



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL ROSARIO

CÁTEDRA DE “Balances de Materia y Energía”



HIGROMETRÍA

MMXXVI

HIGROMETRÍA es la ciencia que estudia las relaciones entre vapores y gases.

DEFINICIONES

HUMEDAD ABSOLUTA Y GRADO DE SATURACIÓN: si bien estos términos inicialmente se utilizaron para determinar las relaciones entre el vapor de agua y el aire, las fórmulas que se deducirán en este apunte se pueden utilizar para cualquier mezcla de gases y vapores.

Tanto los gases como los vapores se considerarán como si se comportaran como gases ideales. Si en un recipiente se tiene una mezcla de n_G moles de un gas y n_V moles de un vapor, a una temperatura determinada, su presión total (de acuerdo a la ley de Dalton) es la suma de las presiones parciales de cada componente:

$$P_T = P_G + P_V \quad (1)$$

Siempre hay que tener en cuenta que la presión de vapor (P_V) nunca puede superar a la presión de saturación (P_S) a esa temperatura.

$$P_V \leq P_S$$

Si la presión de vapor en ese sistema es igual a la presión de saturación, se dice que el sistema está **saturado**. (Si al recipiente se le intenta agregar mayor cantidad de vapor, esto hará que la presión de vapor intente aumentar, pero como ya es igual a la presión de saturación, todo el vapor que se agregue, condensará). Se define como **humedad absoluta molar** de un sistema a los moles de vapor que contiene el sistema por mol de gas (gas exento de vapor, por lo que se lo denomina **gas seco**). La humedad absoluta molar se denominará como HA_m y será:

$$HA_m = \frac{n_V}{n_G} \quad (2)$$

Si se considera que tanto el vapor como el gas se comportan como ideales (llamando V_T al volumen total del recipiente donde están contenidos):

$$P_V \times V_T = n_V \times R \times T \quad y \quad P_G \times V_T = n_G \times R \times T$$

Dividiendo miembro a miembro:

$$\frac{P_V \times V_T}{P_G \times V_T} = \frac{n_V \times R \times T}{n_G \times R \times T} \quad o \quad \frac{P_V}{P_G} = \frac{n_V}{n_G} \quad (3)$$

Normalmente la P_G se coloca en función de la P_T . Despejando de (1) y reemplazando en (3):

$$\begin{aligned} P_G &= P_T - P_V \\ \frac{P_V}{P_G} &= \frac{n_V}{n_G} = \frac{P_V}{P_T - P_V} = HA_m \end{aligned} \quad (4)$$

Se define como **humedad absoluta (HA)** a la masa de vapor de un sistema por masa de gas seco. Como $n_v = \frac{m_v}{PM_v}$ y $n_G = \frac{m_G}{PM_G}$, reemplazando en (4):

$$\frac{n_v}{n_G} = \frac{P_v}{P_T - P_v} = \frac{\frac{m_v}{PM_v}}{\frac{n_G}{PM_G}} = \frac{m_v \times PM_G}{m_G \times PM_v}$$

Despejando $\frac{m_v}{m_G}$ (que por definición es la humedad absoluta **x**):

$$\frac{m_v}{m_G} = \frac{PM_v}{PM_G} \times \frac{P_v}{P_T - P_v} = HA \quad (5)$$

Este valor será máximo, para una determinada temperatura, cuando el sistema está saturado, es decir cuando **P_v = P_s**.

También se definirá el **grado de saturación (φ)** a la relación de la humedad absoluta de un sistema (HA, a una temperatura determinada) y la que contendría si el sistema estuviera saturado (que se denominará HA_s):

$$\varphi = \frac{HA}{HA_s} \quad (6)$$

Si se reemplaza en la **Ecuación 6** los valores de la humedad absoluta dado por la **Ecuación 5** (y teniendo en cuenta que el valor de x_s se tendrá cuando **P_v = P_s**)

$$\varphi = \frac{HA}{HA_s} = \frac{\frac{PM_v}{PM_G} \times \frac{P_v}{P_T - P_v}}{\frac{PM_v}{PM_G} \times \frac{P_s}{P_T - P_s}} = \frac{P_v}{P_s} \times \frac{P_T - P_s}{P_T - P_v} \quad (7)$$

El término P_v/P_s multiplicado por 100 se denomina **humedad relativa**, que para los sistemas vapor de agua – aire tiene especial importancia en las operaciones de secado. En este sistema en especial se denomina **humedad relativa ambiente** (de aquí en adelante se la denominará **HRA** o simplemente **HR**)

$$HR = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (8)$$

Por lo que el grado de saturación se relaciona con la humedad relativa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{HR}{100} \times \frac{P_T - P_s}{P_T - P_v}$$

La presión de saturación de un vapor se puede obtener por medio de los métodos que se vio en el apunte de **Gases y Vapores**.

VOLUMEN ESPECÍFICO:

$$V_e = \frac{R \times (t + 273,15)}{P} \times (1 + HA_m)$$

Donde R es [atm.m³/°K.kmol], P [atm], t [°C], HA_m [kmol V/kmol GS] lo que da Ve [m³/kmol GS] o en unidades consistentes.

TEMPERATURA DE ROCIO: en una mezcla de un vapor con un gas cada uno está a su presión parcial. Como se vio anteriormente, la presión de vapor siempre es menor (a lo sumo igual) que la presión de saturación. Si se comienza a disminuir la temperatura del sistema, a presión constante, como la presión de saturación disminuye con la temperatura, esta comienza a disminuir a medida que disminuye la temperatura, mientras que la presión de vapor se mantiene constante. A una determinada temperatura la presión de saturación (**P_s**) se iguala a la presión de vapor (**P_v**), con lo cual el sistema se satura. Si se disminuye más la temperatura, la presión de saturación no puede ser menor que la de vapor, por lo que la presión de vapor tiene que comenzar a disminuir y esto lo hace condensando vapor. La temperatura a la cual la **PV=P_s** se denomina **temperatura de rocío** (ya que a esa temperatura comienza a condensar vapor).

SISTEMA AIRE SECO – VAPOR DE AGUA: Para una mezcla conformada por vapor de agua y aire seco vale todas las fórmulas realizadas anteriormente. En el caso de la humedad absoluta:

$$HA = \frac{m_v}{m_g} = \frac{PM_v}{PM_g} \times \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

Si se reemplaza el peso molecular del vapor por 18 y el del aire por 29 (peso molecular promedio), la fórmula queda:

$$HA = \frac{18}{29} \times \frac{P_v}{P_T - P_v} = 0,622 \times \frac{P_v}{P_T - P_v} \quad (9)$$

Entalpía del aire húmedo: uno de los parámetros más importantes para el cálculo de secaderos, aire acondicionado, etc, es la entalpía del aire húmedo (es decir la entalpía de una masa unitaria de aire seco más la masa **x** de vapor de agua contenida).

Si se ha de trabajar en un sistema con entalpías, lo primero que se debe definir son sus estados estándar (es decir definir en que estado los componentes del sistema se considerarán que tienen entalpía cero).

Para el vapor de agua, se toma como estado estándar el agua líquida a 0° C (Para que coincida con el estado estándar del agua en las tablas de vapor de agua); el estado estándar para el aire es 0° C. Para definir la fórmula de la entalpía del aire húmedo se tomará una temperatura genérica **t**. Primero se determinará la entalpía del vapor de agua, luego la del aire, sumándose posteriormente las dos.

Para el vapor de agua, para determinar su entalpía, se debe partir del agua líquida a 0° C y llevarla a agua vapor a la temperatura **t**, por lo que debe ser vaporizada y luego elevar su temperatura hasta **t**. Como la entalpía es una función de punto (es decir no importa el camino recorrido, sino los estados finales e iniciales), primero se vaporizará el agua a 0° C y luego se la calentará hasta la temperatura **t**. El calor latente de vaporización del agua a 0° C es de 595 kcal/kg y el calor específico promedio del vapor de agua es de 0,46 kcal/kg.°C. Si se toma como unidad de masa del aire seco 1 kg, este contendrá **HA** kg de vapor de agua, por lo que la entalpía del vapor de agua será:

$$\overline{\Delta H}_v = HA \times [595 + 0,46 \times (t - 0)] = HA \times (595 + 0,46 \times t)$$

Para el aire seco, el calor específico promedio es de 0,24 [kcal/kg.°C] , por lo que su entalpía para una temperatura **t** será:

$$\overline{\Delta H}_{AS} = 0,24 \times (t - 0) = 0,24 \times t$$

La entalpía del aire húmedo será la suma de los dos:

$$\overline{\Delta H}_{AH} = 0,24 \times t + HA \times (595 + 0,46 \times t) \quad (10)$$

Temperatura de saturación adiabática: si se quisiera condensar el vapor de agua de un sistema aire – vapor de agua, se podría realizar de varias formas:

- Enfriando el sistema hasta su temperatura de rocío.
- Comprimiendo isotérmicamente hasta la presión **Ps**.
- Comprimiendo y enfriando simultáneamente.
- Agregándole vapor de agua hasta que la **Pv** aumente hasta la **Ps**.

Se realizará una experiencia sencilla. Un aire húmedo se le hace pasar por un túnel que contiene una superficie de agua lo suficientemente grande como para que el aire salga saturado por el otro extremo del túnel (debido a que el paso del aire por la superficie del agua fuerza a esta a evaporarse), como se observa en la **Figura 1**.

Suponiendo que el túnel está aislado térmicamente, la transformación se realizará en forma adiabática. Se considerara que el aire de entrada tendrá una humedad absoluta determinada (**HA_E**), una entalpía de entrada ($\overline{\Delta H}_E$) y una temperatura de entrada (**t_E**). Una vez que el aire pase por el túnel, saldrá con una humedad absoluta de salida (**HA_S**), una entalpía de salida ($\overline{\Delta H}_S$) y una temperatura de salida (**t_S**).



Figura 1

Como el proceso es adiabático, la entalpía del aire de entrada y el de salida deben ser iguales.

$$\Delta H_E = \Delta H_S$$

Por lo que:

$$0,24 \times t_E + HA_E \times (595 + 0,46 \times t_E) = 0,24 \times t_S + HA_S \times (595 + 0,46 \times t_S) \quad (11)$$

El aire, al pasar por el túnel incorpora agua, necesariamente se tiene que cumplir que $HA_S > HA_E$. Al ser la humedad absoluta de entrada menor que la de salida, para mantener la igualdad de la ecuación (11) tiene que disminuir la temperatura de salida, por lo que se tiene que cumplir que $t_S < t_E$, es decir que en este proceso la temperatura del aire, ha medida que va incorporando agua, va disminuyendo. Esto se debe a que al forzar a pasar el agua líquida a agua vapor se le tiene que entregar el calor latente de evaporación correspondiente, al ser el túnel adiabático, del único lugar que puede obtener ese calor es del mismo sistema, por lo que su temperatura disminuye. Este efecto es muy fácil de comprobar, si se coloca en una mano un líquido volátil (preferentemente agua, por su alto calor latente de evaporación) y se le sopla (por lo que se fuerza a pasar al estado vapor), notará que la mano se enfría.

En este proceso, la temperatura mínima que se puede obtener es cuando el aire de salida sale saturado; en ese caso esa temperatura mínima se denomina **temperatura de saturación adiabática**.

Psicrómetros: si se toman dos termómetros y a uno se le envuelve el bulbo con una tela humedecida en agua y se le hace pasar una corriente de aire, el termómetro al que tiene su bulbo sin cubrir con la tela registrará la temperatura del aire; pero el que tiene el bulbo recubierto, el aire forzará al agua a evaporarse, por lo que la temperatura del termómetro comenzará a descender. Dado ahora que la temperatura del termómetro es menor que la del aire circundante, comienza a haber un intercambio de calor entre estos. En un determinado momento hay un equilibrio entre el calor que pierde y gana el bulbo, por lo que la temperatura del termómetro se estabiliza. Esta temperatura se denomina **temperatura de bulbo húmedo (t_{BH})** (por consiguiente, la temperatura del otro termómetro, que será la del aire, se llama **temperatura de bulbo seco (t_{BS})**).

Solamente en el sistema de vapor de agua – aire, la temperatura de bulbo húmedo coincide con la temperatura de saturación adiabática.

$$t_{BH} = t_{SA}$$

Esto no se cumple para otros sistemas

La temperatura de bulbo húmedo depende de la cantidad de agua que se evapora por unidad de tiempo y a su vez, este parámetro, depende de la humedad relativa ambiente del aire (un aire que esté saturado no puede absorber más agua, por lo tanto no modificará la temperatura del termómetro de bulbo húmedo).

Un equipo de este tipo, conformado por dos termómetros, en el cual uno tiene su bulbo cubierto con una tela embebida en agua, se llama **psicrómetro** y se utilizan para determinar rápidamente la humedad relativa ambiente de un sistema vapor de agua – aire.

En la **Figura 2** se puede observar un psicrómetro sencillo, que consta de dos termómetros comunes de mercurio montados en un soporte provisto de un mango que se utiliza para hacer girar el aparato y hacer pasar una corriente de aire sobre el mismo. Este psicrómetro es un equipo manual que (utilizando el diagrama psicrométrico) se obtienen resultados aceptables.

