

Instrumentación, calibración y puesta en operación de una torre experimental empacada para destilación solar de agua

Jorge A. Escobedo Bretado

Instituto Tecnológico de Durango, Departamento de Metal-Mecánica
Av. Felipe Pescador 1830 Ote., Durango, Dgo., México
itdtico@yahoo.com.mx

Ignacio R. Martín Domínguez*

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV)
Departamento de Medio Ambiente y Energía
Miguel de Cervantes 120. Complejo Industrial Chihuahua. 31109 Chihuahua, Chih. México.
Tel. (614) 439-1148 FAX (614) 439-4884
ignacio.martin@cimav.edu.mx

Resumen

Se describe un sistema experimental construido para estudiar el proceso de evaporación de agua en torres empacadas, a contra flujo con aire caliente, para su utilización en la destilación de agua mediante energía solar. El sistema se compone de una columna hueca vertical de PVC, empacada con materiales disponibles comercialmente, utilizados en equipos de acondicionamiento de aire del tipo evaporativo. Cuenta también con un ventilador de velocidad variable, un dispositivo para calentamiento del flujo de aire y un sistema de medición y recolección de datos. Se presentan resultados preliminares, obtenidos durante la fase de prueba y puesta en operación del sistema experimental.

Palabras clave: Torre empacada, Destilación de agua, Materiales de empaque, Vaporización, Instrumentación, Destilación Solar.

Abstract

A description of an experimental system, constructed to study the behavior of water evaporation in packed towers with counter-current hot air flow, is given. The device is to be used for solar water distillation. The system consists of a vertical PVC tube packed with materials readily available from evaporative air coolers. A variable speed fan, an electric air heater, and data logging instruments completed the experimental rig. Preliminary results, obtained during the system commissioning and operational test are here presented.

Key words: Packed Tower, Water Distillation, Packing Materials, Vaporization, Instrumentation, Solar Distillation.

Nomenclatura

H	Entalpía	[kJ]
h	Entalpía esp.	[kJ/kg]
m	Flujo másico	[kg/s]
P	Presión	[Pa]
R	Constante de gas (Aire)	[kJ/kg-K]
t	Temperatura	[°C o K]
V	Volumen	[m ³]

Símbolos griegos

ϕ	Humedad relativa	[%]
ω	Humedad específica	[kg vapor de agua / kg aire seco]

Subíndices

a	Aire seco
g	Vapor saturado
v	Vapor
1	Estado inicial
2	Estado final

1. Introducción

Uno de los problemas más graves que afrontará el hombre en el futuro próximo, es el aprovisionamiento de agua potable para la población. En la actualidad es ya un grave problema en zonas aisladas y/o áridas del país. La necesidad cada vez mayor de producir agua potable, libre de patógenos y de sales contaminantes,

* Responsable: Tel. (614) 439-1148
Fax (614) 439-4884, E-mail ignacio.martin@cimav.edu.mx

necesaria para satisfacer la demanda de la creciente población, hace necesario explorar métodos alternativos para potabilizar fuentes de suministro no aprovechadas hasta hoy.

De entre los distintos procesos existentes para potabilizar agua, la destilación por evaporación mediante el uso de energía solar térmica, produce agua libre de patógenos y de sales, y permite utilizar una fuente de energía disponible en forma abundante en México.

El proceso de destilación es altamente eficaz en remover desechos inorgánicos, orgánicos y contaminantes tales como los metales pesados, amoníaco, nitratos, cloruros, fluoruros, contaminantes orgánicos industriales, etc. La destilación es también altamente eficaz en remover insecticidas, herbicidas y plomo, así como bacterias y virus.

El agua destilada tiene las siguientes características:

- No contiene sales minerales.
- Es impropia para beberla.
- Se la reconoce por no dejar residuos al evaporarse.

Todos los procesos para potabilizar agua requieren energía. Actualmente la principal fuente de energía utilizada proviene de los combustibles fósiles, que son energías no renovables y generan contaminación ambiental al ser quemadas. Por ello actualmente se busca utilizar otras fuentes energéticas no contaminantes y renovables para potabilizar agua en forma sustentable.

