

Diseño de un Desalinizador de Agua a Escala Piloto por Humidificación-Deshumidificación de Aire Empleando Columnas de Burbujeo

Freire C.*; Albuja M.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química, Quito, Ecuador
e-mail: crispatfre@yahoo.es;jhmalbujat@gmail.com

Resumen: El presente trabajo tuvo como objeto el diseño de un desalinizador de agua de mar a escala piloto por humidificación – deshumidificación de aire empleando columnas de burbujeo. Se montó un sistema experimental que permitió investigar la influencia del flujo de aire y la temperatura de humidificación sobre la producción de condensado. Se aplicó un diseño experimental factorial 3×2 cuyos niveles fueron 40, 50 y 60 L/min para el flujo de aire y 50 y 60 °C para la temperatura; se realizaron dos repeticiones. Empleando un análisis estadístico de los datos recolectados se determinó que la influencia de la temperatura es determinante en el proceso y que las mejores condiciones de operación corresponden a 60 L/min para el flujo de aire y 60 °C para la temperatura. Bajo dichas condiciones se produjo en promedio 0,601 kg/h de agua y se estableció un rendimiento del 83%. Adicionalmente se halló que la efectividad del humidificador y deshumidificador fue igual a 0,935 y 0,995 respectivamente. Con los resultados obtenidos se procedió a dimensionar un sistema capaz de producir 1000 L de agua al día. El dimensionamiento de las columnas de burbujeo se realizó tomando como criterios de escalado la velocidad superficial del gas, el coeficiente volumétrico de transferencia de masa y el número de Froude. Para determinar los valores de las corrientes involucradas en el proceso se efectuaron balances de masa y energía en cada unidad. Se especificaron las condiciones de operación y se diseñaron los serpentines de refrigeración y aspersores. A continuación se seleccionaron el compresor de aire, las bombas y los eliminadores de niebla. Finalmente se realizó una estimación económica que dio como resultado un costo de \$ 62,26/m³ la producción de agua fresca a escala piloto.

Palabras clave: Desalinización, humidificación, deshumidificación, columna de burbujeo, agua de mar

Abstract: The objective of this work was to design a pilot scale seawater desalinator via air humidification – dehumidification using bubble columns. In order to investigate the influence of air flow and humidification temperature over condensate production, an experimental system was mounted and a 3×2 factorial experimental design was applied. Variable levels were 40, 50 and 60 L/min for air flow and 50 and 60 °C for temperature; two repetitions were performed. Through a statistical analysis of the data collected it was determined that the influence of temperature is crucial in the process and that the best operating conditions are 60 L/min for air flow and 60 °C for humidification temperature. Under these conditions, an average of 0,601 kg/h of water was produced, reaching a yield of 83%. Additionally it was found that the effectiveness of the humidifier and dehumidifier was 0.935 and 0.995 respectively. With the results obtained, a system capable of producing 1000 L of water per day was dimensioned. Bubble column size was found considering superficial gas velocity, volumetric mass transfer coefficient and Froude number as scaling criteria. To determine the values of the currents involved in the process, mass and energy balances were made in each unit. Operating conditions were specified and both cooling coils and spargers were designed. Air compressor, pumps and mist eliminators were also selected. Finally, the estimate cost of fresh water production at pilot scale was found to be \$ 62.26/m³.

Keywords: Desalination, humidification, dehumidification, bubble column, seawater

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, alrededor del 40% de la población mundial sufre de una grave escasez de agua dulce y en el año 2025 se espera que este porcentaje aumente a más del 60%. Esto se debe al rápido aumento de la población, los cambios en el estilo de vida, el aumento de las actividades

económicas y la contaminación, los cuales limitan el acceso al agua dulce [12].

Los sistemas de desalinización son esenciales para la solución de este problema, sin embargo las tecnologías de desalinización convencionales, como la destilación y la ósmosis inversa, por lo general son viables solamente a

gran escala, siendo adecuadas para regiones que cuentan con amplios recursos económicos [10].

El proceso de desalinización por humidificación-deshumidificación (HDH) es visto como una técnica prometedora para plantas de pequeña capacidad de producción pues ofrece una operación a temperaturas bajo la de ebullición y a presión atmosférica, es capaz de acoplarse con fuentes de energía renovables y presenta características técnicas simples [2]. Dicho proceso se fundamenta en incrementar la humedad de una corriente de aire, al exponerla a agua a cierta temperatura, para posteriormente recuperar el vapor de agua que contiene.

Los sistemas HDH existentes emplean comúnmente columnas empacadas para la humidificación de aire e intercambiadores de calor de tubos y coraza como deshumidificadores, no obstante los principales problemas son la formación de incrustaciones debido al agua salada y la baja recuperación de calor por la presencia de aire durante la condensación.

La inhibición de la coalescencia de las burbujas de aire en soluciones salinas provoca un intercambio eficiente y uniforme de vapor de agua hacia las mismas, haciendo viable el empleo de columnas de burbujeo como equipos de humidificación para propósitos de desalinización HDH. Dicha transferencia no requiere una membrana y no implica el uso de altas presiones, razón por la cual ofrece ventajas potenciales sobre otros procesos convencionales de desalinización [6].

