

DESARROLLO DE UNA CALCULADORA PSICROMETRICA.

Diego Saravia *
INENCO. UNSa - CONICET
Universidad Nacional de Salta
Calle Buenos Aires 177
4400 - Salta. ARGENTINA

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrollan las relaciones termodinámicas del aire húmedo considerándolo como un gas real.

Se expone un modelo numérico ejecutable en computadora que permite calcular sus propiedades con precisión.

Se presenta una Biblioteca de Rutinas creada sobre el modelo numérico.

Se describe un programa que facilita el uso de la Biblioteca para realizar Cálculos Psicrométricos con gran comodidad, exactitud y capacidad gráfica.

Los resultados y programas de este trabajo están siendo utilizados para el diseño de acondicionadores de aire que trabajan con energía solar con ciclos abiertos de deshumidificación-enfriamiento. La gran exactitud buscada es de fundamental importancia en la determinación de constantes de transferencia de masa [4].

TERMODINAMICA DEL AIRE HUMEDO

Expondremos las ecuaciones para el aire húmedo.

EL VOLUMEN

$$Pv = RT - (x_a^2 A_{aa} + 2x_a x_w A_{aw} + x_w^2 A_{ww}) P - x_w^3 A_{www} P^2$$

POTENCIALES QUIMICOS

$$\begin{aligned} \mu_w = & \mu_w^o + RT \ln P + RT \ln x_w - 2P (x_w A_{ww} + x_a A_{aw}) \\ & + P (x_w^2 A_{ww} + x_w x_a A_{aw} + x_a^2 A_{aa}) - \frac{3}{2} x_w^2 P^2 A_{www} \end{aligned}$$

*Becario del CONICET.

$$\mu_a = \mu_a^o + RT \ln P + RT \ln x_a - 2P(x_a A_{aa} + x_w A_{aw}) + P(x_w^2 A_{ww} + x_w x_a A_{aw} + x_a^2 A_{aa})$$

LA ENTALPIA

$$h = x_a h_a^o + x_w h_w^o - (x_a^2 B_{aa} + 2x_a x_w B_{aw} + x_w^2 B_{ww}) P - \frac{1}{2} x_w^3 B_{www} P^2$$

POTENCIALES QUIMICOS DEL AGUA CON AIRE DISUELTO

Sabemos que cuando el agua pura está en equilibrio con su vapor tiene que cumplirse:

$$\mu^{lp}(T, P_v(T)) = \mu^{vapor}(T, P_v(T))$$

Esta ecuación es importante pues conocemos $P(T)$. Si deseamos calcular el potencial químico fuera de la presión de equilibrio a una temperatura dada:

$$\mu^{lp}(T, P) = \mu^{vapor}(T, P_v(T)) + \int_{P_v(T)}^P v dP$$

Si consideramos al agua como una mezcla líquida ideal de agua y aire podemos escribir el potencial químico:

$$\mu_w^l = \mu^{lp} + RT \ln y_w$$

Entonces el potencial químico del agua en la mezcla de agua y aire:

$$\mu_w^l = \mu^{vapor}(T, P_v(T)) + \int_{P_v(T)}^P v^l dP + RT \ln y_w$$

Si consideramos que $v^l(T, P)$ es casi independiente de la presión para el agua líquida:

$$\mu_w^l = \mu^{vapor}(T, P(T)) + v^l(P - P_v(T)) + RT \ln y_w$$

EQUILIBRIO AGUA-AIRE

Para encontrar las concentraciones de equilibrio del sistema debemos igualar los potenciales químicos.