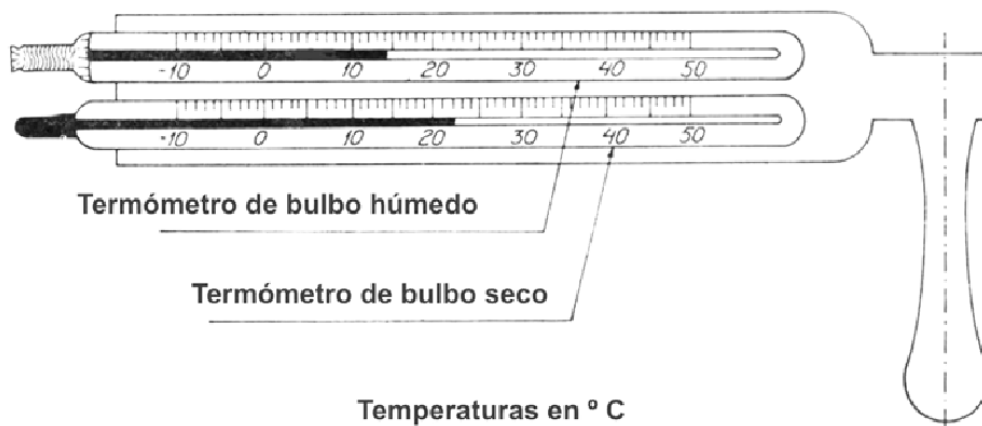


Figura 2: Psicrómetro de boleo

De todas maneras, existen en el mercado aparatos manuales o de mesa, totalmente electrónicos, que pueden medir temperatura de bulbo seco, **HRA**, en algunos casos velocidad del aire y reservar esos datos para luego poder volcarlo a una computadora a través de una ficha RS-232 o por medio de un cable conectado al puerto USB. En las siguientes figuras se pueden observar varios de esos equipos.

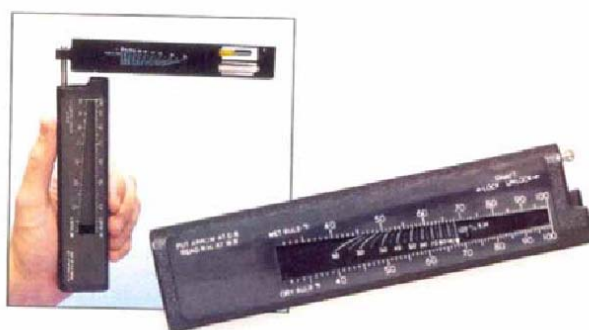


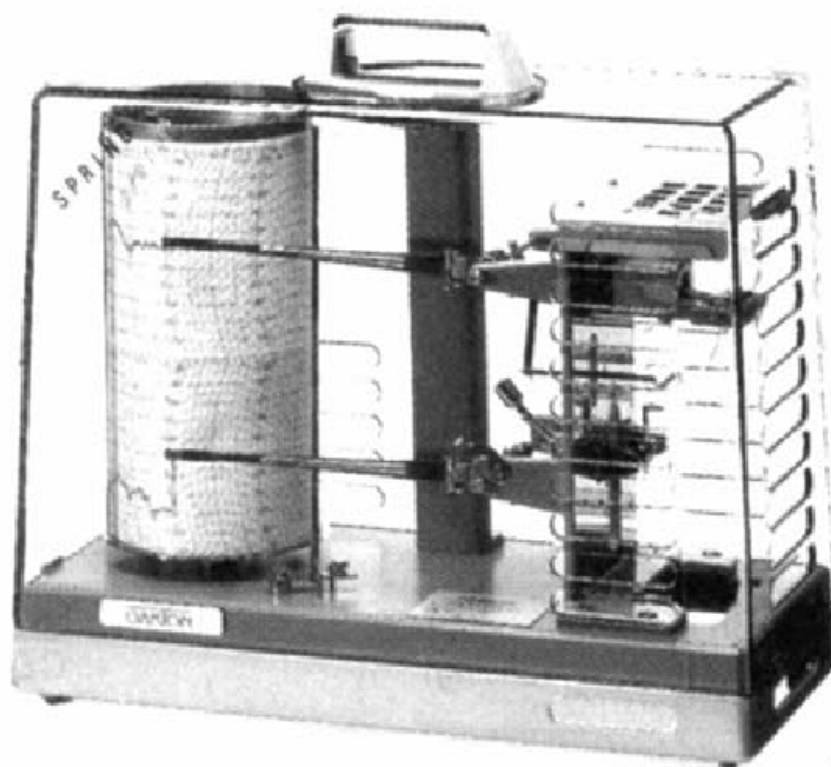
Figura 3: Psicrómetro de onda



Figura 4: Psicrómetro de pared que indica HRA y temperatura de bulbo seco



Figura 5: Psicrómetros que indican y almacenan datos de temperatura de bulbo húmedo, temperatura de rocío y HRA



nioc

Figura 6: Equipo para almacenar datos temperatura de bulbo seco por medios

de HRA y gráficos



Figura 7: Psicrómetros que indican y almacenan datos de temperatura de bulbo húmedo, temperatura de rocío, HRA y velocidad del aire. El rango de determinación del punto de rocío puede variar entre - 50° C a 50° C.

Diagrama psicrométrico: este diagrama es muy útil para realizar cálculos rápidos y sencillos sobre transformaciones de un sistema vapor de agua – aire. Se construye a presión constante (normalmente a 760 mm de Hg) y relaciona la humedad absoluta en función de la temperatura del aire y su humedad relativa ambiente, como se puede observar en la **Figura 8**.

Las coordenadas de este diagrama son: temperatura de bulbo seco (° C) y humedad absoluta (gr de vapor de agua/kg de aire seco). También se presentan las curvas de **HR** (de 10 en 10) y las líneas de entalpía constante (que son todas las distintas mezclas de vapor de agua – aire, a distintas temperaturas y humedades relativas ambientes que tienen la misma entalpía).

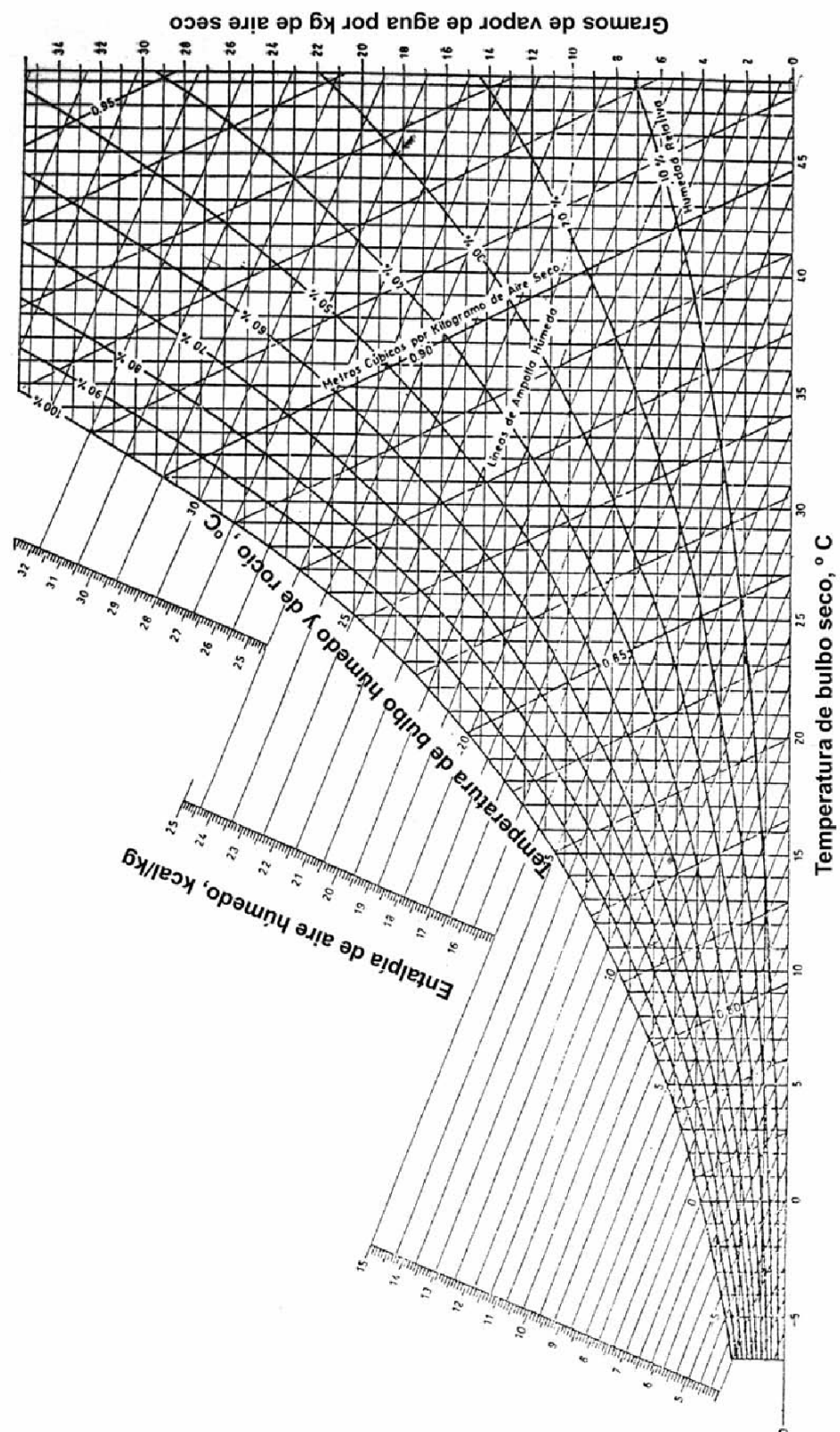


Figura 8: Diagrama psicrométrico completo

Este diagrama se construye siguiendo los siguientes pasos: primero se traza (por puntos) la curva de humedad absoluta en función de la temperatura para una humedad relativa ambiente del 100 %, de la siguiente manera: se elige una temperatura de inicio (que se denominará t_0). Para esa temperatura se determina su presión de saturación (P_s), por medio de algunas de las ecuaciones vistas en el apunte de **Gases y Vapores** (por ejemplo la de Antoine). Con esos datos se determina la humedad absoluta de saturación (HA_{s0}). Con estos datos, se coloca el punto de coordenadas (HA_{s0} , t_0) en el diagrama. Este procedimiento se repite para las distintas temperaturas en que se quiera graficar el diagrama. Uniendo todos esos puntos se obtendrá la curva de humedad absoluta correspondiente al 100 % de humedad relativa ambiente.

Para otra **HRA** cualquiera (supóngase 50 %) se repite el procedimiento, pero en la fórmula con la que se obtiene la humedad absoluta, en vez de colocar P_s , tendrá

que colocarse $P_v = HR \times \frac{P_s}{100}$ ya que la humedad relativa ambiente se define

como $HR = \frac{P_v}{P_s} \times 100$. Con ese valor de la P_v se continúa el procedimiento

como se ha visto anteriormente.

De esta manera se van construyendo todas las curvas de humedad relativa.

Otro de los datos importantes que se presentan en este diagrama son las rectas de entalpía constante. Se ha definido a la entalpía del aire húmedo como:

$$\overline{\Delta H}_{AH} = 0,24 \times t + HA \times (595 + 0,46 \times t)$$

Pero como la gráfica tiene como coordenadas a **HA** y **t**, se tendrá que reacomodar esta ecuación para presentarla **HA** en función de **t**.

Primero se elige un valor de la entalpía, la cual se mantendrá constante y se la designará como **C₁** y se comienza a despejar el valor de HA:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0,24 \times t + HA \times (595 + 0,46 \times t) \\ C_1 - 0,24 \times t &= HA \times (595 + 0,46 \times t) \\ HA &= \frac{C_1 - 0,24 \times t}{(595 + 0,46 \times t)} \\ HA &= \frac{C_1}{(595 + 0,46 \times t)} - \frac{0,24 \times t}{(595 + 0,46 \times t)} \end{aligned}$$

Como se observa el denominador varía con la temperatura, pero como se observa en el diagrama, el rango de temperaturas es de -5° C hasta 50° C. Si se calcula el denominador para esos valores:

Para -5° C → $[595 + 0,46 \cdot (-5 \text{ °C})] = 592,7$

Para 50° C → $(595 + 0,46 \cdot 50 \text{ °C}) = 618$

Como se ve, la variación del denominador en todo el rango de temperaturas de la gráfica, no es mayor del 4 %, por lo que se puede considerar el denominador constante y se lo denominará **C₂**. De esta manera, la ecuación anterior quedará:

$$HA = \frac{C_1}{C_2} - \frac{0,24 \times t}{C_2}$$

Si a la relación de las constantes C_1/C_2 se las denomina C_3 y la relación $0,24/C_2$ como C_4 :

$$HA = C_3 - C_4 \times t$$

Esta es la ecuación de una recta de pendiente negativa, por eso en la gráfica las rectas de entalpías constantes aparecen inclinadas hacia la izquierda.

De todas maneras, para no incurrir en errores por la variación del denominador de la ecuación, el cuadrículado de la gráfica se deforma ligeramente para que de esta manera las líneas de entalpía constantes sean rectas.

