a tener en cuenta en el diseño de un sistema de estas características son los intercambiadores de calor dentro de cada etapa (evaporadores), los cuales pueden ser construidos con arreglos de tubos horizontales, verticales o tubos verticales superpuestos. Independientemente de la disposición adoptada, estos intercambiadores reciben el líquido en forma de "spray" en la entrada de la etapa, y en ellos suceden dos fenómenos: la evaporación del líquido que ingresa a cada etapa y

la condensación del vapor que circula por el interior de los tubos. Es claro que la superficie de transferencia de energía es un factor de suma importancia en este tipo de fenómenos, y que el estudio de los intercambiadores de estas instalaciones es clave, pero para simplificar los cálculos no se consideró este aspecto en los balances que se presentan a continuación previendo que los mismos se abordarán en trabajos futuros.

BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA UN SISTEMA DE DESTILACIÓN DE MÚLTIPLE EFECTO

A continuación se presentan los balances de masa y energía para la etapa inicial y otra etapa cualquiera del sistema. Salvo en la etapa inicial los balances son idénticos en los sucesivos efectos por lo tanto una etapa cualquiera se identifica con un sub-índice i .

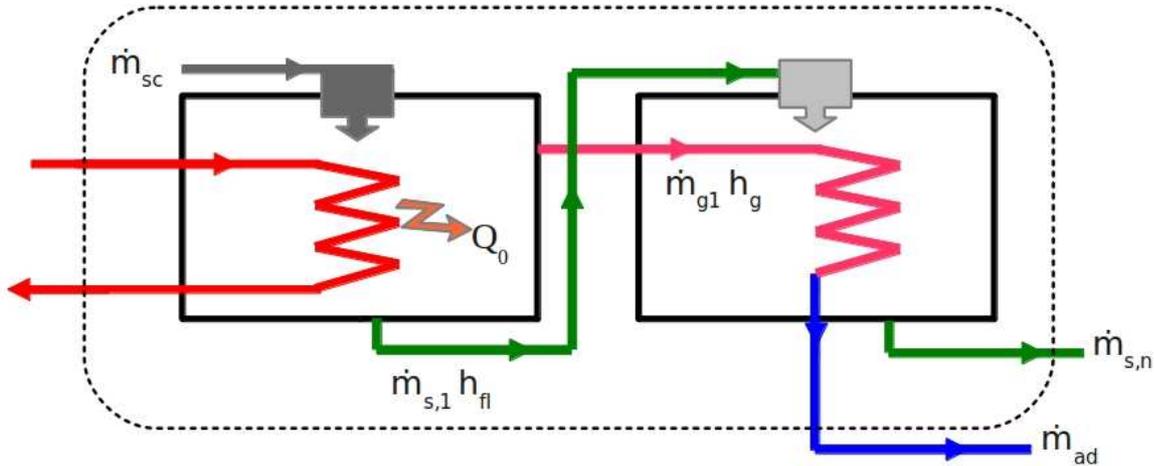


Figura 3: balance de masa para la planta por múltiple efecto (MED)

En las figuras 3 y 4, puede observarse que en la etapa inicial es en el único lugar donde se realiza un aporte de energía externo, las demás etapas utilizan la energía contenida en el vapor generado. Esta situación es muy importante a tener en cuenta porque en los balances también se ha supuesto que no hay pérdidas al medio ambiente en cada etapa. El vapor producido en la primera etapa es el que pasa a la etapa siguiente. Esto determina los valores considerados para la calidad del vapor, en la figura 4 puede observarse que a la salida de la etapa $x = 1$.

La calidad de vapor se define como:

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{líquido} + m_{vapor}} \quad (1)$$

Las ecuaciones del flujo másico en la etapa inicial son: (el punto sobre la variable denota derivada respecto al tiempo)

$$\dot{m}_{sc} = \dot{m}_{ad} + \dot{m}_{sn} \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{\dot{m}_{ad}}{m_a + \dot{m}_{ad}} \quad (3)$$

considerando la entalpía por unidad de masa se puede plantear el siguiente balance de energía:

$$Q_0 = \dot{m}_g h_g + \dot{m}_{sn} h_{fl} - \dot{m}_{sn} h_s \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores cada término significa lo siguiente:

- \dot{m}_{sc} = masa por unidad de tiempo de la salmuera (agua contaminada)
- \dot{m}_{ad} = masa por unidad de tiempo de agua destilada – por etapa
- $\dot{m}_{s,n}$ = masa por unidad de tiempo de salmuera – por etapa
- \dot{m}_a = masa por unidad de tiempo de agua pura (presente en la salmuera contaminada)
- \dot{m}_g = masa por unidad de tiempo de vapor saturado
- C_0 = concentración inicial
- Q_0 = energía entregada al sistema en el inicio del proceso
- h_g = entalpía de vapor saturado (calculado a la máxima temperatura en la primera etapa)
- h_s = entalpía con que ingresa al sistema la salmuera
- h_{fl} = entalpía del líquido saturado (salmuera)

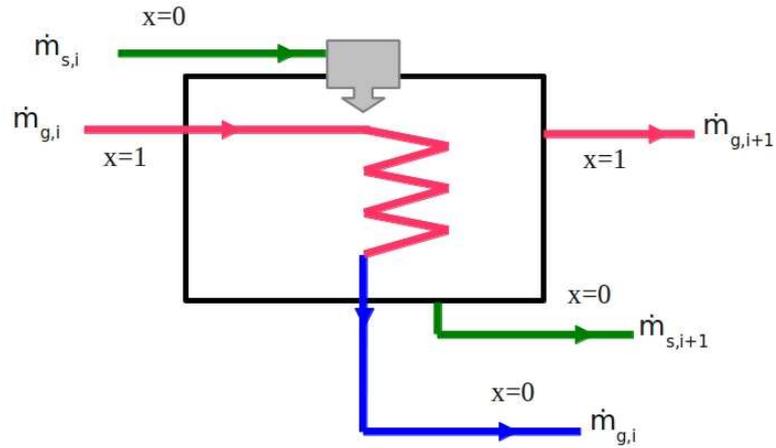


Figura 4: planta para desalinización por múltiple efecto (MED)

Ahora considerando la figura 4, que es una etapa cualquiera del sistema (identificada como i) se puede plantear el balance de masa por etapa (ecuación 5) y la concentración por etapa (ecuación 6).

$$\dot{m}_{s,i} = \dot{m}_{g,i+1} + \dot{m}_{s,i+1} \quad (5)$$

$$C_{s,i} = \frac{\dot{m}_{sc}}{\dot{m}_{s,i}} \quad (6)$$

La cantidad de agua destilada se obtiene a partir de sumar para todas las etapas (ecuación 7):

$$\dot{m}_{ad} = \sum \dot{m}_{g,i} \quad (7)$$

En la figura 5 se consideran los flujos de energía que intervienen en una determinada etapa del sistema, obteniendo como resultado la ecuación 8, nuevamente el subíndice i identifica la etapa en particular

$$\dot{m}_{s,i} h_{fl,i} + \dot{m}_{g,i} h_{g,i} - (\dot{m}_{g,i+1} h_{g,i+1} + \dot{m}_{g,i} h_{fl,i} + \dot{m}_{s,i+1} h_{fl,i+1}) = 0 \quad (8)$$

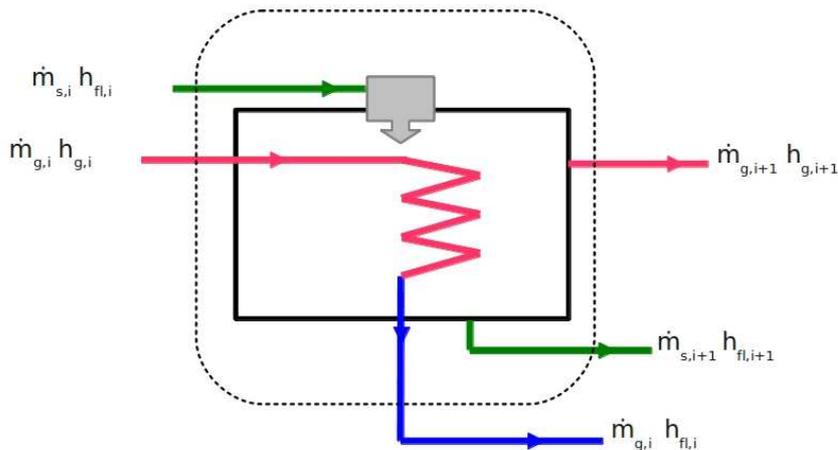


Figura 5: planta para desalinización por múltiple efecto (MED)

Como puede observarse en la figura 5, para una etapa i cualquiera, la masa por unidad de tiempo de gas (\dot{m}_{gi}) que ingresa es igual a la masa por unidad de tiempo de agua destilada producida en la etapa (\dot{m}_{adi}).