La ecuación de potenciales del gas en ambas fases la reemplazamos por la ecuación de la solubilidad del aire en agua: $(1 - y_w) = KP x_a$ Igualando los potenciales químicos del agua en ambas fases y reemplazando y_w llegamos a:

$$\begin{aligned} RT \ln f_s &= P \left(1 - \frac{P_x}{P} \right)^2 (2A_{aw} - A_{aa}) \\ &+ A_{ww} P \left(2 \left(\frac{P_x}{P} - \frac{P_v}{P} \right) + \frac{P_v}{P} - \left(\frac{P_x}{P} \right)^2 \right) \\ &+ A_{www} P^2 \left(\frac{P_v}{P} \right)^2 \left(\frac{3}{2} (f_s^2 - 1) - \left(1 - \frac{P_v}{P} f_s^3 \right) \right) \end{aligned}$$

$$+V_l P \left(1 - \frac{P_v}{P}\right) - RT \ln \left(1 - k \left(1 - f_s \frac{P_v}{P}\right) P\right)$$

donde $P_x = x_w P$ $f_s = \frac{P_x}{P}$, V_l es el volumen del líquido y k es la solubilidad del aire en agua.

Esta ecuación debe ser iterada, pero si hacemos $f_s = 1$ obtenemos de entrada una primera aproximación bastante buena, así procede el [1] que escribe la ecuación con esta simplificación efectuada y reemplaza el logaritmo por una aproximación (la edición que tengo tiene algunos errores de tipeo). El Psicro.bas itera pues con muy pocos ciclos converge.

MODELO NUMERICO

ESCALAS Y UNIDADES

Se ha utilizado el SI y salvo indicación en contrario La temperatura T será en K y t en $^{\circ}C$.

LOS COEFICIENTES VIRIALES

Se toman de [1].

ENTALPIAS Y ENTROPIAS A PRESION CERO

Como se ve en la formulación, es posible referir todas estas variables al potencial químico, sin embargo por ahora se ha procedido tomando los datos de h y s independientemente. Para ello se han desarrollado ecuaciones con el utilitario STAT tomando los datos del [1].

$$h_w^{\circ} = -24.27107566 + .37621851t + .0001057t^2 + \frac{1675.81819168}{T} + 24.6462724 \ln T$$

$$h_a^{\circ} = 42.89510766 + .22881637t + .00001861t^2 + \frac{235.87232451}{T} + 3.84444182 \ln T$$

$$s_w^{\circ} = -.153302928 - .000061635t + .000000164t^2 + \frac{1.28522117}{T} + .465553696 \ln T$$

$$s_a^{\circ} = .100182446 - 7.60756 * 10^{-5}t + 9.536569128 * 10^{-8}t^2 + \frac{2.307481401}{T} + .268927736 \ln T$$

Los errores estimados son: .00038, .00045, .0000061, .0000043 respectivamente.

Estas variables hay que multiplicarlas por 4186.8 y por los pesos moleculares de cada sustancia para obtenerlas expresadas en Julios por mol. Además hay que referirlas a cero grados, y agregarles a las de vapor de agua las magnitudes de evaporación en h y s .

PRESION DE VAPOR DEL AGUA PURA

Se tomaron las ecuaciones de Ilyland and Wexler de 1983., [2].

t °C	Presión (KPa)					
	33.864		101.592		108.364	
	fs		fs		fs	
	Calculado	Ref [1]	Calculado	Ref [1]	Calculado	Ref [1]
-17.78	1.00169	1.0016	1.00479	1.0047	1.00510	1.0051
-6.67	1.00172	1.0016	1.00456	1.0045	1.00484	1.0048
4.44	1.00182	1.0018	1.00441	1.0044	1.00468	1.0047
15.56	1.00203	1.0020	1.00445	1.0044	1.00469	1.0047
26.67	1.00232	1.0023	1.00464	1.0046	1.00486	1.0049
37.78	1.00262	1.0027	1.00497	1.0050	1.00519	1.0053
48.89	1.00274	1.0031	1.00541	1.0055	1.00563	1.0057
60	1.00223	—	1.00583	1.0059	1.00606	1.0063

Tabla 1: Comprobación de fs.

SOLUBILIDAD DEL AIRE EN AGUA Y VOLUMEN DEL AGUA

Se tomaron datos de [3], según lo recomienda [1].

Para temperaturas menores a 0°C

$$v^s = .001091011 + .000000188t + 5.448261998 * 10^{-10}t^2 \quad k = 0$$

Para temperaturas mayores a 0°C

$$v^l = .000999514 + .000000045t + 4.12205831 * 10^{-9}t^2$$

$$\frac{760}{k * 10000000 * 101325} = 9324.772749563001 + 6.170618604t - .010863724t^2 - 1661.580087409 \ln T + .000014808t^3$$

Estas ecuaciones fueron calculadas con el utilitario STAT, a partir de los datos tabulados. Para cada una de las ecuaciones el error estimado es: .00000029, .00000033, .0057 respectivamente.

