

# PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AIRE HUMEDO II: FENOMENOS DE TRANSFERENCIA

Diego Saravia\* y Graciela Lesino†

INENCO – Universidad Nacional de Salta

Calle Buenos Aires 177, 4400, Salta.

Tel/fax: (87) 251034; Email: dsa@ciunsa.edu.ar

## Introducción

A fin de poder simular correctamente el comportamiento de los equipos de aire acondicionado de ciclo abierto y desecantes líquidos regenerados por energía solar se ha automatizado el cálculo de las propiedades del aire húmedo relacionadas con los fenómenos de transferencia. Estas propiedades se integran a la biblioteca de funciones del programa PSICRO [11, 10].

Las sustancias involucradas y los códigos utilizados son: A: Aire seco; W: Vapor de Agua; AW: Aire Húmedo; WL: Agua líquida, ( $T < 0$ : hielo).

## Nuevas propiedades incorporadas

### Conductividad Térmica

[J/(Kms)] Sustancias: A, AW, W

KondT# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)<sup>1</sup>

Los datos del aire seco y del vapor de agua, han sido tomados de [4, 9], se utilizaron regresiones múltiples de los datos que allí se presentaban. [9] toma los datos a su vez de la circular 564 de la NBS. No se tiene en cuenta a la presión, aunque consideraciones teóricas de la mecánica estadística predicen que no hay variaciones con la presión (bajo condiciones ideales). Esto debe tomarse entonces como una primera aproximación al problema.

Para el aire húmedo se utiliza una fórmula lineal en función de la mezcla. Esta fórmula (de Wilke) es aproximada. Los datos en realidad se comportan en forma cuadrática con el máximo en la zona intermedia de concentraciones. En una próxima versión se corregirá este efecto, por el momento hay que tener cuidado al utilizar los valores de todas las variables (conductividad, viscosidad y todas las derivadas) del aire húmedo. Por este motivo el programa produce diferencias mayores a las reales entre las propiedades del aire húmedo y del aire seco.

En las regresiones y las figuras las unidades son las que utilizan las fuentes y no las que entrega el PSICRO. Regresión de la conductividad del aire.

Por razones de espacio se omite el listado y gráfico de residuales.

\*Becario del CONICET

†Investigador del CONICET

<sup>1</sup>Encabezado de la función en el PSICRO.

# Conductividad termica del aire y del vapor de agua

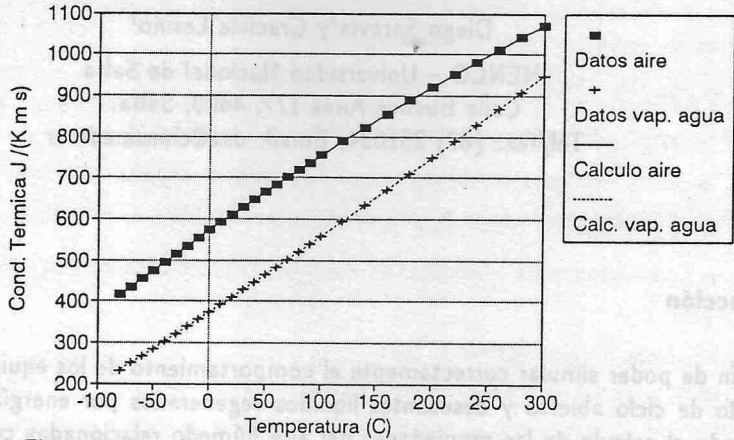


Figura 1: Comparación entre datos y correlación.

| VAR.     | REGRESSION COEFFICIENT | STD. ERROR | T(DF= 26) | PROB.  | PARTIAL r <sup>2</sup> |
|----------|------------------------|------------|-----------|--------|------------------------|
| t        | 1.896664203            | .002642831 | 717.664   | .00000 | .9999                  |
| t2       | -.000793307            | .000011400 | -69.589   | .00000 | .9947                  |
| CONSTANT | 572.703181598          |            |           |        |                        |

STD. ERROR OF EST. = .699547030

ADJUSTED R SQUARED = .999987056  
R SQUARED = .999987981  
MULTIPLE R = .999993990

### ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

| SOURCE     | SUM OF SQUARES    | D.F. | MEAN SQUARE      | F RATIO    | PROB.    |
|------------|-------------------|------|------------------|------------|----------|
| REGRESSION | 1058595.966138000 | 2    | 529297.983069000 | 1.0816E+06 | .000E+00 |
| RESIDUAL   | 12.723517213      | 26   | .489366047       |            |          |
| TOTAL      | 1058608.689655200 | 28   |                  |            |          |