Tomando en cuenta lo anterior, surge la necesidad de investigar y mejorar los procesos de potabilización de agua utilizando fuentes de energía renovables.

Justificación

La potabilización de agua mediante destilación solar es una alternativa sustentable, ya que su fuente de energía es renovable y no contaminante.

En este trabajo se busca estudiar el funcionamiento de un dispositivo diseñado específicamente para evaporar agua a baja temperatura, el cual es parte de un sistema de destilación solar con componentes separados. Se busca obtener un sistema que sea más eficiente que los destiladores solares tipo “caseta” tradicionales. La utilización de dispositivos diseñados específicamente para desempeñar eficientemente una sola función, torre empacada, condensador, etc., permitirá lograr una mejor eficiencia global en el sistema.

Objetivos

- Instrumentar y calibrar una torre empacada para la destilación de agua.

- Determinar la cantidad de agua que puede cambiar de fase e incorporarse a la corriente de aire, a partir de la diferencia de humedades de las corrientes de entrada y salida de la torre, calculadas a partir de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo.
- Poner en operación la columna de evaporación.

Descripción general del sistema

En la figura 1 se muestra el sistema de destilación solar de agua, el cual se compone de una columna vertical hueca de PVC, empacada con materiales disponibles comercialmente, utilizados en equipos de acondicionamiento de aire del tipo evaporativo. Cuenta también con un ventilador de velocidad variable, un dispositivo para calentamiento del flujo de aire y un sistema de medición y recolección de datos.

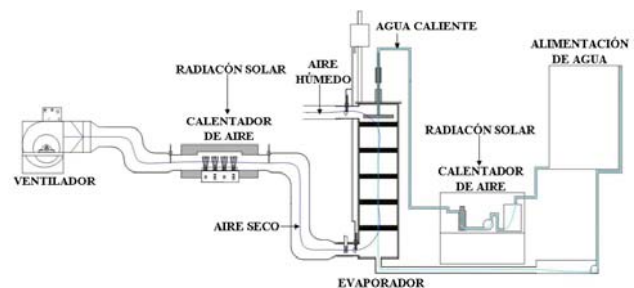


Figura 1. Diagrama de flujo de torre de destilación

2. Desarrollo

Para la modelación de la torre experimental empacada para la destilación solar de agua, se requiere calcular las humedades relativa y específica del aire a la entrada y salida de la misma.

La determinación de estas variables se hace a través de la medición de las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire, usando transductores de temperatura (termopares) en tiempo real.

Las variables gobernadas en el dispositivo experimental fueron: los flujos de aire y agua, la temperatura del aire, y en limitados casos la temperatura del agua.

2.1 Selección de instrumentos

2.1.1 Suministro de agua a la columna de evaporación

Para este propósito se realizó la selección de un recirculador de agua con calefacción y refrigeración de Cole Parmer International (figura 2). Esta selección fue realizada porque este equipo ofrece el gasto volumétrico requerido, además, de entregar el agua a una temperatura de alrededor de 30 °C., ya que cuenta con una resistencia de 34 Ω y 207 volts.



Figura 2. Baño recirculador de agua a temperatura constante.

2.1.2 Suministro de aire a la columna de evaporación

Se tomó un equipo que cuenta con un ventilador que a su vez tiene la capacidad de producir $\frac{1}{4}$ de caballo de potencia y 1725 revoluciones por minuto, (figura 3). Este equipo es seleccionado debido a que aporta al sistema un flujo volumétrico de hasta $2.7 \text{ m}^3/\text{min}$.