EXACTITUD DE LAS FORMULAS

Los siguientes cálculos fueron realizados por el programa PSICRO, en base a las fórmulas precedentes. Para más información referirse al Manual del PSICRO [5]. Los datos de referencia son de [1], [2], [6].

El factor de corrección a la presión de vapor (fs) está en la Tabla 1. Las presiones y temperaturas elegidas son las que figuran en la bibliografía y corresponden a números enteros en unidades inglesas. La Presión de vapor y la Humedad de saturación están en la Tabla 2. La Entalpía en la Tabla 3.

t °C	P _v , KPa		W _s			
	Calculado	Ref. [2]	Calculado	Ref. [2]	Ref. [6]	Calc. Aprox.
0.00	.61121	.6112	.003792	.003789	.003788	.0037747
10.00	1.22799	1.2280	.007664	.007661	.007658	.007638
20.00	2.33880	2.3389	.014763	.014758	.01475	.014696
30.00	4.24602	4.2462	.027338	.027329	.02731	.02720
40.00	7.38346	7.3838	.049152	.049141	.04911	.04889
50.00	12.34985	12.3503	.086867	.086858	.08678	.08633

Tabla 2: Comprobación de la Presión de Vapor y Humedad de Saturación.

t °C	H _{a.seco} KJ/Kg		H _{a.sat} KJ/Kg		H _{H₂O_{vap}} KJ/Kg	
	Calculado	Ref. [2]	Calculado	Ref. [2]	Calculado	Ref. [2]
0.00	.0000	.000	9.4720	9.473	2500.770	2500.77
10.00	10.0592	10.059	29.3517	29.352	2519.132	2519.12
20.00	20.1217	20.121	57.5560	57.555	2537.413	2537.38
30.00	30.1852	30.185	100.0049	100.006	2555.584	2555.52
40.00	40.2535	40.253	166.6851	166.683	2573.614	2573.49
50.00	50.3260	50.326	275.3481	275.345	2591.465	2591.27

Tabla 3: Comprobación de la Entalpía.

BIBLIOTECA DE RUTINAS PSICROMETRICAS

Se desarrolló una Biblioteca de Rutinas Psicrométricas para usarla en programas escritos con QuickBasic 4.*.

Con ella pueden producirse tablas de distintas propiedades y realizarse los cálculos más variados. Por ejemplo, se ha utilizado la biblioteca de rutinas con éxito junto con programas de adquisición de datos para convertir T y TBII a T y W.

Las funciones del aire húmedo se calculan con gran exactitud y reproducen con mucha aproximación las tablas de la ASHRAE [2].

FUNDAMENTOS DE CALCULO

La biblioteca modeliza al aire húmedo según las siguientes ecuaciones y criterios desarrollados en la sección anterior:

- **Aire Húmedo:**

Volumen: Ecuación de estado con coeficientes viriales para mezclas de agua y aire. (f_z).

Entalpía y Entropía: Con la entalpía (entropía) del aire y del vapor de agua a presión cero, integrando la ecuación de estado. (H y S)

- **Agua:** Las funciones que dan las siguientes variables en función de la temperatura.

Volumen: [3] (VW).

Solubilidad del aire en agua: (K).

Presión de Vapor: (PW).

- **Equilibrio:** Se obtiene una ecuación igualando los potenciales químicos de cada componente del aire húmedo con los componentes del agua con aire disuelto. Los potenciales se obtienen similarmente a la entalpía y entropía (f_s).

En principio trabaja entre -60 y 90 grados centígrados, pero algunas funciones dan problemas por debajo de los -30 grados.

Los datos sobre el aire húmedo están contenidos en las siguientes funciones básicas: f_s , f_z , H , S , PW , K , VW .