Por otra parte, El-Agouz reporta que al usar una columna de burbujeo para humidificación de aire es posible alcanzar en una sola etapa el mismo resultado que en un sistema HDH de etapas múltiples por aspersión [4]. Además, recientemente Narayan propuso utilizar una columna de burbujeo con líquido frío en lugar de una superficie fría para la deshumidificación del aire, obteniéndose como resultado una mayor tasa de transferencia de calor y por ende más agua fresca [11].

Debido a los motivos expuestos se formula el diseño de un desalinizador de agua de mar a escala piloto bajo el concepto de humidificación-deshumidificación de aire, empleando columnas de burbujeo. Con este diseño, basado en estudios experimentales que identifican la influencia de variables como el flujo de aire y la temperatura de la columna de humidificación sobre la producción de condensado, se espera analizar si el proceso planteado es competitivo frente a otros ya existentes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Montaje del sistema experimental

En la Figura 1 se muestra el esquema del sistema montado para realizar los experimentos de humidificación y deshumidificación de aire a partir de una solución salina. Los componentes del sistema son: (1) compresor de aire, (2) tubo de Venturi y manómetro diferencial, (3) columna de humidificación, (4 y 8) difusor, (5 y 9) termómetro, (6) resistencia eléctrica, (7) columna de deshumidificación y (10) serpentín de enfriamiento. Las características de los componentes señalados se describen a continuación.

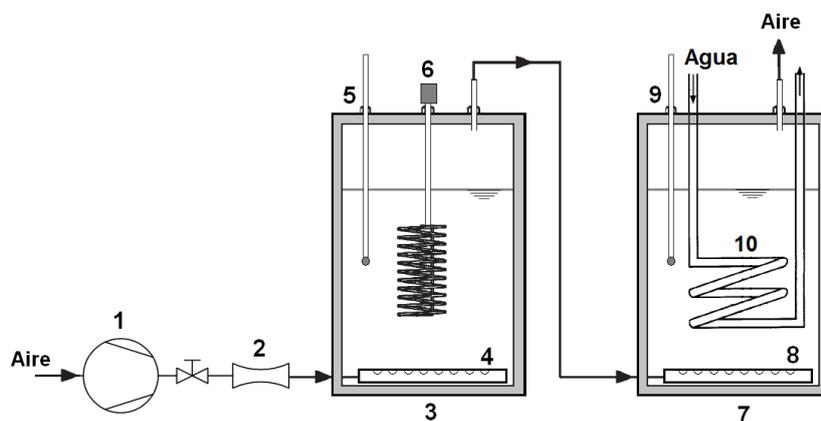


Figura 1. Esquema del sistema de humidificación-deshumidificación de aire

- *Compresor de aire:* se utilizó un compresor eléctrico Kellogg-American, modelo 321 de 1,5 HP de potencia con un filtro de aire y un sistema automático de control de presión en el tanque. La alimentación de aire al sistema se reguló con una válvula adjunta en la conexión de salida.
- *Tubo de Venturi y manómetro diferencial:* el tubo de Venturi acoplado al manómetro se destinó para la

medición del flujo de aire enviado desde el compresor. Como líquido manométrico de empleo agua destilada.

- *Columna de humidificación:* se elaboró con un recipiente plástico con tapa rosca de 0,20 m de altura y 0,12 m de diámetro que fue recubierto con aislante de espuma de poliuretano de 2 cm de espesor. Para calentar y controlar la temperatura de la solución salina se adaptó a la columna una resistencia eléctrica de 1 kW con un interruptor. Para la aspersión del aire

se dispuso de un difusor tipo tubería perforada en configuración anular en el fondo del recipiente.

- *Difusor:* el difusor de aire se elaboró con tubo flexible de polietileno de 0,20 m de longitud y ¼ de pulgada de diámetro en el cual se perforaron 20 orificios de 2 mm de diámetro con un espaciamiento de 5 mm empleando un caudín.
- *Termómetro:* para la medición de la temperatura del líquido en las columnas de humidificación y deshumidificación se emplearon termómetros de mercurio Miller & Weber cuyo rango de operación es de -20 a 150 °C con una precisión de 1 °C.
- *Columna de deshumidificación:* se construyó con un recipiente plástico con tapa ajustable de 0,20 m de altura y 0,17 m de diámetro. Se cubrió con aislante de espuma de poliuretano de 2 cm de espesor y se utilizó un aspersor tipo tubería perforada para distribuir el aire húmedo. Para regular la temperatura de la columna se implementó un serpentín de enfriamiento a través del cual se hizo circular agua de la llave. Las columnas se acoplaron mediante conexiones flexibles de ¼ de pulgada.
- *Serpentín de enfriamiento:* El serpentín de enfriamiento se elaboró con tubería de cobre de 3/8 de pulgada y 1 m de longitud. Se dobló el tubo manualmente, obteniéndose 3 espiras con un diámetro de 0,12 m. Las conexiones de entrada y salida de agua se elaboraron con tubería de vinil de 3/8 de pulgada.

2.2. Diseño experimental

Para determinar la influencia del flujo de aire y temperatura del líquido en la columna de humidificación sobre la producción de condensado por deshumidificación, se desarrolló un diseño experimental factorial 3×2. Para el flujo de aire los niveles fueron 40 L/min, 50 L/min y 60 L/min; y para la temperatura fueron 50 °C y 60 °C.