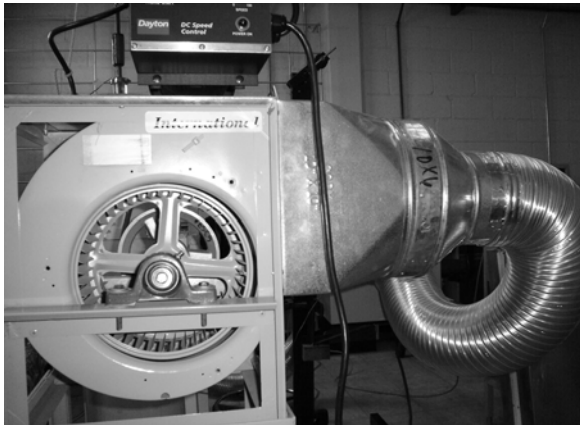


Figura 3. Ventilador

2.1.3 Suministro de energía para calentar el aire

Para secar el aire se emplearon resistencias eléctricas que simularon el calentamiento solar, y para este propósito, requirió un dispositivo para calentamiento regulado del aire de entrada al sistema, consistente en un banco de seis resistencias eléctricas, de las cuales cuatro disipan una potencia de 460 W y dos más de 850 W, cada una. El dispositivo permite encender por separado cada resistencia, para lograr la potencia deseada en los experimentos (figura 4).

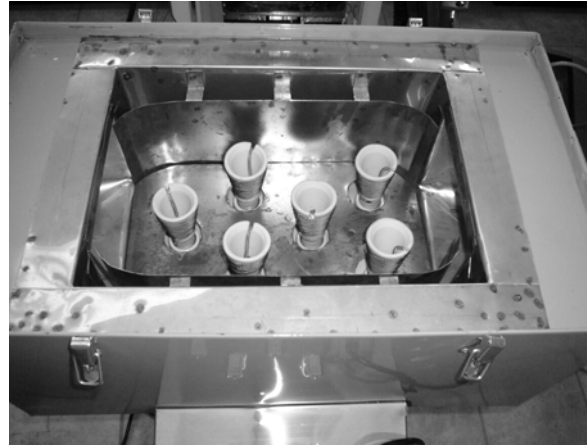


Figura 4. Banco de resistencias

2.1.4 Sistemas de adquisición de datos

Flujo de agua.- Para su medición se utilizó un recipiente con volumen conocido y un cronómetro.

Flujo volumétrico de aire.- Se utilizó un anemómetro tipo turbina a la entrada de la columna de evaporación, este instrumento permite el monitoreo en tiempo real y también se comunica con la computadora, almacenando los datos colectados directamente en disco.

Potencia suministrada al aire por resistencias.- Se hizo uso de un wattímetro adquisitor de datos, en la alimentación eléctrica del banco de resistencias, también se conectó directamente a la computadora.

Temperaturas.- Se utilizó una unidad central de adquisición de datos (Agilent 34970A) (figura 5). Se utilizaron termopares tipo T (cobre-constantan) y J (hierro-constantan) para las mediciones. Este dispositivo permitió la medición simultánea de todas las temperaturas del sistema en estudio.



Figura 5. Agilent 34970A

En la figura 5 se presenta el instrumento Agilent 34970A. El cual permite tomar las siguientes temperaturas:

Tabla 1. Tipo y ubicación de termopares

Tipo/ Ubicación
T Aire de entrada a banco de resistencias
T Aire en salida de banco de resistencias
Tbs de Entrada a columna de evaporación
Tbh de Entrada a columna de evaporación
Tbs de Salida de columna de evaporación
Tbh de Salida de columna de evaporación
T Agua de entrada a columna de evaporación
T Agua de salida de columna de evaporación
T Ambiente

[3], [4] y [5]

Todos los dispositivos para adquisición de datos utilizados en los experimentos permitieron almacenar la información en disco, y visualizarla simultáneamente mediante gráficas en tiempo real.

2.2 Procedimiento de puesta en operación

2.2.1 Suministro de agua a la columna de evaporación

Para este propósito se preparó el equipo para hacer recircular agua (ver sección 2.1.1). Al probar este sistema se encontró que la resistencia estaba quemada, por lo que se procedió a adquirir una de reemplazo. Una vez instalado el reemplazo se probó el sistema y se verificó el correcto funcionamiento, es decir, el rendimiento de la bomba, el dispositivo de calefacción y el de refrigeración. Finalmente se puso en operación el sistema de suministro de agua caliente.

2.2.2 Suministro de aire a la columna de evaporación

Para lograr un flujo de aire a través de la columna de evaporación, se preparó un equipo específico para este fin (descrito en la sección 2.1.2). Una vez conectado el ventilador al sistema, éste se puso y para obtener un valor del gasto volumétrico que entregaba el ventilador se colocó un anemómetro tipo turbina a la entrada de la columna de evaporación, posteriormente se observó un buen desempeño y finalmente se puso en operación el sistema de suministro de aire.