En este diagrama psicrométrico se pueden visualizar las siguientes curvas:

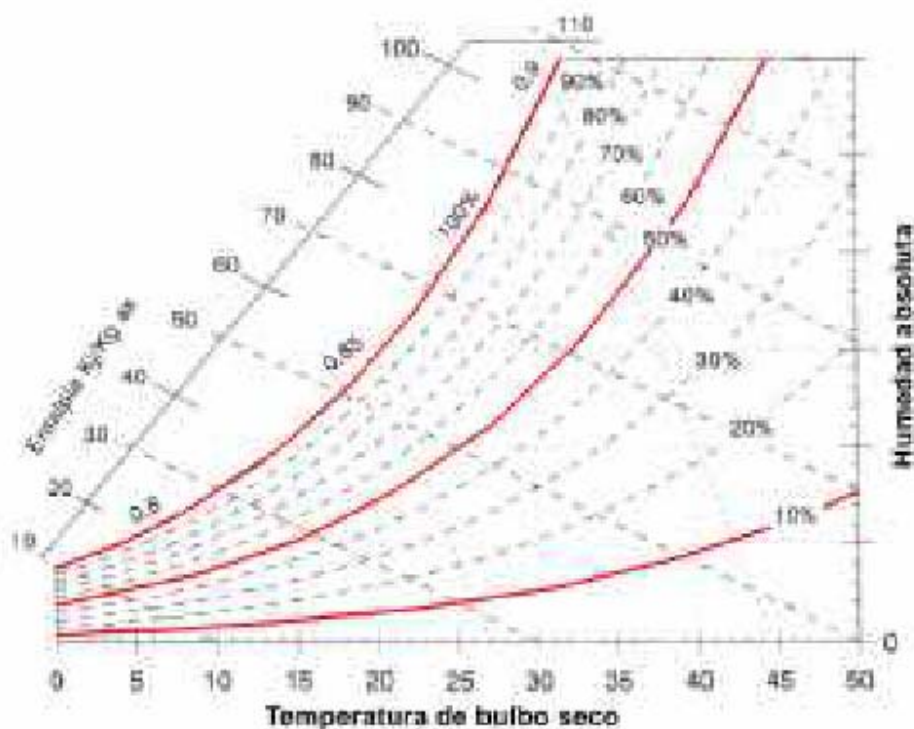


Figura 9: Curvas de humedad relativa ambiente

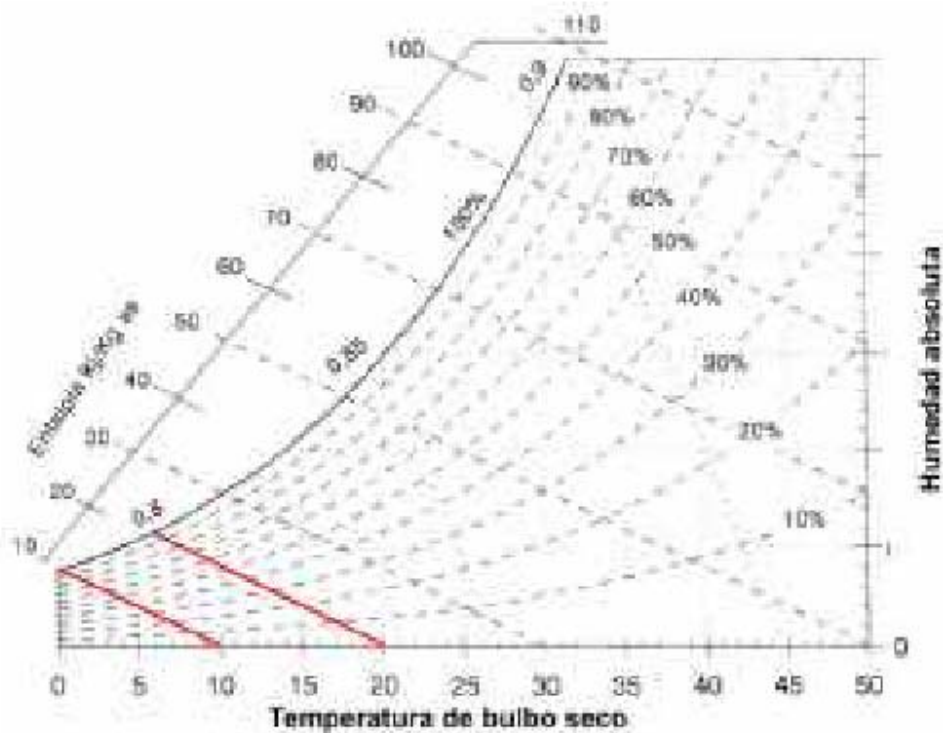


Figura 10: Líneas de entalpías constantes

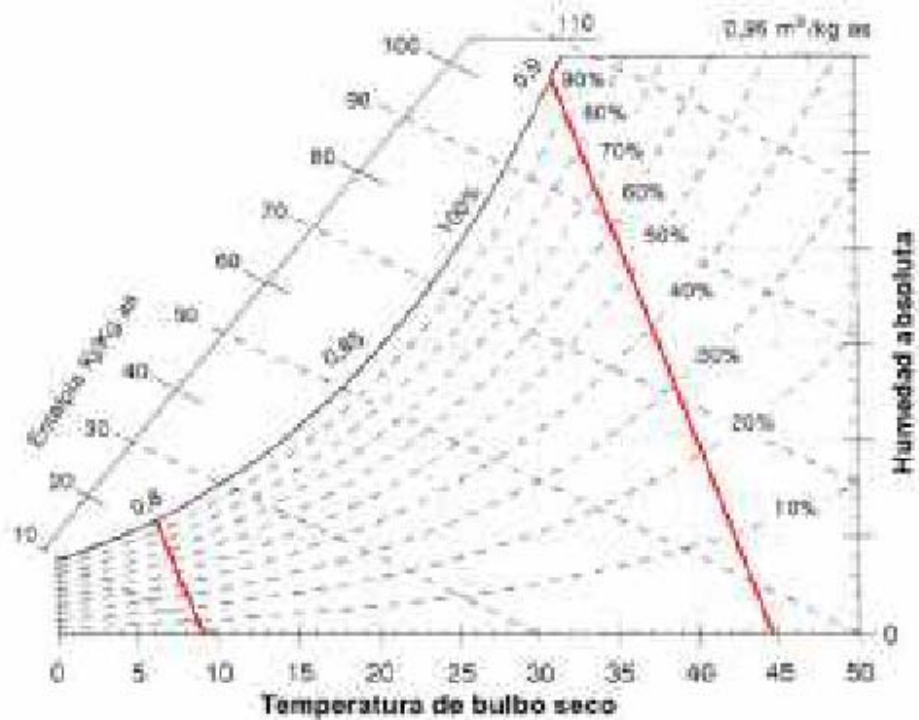


Figura 11: Líneas de volumen constante

Las líneas de volumen constante no son de importancia en este curso.
En la **Figura 12** se resumen los datos que se pueden obtener de este diagrama.

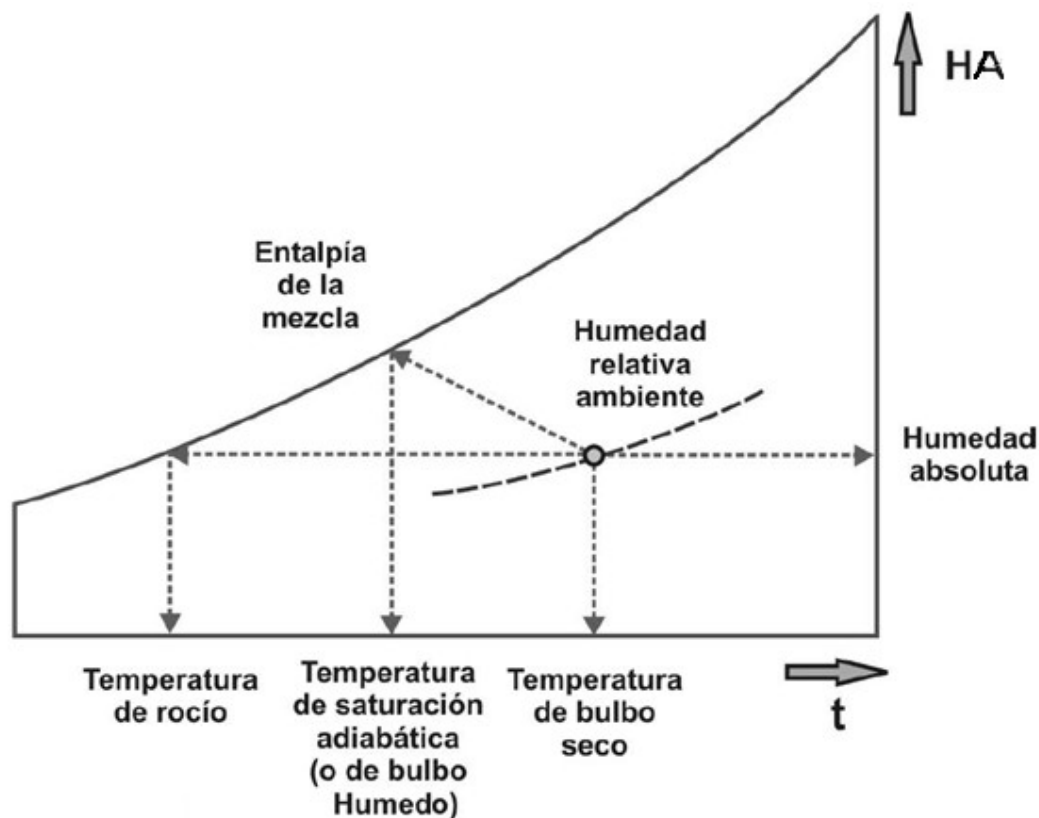


Figura 12

Transformaciones en el diagrama psicrométrico: como se ha comentado anteriormente, con este diagrama se pueden realizar una serie de cálculos sencillos, como ser:

Calentamiento a humedad constante: si se debe calentar un aire a una temperatura determinada, por ejemplo, para ser utilizado en un secadero o para acondicionamiento de aire, el dato más importante que se puede obtener de este diagrama, es la cantidad de calor a agregar a cada unidad de masa de aire.

Supóngase que el aire se debe calentar desde la temperatura t_0 (con una HR_0) hasta t_1 (manteniendo la humedad absoluta constante, es decir sin agregar ni extraer vapor de agua al aire), la cantidad de calor a agregar por unidad de masa de aire es la diferencia de entalpías ($\overline{\Delta H}_1 - \overline{\Delta H}_0$) (ver **Figura 12**). Como se observa en la **Figura 13**, ha medida que el aire se calienta (a humedad constante) la HR disminuye (hasta $\overline{\Delta H}_1$) por lo que su capacidad para absorber vapor de agua aumenta, por eso, en los secaderos se utiliza aire caliente.

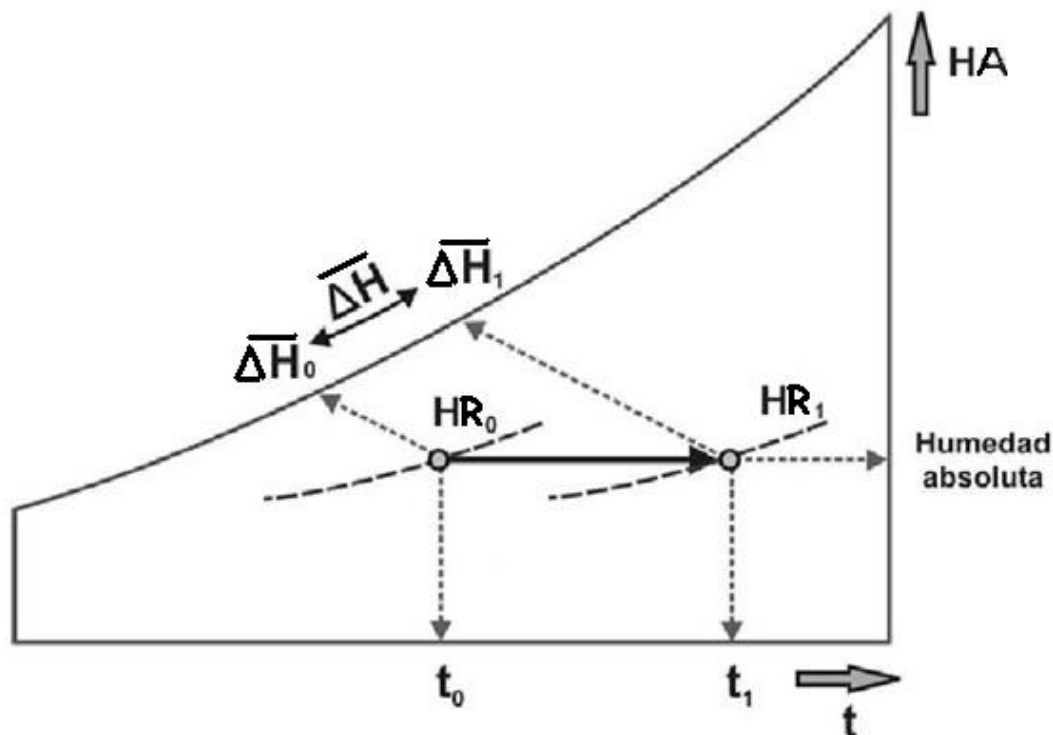


Figura 13

Enfriamiento a humedad constante: esta transformación es la inversa de la anterior y se la puede utilizar en los procesos de enfriamiento para acondicionadores de aire. En la medida que el aire se enfría su **HR** comienza a aumentar. Si sigue bajando la temperatura, la humedad relativa ambiente puede llegar al 100 % (con lo cual comenzaría a condensar agua) y esa sería la temperatura de rocío (t_R). Si se sigue disminuyendo la temperatura el vapor de agua condensa (para mantener la humedad relativa ambiente en el 100 %), por lo cual la humedad absoluta disminuye, (por eso un aparato de aire acondicionado gotea agua desde el enfriador).