Sobre la base anterior se calculan:

$$W = \frac{PM_{H_2O}}{PM_{Aire}} \frac{X_W}{1-X_W} \quad X_{W_s} = f_s PW(t)/P \quad WR = X_w/X_{W_s}$$

$$GS = W/W(X_{W_s}) \quad VOL = f_z \frac{RT}{P} \frac{PM_{Aire}}{1-X_W} \quad \text{Ecuación de TBII}$$

Y estas se encuentran organizadas en funciones compuestas como: FTW, WTF, TFW.

Toda variable extensiva se calcula por Kg de aire seco.

Cualquier otro dato lo encuentra resolviendo ecuaciones con las funciones anteriores.

El cálculo aproximado se hace igualando a uno: f_s y f_z . Además en las rutinas de entalpía y entropía se usan ecuaciones que suponen al aire húmedo un gas perfecto.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA PSICRO

El programa PSICRO realiza cálculos psicrométricos, utilizando la Biblioteca de Rutinas ya descrita.

PSICRO trabaja con "Cartas Psicrométricas". Cada carta se define para una presión atmosférica y con condiciones extremas de temperatura y humedad. Además cada carta se define para realizar o no distintas tareas:

- Calcular las propiedades del aire húmedo, dados dos datos. Reconoce a los mismos datos que usa la biblioteca pero con algunas unidades diferentes.
- Calcula también la temperatura de Punto de Rocío Tr : , la presión de Vapor PW : y la fracción molar del vapor de agua Xw : .
- Dibujar el diagrama psicrométrico si la pantalla es gráfica.
- Marcar puntos y líneas en el diagrama a partir de datos o con ratón.
- Exportar el diagrama hacia el AUTOCAD, para ser editado o impreso en todos los tipos de impresoras o plotters que el AUTOCAD soporta, logrando una excelente definición.
- Imprimir los resultados en una impresora de texto.

- Crear un archivo de resultados ASCII.
- Ingresar datos con ratón en el diagrama psicrométrico.
- Cada carta psicrométrica puede ser configurada durante su creación estableciendo las siguientes variables: [Datos a la Pantalla] SI / NO, [Datos a la Impresora] SI / NO, [Datos a un Archivo] SI / NO, [Dibuja en la Pautilla] SI / NO, [Dibuja en Archivo para ACAD] SI / NO, [Densidad de Líneas en el Dibujo] ALTA / BAJA, [Presión Atmosférica] (% de la normal), [Dibujo Líneas de C_2C_0] SI / NO, [Dibujo Líneas de TBII] SI / NO, [Dibujo Líneas de Volumen] SI / NO, [Precisión de cálculo] E / I, [Temperatura Máxima]. múltiplos de 10, [Humedad Máxima]. múltiplos de 10, [Temperatura Mínima]. múltiplos de 10.

Las cartas se pueden almacenar para seguir usándolas luego, se pueden borrar y copiar.

PSICRO está desarrollado en el lenguaje QuickBasic 4.0 de Microsoft. En esta versión se han utilizado algunas rutinas del PROBAS, versión 3.0, de Hammerly Computer Services.

Funciona en pantallas VGA y HERCULES de la línea de las IBM PC/PS.

PSICRO tiene un manual [5] de 45 páginas que describe detalladamente su instalación, funcionamiento y el uso de la Biblioteca de Rutinas.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta valiosa para facilitar trabajos de gran exactitud con aire húmedo.

El programa PSICRO y la teoría de la Termodinámica del Aire Húmedos pueden usarse además como herramienta docente.

REFERENCIAS

- [1] ASHRAE. *Brochure on Psychrometry*, 1977.
- [2] ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*, 1985.
- [3] ICT.
- [4] Graciela Lesino y Diego Saravia. La propagación de errores en la medición de humedad. En *ASADES*, 1992.
- [5] Diego Saravia. *Manual del programa PSICRO*, 1992.
- [6] J.L. Threlkeld. *Ing. del Ambito Térmico*. 1973.