2.2.3 Suministro de energía para calentar el aire

Se preparó un dispositivo para calentamiento regulado del aire de entrada al sistema (descrito en la sección 2.1.3). Se comenzó con colocar y ajustar resistencias eléctricas que le van a dar al aire la energía térmica y con esto tratar de secar el aire lo más posible antes de entrar a la columna de evaporación. Dentro de los ajustes del banco de resistencia se determinó que se debía extraer un regulador de potencia ya que su comportamiento era deficiente. Finalmente se puso en operación el banco de resistencias.

2.2.4 Sistemas de adquisición de datos

Flujo de agua.- La medición de la tasa de flujo de agua se hizo mediante un recipiente con volumen conocido y un cronómetro. Una vez que el sistema está en funcionamiento y en estado estable, se realizaron varios ensayos para determinar un flujo correcto de agua.

Flujo volumétrico de aire.- Se instaló un anemómetro tipo turbina a la entrada de la columna de evaporación, el cual transmitía la información directamente a la computadora para su almacenamiento durante el transcurso de los experimentos.

Potencia suministrada al aire por resistencias.- Se instaló un wattímetro en el banco de resistencias, también conectado a la computadora para registrar y almacenar sus lecturas.

Temperaturas.- Para la medición de las diversas temperaturas requeridas, se instaló un sistema de adquisición de datos (Agilent 34970A).

3. Procedimiento para el análisis de los resultados obtenidos del sistema experimental

3.1 Determinación de humedad específica (absoluta) y relativa

La Humedad específica es la masa de vapor de agua presente en una masa unitaria de aire seco y se representa por ω

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg vapor de agua / kg aire seco}) \quad (3.1.1)$$

La humedad específica también se puede expresar como:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_a V}{R_a T}} = \frac{P_v}{R_v} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \quad (3.1.2)$$

ó

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg vapor de agua / kg aire seco}) \quad (3.1.3)$$

La humedad específica es la cantidad real de vapor de agua en 1 kg de aire seco, en tanto que la humedad relativa es la proporción entre la cantidad real de humedad en el aire y la cantidad máxima de aire húmedo que puede contenerse a esa temperatura.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_g V}{R_g T}} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.1.4)$$

Si se combinan las ecuaciones (3.1.3) y (3.1.4), también se puede expresar la humedad relativa como

$$\phi = \frac{\omega P_v}{(0.622 + \omega) P_g} \text{ y } \omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (3.1.5)$$

Entalpías

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, por ello la entalpía del aire se expresa en términos de las entalpías del aire seco y del vapor de agua. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, la cantidad de aire seco en la mezcla aire-agua-vapor permanece constante, pero la cantidad de vapor de agua cambia.

La entalpía total (una propiedad extensiva) del aire atmosférico es la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (3.1.6)$$

$$h = \frac{H}{m} h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v \quad (3.1.7)$$

ó

$$h = h_a + \omega h_g \quad (\text{kJ/kg aire seco}) \quad (3.1.8)$$

Puesto que h_v es aproximadamente igual a h_g . (Ver figura 6). La entalpía del aire húmedo (atmosférico) se expresa por unidad de masa de aire seco, no por unidad de masa de aire húmedo.

Esta aproximación se debe a que a bajas presiones (como la presión relativa del vapor en el aire húmedo), el vapor saturado cuya entalpía es h_g , tiende a comportarse como gas ideal, por lo que h_v y h_g tienen valores similares si se evalúan a la misma temperatura.

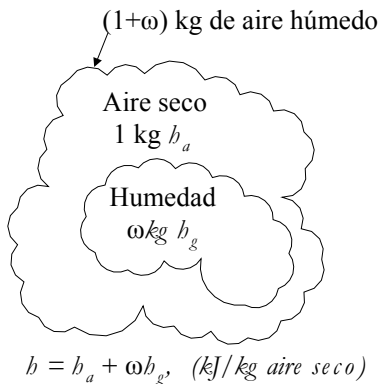


Figura 6. Entalpía en el aire.

