

# REGENERACION DE SOLUCIONES DE $Cl_2Ca$ EN TORRES EMPACADAS

## RESULTADOS COMPUTACIONALES Y EXPERIMENTALES

Luis Cardón\* y Judith Franco

INENCO<sup>#</sup>, Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

### Resumen

Algunos sistemas para la regeneración de soluciones desecantes o para la deshumidificación de aire utilizan lechos o torres empacadas como equipo de transferencia de calor y masa.

En este trabajo se estudian las posibilidades de una torre rellena con piedra. Se describen en primer lugar las ecuaciones de balance de materia y energía que, conjuntamente con las ecuaciones de equilibrio líquido-vapor para la solución de  $Cl_2Ca$  empleadas, permiten dimensionar y simular la torre.

El prototipo experimental consiste en una torre rellena de piedra conectada a un colector solar de aire. Se obtuvieron datos de temperatura y humedad de aire a la entrada y salida de la torre, y de temperatura del líquido.

Se realizó también un estudio a partir de los datos experimentales de la variación de la razón de evaporación cuando opera la torre.

res y enfriadores evaporativos. Un sistema de este tipo permite un control total de las condiciones dentro del edificio, y se esquematiza en la Fig. 1 en una versión muy simplificada.

La solución absorbente se regenera en la torre de absorción, evaporando agua al ponerse en contacto con aire caliente proveniente de un colector solar Fig. 1a. El aire no se recircula ya que se saturaría impidiendo mayor evaporación. La Fig. 1b muestra la etapa de enfriamiento.

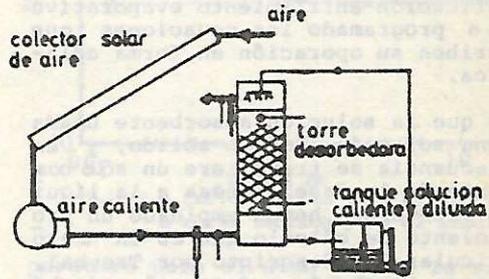


Fig. 1a

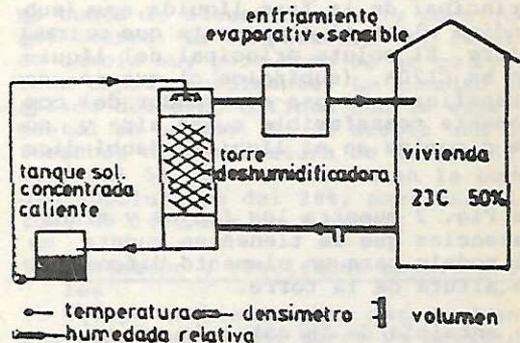


Fig. 1b

Secario del CONICET

Instituto UNSa-CONICET

El aire en condiciones de confort se extrae de la vivienda y se seca en la torre empacada al ponerse en contacto con la solución concentrada y fría. El aire que sale de la torre, más caliente, se enfría sensiblemente y luego se enfría evaporativamente, llegando a condiciones de temperatura y humedad tales que al ser introducido nuevamente en la vivienda satisfaga la carga térmica y de humedad manteniendo las condiciones de confort.

En el sistema esquematizado la torre empacada cumple las funciones de absorbedor y desorbedor de vapor de agua desde la solución, siendo la solución empleada agua-Cl<sub>2</sub>Ca.

Leboeuf y Lof (1) y Lof (2) han estudiado sistemas más elaborados que operan con el mismo principio habiendo utilizado soluciones de ClLi y trietilenglicol respectivamente.

## 2. Estudio teórico

Con el propósito de evaluar otras situaciones fuera del rango de nuestras posibilidades experimentales y el comportamiento de la torre de absorción como un componente de sistemas solares de refrigeración que utilizan deshumidificación-enfriamiento evaporativo se ha programado las ecuaciones que describen su operación en forma adiabática.

Dado que la solución absorbente usada es una solución líquido-sólido, y en consecuencia se transfiere un sólido como componente de la fase gaseosa a la líquida o viceversa, hemos empleado un procedimiento de cálculo que es un caso particular del descrito por Treybal, (3) para absorción y desorción adiabáticas en torres empacadas.

Para el presente caso, el disolvente principal de la fase líquida, agua, (subíndice a) es el componente que se transfiere. El soluto principal del líquido es Cl<sub>2</sub>Ca, (subíndice c) que no se transfiere. El gas acarreador del componente transferible a, es aire y no se disuelve en el líquido, (subíndice b).