Supóngase que se parte de un aire con temperatura t_0 , entalpía $\overline{\Delta H}_0$ y HR_0 , al enfriarlo hasta saturación se llega a la temperatura de rocío (t_R) y si se sigue enfriando hasta la temperatura t_1 , condensa agua. La cantidad de agua condensada por unidad de masa de aire es $(HA_0 - HA_1)$ y la cantidad de calor a extraer para llevarlo a esas condiciones es $(\overline{\Delta H}_0 - \overline{\Delta H}_1)$. Ver **Figura 14**.

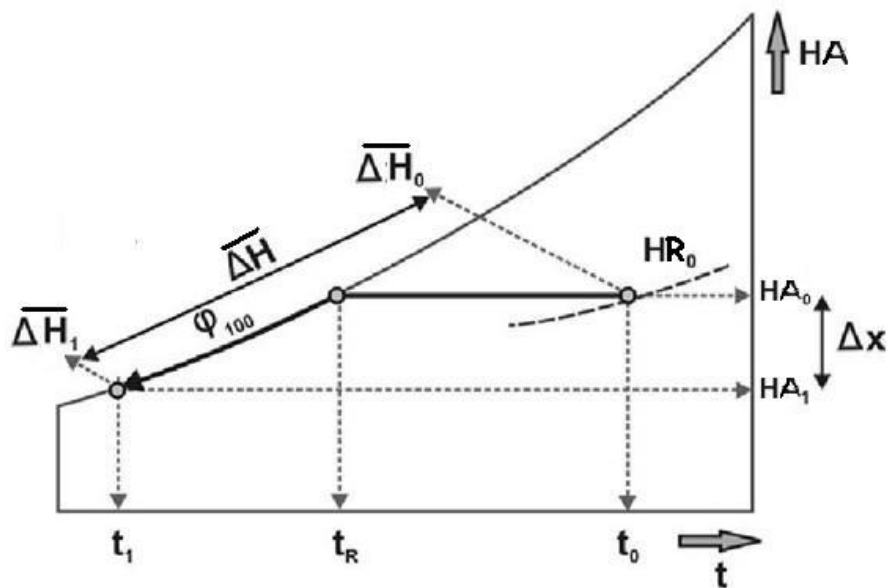


Figura 14

Enfriamiento a entalpía constante: Las paredes de un secadero industrial normalmente están aisladas para evitar la pérdida de calor a través de ellas, debido a esto el aire que se utiliza para secar un determinado material dentro del secadero, realiza una transformación de saturación a entalpía constante, pudiendo llegar a su temperatura mínima posible, que es la temperatura de saturación adiabática. En la **Figura 15** se puede observar que el aire inicial (con una temperatura inicial t_0 y una humedad relativa ambiente ϕ) evoluciona sobre la línea de entalpía constante, hasta llegar a la curva de humedad relativa ambiente del 100 %. En ese momento la temperatura del aire será la de saturación adiabática. De todas maneras, en un secadero real nunca llega a esa temperatura, ya que la capacidad del secadero para eliminar agua del material es inversamente proporcional a la **HR**; cuando mayor es la **HR** menor capacidad de secar tiene el secadero.

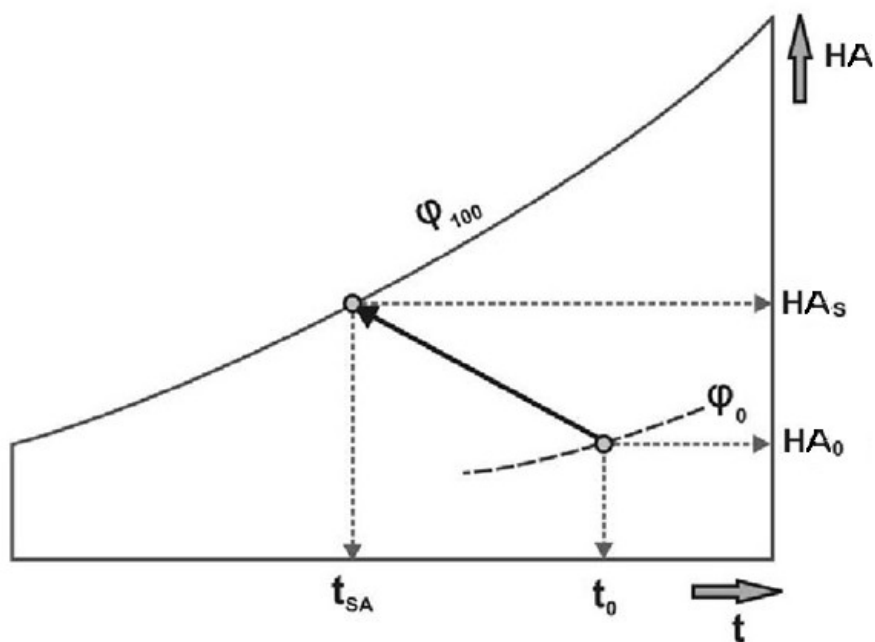


Figura 15

Determinación de la HR utilizando la temperatura de bulbo húmedo y la de bulbo seco: Una de las aplicaciones importantes del diagrama psicrométrico es la determinación de la **HR** mediante la utilización del psicrómetro (ver **Figuras 2 y 3**). Con este equipo se determina la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco de un aire. Como ya se ha comentado, para solamente un sistema aire – vapor de agua, la temperatura de bulbo húmedo coincide sensiblemente con la temperatura de saturación adiabática. Por lo tanto, teniendo esos dos datos, el proceso para hallar la **HR** es la inversa del método anterior (ver **Figura 16**).

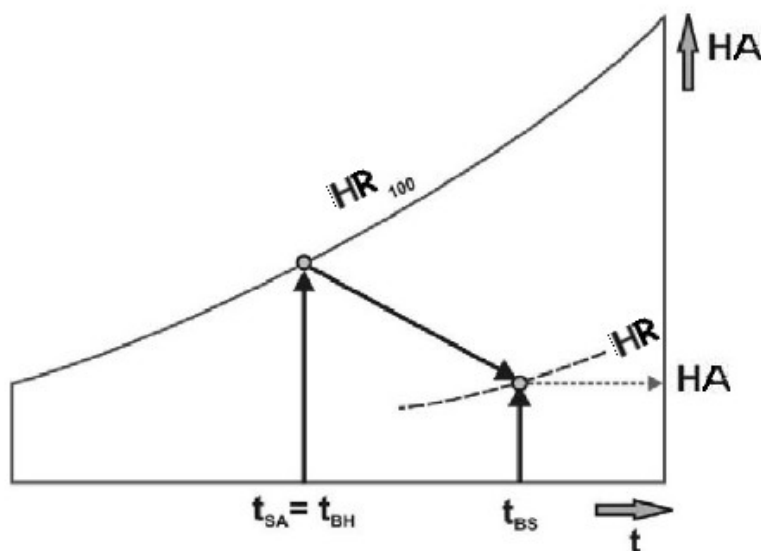
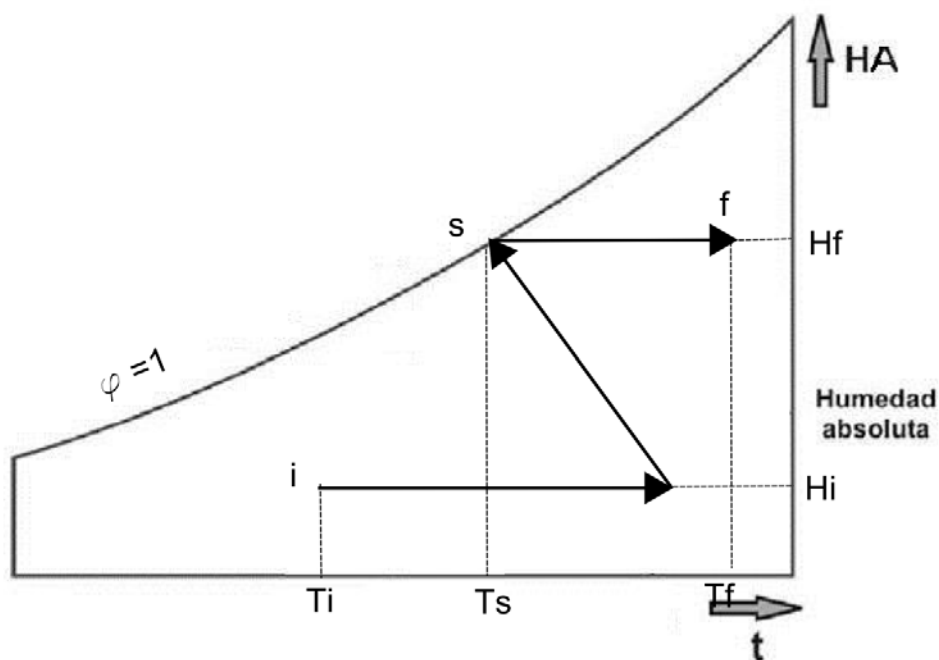


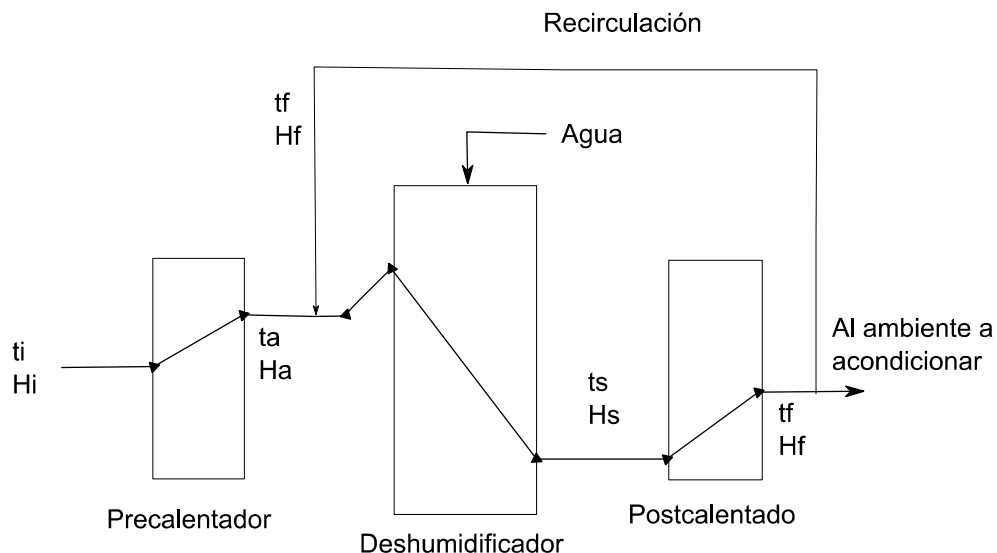
Figura 16

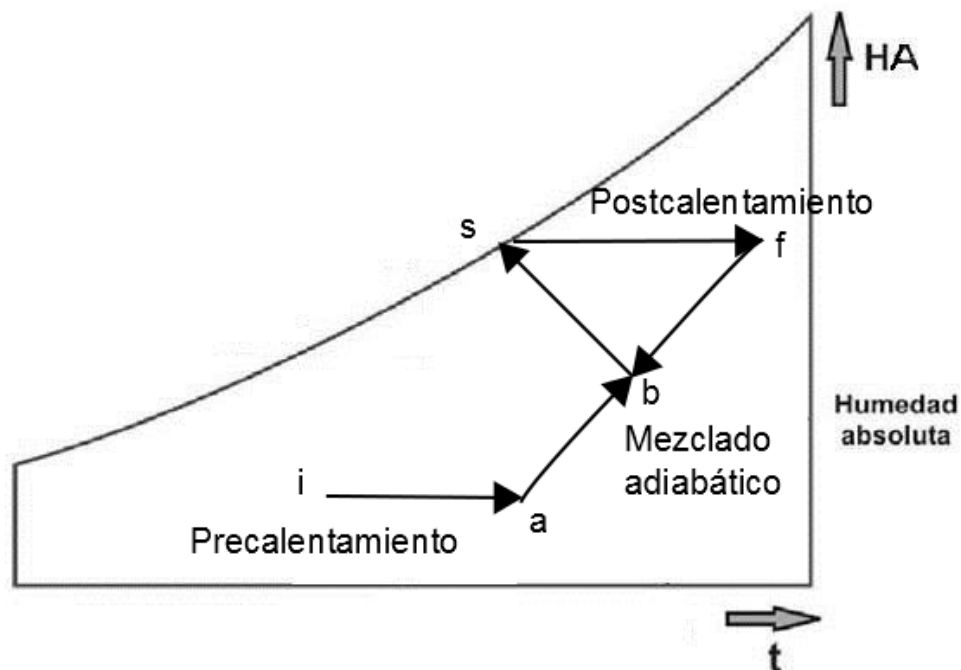
Humidificación



Humidificación con mezcla o recirculación

En varias aplicaciones industriales se tira el aire ya usado para evitar acumulación de vapores riesgosos o por otros motivos. No obstante, esto implica un desperdicio de dinero que se debe evitar cuando sea posible. En acondicionamiento de ambientes para personas también es necesario renovar el aire viciado, pero resulta deseable mezclar una cantidad de aire ambiente con el que se introduce fresco; a esto se lo denomina recirculación. A continuación un croquis de las operaciones en este tipo de proceso.