Medición de la humedad relativa del aire

En este trabajo la medición de la humedad relativa del aire se hizo a través de la medición de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo.

Temperatura de bulbo seco

A la temperatura del aire atmosférico, medida con un termómetro simple, se le denomina la **temperatura de bulbo seco**.

Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura medida con un termómetro cuyo bulbo está cubierto con una mecha de algodón saturada con agua, y sobre la cual fluye el aire del cual se va a determinar su humedad relativa, como se muestra en la figura 7.

El principio básico implicado es similar al de la saturación adiabática. Cuando el aire no saturado pasa sobre la mecha húmeda, un poco de agua de la mecha se evapora. Como resultado, disminuye la temperatura del agua y se crea una diferencia de temperatura (que es la fuerza impulsora para la transferencia de calor) entre el aire y el agua. Después de un tiempo la pérdida de calor del agua por evaporación es igual a la ganancia de calor del aire y la temperatura del agua se estabiliza. En este punto la lectura del termómetro es la temperatura de bulbo húmedo [1].

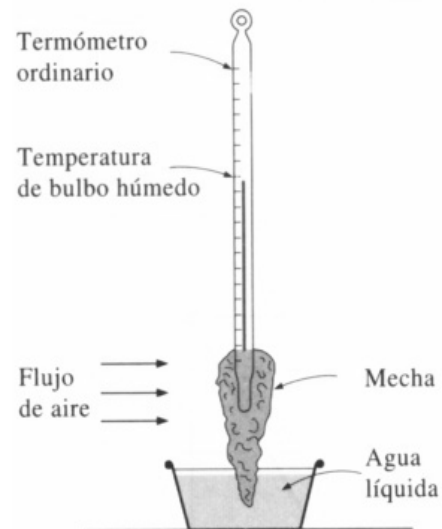


Figura 7. Un arreglo simple para medir la temperatura de bulbo húmedo.

3.2 Balance de materia y energía

La modelación matemática de los procesos que ocurren dentro de la torre empacada fue presentada en otro trabajo previo [2], en el cual se realizaron balances de materia y energía en un volumen de control, dentro de la torre empacada, figura 8, y se obtuvo un sistema de dos ecuaciones diferenciales acopladas, que posteriormente fueron integradas numéricamente a lo largo de la altura de la torre

empacada para obtener el comportamiento térmico del aire y del agua a su paso por la columna.

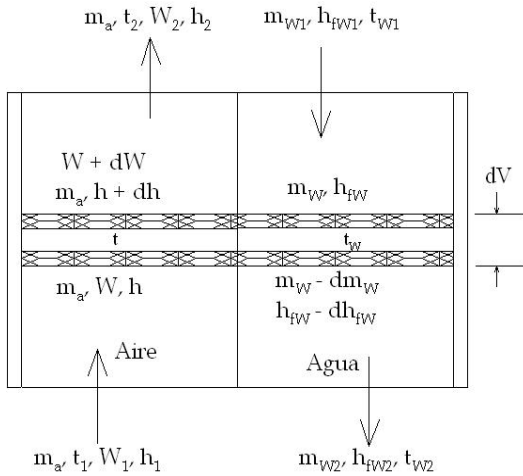


Figura 8. Volumen de control.

En este trabajo se reporta solo la preparación del equipo experimental con el cual se desea probar el funcionamiento de ese tipo de torre empacada, para validar, o rechazar, las predicciones del modelo matemático.

4. Resultados y discusión

El objetivo final de la torre empacada experimental aquí descrita es el de permitir estudiar el comportamiento de tal geometría trabajando bajo diversas condiciones de flujos y temperaturas de aire y agua, así como el efecto de utilizar diversos materiales de empaque y varias densidades de empaque. El objetivo de este trabajo es, sin embargo, reportar la fase de preparación del dispositivo experimental, describir la instrumentación utilizada y los resultados obtenidos durante las corridas de prueba.

Se reportan resultados obtenidos en dos corridas experimentales, en las cuales se utilizaron materiales de empaque diferentes.