Los tratamientos experimentales se generaron por combinaciones al azar entre los niveles de las dos variables mencionadas empleando un diseño factorial multinivel del software estadístico StatgraphicsCenturion XV. Cada experimento se llevó a cabo durante una hora y se realizaron dos repeticiones.

La producción de condensado por deshumidificación del aire en la segunda columna de burbujeo se midió directamente por masa y volumen. Para la medición por masa se utilizó una balanza Ohaus, modelo CD-11 de 5 kg de capacidad y una sensibilidad de 1 g. El volumen del condensado se midió mediante una probeta LMS de 250 mL de capacidad y 1 mL de precisión.

2.3. Procedimiento

La solución salina para la columna de humidificación, cuya concentración es similar a la del agua de mar (32 g/L), se preparó a partir de agua destilada y sal de mesa común. A continuación se describe los pasos seguidos para ejecutar el experimento:

- Se pesaron 1200 g de agua destilada, cantidad suficiente para cubrir completamente el serpentín de enfriamiento en el deshumidificador.
- Se calentó 1 L de la solución salina con un reverbero eléctrico hasta alcanzar la temperatura de operación.
- Se abrió la válvula del compresor de aire ligeramente y se colocó la solución salina en la columna de humidificación. Inmediatamente se selló el recipiente, se activó la resistencia eléctrica y se ajustó el flujo de aire hasta el caudal de operación.
- Una vez alcanzadas condiciones estables se acopló la columna de humidificación con la columna de deshumidificación.
- Se abrió la válvula de agua para el serpentín de enfriamiento hasta alcanzar un flujo de 5 L/min, determinado preliminarmente para mantener la temperatura del deshumidificador por debajo de los 25 °C.
- Se insertó el serpentín en el deshumidificador y se colocó el agua destilada en la columna de deshumidificación. Se inició la medición del tiempo.
- Durante el proceso se monitoreó las temperaturas de ambas columnas y el flujo de aire, controlándose el proceso mediante la manipulación de las válvulas del compresor, de la toma de agua y del interruptor de la resistencia eléctrica.
- Una vez transcurrida una hora de operación se apagó la resistencia eléctrica y se suspendieron los flujos de aire y agua de enfriamiento. Se recogió el contenido del deshumidificador en un recipiente, determinándose su masa en la balanza y su volumen mediante una probeta.
- La masa y volumen de condensado obtenida se obtuvo por diferencia entre los valores finales e iniciales.

Los datos obtenidos se procesaron mediante el software StatgraphicsCenturion XV, mediante el cual se seleccionaron las mejores condiciones de operación. Bajo dichas condiciones se registró la humedad relativa del aire a la entrada y salida de las columnas durante 30 minutos usando un higrómetro Digi-Sense, modelo NO60020-52 cuyo rango de operación es de 0 a 70 °C con una sensibilidad de 0,1 % para humedad relativa. Los caudales de aire se midieron acoplando el medidor de Venturi a cada columna y registrando la diferencia manométrica. Con los resultados adquiridos se determinó el requerimiento energético en la columna de humidificación y el rendimiento del proceso.

2.4. Diseño del sistema de desalinización a escala piloto

Para el diseño del sistema de desalinización de agua de mar a escala piloto capaz de producir 1 000 L/día de agua se asumió una operación de 12 horas. Se utiliza las unidades del sistema internacional para el desarrollo de las fórmulas presentadas.

Dimensionamiento

Se toman como criterios de escalado para el diámetro de la columna los valores de la velocidad superficial del gas, el coeficiente volumétrico de transferencia de masa y el número de Froude bajo condiciones de laboratorio, es decir se mantienen constantes para el diseño a escala piloto.

Para determinar el nivel del líquido en las columnas se empleó la ecuación (1), donde ε es la retención del gas, U_g es la velocidad superficial del gas, z y z_0 son los niveles del líquido con y sin aireación respectivamente [16]. Se asume que z_0 es el necesario para cubrir la resistencia eléctrica por completo, es decir 0,35 m. Se considera que dicha altura es suficiente para cubrir los serpentines de enfriamiento en los deshumidificadores.

$$\varepsilon = \frac{U_g}{0.3 + 2U_g} = \frac{z - z_0}{z} \quad (1)$$

Balances de masa y energía

Se asume que el proceso se encuentra en estado estacionario y que tanto las pérdidas de calor hacia el ambiente como el cambio en la energía cinética y potencial son despreciables. Además al ser la presión de operación cercana a la atmosférica la mezcla aire - vapor de agua se comporta como gas ideal.

Diseño de aspersores

El diseño de los aspersores de aire tipo tubería perforada se realizó mediante el siguiente procedimiento [13]:

- Seleccionar un tipo de tubería y obtener sus características.
- Fijar el caudal requerido de gas y establecer sus propiedades.
- Obtener el valor del número de Reynolds en la conducción y determinar el coeficiente de fricción correspondiente mediante el diagrama de Moody.
- Examinar que la relación $4fL/3D < 1$ se cumpla, con el fin de obtener un 5 por 100 de distribución defectuosa del gas.
- De no cumplirse el criterio se debe dividir el distribuidor en secciones o probar diferentes diámetros de conducción.