La Fig. 2 muestra los flujos y transferencias que se tienen en cuenta en el modelo para un elemento diferencial de altura de la torre.

La entalpía de la solución es:

$$Hl = Cl (t_l - t_o) + \Delta Hs$$

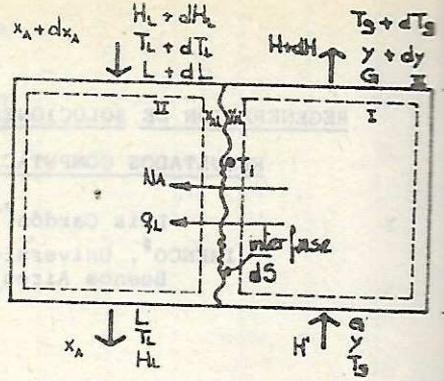


Fig. 2 Elemento diferencial

donde la temperatura de referencia es igual a 18 C y el calor integral de la solución es  $Hs = 1,050$  (J/kg).

El calor específico de la solución,  $C_l$ , depende de la concentración y de la temperatura de la solución.

La entalpía del gas es:

$$Hg = Cg (tg - to) + Ya (Ca (tg - to) + \lambda_o) \quad (2)$$

el calor latente de vaporización del agua se lo toma a 18 C,

$$\lambda_o = 136552 \text{ (J/kg C)}.$$

Para la transferencia de masa en la interfase se considera la teoría de la doble resistencia. Los coeficientes para la fase gaseosa  $Fga$  y para la fase líquida  $Fla$ . La razón de transferencia de masa para el gas es:

$$Na.a.dz = Fga \cdot \ln \left( \frac{1 - ya,i}{1 - ya} \right) \quad a.dz = Cb.dya \quad (3)$$

y para el líquido

$$Na.a.dz = Fla \cdot \ln \left( \frac{1 - xa}{1 - xa,i} \right) \quad a.dz \quad (4)$$

la transferencia de calor en la interfase es:

$$qg.a.dz = hg.a.(tg - ti) \cdot dz \quad (5)$$

donde  $hg$  es el coeficiente de transferencia de calor corregido para considerar la transferencia simultánea de calor y de masa.

Con las ecuaciones precedentes y los balances de entalpía para los entornos I, II y III, Fig. 2, obtenemos las ecuaciones para las condiciones de la interfase y los gradientes de tempe-

temperatura y contenido de humedad del componente a en el gas que permitirán recorrer la altura de la torre.

$$t_i = t_l + \frac{G_b}{h_{la}} \cdot (H_{a,i} - C_a \cdot (t_g - t_o) - \lambda_o) \cdot \frac{dY_a}{dz} - \frac{G_b}{h_{la}} \cdot (C_b + Y_a \cdot C_a) \cdot \frac{dt_g}{dz} \quad (6)$$

$$Y_{a,i} = Y_a \cdot \left( \frac{1 - X_{a,1}}{1 - X_{a,i}} \right) \cdot \left( \frac{F_{la}}{F_{ga}} \right) \quad (7)$$

$$\frac{dt_g}{dz} = \frac{h_{ga} \cdot (t_g - t_i)}{G_b \cdot (C_b + Y_a \cdot C_a)} \quad (8)$$

$$\frac{dY_a}{dz} = \frac{F_{ga} \cdot a}{G_b} \cdot \ln \left( \frac{1 - Y_{a,i}}{1 - Y_a} \right) \quad (9)$$

se utilizó la correlación de Mullick, (4), para la curva de equilibrio líquido-vapor de la solución de  $Cl_2Ca$ .

$$P = (-3252.52 + 266/\sqrt{T}) \cdot \exp(0.05 \cdot (T - 41.5)) \quad (10)$$

#### 4. Diseño computacional

El modelo teórico precedente ha sido llevado al programa CDSORI en lenguaje FORTRAN, para el caso de una torre empacada con sillas de Berl. El cálculo de los coeficientes de transferencia de masa se realiza con la subrutina CBERL según datos de Treybal, (3) y puede ser reemplazada con facilidad para considerar otro empaque. Las propiedades físicas de la solución y del aire en función de la concentración, contenido de agua y temperatura se realizan mediante las subrutinas CSUB y CSUB2.