## Regresión de la conductividad del vapor de agua

| VAR.     | REGRESSION COEFFICIENT | STD. ERROR | T(DF= 26) | PROB.  | PARTIAL r <sup>2</sup> |
|----------|------------------------|------------|-----------|--------|------------------------|
| t        | 1.791856178            | .002088331 | 858.033   | .00000 | 1.0000                 |
| t2       | .000415204             | .000009008 | 46.092    | .00000 | .9879                  |
| CONSTANT | 373.771968040          |            |           |        |                        |

STD. ERROR OF EST. = .552773101

ADJUSTED R SQUARED = .999993113  
R SQUARED = .999993605  
MULTIPLE R = .999996803

### ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

| SOURCE     | SUM OF SQUARES    | D.F. | MEAN SQUARE      | F RATIO    | PROB.    |
|------------|-------------------|------|------------------|------------|----------|
| REGRESSION | 1242360.745144600 | 2    | 621180.372572300 | 2.0329E+06 | .000E+00 |
| RESIDUAL   | 7.944510643       | 26   | .305558102       |            |          |
| TOTAL      | 1242368.689655200 | 28   |                  |            |          |

## Viscosidad dinámica

( $\mu$ ). [Kg/(ms)] Sustancias: A, AW, W

vis# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

Los datos utilizados son de [12, 9, 1] presentándose la misma problemática de la

# Viscosidad del aire y del vapor de agua

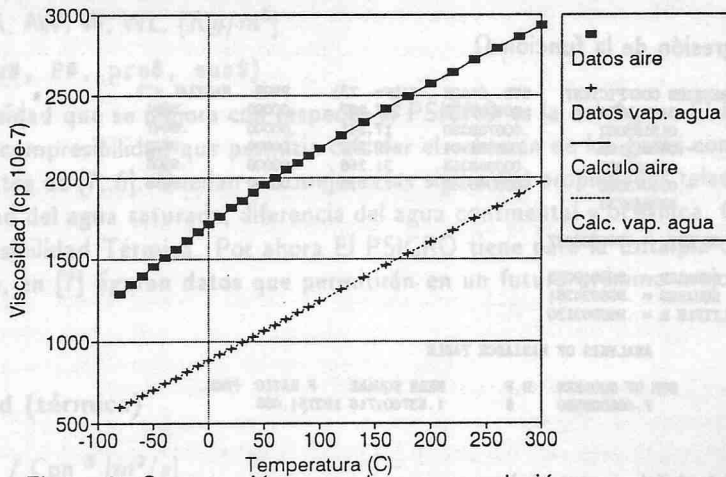


Figura 2: Comparación entre datos y correlación.

## Conductividad.

En el caso del aire seco se utilizó una fórmula derivada de la teoría de Chapman-Enskog para gases a baja densidad, utilizando la función  $\Omega$  calculada a través de una regresión múltiple a partir de una tabla. Esta función proviene de un potencial 6-12 de Lennard - Jones. Se utilizó esta fórmula en el caso del aire seco y no para el vapor de agua porque para éste ajusta mejor la regresión múltiple.

La viscosidad del aire seco esta corregida en cuanto a las variaciones de presión.

Regresión de la viscosidad del aire. (Como ya se ha dicho no se utiliza la regresión sino la fórmula semi-empírica.)

| VAR.     | REGRESSION COEFFICIENT | STD. ERROR | T(DF= 25) | PROB.  | PARTIAL r <sup>2</sup> |
|----------|------------------------|------------|-----------|--------|------------------------|
| t        | 4.964917611            | .002622934 | 1892.887  | .00000 | 1.0000                 |
| t2       | -.004298691            | .000035026 | -122.728  | .00000 | .9983                  |
| t3       | .000004203             | .000000107 | 39.167    | .00000 | .9840                  |
| CONSTANT | 1716.940105799         |            |           |        |                        |

STD. ERROR OF EST. = .647203474

ADJUSTED R SQUARED = .999998214

R SQUARED = .999998405

MULTIPLE R = .999999203

### ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

| SOURCE     | SUM OF SQUARES    | D.F. | MEAN SQUARE       | F RATIO    | PROB. |
|------------|-------------------|------|-------------------|------------|-------|
| REGRESSION | 6566057.735088200 | 3    | 2188685.911696100 | 5.2252E+06 |       |