Bajo los requerimientos anteriores se obtuvo el área total de los orificios y asumiendo un diámetro de orificio se determinó el número de orificios y espaciado entre ellos.

Diseño de serpentines de enfriamiento

Para el diseño de los serpentines se emplearon expresiones convencionales de transferencia de calor. Para estimar el coeficiente de convección interno se calculó el número de Nusselt (Nu) empleando la ecuación de Pethukov para flujo turbulento totalmente desarrollado al interior de tubos rectos. Dicho valor se relacionó con el de un serpentín helicoidal (Nu_c) mediante la ecuación (2).

$$\frac{Nu_c}{Nu} = 1.0 + 3.6 \left(1 - \frac{D_i}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.8} \quad (2)$$

Donde D_i es el diámetro interno del tubo y D_c es el diámetro de la espira [7].

El coeficiente de convección (h_e) para condensación de vapor de agua mediante burbujeo en un lecho frío se estimó mediante la ecuación (3):

$$h_e = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k\rho C_p}{t}} \quad (3)$$

Donde k : coeficiente de conductividad térmica, ρ : densidad y C_p : calor específico a la temperatura del líquido. t es el tiempo de renovación de la superficie y se define por el cociente entre el diámetro de la burbuja (d_b) y la velocidad de circulación del líquido (v_c) [11].

El diámetro de la burbuja se describe por el número de Reynolds en el orificio (Re_o) según la ecuación (4) [14]:

$$d_b = 0,0071 Re_o^{-0,05} \quad (4)$$

La velocidad de circulación del líquido se expresa mediante la ecuación (5) [8].

$$v_c = 1,36 [gz_0 (U_g - \varepsilon v_b)]^{1/3} \quad (5)$$

Donde g es la gravedad y v_b es la velocidad de ascensión de la burbuja calculada por la ecuación (6), siendo σ es la tensión superficial del líquido [14].

$$v_b = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho d_b} + \frac{gd_b}{2}} \quad (6)$$

Para estimar el coeficiente global de transferencia de calor en el sistema se consideró la resistencia al ensuciamiento para agua de mar a temperaturas promedio inferiores y superiores a 50 °C. Posteriormente se determinó el área y altura del serpentín, la longitud del tubo, el número de espiras y su separación.

Dimensionamiento del compresor de aire y bombas

La altura desarrollada por el compresor de aire y por las bombas para alimentar el agua de mar al sistema y

almacenar el agua pura se estimó aplicando la ecuación de Bernoulli en cada caso, considerando las pérdidas de carga producidas por fricción y accesorios. La potencia de las bombas se calculó considerando una eficiencia mecánica del 70%.

Selección del eliminador de niebla

La selección de los eliminadores de niebla se realizó tomando en cuenta los rangos recomendados de área específica, densidad de empaque y fracción de vacío para una operación normal del sistema, es decir que no provoque obstrucciones y en consecuencia otorgue una baja caída de presión.

2.5 Estimación del costo de producción de agua fresca a escala piloto

Para calcular el costo de producción de 1 m³/día de agua mediante el sistema diseñado, se establecieron los costos directos y el costo de operación. En el costo de operación se consideró el costo de la electricidad igual a \$ 0,08/KWh y el costo específico de los químicos igual a \$ 0.025/m³ [3].

Para calcular el factor de amortización (a) se aplicó la ecuación (7)[5], considerándose una tasa de interés (i) del 15,91 % [1] y un tiempo de vida (n) igual a 20 años.

$$a = \frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \tag{7}$$

El costo de producción (C) se obtuvo mediante la ecuación (8).

$$C = \frac{(a \cdot CD) + CO}{P} \tag{8}$$

Donde CD: costo directo total, CO: costo de operación anual y P: producción anual [5]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados experimentales

Los resultados obtenidos con cada tratamiento experimental del diseño factorial 3x2 se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Masa y volumen de condensado obtenido en cada tratamiento experimental

| Flujo de aire (L/min) | Temperatura (°C) | Masa (g) | | | Volumen (mL) | | |
|-----------------------|------------------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | | Bloque 1 | Bloque 2 | Bloque 3 | Bloque 1 | Bloque 2 | Bloque 3 |
| 40 | 50 | 228 | 226 | 212 | 229 | 228 | 215 |
| | 60 | 450 | 426 | 446 | 453 | 428 | 449 |
| 50 | 50 | 294 | 298 | 286 | 296 | 301 | 289 |
| | 60 | 528 | 510 | 522 | 530 | 513 | 523 |
| 60 | 50 | 333 | 344 | 340 | 336 | 346 | 343 |
| | 60 | 594 | 602 | 608 | 597 | 605 | 610 |

Por inspección simple de los datos se observa que la mayor cantidad de condensado se obtiene cuando se utilizan los niveles más altos de temperatura y flujo de aire

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos fue realizado mediante el software StatgraphicsCenturion XV. Una vez comprobados mediante evidencias gráficas que los supuestos de normalidad, varianza constante y de independencia se cumplen, se evaluó la influencia de las variables de diseño por medio de un análisis de varianza al 95 % de confianza. Se halló que el flujo de aire, la temperatura y la interacción entre ambas variables tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la producción de condensado. Dicho efecto se representa gráficamente mediante el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 2.