En su estado actual el programa permite diseñar la torre, esto es, obtener la altura de la misma, requiriéndose como datos las condiciones de entrada y salida del aire y las condiciones de entrada de la solución, así como los flujos de ambos.

A partir de un primer balance global sobre toda la torre se calculan las condiciones de salida de la solución. Con el estado conocido en el fondo de la torre y a partir de allí se calculan paso a paso las condiciones de la interfase y las del límite superior de un elemento diferencial de altura. Se lleva así el cálculo hasta que la temperatura del aire en el límite superior de algún elemento diferencial alcanza la temperatura dada para la salida del aire en la parte superior de

la torre.

Para cada elemento se realiza una doble iteración. Se supone primero la temperatura y la concentración para la interfase. Con estos valores se resuelve las ecuaciones 7 y 10 iterativamente hasta obtener los verdaderos valores de concentración del gas y de la solución en la interfase. Con éstos se calcula la temperatura de la interfase con la ecuación 6 y se verifica su igualdad con el valor supuesto previamente. Se repite el cálculo hasta obtener un buen ajuste. Luego se calculan las condiciones sobre el límite superior del elemento diferencial con las ecuaciones 8 y 9.

#### 4. Resultados computacionales

La Fig. 3 muestra los perfiles de tem-

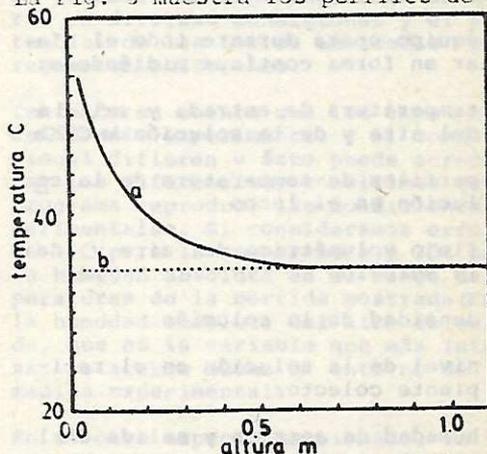


Fig. 3 a Curva teórica para el aire  
b Curva teórica para el líquido

peratura para el aire y para la solución obtenidos para condiciones de trabajo extraídas de una de las experiencias realizadas. Las temperaturas coinciden perfectamente, ya que el programa busca la altura necesaria para que así ocurra. La temperatura del líquido cambia muy poco como se ha comprobado experimentalmente. La humedad de salida del aire difiere con la experimental en un 44%. Si se acepta una diferencia de temperatura de salida del aire del 5%, la diferencia en la humedad absoluta es del 28%, para una altura de la torre de 1 metro.

#### 5. Prototipo y resultados experimentales

El equipo utilizado para esta experiencia consiste en una torre ya existente, de un metro de altura y 30 cm de diámetro, rellena con piedra (5), co-

nectada a un colector solar de aire preexistente de 75 m<sup>2</sup> de superficie.

El aire caliente y seco penetra a la torre por la parte inferior, la solución se introduce en la zona superior mediante un distribuidor y corre por las piedras ofreciendo una mayor área de contacto con el aire.

En la superficie interfacial se produce la transferencia de calor del aire a la solución provocando la evaporación del agua y la regeneración de la solución. El aire sale de la torre por la parte superior con menor temperatura y mayor humedad; la solución se colecta en un recipiente y se recircula por la torre. Ver esquema de funcionamiento en la Fig. 1a.

El equipo opera durante todo el día solar en forma continua midiéndose:

1. temperatura de entrada y salida del aire y de la solución de Cl<sub>2</sub>Ca
2. perfiles de temperatura de la solución en el lecho
3. flujo volumétrico del aire y de la solución
4. densidad de la solución
5. nivel de la solución en el recipiente colector
6. humedad de entrada y salida del aire.