Tabla 2. Condiciones para las corridas

Corrida	Empaque	Número de Empaques	Flujo de agua (L/min.)
1	Coolpad	3	4.75
2	Excelsior	3	4.75

4.1 Corrida número 1

En esta prueba se mantuvo un flujo de aire constante. Partiendo de una condición de temperaturas estables, se procedió a encender una resistencia de 460 W durante 30 minutos, para luego apagarla. La figura 9 muestra el comportamiento del flujo de aire y la potencia suministrada. El flujo de aire se mantuvo constante en $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$. durante toda la prueba.

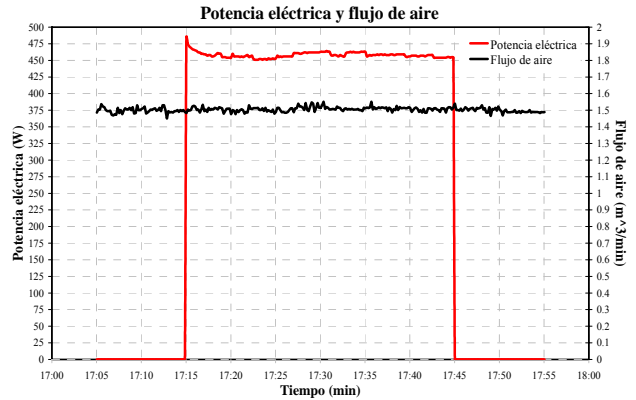


Figura 9. Potencia eléctrica y flujo de aire

4.1.1 Temperaturas

El comportamiento de las temperaturas en el sistema se muestra en la figura 10, en donde se puede observar el tiempo requerido por el sistema para alcanzar un estado estable.

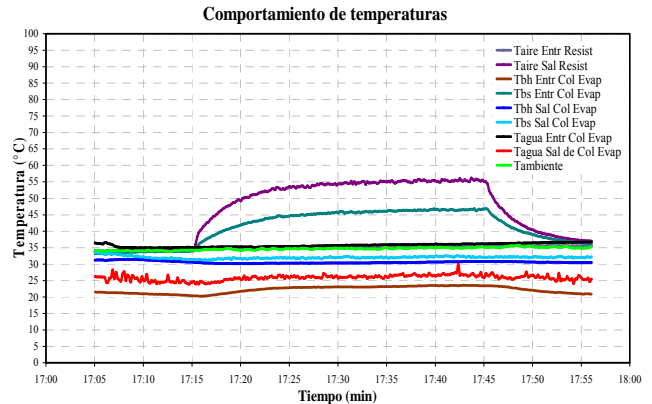


Figura 10. Comportamiento de temperaturas

4.1.2 Humedades

El efecto del aumento de temperatura en el aire sobre la evaporación, y consecuentemente sobre la humedad del aire, se muestra en la figura 11.

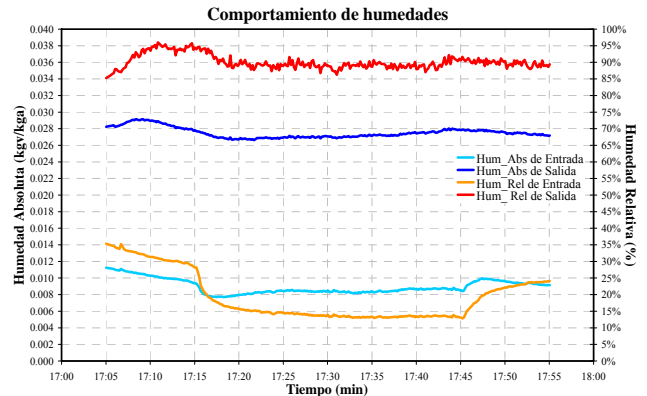


Figura 11. Comportamiento de humedades

4.2 Corrida número 2

En esta corrida se utilizó un material de empaque diferente, y además se utilizaron varias potencias de calentamiento y varios flujos de aire, para observar el comportamiento dinámico del sistema.

Esta corrida permite observar la gobernabilidad que se tiene sobre las variables importantes del sistema, como son el flujo de aire y la tasa de energía suministrada al mismo. La figura 12 muestra la potencia térmica suministrada y el flujo de aire.