Deshumidificación

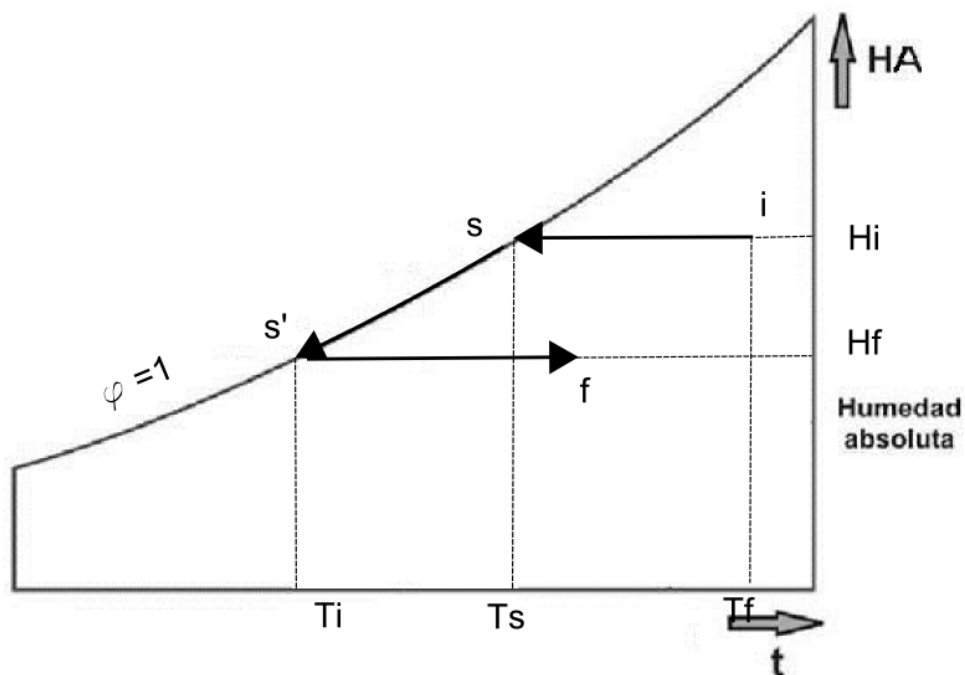
Es una operación necesaria en el acondicionamiento en climas cálidos y húmedos. Se puede lograr de dos maneras: por enfriamiento mediante un intercambiador de calor (deshumidificación con superficie de enfriamiento) o por contacto directo del aire con agua previamente enfriada. Así como la humidificación casi siempre viene acompañada de calentamiento, la deshumidificación se asocia con enfriamiento. En verano la mayoría de las personas está más cómoda con temperaturas del orden de 25 °C y humedades del orden del 50% aunque según el diagrama de confort que se acompaña también pueden estar confortables a temperaturas del orden de 24 °C y humedades relativas del orden de 70%. La elección se hace en función de la estructura de costos operativos.

Deshumidificación por intercambiador enfriador

En este sistema el aire externo se pone en contacto con un intercambiador de calor (generalmente de tubos aletados) por el que circula un refrigerante, que lo enfría a humedad constante desde i hasta s.

Allí se comienza a eliminar la humedad que condensa en el intercambiador y lleva la condición del aire hasta s'. Desde s' se calienta hasta la condición f de ser preciso.

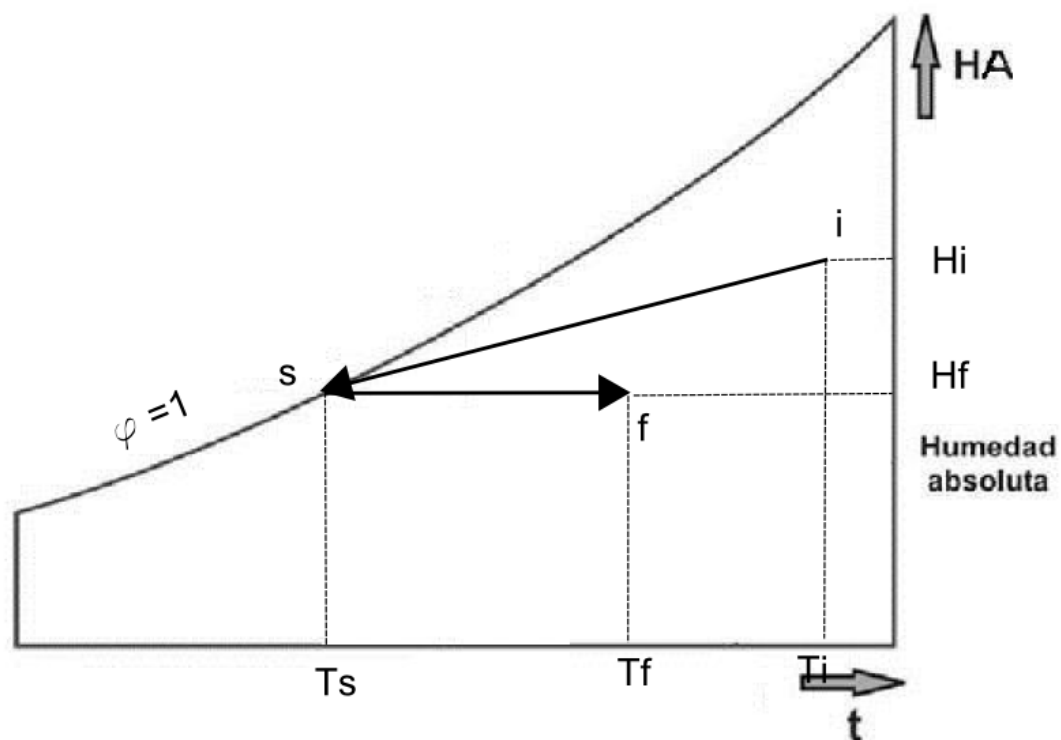
Otras veces, cuando se desea mantener una temperatura acondicionada a valores inferiores a la temperatura ambiente, se envía el aire al interior con la condición s' a fin de mantener baja la temperatura. Este es el tipo de evolución que produce un acondicionador de aire doméstico.



Deshumidificación por contacto directo

En este proceso el aire se pone en contacto con agua enfriada a temperatura algo menor que T_s , que se pulveriza para que al tomar contacto con el aire lo enfríe, lo que produce la condensación de humedad desde hasta H_i en H_s . Luego, de ser necesario se recalienta el aire hasta f , o sino si se desea que el aire entre frío al local para compensar el calor generado en el mismo, se ingresa con la condición s . Este proceso es algo más difícil de controlar que el anterior, pero más económico en su operación.

El cálculo de las operaciones de deshumidificación es algo más complejo que el de las de humidificación. Sin embargo el aire de recirculación (o sea el que se toma del local para reciclar) no complica los cálculos ya que es más fácil de controlar. Para simplificar los cálculos se emplea un parámetro llamado coeficiente de calor sensible (ccs). El coeficiente de calor sensible se define como el cociente del calor sensible producido o liberado en el interior del local dividido por el calor total (calor sensible más calor latente). Se denomina calor sensible al calor producido o liberado sin tomar en cuenta la humedad. El calor latente es el proveniente de la humedad liberada en el interior del local. Salvo los casos excepcionales como ser talleres donde se libera vapor el calor latente y el sensible provienen de los propios ocupantes del local. Se puede estimar mediante una tabla



ANEXO 1:

Torre de enfriamiento

Limitaciones y alcances:

Lo aquí presentado es una simplificación del fenómeno cuyos detalles serán considerados en la cátedra "Operaciones Unitarias 2". En principio se aplicarán los conceptos vertidos en el tema Higrometría para el estudio de las condiciones del aire húmedo que ingresan y egresan de la torre sin entrar en detalles de diseño.

Conceptualmente una torre de enfriamiento es un equipo que acondiciona térmicamente a una corriente de agua que fluye en un circuito compuesto de equipos que le entregan calor (equipos a refrigerar como reactores, compresores, condensadores, etc) y la propia torre que la enfria. Adicionalmente tendremos equipos adicionales como bombas de circulación, inyectores de productos químicos, etc. Debido a que el agua está en circuito cerrado se agregan productos químicos para evitar la formación de algas u otros organismos, incrustaciones, se ajusta el ph, etc. Además, debido a la sempiterna presencia de sales la concentración de estas tiende a aumentar por los que se acumularían para lo que se dispone de una purga correspondiente.

Si bien una torres real tiene varias etapas de equilibrio en esta cátedra asumiremos sólo una por lo que las temperaturas de salida serán iguales.

El principio de operación se expuso en el punto “temperatura de saturación adiabática”. El agua caliente proveniente de la planta se ingresa a la torre por la parte superior y cae por gravedad. Esta corriente se pone en contacto con otra de aire fresco tomada de la atmósfera que hace el camino opuesto (hacia arriba). Hay 3 mecanismos por lo que esto ocurre, por tiro natural: cuando la propia diferencia de temperatura del aire dentro y fuera del equipo genera la circulación, por tiro inducido: cuando existe un ventilador que extrae el aire del interior del equipo desde la parte exterior o tiro forzado: cuando el soplador impulsa el aire hacia en interior. Podría también, de ser necesario, combinar los métodos.

El mecanismo por lo que el agua se enfría es que el aire que ingresa aun conteniendo humedad permite acomodar cierta cantidad de agua hasta alcanzar su saturación. El agua que se aporta es por evaporación de la entrada de agua caliente. Para producirse el cambio de fase se requiere calor que se toma del mismo sistema enfriándolo. El agua fría cae a una pileta desde la que es bombeada a la planta cerrándose el ciclo.

Pero en realidad se aprecia que el ciclo no es cerrado produciéndose permanente pérdida de agua (agua tratada, recordemos) no solo por el propio funcionamiento de la torre sino también por las gotas que suelen ser arrastradas por el aire como así la necesaria purga requerida para evitar la acumulación de sales.

Para evitar la pérdida de inventario de agua esa cantidad debe reponerse en lo que se conoce como agua de reposición o make-up por la expresión en inglés. Al considerar una sola etapa ambas temperaturas de salida son igual siendo la mínima que es posible la temperatura de bulbo húmedo la que es muy dependiente de la humedad del aire de entrada.