## Regresión para la viscosidad del vapor de agua.

| VAR.     | REGRESSION COEFFICIENT | STD. ERROR | T(DF= 27) | PROB.  |
|----------|------------------------|------------|-----------|--------|
| t        | 3.608818805            | .000707414 | 5101.424  | .00000 |
| CONSTANT | 885.131204701          |            |           |        |

STD. ERROR OF EST. = .419746921

r SQUARED = .999998963

r = .999999481

### ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

| SOURCE     | SUM OF SQUARES    | D.F. | MEAN SQUARE       | F RATIO    | PROB.    |
|------------|-------------------|------|-------------------|------------|----------|
| REGRESSION | 4585195.932593500 | 1    | 4585195.932593500 | 2.6025E+07 | .000E+00 |

RESIDUAL 4.757061900 27 .176187478  
 TOTAL 4585200.689655400 28

### Regresión de la función $\Omega$

| VAR.     | REGRESSION COEFFICIENT | STD. ERROR | T(DF= 73) | PROB.  | PARTIAL r <sup>2</sup> |
|----------|------------------------|------------|-----------|--------|------------------------|
| Int      | .316582854             | .001099295 | 287.987   | .00000 | .9991                  |
| Int2     | .013168082             | .000759350 | 17.341    | .00000 | .8047                  |
| Int3     | -.040011169            | .000931104 | -42.972   | .00000 | .9620                  |
| Int4     | .012135093             | .000388253 | 31.256    | .00000 | .9305                  |
| Int5     | -.001073326            | .000046045 | -23.310   | .00000 | .8816                  |
| CONSTANT | .633849733             |            |           |        |                        |

STD. ERROR OF EST. = .002823827

ADJUSTED R SQUARED = .999919073  
 R SQUARED = .999924261  
 MULTIPLE R = .999962130

#### ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

| SOURCE     | SUM OF SQUARES | D.F. | MEAN SQUARE | F RATIO    | PROB. |
|------------|----------------|------|-------------|------------|-------|
| REGRESSION | 7.685008589    | 5    | 1.537001718 | 192751.665 |       |

### Difusividad (de materia)

[ $m^2/s$ ] Sustancia: vapor de agua en aire

Dv# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

Se toma la función de [2].

### Capacidad Calorífica a presión constante

[ $J/(K Kg)$ ] Sustancias: A, W, AW, WL.

CPN# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)<sup>2</sup>

La capacidad calorífica se obtiene calculando la derivada de la Entalpía con respecto a la Temperatura a Presión constante. Para ello se fija un  $\Delta T$  arbitrariamente pequeño y se calcula la derivada realizando la diferencia de Entalpías y dividiendo por  $\Delta T$ . Utiliza la función Entalpía del PSICRO. Esta definida para todas las sustancias para las que PSICRO calcula la Entalpía.

### Lambda: Calor latente de vaporización

Sustancia: agua. [ $J/Kg$ ]

lambdaN# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

Se calcula a través de la diferencia de Entalpías para el agua líquida y el vapor de agua. Una cuestión a hacer notar es que si se calcula este valor utilizando la ecuación de Clasius – Clapeyron donde intervienen las densidades de ambas fases y la presión de vapor se observa una buena coincidencia, mostrando la coherencia del modelo termodinámico implementado.

| t   | dif. de H | C-C     | dif porc.      |
|-----|-----------|---------|----------------|
| 0   | 2500770   | 2501480 | 2.837126E-02 % |
| 20  | 2453693   | 2456757 | .1248526 %     |
| 40  | 2406174   | 2412886 | .2789595 %     |
| 60  | 2357939   | 2370499 | .5326367 %     |
| 80  | 2308664   | 2330112 | .9290331 %     |
| 100 | 2257992   | 2292127 | 1.511752 %     |

<sup>2</sup>Se agrega una "n" luego de "Cp" pues PSICRO ya tenía un símbolo definido como "Cp"

## Densidad

Sustancias: A, AW, W, WL. [ $Kg/m^3$ ]

den# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

La única densidad que se mejora con respecto al PSICRO es la del Agua. El PSICRO daba el factor de compresibilidad que permitía calcular el volumen de los gases con exactitud. Se usaron datos de [7, 6]. Quedan por mejorar las siguientes propiedades relacionadas del agua: Densidad del agua saturada, diferencia del agua continental y oceánica, Compresibilidad, y Expansibilidad Térmica. Por ahora El PSICRO tiene para la Entalpía del agua una Cp constante, en [7] figuran datos que permitirán en un futuro próximo mejorar esta aproximación.