Se observa que la temperatura de la columna de humidificación es la variable que presenta un mayor impacto sobre la producción de condensado, seguida por el flujo de aire y la interacción de las dos variables (AB).

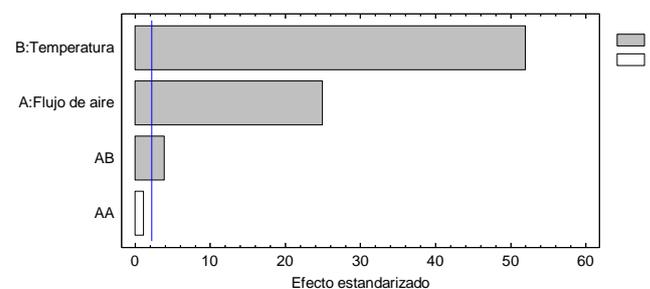


Figura 2. Diagrama de Pareto

Influencia del flujo de aire y temperatura del líquido

Mediante las gráficas de interacción en función del flujo de aire y temperatura presentadas en las Figs. 3 y 4 respectivamente, se analiza la influencia de dichas variables sobre la producción de condensado por deshumidificación de aire.

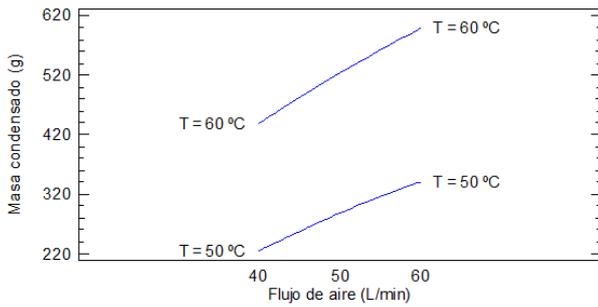


Figura 3. Gráfica de interacción en función del flujo de aire

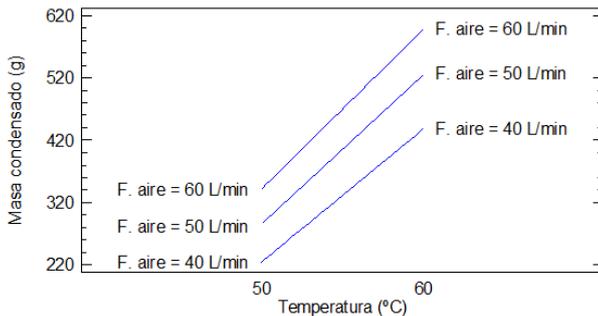


Figura 4. Gráfica de interacción en función de la temperatura

En la Figura 3 se observa que para una temperatura constante al incrementar el flujo de aire la producción de condensado aumenta. Esto se atribuye a que una mayor cantidad de aire es capaz de transportar más vapor de agua. Se observa además que es necesario emplear un mayor flujo de aire para alcanzar los mismos resultados que se podrían obtener elevando la temperatura en 10 °C, comprobándose así el fuerte efecto de la temperatura en el proceso.

En cuanto a la influencia de la temperatura, en la Figura 4 se aprecia que para un valor fijo de flujo de aire el aumento de la temperatura lleva igualmente a un incremento de condensado pero con un efecto más marcado. Esto se debe a que a mayor temperatura la humedad absoluta del aire se incrementa, lo que resulta en una mayor cantidad de vapor que se transporta al aire y finalmente condensa. Se puede afirmar además que al emplear un menor flujo de aire se puede obtener la misma cantidad de condensado que la obtenida con un flujo mayor de aire siempre y cuando se incremente la temperatura de humidificación.

Las mejores condiciones de operación del proceso, es decir la temperatura y flujo de aire que otorgan la mayor producción de condensado corresponden a 60 L/min para el flujo de aire y 60 °C para la temperatura de humidificación. Las mediciones de caudal y humedad relativa indicaron que mientras se mantenga la columna a una temperatura constante, el aire alcanza la misma temperatura del líquido y saturación completa además de no presentarse caídas de presión significativas en el sistema.

Establecimiento del requerimiento energético en la columna de humidificación

Para determinar el requerimiento energético en la columna de humidificación se realizó un balance de energía en esta unidad. El flujo de calor se expresa en la ecuación (9):

$$Q = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (9)$$

Donde Q es el flujo de calor, \dot{m}_a el flujo másico de aire y $h_{2,1}$ las entalpías del aire a la salida y entrada del humidificador respectivamente. Se obtuvo un flujo de calor igual a 0,558 kW. Considerando una producción promedio de condensado de 0,6 kg/h de agua se obtiene un consumo específico de energía igual a 930 kWh/m³. Dicho valor se encuentra dentro del rango típico para este sistema de desalinización, igual a 500 – 950 kWh/m³ [9].