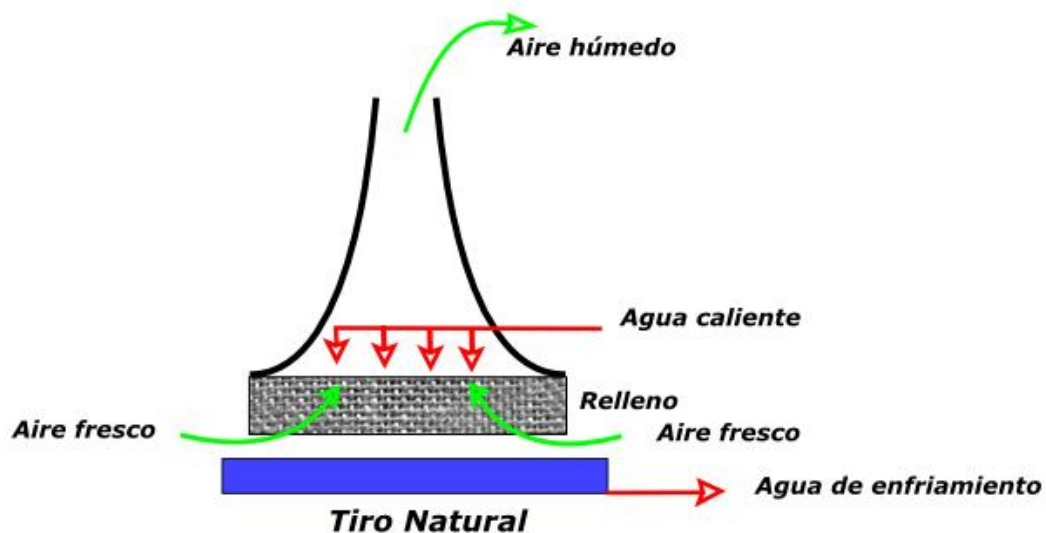


Figura 17

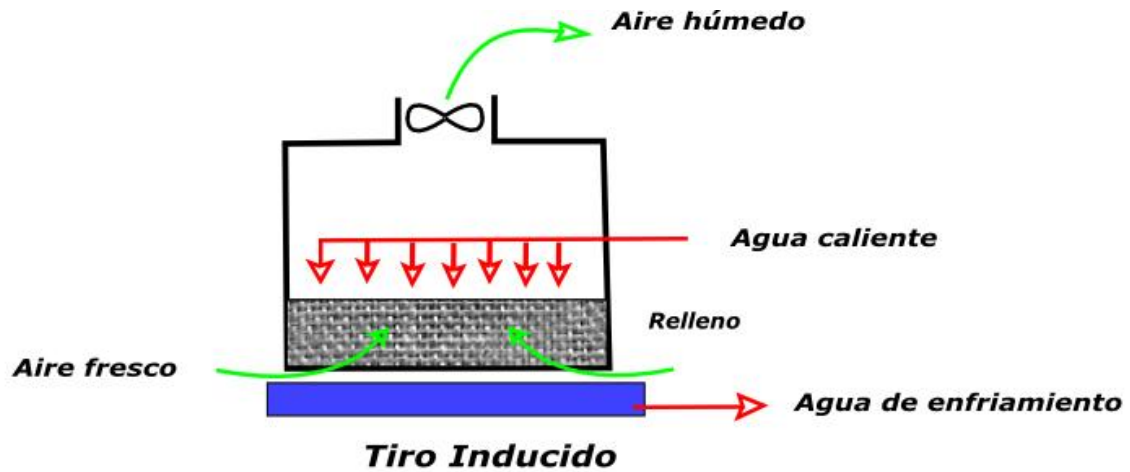


Figura 18

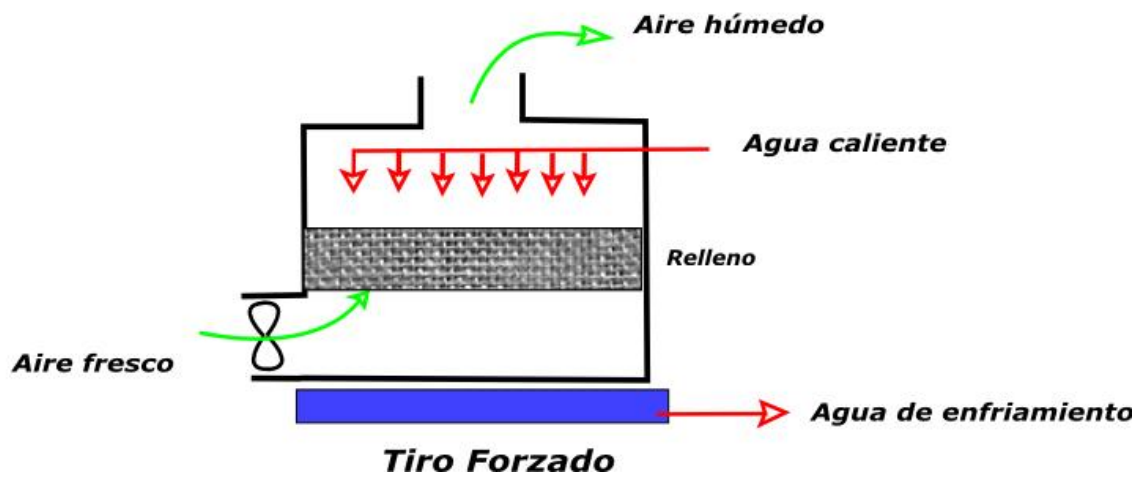


Figura 19

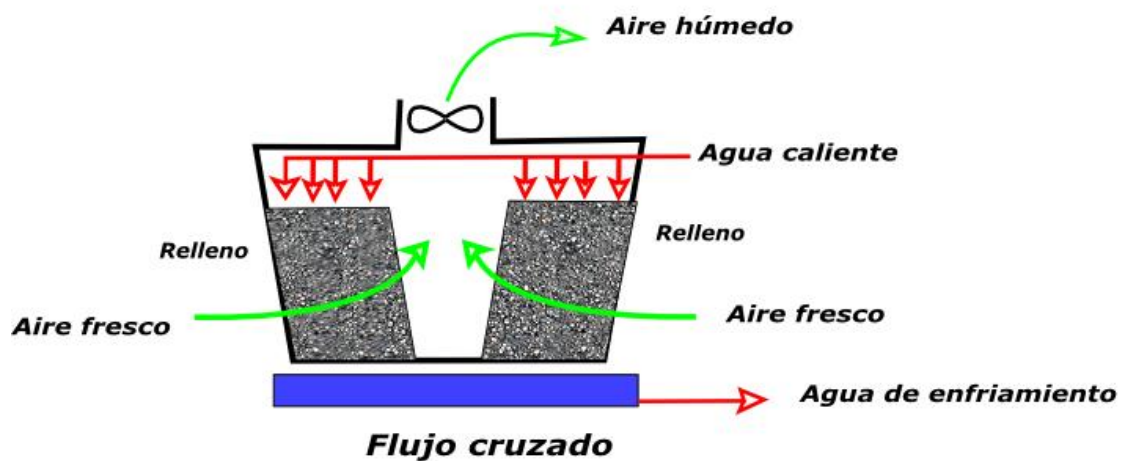


Figura 20

Aplicación de higrometría.

Una corriente de agua de enfriamiento que viene caliente del proceso se pone en contacto con aire. Una parte del agua se evapora en forma adiabática y enfría el resto del agua que abandona la torre. A modo de simplificación supondremos que la torre opera como una única etapa de equilibrio (en la realidad son varias) por lo que podemos admitir que las temperaturas del aire y del agua que abandonan el equipo son la misma. Además supondremos que el aire sale completamente saturado. Debido a la pérdida de agua por evaporación ésta debe reponerse. En el presente modelo dicha corriente no está considerada.

Esquema:

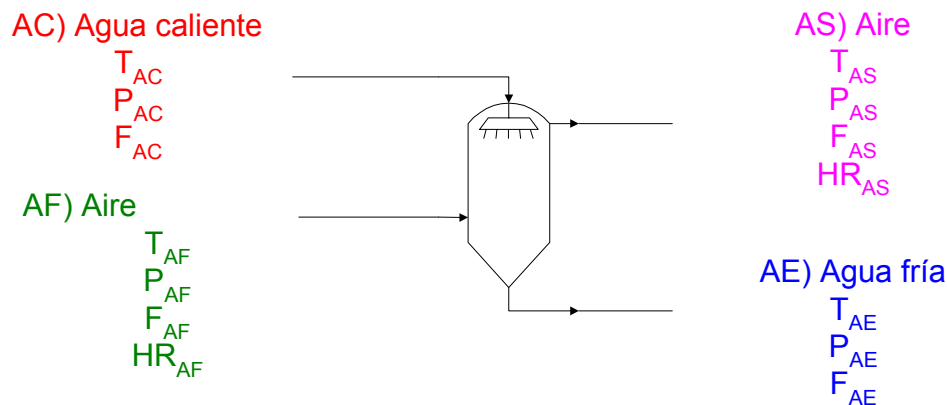


Figura 21

AC) Agua caliente:

Flujo: F_{AC}
 Temperatura: T_{AC}
 Presión: P_{AC}
 Entalpía: $H_{AC} = \int_0^{T_{AC}} Cp \times t = Cp \times T_{AC}$

AF) Aire Frío

Flujo: F_{AF}
 Temperatura: T_{AF}
 Presión: P_{AF}
 Humedad Relativa: HR_{AF}

Presión de saturación: $Ps_{AF} = 10^{\left(A - \frac{B}{C + T_{AF}}\right)}$

Presión de vapor: $Pv_{AF} = \frac{Ps_{AF} \times HR_{AF}}{100}$

Fracción de agua: $x_{AF} = \frac{P_{v_{AF}}}{P_{AF}}$

Peso Molecular: $PM_{AF} = x_{AF} \times 18 + (1 - x_{AF}) \times 28,84$

Fracción másica: $xm_{AF} = \frac{P_{v_{AF}}}{P_{AF}} \frac{18}{PM_{AF}}$

Entalpía: $H_{AF} = 0,24 \times T_{AF} + xm_{AF} \times (595 + 0,22 \times T_{AF})$

AE) Agua de enfriamiento:

Flujo: F_{AE}

Temperatura: T_{AE}

Presión: P_{AE}

Entalpía: $H_{AE} = \int_0^{T_{AE}} Cp \times t = Cp \times T_{AE}$

2) Aire salida

Flujo: F_{AS}

Temperatura: T_{AS}

Presión: P_{AS}

Humedad Relativa: HR_{AS}

Presión de saturación: $P_{s_{AS}} = 10^{\left(A - \frac{B}{C + T_{AS}}\right)}$

Presión de vapor: $P_{v_{AS}} = \frac{P_{s_{AS}} \times HR_{AS}}{100}$

Fracción de agua: $x_{AS} = \frac{P_{v_{AS}}}{P_{AS}}$

Peso Molecular: $PM_{AS} = x_{AS} \times 18 + (1 - x_{AS}) \times 28,84$

Fracción másica: $xm_{AS} = \frac{P_{v_{AS}}}{P_{AS}} \frac{18}{PM_{AS}}$

Entalpía: $H_{AS} = 0,24 \times ts + xm_{AS} \times (595 + 0,22 \times ts)$

Resolución:

Balance global de materia: $F_{AC} + F_{AF} = F_{AS} + F_{AE}$ (1)

Balance por componente: $F_{AC} \times xm_i^{AC} + F_{AF} \times xm_i^{AF} = F_{AS} \times xm_i^{AS} + F_{AE} \times xm_i^{AE}$

Si consideramos al aire seco como un componente puro la mezcla puede tratarse como binaria bastando sólo un balance por componente. En caso de usar el del aire seco, se anulan sus composiciones en la corrientes de agua (se asume que no hay aire disuelto).

$$F_{AF} \times xm_{AS}^{AF} = F_{AS} \times xm_{AS}^{AS} \quad (2)$$

$$F_{AS} = \frac{F_{AF} \times xm_{AS}^{AF}}{xm_{AS}^{AS}}$$

Balance de energía: $F_{AC} \times H_{AC} + F_{AF} \times H_{AF} = F_{AS} \times H_{AS} + F_{AE} \times H_{AE}$ (3)

Sistema de ecuaciones:

Siendo que las composiciones de las 4 corrientes se pueden calcular y que, dadas las 4 temperaturas se pueden calcular las 4 entalpías, tomamos a estos como parámetros con lo que nos queda:

Variables) $F_{AC}, H_{AC}, F_{AF}, x_{AS}^{AF}, H_{AF}, F_{AS}, x_{AS}^{AS}, H_{AS}, F_{AE}, H_{AE}, T_{AC}, T_{AF}, T_{AF}, T_{AS}$

Parametros) $H_{AC}, F_{AF}, xm_{AS}^{AF}, H_{AF}, xm_{AS}^{AS}, H_{AS}, H_{AE}, T_{AC}, T_{AF}, T_{AF}, T_{AS}$

Variables) F_{AC}, F_{AS}, F_{AE}

Que junto con las ecuaciones (1), (2) y (3) nos conforma un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas por lo que el sistema puede resolverse.

Agua de reposición:

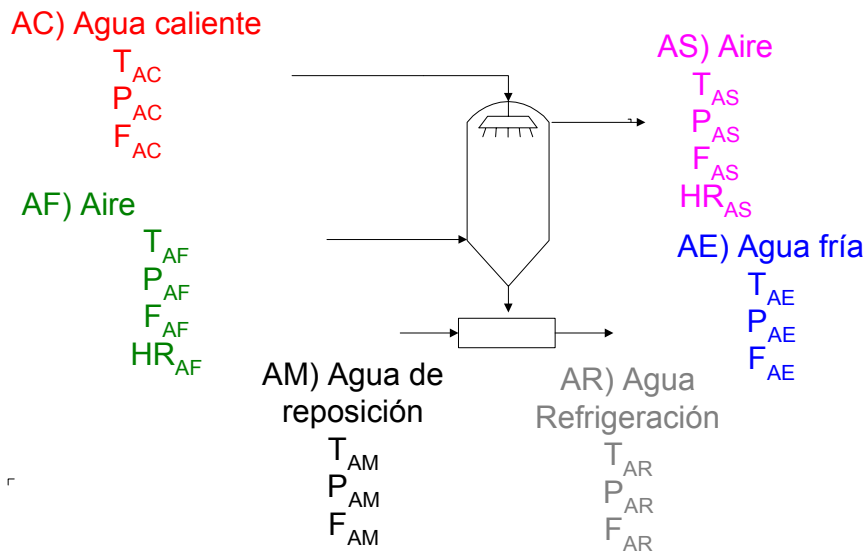


Figura 22

Para evitar que el inventario de agua de la torre disminuya se le agrega una cantidad de agua de reposición (Make up) equivalente a la cantidad evaporada. Como la temperatura de la misma es diferente a la de Agua de enfriamiento que sale de la torre, el agua refrigerada (la que finalmente va al proceso) resulta tener una temperatura diferente que debe calcularse del balance de energía de la propia pileta.

$$F_{AM} \times H_{AM} + F_{AE} \times H_{AE} = F_{AR} \times H_{AR}$$

Ejemplo numérico:

Una corriente de aire de 1000 Kg/hr a 27 °C, 1 atm de presión con una humedad relativa del 40 % ingresa a una torre de enfriamiento de la que sale totalmente saturado y a una temperatura de 30 °C para enfriar una corriente de agua de enfriamiento cuya temperatura es de 50 °C. El sistema está en equilibrio.

- Calcular la humedad absoluta de la corriente de aire que sale.
- Calcular la cantidad de agua de enfriamiento que se evapora.
- Calcular la cantidad de agua que puede enfriarse.