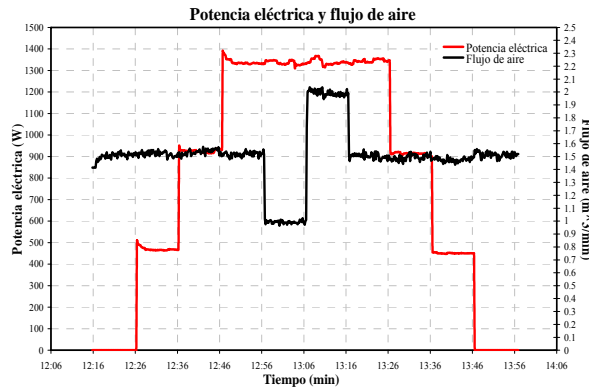


Figura 12. Potencia eléctrica y flujo de aire

4.2.1 Temperaturas

La figura 13 muestra el comportamiento de la temperatura en los diversos puntos del sistema estudiado. Esta corrida permitió comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas de medición instalados, ya que una de las principales necesidades para lograr los objetivos en este proyecto es la plena certidumbre de obtener los datos correctos en cada corrida. Además los datos obtenidos fueron corroborados con termómetros digitales Fluke 54 II.

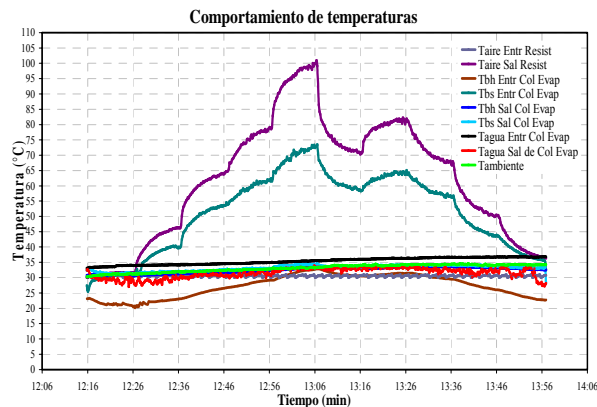


Figura 13. Comportamiento de temperaturas

4.2.2 Humedades

La figura 14 muestra finalmente el comportamiento de las humedades relativa y específica del aire que circula

por el sistema. En ella se puede observar que utilizando este dispositivo experimental es posible gobernar y medir adecuadamente el proceso de evaporación, que era el objetivo deseado.

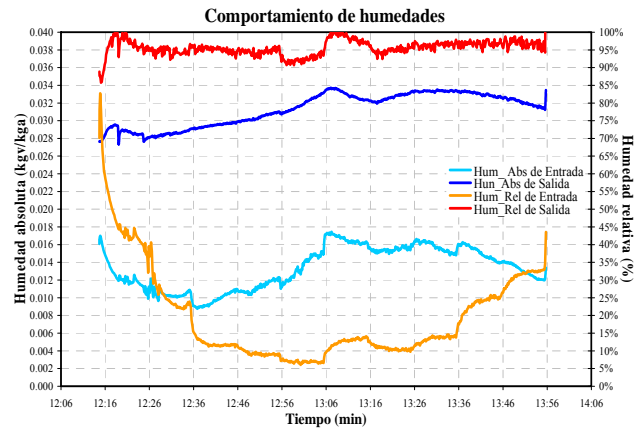


Figura 14. Comportamiento de humedades

4.3 ganancia de humedades

Haciendo referencia a las figuras 11 y 14, se presentan a continuación las relaciones de humedades relativas y absolutas de entrada y salida de la columna de evaporación (tablas 3 y 4), Tablas en las cuales se puede visualizar una clara ganancia de humedad en la salida de la columna de evaporación con respecto a la entrada de esta.

Para la determinación de estos datos se hizo uso de un programa creado en Visual Basic, el cual permitió obtener humedades tanto absolutas como relativas mediante las ecuaciones descritas en el apartado 3.1, tomando las temperaturas correspondientes en los puntos de interés.