Determinación del rendimiento del proceso

El rendimiento del proceso se obtuvo considerando la relación entre la cantidad de condensado obtenida en laboratorio y la máxima cantidad de agua que puede ser recuperada del humidificador en condiciones ideales. El rendimiento térmico (GOR) se calculó mediante la ecuación (10).

$$\text{GOR} = \frac{\dot{m}_w \lambda_w}{Q} \quad (10)$$

Donde \dot{m}_w es el flujo másico de condensado y λ_w es el calor latente del agua evaluado a la temperatura de entrada de la mezcla aire-vapor de agua al deshumidificador [10]. Se halló un rendimiento del 83 % y un GOR igual a 0,85. Adicionalmente se encontró la efectividad del humidificador y deshumidificador siendo éstas iguales a 0,935 y 0,995 respectivamente

3.2. Diseño de un sistema de desalinización de agua a escala piloto

Dimensionamiento preliminar

Debido a que el sistema de desalinización diseñado opera a nivel del mar se calculó la temperatura equivalente a la determinada en el laboratorio a la presión de la ciudad de Quito, igualando las expresiones de producción de agua, obteniéndose una temperatura de 67 °C. Se estimó el diámetro de la columna, usando el flujo de aire necesario para alcanzar un 85% de rendimiento, mediante un promedio entre los valores hallados con cada criterio de escalado, resultando éste igual a 1 m. Por considerarse dicho diámetro poco realista se realizó una iteración asumiendo una temperatura de 80 °C y se obtuvo un diámetro de 0,70 m.

Balace de masa y energía

Tomando en cuenta que es deseable recuperar una mayor cantidad de calor para fines de precalentamiento del agua de mar se decidió emplear dos deshumidificadores en una configuración a contracorriente. Asumiendo una efectividad para el humidificador y los deshumidificadores igual a 0,95, fijando en 7% la concentración de sal para la corriente de salida y una potencia de 32 kW para la resistencia eléctrica se procedió a calcular todos los valores de las corrientes del proceso. Se supone que el aire

ingresa a 20 °C y un 20 % de humedad relativa al humidificador y que la temperatura en el segundo deshumidificador es 30 °C.

Se halló que es necesario operar el deshumidificador I a 70 °C para obtener una igual producción de agua en ambas unidades. Se resolvió emplear dos columnas de humidificación puesto que la potencia suministrada por una sola resistencia no era la suficiente para operar el sistema. El esquema del sistema se muestra en la Figura 5.

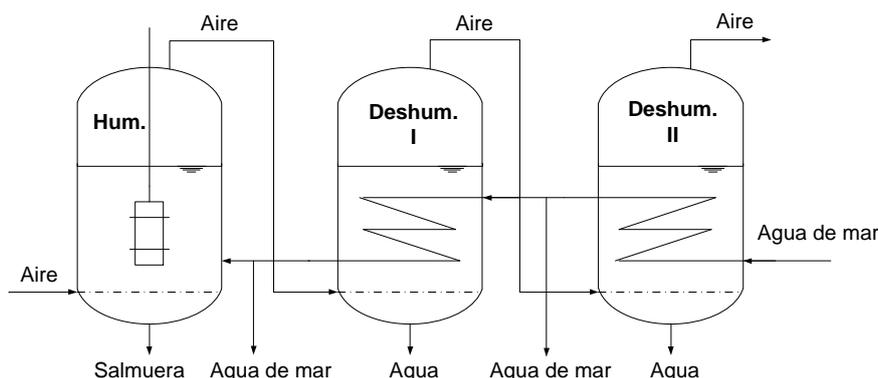


Figura 5. Esquema del sistema de desalinización a escala piloto

Dimensionamiento definitivo

Con el flujo real de aire se determinó el diámetro de las columnas de humidificación y deshumidificación, siendo éste 0,50 m y 0,70 m respectivamente. Se consideró por observación experimental que la altura de diseño es igual al doble de la altura del líquido con aireación en la columna, correspondiente a 0,45 m. En consecuencia se calculó una altura de 0,90 m para ambas columnas.

Diseño de los aspersores

Se elige emplear tubería lisa de vinil debido a su flexibilidad y resistencia. Se considera que el diámetro del aspersor corresponde al 90% del diámetro de la columna y que para una mejor distribución del aire, éste se alimenta por los dos extremos del aspersor. Se asume orificios de diámetro 5 mm y un aspersor anular dividido en 4 secciones iguales. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del aspersor para las columnas de humidificación y deshumidificación

| Característica | Columna humidificación | Columna deshumidificación |
|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| Longitud (m) | 1,41 | 2,00 |
| Diámetro nominal (in) | 1 ½ | 2 |
| Número de orificios | 140 | 228 |
| Espaciamento (m) | 0,010 | 0,008 |

Diseño de los serpentines de enfriamiento

Para el enfriamiento de las columnas de deshumidificación se diseñan serpentines helicoidales de cobre, considerándose una tubería de ½ pulgada de diámetro nominal. Se asume que el diámetro de la espira corresponde al 90% del diámetro de la columna, pues de ésta forma el aspersor se encuentra directamente bajo el serpentín, provocando que las burbujas impacten directamente en el mismo y favoreciendo una mayor tasa de transferencia de calor. Los valores obtenidos para calcular el coeficiente global de transferencia de calor se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes de transferencia de calor en las columnas de deshumidificación

| Coefficiente de transferencia de calor (W/m ² °C) | Columna deshumidificación I | Columna deshumidificación II |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| Convección interno | 5 486,20 | 18 573,52 |
| Convección externo | 23 980,77 | 23 175,39 |
| Global "limpio" | 5 660,64 | 10 310,42 |
| Global de diseño | 2 654,86 | 5 347,90 |

En el caso del deshumidificador I, se observa que el valor obtenido es válido pues para efectos de diseño se estima que el coeficiente global de transferencia de calor en un sistema agitado por burbujas de aire, para agua fría que circula en el serpentín y agua caliente fuera de él, se encuentra en un rango de 1 700 – 2 100 W/m²°C [13]. El ligero incremento del valor hallado se explica por la

condensación directa del vapor de agua presente en la corriente de aire sobre el líquido a menor temperatura.