Datos:

Temperatura de referencia: 0 [°C]

$CP_{AGUA} = 1$ [Kcal/Kg °C]

$$H_{AGUA} = \int_0^t Cp_{AGUA} \times dt = 1 \left[\frac{Kcal}{Kg \times ^\circ C} \right] \times (t - 0) [^\circ C] = t \left[\frac{Kcal}{Kg} \right]$$

Entradas :

AC) Agua caliente

Flujo = F_{AC}

$T_{AC} = 50$ [°C]

$P_{AC} = 1$ [atm]

$H_{AC} = 50$ [Kcal/Kg]

AF) Aire Frío

$F_{AF} = 1000$ [Kg/hr]

$T_{AF} = 27$ [°C]

$P_{AF} = 1$ [atm]

$HR_{AF} = 40$ %

$$P_{sat_{AF}} = 10^{\left(8,071311 - \frac{1730,63}{233,426 + T_{AF}} \right)} = 10^{\left(8,071311 - \frac{1730,63}{233,426 + 27} \right)} = 26,66 \text{ [mmHg]}$$

$$P_{v_{AF}} = HR_{AF} = \frac{P_{v_{AF}}}{P_{sat_{AF}}} \times 100 \rightarrow P_{v_{AF}} = \frac{HR_{AF} \times P_{sat_{AF}}}{100}$$

$$P_{v_{AF}} = \frac{40 \times 26,66 \text{ [mmHg]}}{100} = 10,66 \text{ [mmHg]}$$

$$\text{Humedad absoluta} \quad w_{AF} = \frac{P_{v_{AF}}}{P_{AF} - P_{v_{AF}}} = \frac{10,66}{760 - 10,66} = 0,01423 \left[\frac{Kmol_{AGUA}}{Kmol_{AS}} \right]$$

Humedad absoluta másica

$$wm_{AF} = \frac{PM_{Agua}}{PM_{AS}} \frac{Pv_{AF}}{P_{AF} - Pv_{AF}} = 0,622 \times \frac{10,66}{760 - 10,66} = 8,851 \times 10^{-3} \left[\frac{Kg_{AGUA}}{Kg_{AS}} \right]$$

$$\text{Fracción molar } x_{AF} = \frac{Pv_{AF}}{P_{AF}} = \frac{10,66}{760} = 0,01403 \left[\frac{Kmol_{AGUA}}{Kmol_{AH}} \right]$$

Peso molecular

$$PM_{AF} = \sum_{i=1}^{NC} x_i^{AF} \times PM_i = 0,01403 \times 18 + (1 - 0,01403) \times 28,84 = 28,69 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right]$$

$$\text{Fracción másica } xm_{AF} = \frac{18}{28,69} \times \frac{Pv_{AF}}{P_{AF}} = 0,627 \times \frac{10,66}{760} = 8,800 \times 10^{-3} \left[\frac{Kg_{AGUA}}{Kg_{AH}} \right]$$

$$\text{Entalpía } H_{AF} = 0,24 \times t_{AF} + xm_{AF} \times (595 + 0,22 \times t_{AF}) =$$

$$H_{AF} = 0,24 \times 27 + 8,800 \times 10^{-3} \times (595 + 0,22 \times 27) = 11,77 \left[\frac{Kcal}{Kg_{AH}} \right]$$

Salidas :

AE) Agua de enfriamiento

$$\text{Flujo} = F_{AE}$$

$$T_{AE} = T_{AS} = 30 [^{\circ}\text{C}] \text{ (se considera equilibrio entre fases)}$$

$$P_{AE} = 1 [\text{atm}]$$

$$H_{AE} = 30 [\text{Kcal/Kg}]$$

AS) Aire saturado

$$\text{Flujo} = F_{AS} [\text{Kg/hr}]$$

$$T_{AS} = 30 [^{\circ}\text{C}]$$

$$P_{AS} = 1 [\text{atm}]$$

$$HR_{AS} = 100 \% \text{ (rendimiento del 100 \% de la torre)}$$

$$P_{sat_{AS}} = 10^{\left(8,071311 - \frac{1736,63}{233,426 + T_{AS}}\right)} = 10^{\left(8,071311 - \frac{1736,63}{233,426 + 30}\right)} = 31,74 [mmHg]$$

$$Pv_{AS} = HR_{AS} = \frac{Pv_{AS}}{P_{sat_{AS}}} \times 100 \rightarrow P_{AS} = \frac{HR_{AS} \times P_{sat_{AS}}}{100}$$

$$P_{AS} = \frac{100 \times 31,74 [mmHg]}{100} = 31,74 [mmHg]$$

$$\text{Humedad absoluta } w_{AS} = \frac{Pv_{AS}}{P_{AS} - Pv_{AS}} = \frac{31,74}{760 - 31,74} = 0,04358 \left[\frac{Kmol_{AGUA}}{Kmol_{AS}} \right]$$

Humedad absoluta másica

$$wm_{AS} = \frac{PM_{Agua}}{PM_{AS}} \frac{Pv_{AS}}{P_{AS} - Pv_{AS}} = 0,622 \times \frac{31,74}{760 - 31,74} = 0,02711 \left[\frac{Kg_{AGUA}}{Kg_{AS}} \right]$$

$$\text{Fracción molar } x_{AS} = \frac{Pv_{AS}}{P_{AS}} = \frac{31,74}{760} = 0,04176 \left[\frac{Kmol_{AGUA}}{Kmol_{AH}} \right]$$

Peso molecular

$$PM_{AS} = \sum_{i=1}^{NC} x_i^{AS} \times PM_i = 0,04176 \times 18 + (1 - 0,04176) \times 28,84 = 28,38 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right]$$

$$\text{Fracción másica } xm_{AS} = \frac{18}{28,38} \times \frac{Pv_{AS}}{P_{AS}} = 0,6341 \times \frac{31,74}{760} = 0,02648 \left[\frac{Kg_{AGUA}}{Kg_{AH}} \right]$$

$$\text{Entalpía } H_{AS} = 0,24 \times T_{AS} + xm_{AS} \times (595 + 0,22 \times T_{AS}) =$$

$$H_{AS} = 0,24 \times 30 + 0,02648 \times (595 + 0,22 \times 30) = 23,13 \left[\frac{Kcal}{Kg_{AH}} \right]$$

Enfoque generalizado:

Torre de enfriamiento

Aplicación higrometría.

Esquema:

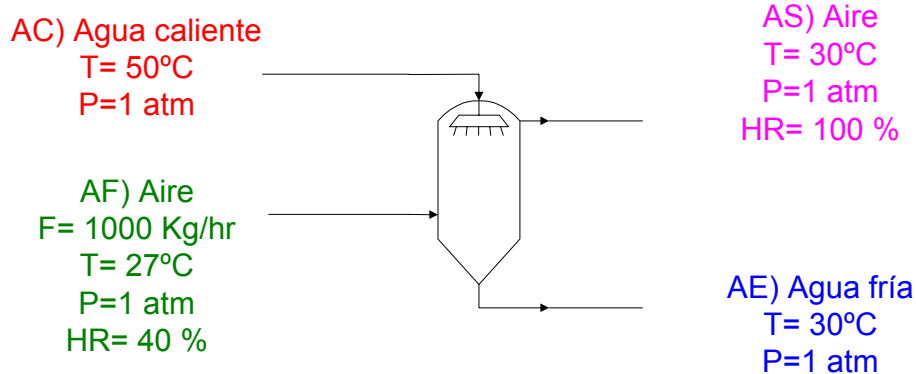


Figura 23

$$\text{Balance global de materia: } F_{AC} + F_{AF} = F_{AS} + F_{AE} \quad (1)$$

$$\text{Balance por componente: } F_{AC} \times xm_i^{AC} + F_{AF} \times xm_i^{AF} = F_{AS} \times xm_i^{AS} + F_{AE} \times xm_i^{AE}$$

Si consideramos al aire seco como un componente puro la mezcla puede tratarse como binaria bastado sólo un balance por componente. En caso de usar el del aire seco, se anulan sus composiciones en la corrientes de agua (se asume que no hay aire disuelto).

$$F_{AF} \times x_{m_{AS}}^{AF} = F_{AS} \times x_{m_{AS}}^{AS} \quad (2)$$

$$F_{AS} = \frac{F_{AF} \times x_{m_{AS}}^{AF}}{x_{m_{AS}}^{AS}}$$

$$\text{Balance de energía: } F_{AC} \times H_{AC} + F_{AF} \times H_{AF} = F_{AS} \times H_{AS} + F_{AE} \times H_{AE} \quad (3)$$

Sistema de ecuaciones:

Siendo que las composiciones de las 4 corrientes se pueden calcular y que, dadas las 4 temperaturas se pueden calcular las 4 entalpías, tomamos a estos como parámetros con lo que nos queda:

$$\text{Variables)} \quad F_{AC}, H_{AC}, F_{AF}, x_{AS}^{AF}, H_{AF}, F_{AS}, x_{AS}^{AS}, H_{AS}, F_{AE}, H_{AE}, T_{AC}, T_{AF}, T_{AF}, T_{AS}$$

$$\text{Parametros)} \quad H_{AC}, F_{AF}, x_{m_{AS}}^{AF}, H_{AF}, x_{m_{AS}}^{AS}, H_{AS}, H_{AE}, T_{AC}, T_{AF}, T_{AF}, T_{AS}$$

$$\text{Variables)} \quad F_{AC}, F_{AS}, F_{AE}$$

Que junto con las ecuaciones (1), (2) y (3) nos conforma un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas por lo que el sistema puede resolverse.

En números:

$$F_{AF} = 1000 \text{ [Kg/h]}$$

$$x_{m_{AS}}^{AF} = (1 - x_{m_{AGUA}}^{AF}) = 1 - 8,8 \times 10^{-3} = 0,9912 \text{ [fracc másica]}$$

$$x_{m_{AS}}^{AS} = (1 - x_{m_{AGUA}}^{AS}) = 1 - 0,02648 = 0,9735 \text{ [fracc másica]}$$

$$H_{AC} = 50 \text{ [Kcal/Kg]}$$

$$H_{AF} = 11,77 \text{ [Kcal/Kg]}$$

$$H_{AE} = 30 \text{ [Kcal/Kg]}$$

$$H_{AS} = 23,13 \text{ [Kcal/Kg]}$$

$$F_{AC} + 1000 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right] = F_{AS} + F_{AE} \quad (a)$$

$$1000 \times 0,9912 = F_{AS} \times 0,9735 \quad (b)$$

$$F_{AC} \times 50 + 1000 \times 11,77 = F_{AS} \times 23,13 + F_{AE} \times 30 \quad (c)$$

El sistema es lineal y existen diferentes métodos de resolución. De la ecuación (b) se desprende que:

$$F_{AS} = \frac{1000 \times 0,9912}{0,9735} = 1018 \left[\frac{Kg}{hr} \right]$$

Reemplazando en la ecuación (a):

$$F_{AC} + 1000 \left[\frac{Kg}{hr} \right] = 1018 \left[\frac{Kg}{hr} \right] + F_{AE}$$

Despejando el flujo de agua de enfriamiento (F_{AE}):

$$F_{AE} = F_{AC} + 1000 \left[\frac{Kg}{hr} \right] - 1018 \left[\frac{Kg}{hr} \right]$$

Y Reemplazando en (c):

$$F_{AC} \times 50 + 1000 \times 11,77 = 1018 \left[\frac{Kg}{hr} \right] \times 23,13 + \left(F_{AC} + 1000 \left[\frac{Kg}{hr} \right] - 1018 \left[\frac{Kg}{hr} \right] \right) \times 30$$

Operando algebraicamente (momentáneamente quitamos las unidades):

$$F_{AC} \times 50 + 11770 = 23546 + 30 \times F_{AC} - 540$$

$$F_{AC} \times 50 - 30 \times F_{AC} = 23546 - 540 - 11770$$

$$20 \times F_{AC} = 11236$$

Flujo de agua caliente) $F_{AC} = \frac{11236}{20} = 561,8 \left[\frac{Kg}{hr} \right]$

Flujo de agua de enfriamiento) $F_{AE} = 561,8 + 1000 - 1018 = 543 \left[\frac{Kg}{hr} \right]$

Agua evaporada) $= 561,8 \left[\frac{Kg}{hr} \right] - 543,8 \left[\frac{Kg}{hr} \right] = 18 \left[\frac{Kg}{hr} \right]$

a) La humedad absoluta a la salida es: 27,11 [gr de agua/Kg de aire seco]

b) Se evaporan 18 [Kg/hr]

c) Se obtuvieron 543 [Kg/hr] de agua de enfriamiento.

Agua de reposición:

El agua que se evapora se repone con una corriente de agua cuya temperatura es de 27 °C y 1 atm de presión, calcular la temperatura del agua que abandona la pileta de la torre.