Una de las curvas características obtenidas para la evolución de la temperatura del aire y de la solución se muestra en la Fig. 4. La torre co

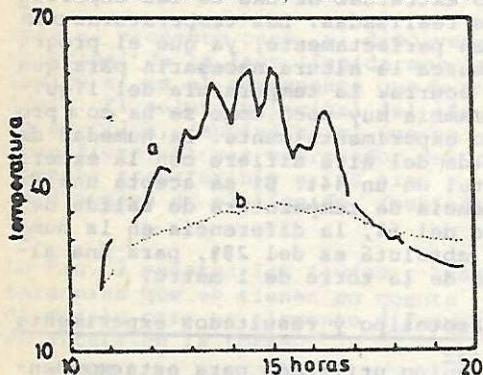


Fig. 4 a-Temperatura del aire a la salida del colector

b-Temperatura del líquido en el recipiente.-

menzó a funcionar a las 10 hs 30' a.m. en un día soleado y claro. La temperatura máxima del aire fué de 60 C a la salida del colector a las 15 hs, como muestra la curva a de la misma figura, las irregularidades en el comportamiento de la temperatura se deben probablemente a una mala ubicación de la termocupla que la medía; la cual al estar salpicada por la solución acusaba los valores de la temperatura de bulbo húmedo; por ésto, la curva de temperatura de aire seco es la envolvente superior de la misma.

En la misma figura la curva inferior es la variación de temperatura del líquido en el recipiente colector en función del tiempo, ésta es un valor promedio de las temperaturas de entrada y salida del líquido a la torre, la de entrada está por debajo y la de salida por encima de la misma el aumento de temperatura se debe a que la energía cedida por el aire no sólo se gasta en evaporar, sino que también produce un aumento de temperatura en la solución que es de 1 ó 2 C aproximadamente.

La Fig. 5 muestra la variación de volumen en el recipiente colector de la solución en función del tiempo, la pendiente de la curva en cada punto es la razón de evaporación del agua.

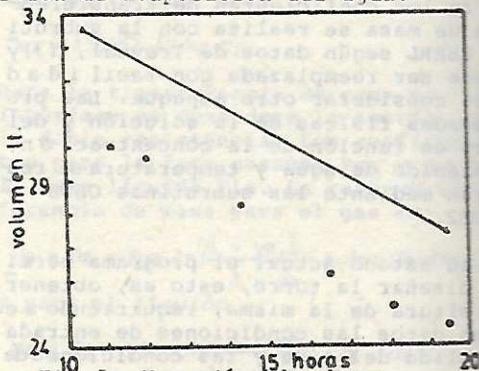


Fig. 5 - Variación del volumen

La razón de evaporación no es constante sino que varía con la temperatura de entrada del aire. Esto se deduce de la Fig. 6 donde se grafica la humedad absoluta del aire a la entrada y salida de la torre, en kgs de agua/ kgs de aire seco, curvas 6a y 6b respectivamente. La diferencia de estas dos curvas (6c) es la cantidad de agua extraída a lo largo del día; el producto de esta diferencia por el flujo másico de aire seco es la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo que es una función de la temperatura de entrada del aire Fig. 7a.

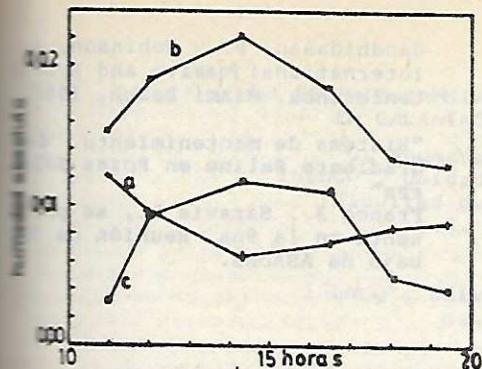


Fig. 6: a Humedad del aire a la entrada de la torre  
 b Humedad del aire a la salida de la torre  
 c Diferencia de humedades

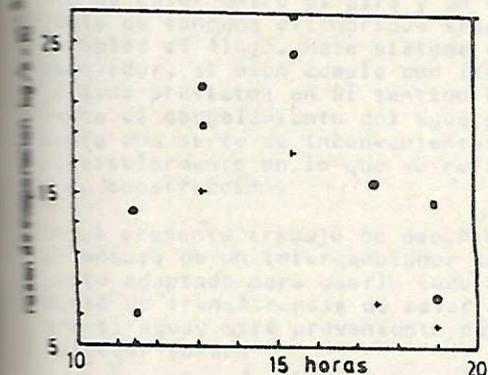


Fig. 7: Razones de evaporación calculadas  
 □ Utilizando  $\Delta V/\Delta t$   
 ○ Utilizando la ley de la dilución  
 ♦ Utilizando diferencia de humedades

Existen otras dos formas de estimar la razón de evaporación a partir de los datos experimentales. Una de ellas es cuando la variación de volumen en un intervalo de tiempo o sea  $\Delta V/\Delta t =$  razón de evaporación, esto se grafica en la Fig. 7b. En la misma figura se grafican los valores obtenidos a partir de la diferencia de las humedades absolutas del aire, curva 7a.