Se aprecia que para el deshumidificador II el valor del coeficiente de transferencia de calor es mayor al primero. Esto se explica debido a que el coeficiente de convección interno es superior pues por el serpentín circula una cantidad aproximadamente 6 veces más grande de agua de enfriamiento, promovándose así un mayor efecto de remoción de calor. Por otra parte es necesario mencionar que para equipos de transferencia de calor con condensación de vapor el coeficiente global de transferencia de calor se encuentra en un rango de 2 000 – 6 000 W/m²°C [13], razón por la cual el valor obtenido se considera válido.

En la Tabla 4 se muestran las características de los serpentines de enfriamiento.

Tabla 4. Características de los serpentines para las columnas de deshumidificación

| Característica | Columna deshumidificación I | Columna deshumidificación II |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Área (m ²) | 0,53 | 1,07 |
| Longitud del tubo (m) | 7,88 | 15,92 |
| Número de espiras | 4 | 8 |
| Altura del serpentín (m) | 0,13 | 0,29 |

Dimensionamiento del compresor de aire y bombas

La potencia suministrada por el compresor a las columnas se obtuvo mediante el balance de energía mecánica para el gas entre el punto O (justamente encima de los orificios del aspersor) y el punto S (en la superficie del líquido) como se indica en la Fig. 6a. Se considera al sistema de columnas de burbujeo como una única columna con una altura de líquido igual a la sumatoria de cada una de ellas. La potencia requerida por la bomba para alimentar el agua de mar al sistema se calculó aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2, de acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 6b.

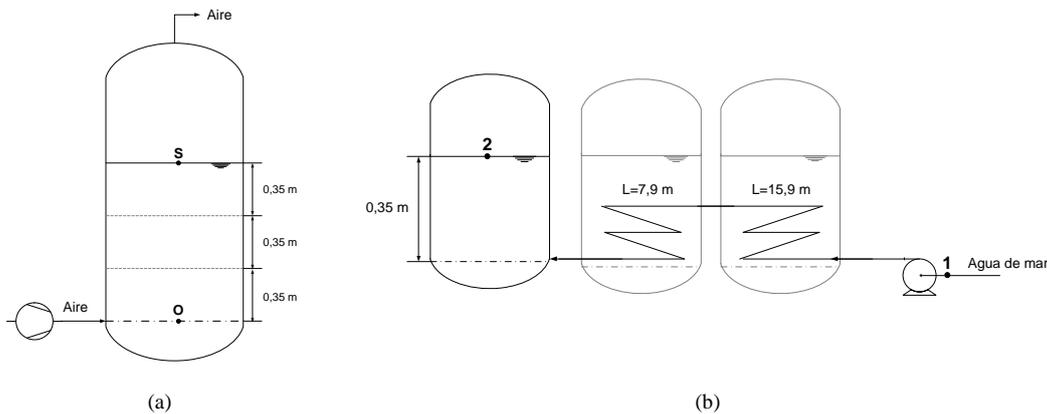


Figura 6. Esquema del sistema para determinar (a) la potencia del compresor de aire y (b) la potencia de la bomba de alimentación de agua de mar

Se encontró que se requiere un compresor de aire de 1,5 HP de potencia y una bomba centrífuga de 1 HP para la alimentación de agua de mar al sistema.

Selección del eliminador de niebla

Se seleccionó un eliminador de niebla con un área específica de 150 m²/m³, densidad de 150 kg/m³ y una fracción de vacío igual a 0,98; y se estableció la altura del empaque en 0,1 m. Las principales características del eliminador de niebla se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de los eliminadores de niebla para las columnas de humidificación y deshumidificación

| Parámetro | Humidificador | Deshumidificador |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Volumen total (m ³) | 0,019 | 0,038 |
| Área superficial (m ²) | 2,95 | 5,77 |
| Masa (kg) | 2,95 | 5,77 |
| Volumen de malla (m ³) | 3,9×10 ⁻⁴ | 7,7×10 ⁻⁴ |

Se observa que volumen ocupado por los eliminadores de niebla es pequeño en relación a las dimensiones de la columna y por lo tanto constituyen un elemento compacto que garantiza la minimización del arrastre del agua de mar a través del sistema.