## Alfa: Difusividad (térmica)

KondT / Den / Cpn<sup>3</sup> [ $m^2/s$ ]

alfa# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

## Prandtl

Adimensional Cpn vis / KondT

Pr# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

## Schmidt

(equivalente al Pr para masa) Adimensional. vis / (Den Dv)

Sc# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

## Lewis

(adimensional)

Le# (t#, w#, P#, pre\$, sus\$)

Existen diferentes significados asignados al número adimensional de Lewis:

$$Le1 = Sc/Pr = \text{alfa}/Dv = KondT / (Den Cp Dv)$$

$$Le2 = hc / hm / Cp(w)$$

$$Le3 = 1/Le1 = Pr/Sc = Dv/\text{alfa} = den Cp Dv / KondT$$

La opción 1 es una relación entre propiedades del aire húmedo, en cambio la opción 2 incluye constantes de transferencia de masa que dependen entre otras cosas de la geometría del problema. La opción 3 no difiere conceptualmente de la 1.

Se asocia la opción 3 con W. K. Lewis y Von Karman asocia la 1 con Bernard Lewis indicando que este número fue introducido por E. Schmidt en 1929[3].

<sup>3</sup>Utilizando las funciones del PSICRO, se calcula según fórmula.



Threlkeld [13] toma la opción 2. Indicando que es igual a la opción 1 elevada a 2/3 en función de consideraciones sobre los fenómenos de transferencia. Uno de los artículos citados por Threlkeld, [8] en varios lugares escribe  $Le = opcion2$  indicando que se trata de la "relación de Lewis", justamente la relación de Lewis vincula lo que aquí llamamos opción 1 con la opción 2, es decir relaciona las constantes de transferencia con propiedades termodinámicas. Esto es posible pues se considera que ambas transferencias: calor y masa, son similares.

Por todo lo anterior y remarcando que en definitiva es sólo un problema de nomenclatura de aquí en más usaremos la opción 1 como número de Lewis.

## Modificaciones al PSICRO

### Otras mejoras en el Programa PSICRO y sus bibliotecas

Queda pendiente una mejora en los coeficientes viriales del aire húmedo en función de los nuevos datos de [5]. PSICRO utiliza para estos coeficientes los datos de Goof y Gratch de 1941. El impacto de este cambio no es sustancial, además algunas de las fórmulas más significativas utilizadas en [5] ya se usan en el PSICRO como la Presión de Vapor. En el caso del coeficiente  $f_s$ , Goof y Gratch lo utilizaban sin iterar y tanto [5] como el PSICRO iteran.

### Error en el programa PSICRO

Se detectó y corrigió un error en la función Entalpía del Programa PSICRO versiones 2 y 1.

Esta función, para el caso de Aire Húmedo, devolvía correctamente el valor de la Entalpía, pero modificaba el valor de la Presión. Es decir que si uno llamaba a la función "H" con determinado valor de la presión, digamos la Presión atmosférica, el programa luego de ejecutar la función Entalpía modificaba el valor de la Presión dejando en esa variable la Presión de Vapor del agua a la temperatura en que se quería la Entalpía. Esto sólo afectó a la biblioteca de funciones del PSICRO y no al programa en si mismo. La versión 3 del PSICRO arregla el problema.

También se ha corregido un error que ocasionaba un funcionamiento incorrecto cuando la presión atmosférica se fijaba por debajo de la presión de equilibrio agua-vapor a 85 C. Esto se debía a un límite artificialmente impuesto a una de las funciones matemáticas que invierten funciones.

Se agradece la colaboración y las críticas de los usuarios que han permitido encontrar estos errores.

## Aclaraciones

### Distintas Calorías

Se han detectado por lo menos 5 deficiones distintas de calorías en los distintos trabajos que se han relevado. Si no se especifica en el trabajo el tipo de caloría utilizado se tomó

la Internacional. Las posibles calorías y su equivalencia en J son: International steam table (4.1868); Media (4.19002); termoquímica (4.184); 15 C (4.1858); 20 C (4.1819).

## Distintas Temperaturas

El cambio de la escala IPTS-48 a la del IPTS-68 trae aparejado una serie de problemas que hay que tomar en cuenta [7].