Tabla 3. Relación de humedades absolutas y relativas (corrida 1)

Ent a Col		Sal de Col		Δ Hum _Abs kgv/kg	Δ Hum _Rel %
Hum_Abs kgv/kg	Hum_ Rel %	Hum_Abs kgv/kg	Hum Rel %		
0.0090	19.38	0.0275	90.12	0.0185	70.74

Tabla 4. Relación de humedades absolutas y relativas (corrida 2)

Ti- em- po	Ent a Col		Sal de Col		Δ Hum _Abs kgv/kg	Δ Hum _Rel %
	Hum_Abs kgv/kg	Hum_ Rel %	Hum_Abs kgv/kg	Hum Rel %		
10	0.0126	47.45	0.0286	95.66	0.016	48.21
20	0.0103	24.06	0.0286	94.65	0.0183	70.59
30	0.0098	11.88	0.0295	95.05	0.0197	83.17
40	0.0113	9.11	0.0305	94.35	0.0192	85.24
50	0.0140	7.15	0.0321	92.88	0.0181	85.73
60	0.0165	12.72	0.0329	98.28	0.0164	85.56
70	0.0155	10.72	0.0327	95.00	0.0172	84.28
80	0.0157	13.89	0.0333	96.36	0.0176	82.47
90	0.0150	23.88	0.0330	96.74	0.018	72.86
---	0.0129	31.79	0.0320	96.75	0.0191	64.96

4. Conclusiones

Para visualizar y concluir el resultado de este trabajo es conveniente observar las figuras 11 y 14, ya que estas muestran la evolución del proceso de humidificación del aire a su paso por el interior de la torre de evaporación para ambas corridas.

En la tabla 3 (que muestra los resultados de la corrida #1) se observa un incremento para ambas humedades, y a partir de estos resultados se concluye que realmente se obtiene una ganancia de humedad, es decir, que el aire de salida contiene mayor cantidad de vapor de agua por unidad de aire seco que en la entrada de la columna de evaporación.

Por otra parte, para la corrida #2 (que puede ser visualizada en la tabla 4) se observa un incremento de humedades por etapas, es decir, que en cada 10 minutos se tuvieron cambios en las humedades debido a cambios en las variables gobernables.

Para la corrida dos y observando la figura 13, se concluye también que sólo hace falta esperar poco menos de 10 minutos para obtener un equilibrio en el sistema de temperaturas.

Una conclusión muy interesante es que se aprecia que para lograr la máxima tasa de evaporación en la torre empacada, se deberá buscar que el aire de entrada tenga la mínima humedad absoluta, mientras que a la salida deberá tener la máxima posible.

Por otro lado, para alcanzar la máxima humedad posible en el aire a su paso por la torre de evaporación, se deberá contar con un suministro de agua a la máxima temperatura posible y lograr que el aire salga de la torre en condiciones de saturación y a la temperatura más cercana posible a la del agua de suministro.

Con respecto al uso de energías renovables para destilar agua se concluye que es una excelente fuente alternativa de energía, ya que es renovable y no contaminante. Además permite utilizar una fuente de energía disponible en forma abundante en México.

Finalmente se concluye que en el sistema de torre experimental empacada para destilación solar de agua se obtienen resultados satisfactorios.

Referencias

- [1] Cengel, Y.A. y Boles, M.A. Termodinámica, 4a Edición, McGraw-Hill (2003)
- [2] Martín-Domínguez, I.R. y Alarcón-Herrera, M.T. Transferencia de calor y masa en una columna vertical empacada, para la destilación solar de agua. Memorias del Congreso Internacional de Metal Mecánica. CIMM 2002, Inst. Tec. de Durango, México. Edit.:Pérez Galindo, J.A. (2002)
- [3] Doebelin, E.O. Measurement systems, Applications and design, 4th Edition, McGraw-Hill International Editions, Mechanical Engineering Series. (1990)
- [4] Practical Temperature Measurements. Application Note 290, Agilent Technologies (2000). <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>
- [5] Figliola, R.S. Beasley, D.E. Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & Sons. (1991)

Memorias del Congreso Internacional de Metal-Mecánica 2005

Organizado por el Departamento de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico de Durango
del 3 al 7 de Octubre de 2005 en la Cd. de Durango, Dgo., México

Prólogo

Comité organizador

Índice de conferencias

Otros Eventos

Convocatoria CIMM 2006

Aplicaciones extras



Editor:

Dr. José Arturo Pérez Galindo