Gráfica? s/n=
 Datos elegidos =T, W
 T = 47.07 °C
 W = 21.93 gr/Kgr
 WR = 26.79 %
 GS = 24.21 %
 H = 104.976 KJ/kg
 TDBI= 29.07 °C
 v = 1.0070 m3/kg
 Xw = 3.406 %
 S = 104.77 J/K kg
 PW = 11.10 KPa
 TR = 23.95 °C
 T= 47.07 W= 21.93

I:Entre Q:Sale Datos: T,W,TDBI,H,UOL,WR,GS,S

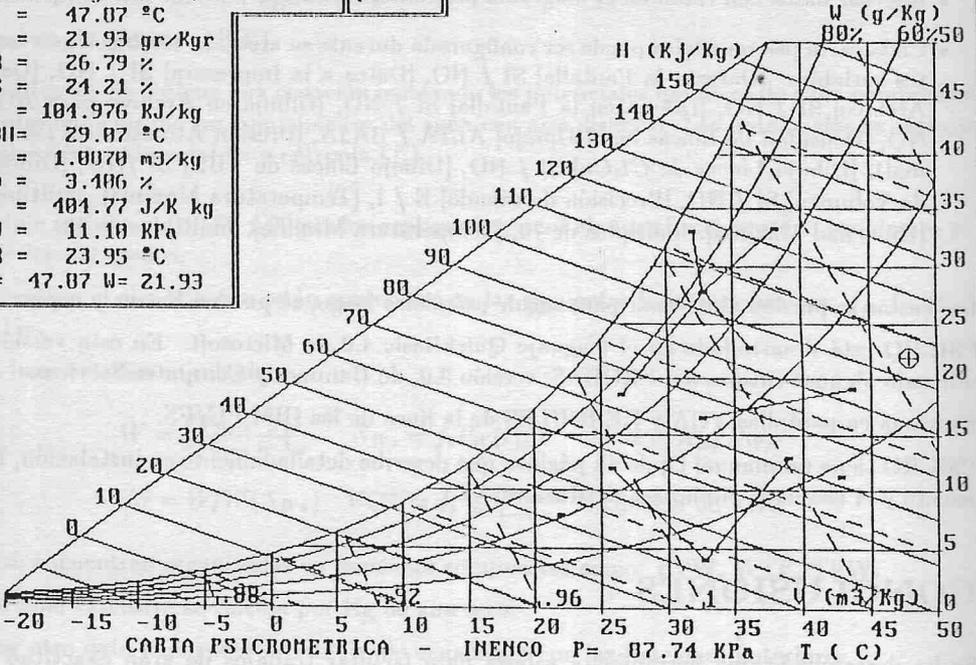


Figura 1: PRINT-SCREEN de la pantalla del PSICRO.

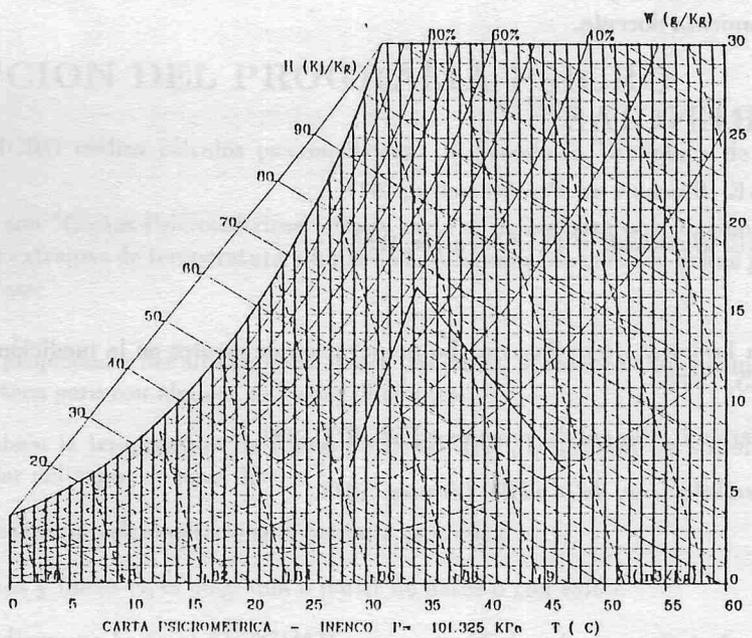


Figura 2: Archivo gráfico procesado en AUTOCAD.