El tercer método para poder obtener la razón de evaporación en una forma indirecta es a partir de los datos de concentración y densidad, medido el primero y calculado el segundo a partir de la densidad y de la temperatura, considerando la ley de disolución:

$$V_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1 = V_2 \cdot C_2 \cdot \rho_2$$

se puede encontrar la variación del volumen conociendo el volumen inicial.

Si a esta variación la dividimos por el intervalo del tiempo, puntos c de la Fig. 7, que dentro de los límites del error es igual a las dos anteriores.

Los errores cometidos en cada una de las determinaciones varía entre el 20 y el 40%.

En un día de operación, la torre evaporó 6 lts de agua con flujos de aire y agua de  $0,014 \text{ m}^3/\text{seg}$  y  $10,1 \text{ lts}/\text{min}$ , respectivamente. La concentración inicial fué 28,2% y la final 33,2%, el aumento de concentración fué entonces de un 5%.

### Conclusiones

El trabajo presenta dos modelos a evaluar, la capacidad del modelo teórico de predecir el funcionamiento de la torre en diversas condiciones y el potencial de las torres empacadas para regenerar soluciones.

Teniendo en cuenta que los empaques del modelo experimental y el computacional difieren y esto puede acrecentar las diferencias, concluimos que el programa reproduce las condiciones experimentales. Si consideramos errores de 1 C para la temperatura y 20% para la humedad absoluta en el rango de temperaturas de la corrida mostrada (Fig. 3) la humedad absoluta del aire calculada, que es la variable que más interesa, se acerca mucho al entorno de la medida experimental.

En el otro aspecto mencionado, la torre evapora aproximadamente 0,06 lts de agua por hora. Este valor puede ser superado con un mayor flujo de aire sin afectar la temperatura del aire a la salida del colector, que en las experiencias realizadas trabajó con velocidades muy por debajo de las de operación.

### Nomenclaturas

- a : superficie interfacial específica  $1/\text{m}$
- c : calor específico  $\text{J}/\text{kg mol K}$
- $F_{i,j}$  : coeficiente de transferencia de masa para la fase i para el compuesto j  $\text{kmol}/\text{m}^2 \text{seg}$
- G : flujo molar superficial  $\text{kmol}/\text{m}^2 \text{seg}$
- H : entalpía molar del aire húmedo por mol de aire seco, referido a to  $\text{J}/\text{kmol}$

$H_{i,j}$	: entalpía parcial del compuesto $i$ en la solución a la concentración $x_j$ y a la temperatura $t_j$	J/kmol
$h$	: coeficiente de transferencia de calor	$W/m^2 K$
$P$	: presión de vapor de la solución	$N/m^2$
$N$	: razón de transferencia de masa	$kmol/m^2 \text{ seg}$
$q$	: flujo de calor	$W/m^2$
$t$	: temperatura	$C$
$x$	: concentración en el líquido, fracción molar	$kmol/kmol$
$y$	: concentración en el aire, fracción molar	$kmol/kmol$
$Y$	: humedad absoluta del aire	$kmol/kmol$
$z$	: altura de la torre	$m$
$\lambda$	: calor latente de vaporización	$J/kg$
$\xi$	: concentración de la solución	$kg/kg$

#### Subíndices

a	: agua
b	: aire
g	: aire húmedo
i	: interfase
l	: solución
o	: referencia

#### Referencias

1. "Open Cycle Absorption Cooling Using Packed-Bed Absorbent Reconcentration"  
Lebóeuf C.M., Lof G.D.G., AS/ISES Proceeding, Phoenix, Arizona 1980.
2. "Cooling with Solar Energy". Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Arizona 1955.
3. Operaciones de Transferencia de Masa"  
Treybal, R., Mc Graw Hill, 1980.
4. "Analysis and simulation of forced flow solar collector-regenerator"

Gandhidasan, P. y Robinson, A. International Passive and Hybrid Conference. Miami Beach, 1980.

5. "Sistema de mantenimiento de Gradiente Salino en Pozas Salinas"  
Franco J., Saravia L., se presenta en la 9na. Reunión de Trabajo de ASADES.