A partir de las ecuaciones planteadas anteriormente se puede resolver el sistema de ecuaciones para obtener una primera aproximación de la cantidad de agua destilada que produce un sistema de Destilación Múltiple Efecto (MED). Analizando los

distintos balances puede observarse que solo es necesario contar con valores de las diferentes presiones y temperaturas en cada una de las etapas. Con estos valores es posible obtener los datos de entalpía que multiplicados por el flujo másico resuelve el problema de transferencia de energía.

El cálculo realizado anteriormente se lo considera como una primera aproximación debido a que como se indicó precedentemente faltan plantear las geometrías de los intercambiadores donde se realiza la evaporación de líquido que ingresa al sistema. Además también habría que considerar correlaciones experimentales para agua salada, entalpía de la salmuera como líquido saturado, modelizar correctamente la condensación forzada dentro del intercambiador, los flujos de líquidos (enfriamiento) en las diferentes partes del sistema donde no existe cambio de fase, efectos de ebullición forzada, pérdidas de carga por efectos de la viscosidad tanto en cañerías y ajustes (codos, válvulas, etc.).

En particular la entalpía de la salmuera que ingresa al sistema (agua salada) puede ser determinada a partir de correlaciones experimentales. Una posibilidad es utilizar la ecuación que se muestra a continuación, la cual ha sido adaptada para que las unidades estén en el sistema internacional.

La entalpía de la salmuera inicial se obtiene integrando el calor específico desde una temperatura de referencia T^* (273,15 K) hasta la temperatura deseada, quedando (Wagner et al. 2008):

$$h_{sc} = 2,3258 \left[a_1 (Tb - T^*) + a_2 (Tb - T^*)^2 + a_3 (Tb - T^*)^3 + a_4 (Tb - T^*)^4 + a_5 (Tb - T^*)^5 \right] \quad (9)$$

en esta ecuación los términos a_1 , a_2 , a_3 , a_4 y a_5 tienen las siguientes expresiones:

$$a = 1 - 0,011311 \cdot C_b \quad (10)$$

$$a_1 = 1,0011833 \cdot a \quad (11)$$

$$a_2 = \frac{1,1473561 \cdot 10^{-5} - 6,1666653 \cdot 10^{-5} \cdot a}{2} \quad (12)$$

$$a_3 = \frac{1,3999989 \cdot 10^{-7} - 7,0669983 \cdot 10^{10} \cdot a}{3} \quad (13)$$

$$a_4 = \frac{1,3333336 \cdot 10^9 - 1,6043987 \cdot 10^{-12} \cdot a}{4} \quad (14)$$

$$a_5 = \frac{1,5296 \cdot 10^{-14} \cdot a}{5} \quad (15)$$

Resolviendo las ecuaciones planteadas es posible determinar la cantidad de destilado que se obtiene en forma general y con las limitaciones impuestas al modelo adoptado. Como el objetivo del trabajo es plantear las ecuaciones necesarias para realizar una primera aproximación de la cantidad de agua destilada que se puede obtener de un sistema como el descrito, a continuación se resumen los pasos a seguir para un cálculo en particular.

Conociendo el valor de Q_0 (figura 3) se determina la energía entregada al líquido que ingresa a la primera etapa (con una calidad cercana a cero, por ejemplo 0,001), de esta forma se puede determinar la temperatura del vapor, que es la temperatura de la primera etapa. Otro dato que debe conocerse es el flujo másico de entrada, \dot{m}_{sc} y la presión que puede suponerse como la atmosférica y la concentración inicial C_0 .

En una segunda etapa de cálculo se determina \dot{m}_g para la primera etapa multiplicando la calidad del vapor x , supuesta por \dot{m}_{sc} y por diferencia de estos dos flujos se puede determinar el flujo másico de la salmuera que no se evaporó y es el nuevo flujo de entrada para la etapa posterior.

Para resolver esta última ecuación hay que utilizar el balance de energía, puesto que las entalpías son datos conocidos y se calcularon con la ecuación experimental propuesta. Las ecuaciones se reducen entonces a un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas: una de ellas el flujo de salmuera de la segunda etapa y otra el flujo de vapor de la segunda etapa, sistema que puede ser resuelto fácilmente y por lo tanto determinar estas variables. Los pasos que siguen es determinar nuevamente el flujo de líquido no evaporado hacia la etapa siguiente y el vapor generado que ingresa a la etapa próxima. La cantidad de agua destilada es simplemente la suma de todos los flujos de vapor por etapa o sea la sumatoria de todos los \dot{m}_{gi} .