Escalas de Temperaturas a lo largo del tiempo:

- *Echelle Normale*: fue la primera escala de temperatura adoptada por acuerdo internacional, definida entre 0 y 100 C, basada en el termómetro de hidrogeno y con interpolaciones con el termómetro de mercurio en vidrio.
- *International Temperature Scale de 1927*: utilizó el termómetro de resistencia de platino como instrumento de interpolación. Esta escala no difería de la anterior en más de 0.002 C y cada termómetro de vidrio podía diferir de otro similar en más de 0.02 C, por lo que esencialmente ambas escalas son iguales.
- *ITS 1948*: Las temperaturas entre 0 y 630 C no cambiaron pero se reemplazó el punto de congelación del agua por el punto triple.
- *International Practical Temperature Scale de 1948 (1960)*: En 1960 se reviso el texto de la ITS-48 sin cambiar las temperaturas.
- *IPTS 1968*: Al conocer más acerca de la temperaturas absolutas se supo que la IPTS 48 difería de las mismas. Para ello manteniendo el termómetro de platino se modificó la fórmula de interpolación a fin de ajustar la escala a la temperatura termodinámica.
- *Futuros cambios* Actualmente se considera que el punto de ebullición del agua debe ser 0.03K mas bajo que el valor actual. (NBS)

Al relevar propiedades de sustancias hay que tener en cuenta que escala usaron los autores, si no se indica hay que suponerlo por la fecha del trabajo.

Las fórmulas para convertir temperaturas de la escala del 48 a la del 68 son:

$$t_{68} = t_{48} + w(t) + z(t)$$

donde: t es la temperatura Celsius; w(t) ajusta la fórmula cuadrática de interpolación a fin de dar la temperatura termodinámica.

$$w(t) = .00045t(t/100 - 1)(t/419.58 - 1)(t/630.74 - 1)$$

z(t) tiene en cuenta el cambio en la redefinición del punto del Zinc en la IPTS-68

$$z(t) = \frac{4.903510^{-5}t(t/100 - 1)}{1 - 2.9485810^{-4}t}$$

## Conclusiones

Se presenta un conjunto de funciones que agregan propiedades a las que ya calculaba el PSICRO. Estas propiedades permiten mejorar las simulaciones de procesos de transferencia de masa y calor en sistemas de soluciones acuosas y aire húmedo.

## REFERENCIAS

1. J. Kestin and J. H. Whitelaw. Measurements of the viscosity of dry and humid air. En *Humidity and Moisture. Vol. 3 Sec. 1, Fundamentals*, pp. 301–314, 1966.
2. ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*, 1985.
3. Richard S. Brokaw. *The Lewis Number*, chapter 26, pp. 271–278. Academic Press, 1962.
4. Henry Cheung, Leroy A. Bromley, y C. R. Wilke. Thermal conductivity of gas mixtures. *AIChE Journal*, 8(2):221 – 228, 1962.
5. R. W. Hyland y A. Wexler. Formulation for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 k to 473.15 k, and of saturated moist air from 173.15 to 372.15 k at pressures to 5 mpa. *ASHRAE Transactions*, 89:520–535, 1983. Part. 2 2794.
6. R.W Hyland y A. Wexler. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of  $h_2o$  from 173.15 k to 473.15 k. *ASHRAE Transactions*, 89:500 – 519, 1983. Part. 2 2793.
7. George S. Kell. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 20(1):97 – 105, 1975.
8. Tamani Kusuda. Calculation of the temperature of a flat-plate wet surface under adiabatic conditions with respect to the lewis relation. En *Humidity and Moisture*, volume 1, pp. 16–32, 1966.
9. E. A. Mason y L. Monchick. Survey of the equation of state and transport properties of most gases. En *Humidity and Moisture*, volume 3, pp. 257–272, 1966.
10. Diego Saravia. Desarrollo de una calculadora psicrométrica. Presentado en el Tercer Encuentro Académico Tecnológico. Universidad de la Plata. IBM y en ASADES 1992, 1992.
11. Diego Saravia. Termodinámica del aire húmedo. Informe Interno. INENCO, 1992.
12. Leonard I. Stiel y George Thodos. The viscosity of polar gases at normal presures. *AIChE Journal*, 8(2):228 – 232, 1962.
13. J.L. Threlkeld. *Ing. del Ambito Térmico*. 1973.