3.3 Estimación del costo de producción de agua fresca a escala piloto

El resumen de costos para el proceso se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Costo anual y unitario de producción de agua para el proceso HDH propuesto

| Concepto | Costo anual (\$) | Costo unitario (\$/m ³) |
|-------------------|------------------|-------------------------------------|
| Costo fijo | 289,23 | 0,79 |
| Energía eléctrica | 22 425,60 | 61,44 |
| Químicos | 9,13 | 0,03 |
| Total | 22 723, 95 | 62,26 |

Se aprecia que el costo de la energía eléctrica para la producción de agua es el más significativo y en

consecuencia la reducción de éste llevará a la obtención de un menor costo de producción. El-Agouz estima que el costo de producción de agua en un equipo HDH que utiliza una columna de burbujeo como humidificador y opera a 80 °C es \$ 95/m³ [4] razón por la cual el valor obtenido es razonable. Sin embargo este valor es demasiado alto con respecto al de otros procesos, como la destilación múltiple etapa o la ósmosis inversa, que en virtud a su mayor nivel de recuperación energética y escala ofrecen costos en el rango de \$ 0,20 - \$ 1,80 por metro cúbico de agua [15]. En consecuencia se puede decir que por el momento el proceso no es competitivo frente a otros disponibles en el mercado.

4. CONCLUSIONES

El análisis estadístico de los datos obtenidos en laboratorio mostró que el flujo de aire, la temperatura de humidificación y la interacción entre ambas variables tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la producción de condensado por deshumidificación de aire.

Se encontró que todas las variables estudiadas afectan positivamente el proceso, siendo la temperatura de la columna de humidificación la variable que presenta un mayor impacto sobre la producción de condensado, seguida por el flujo de aire y la interacción entre ambas variables.

Bajo las mejores condiciones de operación, correspondientes a 60 L/min para el flujo de aire y 60 °C para la temperatura de humidificación, la producción promedio de condensado fue 0,601 kg/h de agua.

El rendimiento del proceso estudiado fue del 83 % y la efectividad del humidificador y deshumidificador fue igual a 0,935 y 0,995 respectivamente.

Se encontró que el diámetro de la columna de burbujeo limita una aplicación a mayor escala del proceso pues éste depende directamente del flujo de aire, que en el caso de la desalinización HDH es grande. Sin embargo la ventaja radica en que el nivel del líquido no afecta al sistema, teniéndose así un equipo compacto.

Se determinó que el costo de producción del agua es de \$ 62,26/m³. Este valor depende fuertemente del costo de la energía destinada a mantener caliente la columna de humidificación por lo que consecuentemente es deseable el uso de energías renovables o calor de desecho a fin de minimizar el valor final.

A diferencia de otras tecnologías de desalinización existentes, la técnica HDH empleando columnas de burbujeo ofrece una construcción sencilla y brinda beneficios como la operación a condiciones ambientales. Por esta razón se concluye que con una apropiada recuperación energética podría ser implementada para producciones pequeñas de agua.

REFERENCIAS

- [1] Banco Central del Ecuador. (2014). *Tasas de interés vigentes*. Disponible en <http://www.bce.fin.ec/docs.php?path=/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm>
- [2] Bourouni, K. (2001). Water desalination by humidification and dehumidification of air: State of the art. *Desalination Journal*, 137(1-3), 167-176. Disponible en [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00215-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00215-6)
- [3] Cipollina, A., Micale, G. y Rizzuti, L. (2009). *Seawater desalination: Conventional and renewable energy processes*. Palermo, Italia: Springer, p.12
- [4] El-Agouz, S.A. (2010). Desalination based on humidification-dehumidification by air bubbles passing through brackish water. *Chemical Engineering Journal*, 165(2), 413-419. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.008>
- [5] El-Dessouky, H.T. y Ettouney, H.M. (2002). *Fundamentals of salt water desalination*. Amsterdam, Holanda: Elsevier, p.508
- [6] Francis M.J. y Pashley R.M. (2009). Thermal desalination using a non-boiling bubble column. *Desalination and Water Treatment*, 12(1-3), 155-161. Disponible en <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2009.91>
- [7] Geankoplis, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (3ra ed.). México D.F., México: Compañía Editorial Continental, p.270
- [8] Hulet, C., Clement, P., Tochon, P., Schweich, D., Dromard, N. y Anfray, J. (2009). Heat transfer in two- and three-phase bubble columns. *International Journal of Chemical Reactor Eng.*, 7(2009), 1-93. doi: 10.2202/1542-6580.1804
- [9] Narayan, G y Lienhard, J. (2012). Thermal design of humidification-dehumidification systems for affordable small scale desalination. *IDA Journal*, 4(3), 24-34. Disponible en <http://content.yudu.com/A1yjev/IDAJournal3rdQtr2012/resources/index.htm?referrerUrl>
- [10] Narayan, G. (2010). The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1187-1201.
- [11] Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014>
- [12] Narayan, G. (2013). Bubble columns for condensation at high concentrations of noncondensable gas: Heat transfer model and experiments. *AIChE Journal*, 59(5), 1780-1790. doi: 10.1002/aic.13944
- [13] Perlman, H. (2013). *Desalination: Drink a cup of seawater?*. United States Geological Survey. Disponible en <http://ga.water.usgs.gov/edu/drinkseawater.html>
- [14] Perry, R. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. (6ta ed.). México D.F., México: McGraw-Hill, pp. 5-54, 10-42, 10-45.
- [15] Treybal R. E., (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. (2da ed). México D.F., México: McGraw-Hill, p. 160
- [16] Voutchkov, N. (2012). *Desalination Engineering: Planning and design*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill, p.598
- [17] Zehner, P. (2000). *Bubble columns*. [Versión Adobe Digital editions]. p. 11. doi: 10.1002/14356007.b04 275