ECUACIONES A RESOLVER

Se presenta a continuación las ecuaciones en forma explícita para los cálculos descritos anteriormente. Antes de determinar valores numéricos es necesario haber evaluado la distribución de presión y temperaturas en las diferentes etapas, este es un

dato de diseño en una instalación en particular por ese motivo no se evalúan estos parámetros. Con estos datos de diseño es posible determinar las entalpías de la salmuera en cada etapa y del vapor generado.

A partir de conocer: T1 (temperatura a la que es sometida el líquido que ingresa a la primera etapa), x_1 , C_0 (concentración inicial) y \dot{m}_{sc} se plantea el balance de masa y se determina:

$$\dot{m}_{g,1} = x_1 \dot{m}_{sc} \quad (16) \qquad \dot{m}_{g,1} = \dot{m}_{sc} - \dot{m}_{g,1} \quad (17) \qquad \dot{m}_{s,1} = \dot{m}_{g,2} + \dot{m}_{s,2} \quad (18)$$

Se plantea ahora el balance de energía:

$$\dot{m}_{s,1} h_{fl} + \dot{m}_{g,1} h_g - [\dot{m}_{g,2} h_{j2} + \dot{m}_{g,1} h_{fl} + \dot{m}_{s,2} h_{j2}] = 0 \quad (19)$$

donde $\dot{m}_{g,2}$ y $\dot{m}_{s,2}$ son incógnitas

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones (18 y 19) se encuentran los valores para la etapa 2, luego hay que plantear las mismas ecuaciones tantas veces como etapas tenga el sistema. Para determinar la nueva concentración y poder calcular las entalpías se debe recalcular el flujo de agua salada (ec. 20) y la nueva concentración para la próxima etapa (ec.21).

$$\dot{m}_{sal} = \dot{m}_{sc} C_0 \quad (20) \qquad C_1 = \frac{\dot{m}_{sal}}{\dot{m}_{s,2}} \quad (21)$$

Todo el procedimiento anterior se debe repetir cada una de las etapas del destilador y como se mencionó la cantidad de agua destilada es la suma de los flujos de vapor condensados que salen de cada efecto.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un sistema de ecuaciones que son el resultado de realizar balances de masa y energía en un sistema de destilación por multi-efecto. A partir de evaluar numéricamente las ecuaciones resultantes es posible determinar en una primera aproximación el flujo de agua destilada. Como no se consideran geometrías de los intercambiadores ni otras variables que pueden generar pérdidas, el valor obtenido es el máximo posible en un sistema de destilación de multi-efecto.

Lo desarrollado anteriormente se presenta como una primera aproximación de trabajos futuros, siendo el principal objetivo el desarrollo de un programa de simulación completo. Este programa puede ser utilizado como una herramienta de diseño y de cálculo. Para el desarrollo de un programa como el que se piensa es necesario, además de los balances, considerar aspectos como los mencionados, por ejemplo todos los fenómenos de evaporación y condensación en diferentes partes del sistema.

Disponer de un programa que pueda realizar un prediseño de un sistema para purificar agua es importante de considerar porque puede ser utilizado para brindar una posible solución, sobre agua para consumo, a comunidades que actualmente carecen de este recurso apto para el consumo humano. También se plantea como importante en los futuros desarrollos incorporar aspectos económicos pensando principalmente en evaluar la amortización de futuras instalaciones.

REFERENCIAS

- Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell (2004). The Properties of Gases and Liquids, Fifth Edition, Ed. Mc Graw Hill
- Callen H. B. (1985). Thermodynamics and an introduction to thermostatics, Second edition. Ed. John Wiley & Sons.
- F. P. Incropera y D. P. DeWitt (1999). Fundamentos de transferencia de calor, Ed. Pearson
- Massoud M. (2005). Engineering Thermofluids - Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer , Ed. Springer
- Wagner W., Kretschmar H. J. (2008). International Steam Tables , Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97 , Second edition . Ed. Springer.
- Yunus A Cengel, Michael A. Boles (). Thermodynamics. An Engineering Approach, Fifth Edition, Ed. Mc Graw Hill

ABSTRACT

In Argentina, there are large areas that are in a delicate situation regarding the availability of drinking water. For example, in the province of Salta and in particular in the Puna area or what is called Chaco Salta, the resource "water" is not recommended for human consumption due to the presence of arsenic and other salts harmful to health. In these rural people must travel long distances to fetch water that is safe for consumption. However, in these places the solar resource is important therefore to consider desalination equipment is a valid alternative for drinking water. This paper presents equations involved in a distillation system "multi-effect" as a first step to study and propose a design of a system to produce drinking water that is applicable in these areas.

Keywords: distillation, energy transfer, solar energy