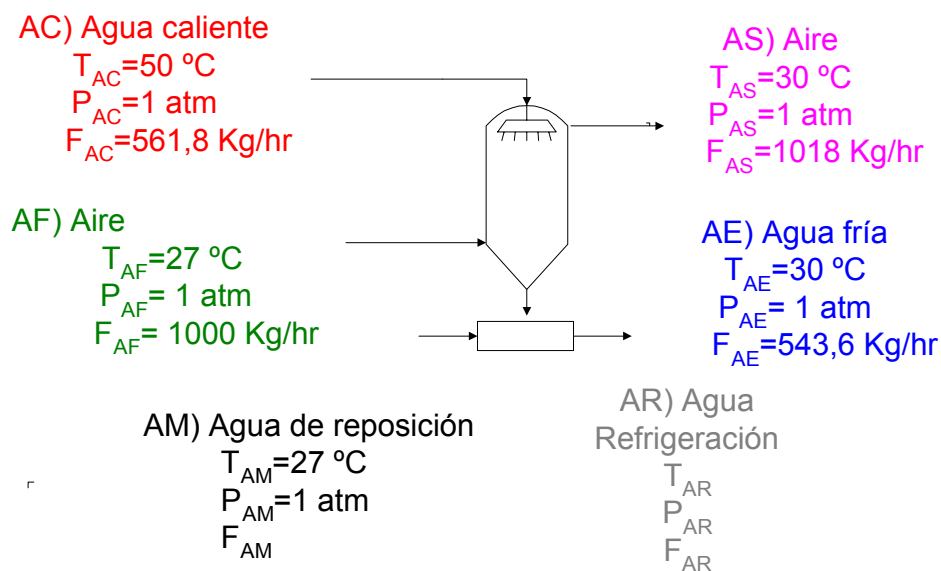


Figura 24

AM) Agua de reposición

Flujo = F_{AM}

$T_{AM} = 27\text{ [°C]}$

$$P_{AM} = 1 \text{ [atm]}$$

$$H_{AM} = 27 \text{ [Kcal/Kg]}$$

$$F_{AM} = F_{AC} - F_{AE} = 561,8 - 543,6 = 18,2 \text{ [Kg/hr]}$$

AR) Agua de refrigeración

$$\text{Flujo} = F_{AR}$$

$$T_{AR} = ? \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$P_{AR} = 1 \text{ [atm]}$$

$$H_{AR} = ? \text{ [Kcal/Kg]}$$

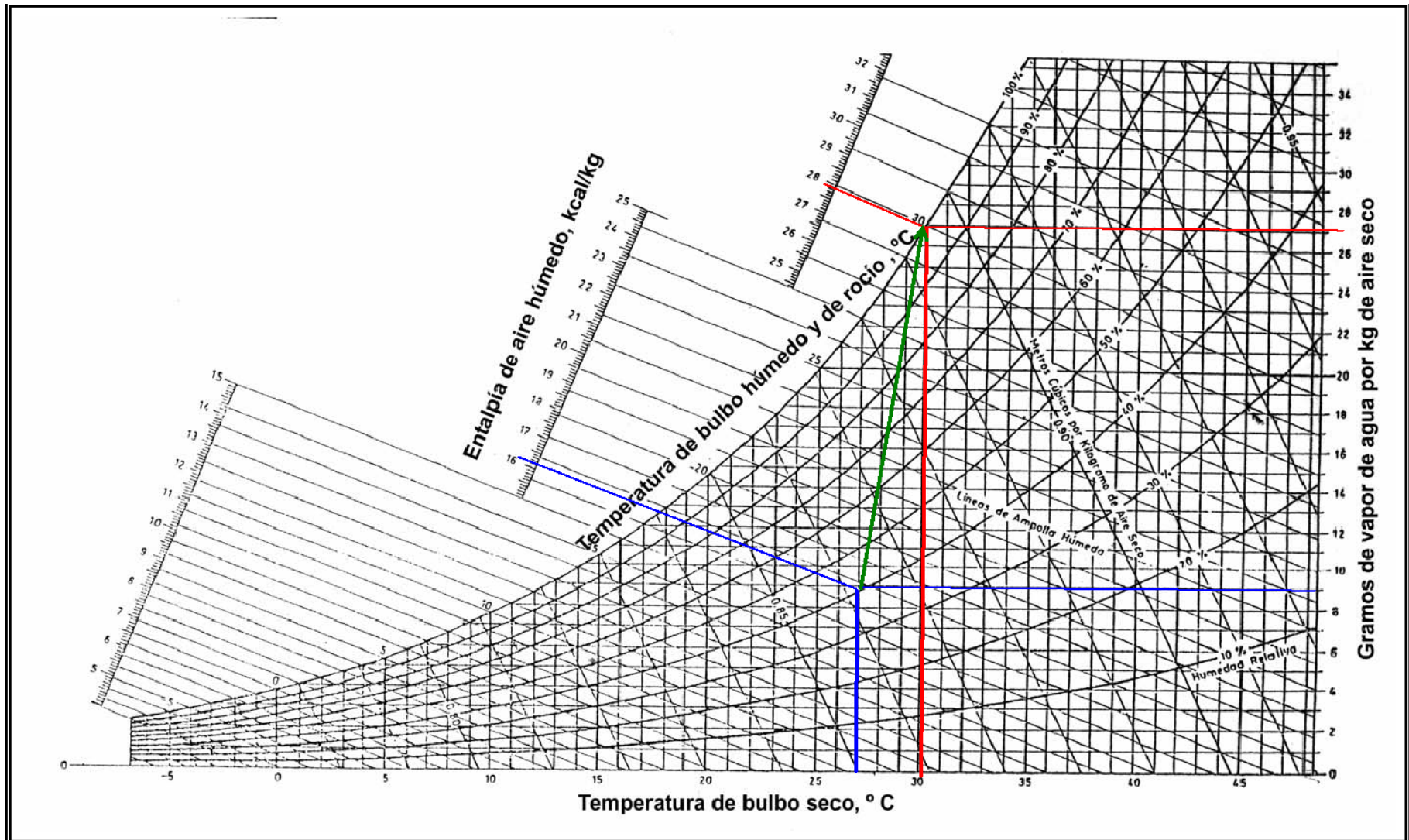
$$F_{AR} = F_{AC} = 561,8 \text{ [Kg/hr]}$$

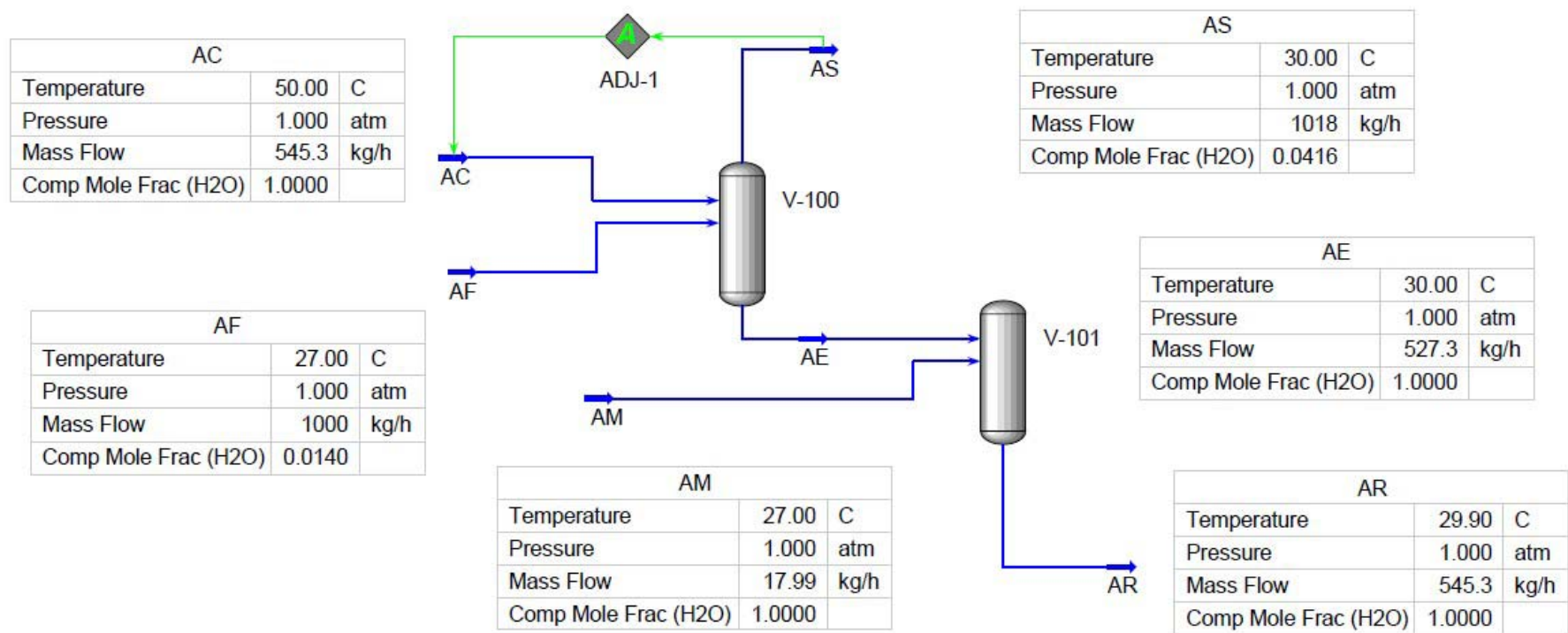
$$F_{AM} \times H_{AM} + F_{AE} \times H_{AE} = F_{AR} \times H_{AR}$$

$$18 \times 27 + 543,6 \times 30 = 561,8 \times T_{AR}$$

$$T_{AR} = \frac{18 \times 27 + 543,6 \times 30}{561,8} = \frac{16794}{561,8} = 29,89 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Como se aprecia debido a lo escaso del flujo de reposición la temperatura varía muy poco.





Código EMSO:

Para resolver el tema A, se asume que el flujo de aire frío es de 1000 [Kg/hr] y se liberan los otros 3 flujos. El código se detalla abajo. Los resultados son:

Para Faf =1000 [Kg/hr]

Da Fae= 543,598 [Kg/hr]

Fas=1018, 16 [Kg/hr]

Fac=561,755 [Kg/hr]

Con lo que el agua evaporada es: $561,755 - 543,598 = 18,157$ [Kg/hr]

Variable	Valor
Cp	1,0000
A	8,0713
B	1730,6300
C	233,4260
xmac	1,0000
xmae	1,0000
Fac	561,7550
Tac	50,0000
Hac	50,0000
Fae	543,5980
Tae	30,0000
Hae	30,0000
Faf	1000,0000
Taf	27,0000
Paf	760,0000
HRaf	40,0000
Psaf	26,6642
Pvaf	10,6657

Variable	Valor
waf	0,0142
wmaf	0,0089
xaf	0,0140
PMaf	28,6879
xmaf	0,0088
Haf	11,7715
Fas	1018,1600
Tas	30,0000
Pas	760,0000
HRas	100,0000
Psas	31,7402
Pvas	31,7402
was	0,0436
wmas	0,0271
xas	0,0418
PMas	28,3873
xmas	0,0265
Has	23,1313

Cuando se considera el flujo de reposición de agua se deben insertar las nuevas variables quedando:

Variable	Valor
Cp	1,0000
A	8,0713
B	1730,6300
C	233,4260
xmac	1,0000
xmae	1,0000
Fac	1000,0000
Tac	50,0000
Hac	50,0000

Variable	Valor
PMaf	28,6879
xmaf	0,0088
Haf	11,7715
Fas	1812,4600
Tas	30,0000
Pas	760,0000
HRas	100,0000
Psas	31,7402
Pvas	31,7402

Variable	Valor
Fae	967,6780
Tae	30,0000
Hae	30,0000
Faf	1780,1400
Taf	27,0000
Paf	760,0000
HRaf	40,0000
Psaf	26,6642
Pvaf	10,6657
waf	0,0142
wmaf	0,0089
xaf	0,0140

Variable	Valor
was	0,0436
wmas	0,0271
xas	0,0418
PMas	28,3873
xmas	0,0265
Has	23,1313
Fam	32,3220
Tam	27,0000
Ham	27,0000
Far	1000,0000
Tar	29,9030
Har	29,9030

```

1  ## Balance **
2
3  using "types";
4
5  FlowSheet Torre_de_enfriamiento
6
7  PARAMETERS
8  Cp as Real;
9  A as Real;
10 B as Real;
11 C as Real;
12 xmac as Real;
13 xmae as Real;
14
15
16 VARIABLES
17 Fac as Real;
18 Tac as Real;
19 Hac as Real;
20
21 Fae as Real;
22 Tae as Real;
23 Hae as Real;
24
25 Faf as Real;
26 Taf as Real;
27 Paf as Real;
28 HRaf as Real;
29 Psaf as Real;

```

```

30    Pvaf as Real;
31    waf as Real;
32    wmaf as Real;
33    xaf as Real;
34    PMaf as Real;
35    xmaf as Real;
36    Haf as Real;
37
38    Fas as Real;
39    Tas as Real;
40    Pas as Real;
41    HRas as Real;
42    Psas as Real;
43    Pvas as Real;
44    was as Real;
45    wmas as Real;
46    xas as Real;
47    PMas as Real;
48    xmas as Real;
49    Has as Real;
50
51
52    EQUATIONS
53    # Fac= 1000;
54    Tac= 50;
55    Hac=Cp*Tac;
56
57    #Fae= Fac;
58    Tae= 30;
59    Hae=Cp*Tae;
60
61    Faf=1000;
62    Taf=27;
63    Paf=760;
64    HRaf=40;
65    Psaf=10^(A-B/(C+Taf));
66    Pvaf=HRaf*Psaf/100;
67    waf=Pvaf/(Paf-Pvaf);
68    wmaf=0.622*waf;
69    xaf=Pvaf/Paf;
70    PMaf=xaf*18+(1-xaf)*28.84;
71    xmaf=18/PMaf*xaf;
72    Haf=0.24*Taf+xmaf*(595+0.22*Taf);

```

```

73
74
75     #Fas=Faf;
76     Tas=30;
77     Pas=760;
78     HRas=100;
79     Psas=10^(A-B/(C+Tas));
80     Pvas=HRas*Psas/100;
81     was=Pvas/(Pas-Pvas);
82     wmas=0.622*was;
83     xas=Pvas/Pas;
84     PMas=xas*18+(1-xas)*28.84;
85     xmas=18/PMas*xas;
86     Has=0.24*Tas+xmas*(595+0.22*Tas);
87
88     Fac+Faf=Fas+Fae;
89     Fac*xmac+Faf*xmaf=Fas*xmas+Fae*xmae;
90     Fac*Hac+Faf*Haf=Fas*Has+Fae*Hae;
91
92     SET
93     Cp= 1.0;
94     A= 8.07131;
95     B=1730.63;
96     C=233.426;
97     xmac=1;
98     xmae=1;
99
100    INITIAL
101
102
103    GUESS
104
105
106    OPTIONS
107    TimeStart=0;
108    TimeEnd=100;
109    TimeStep=1;
110    TimeUnit='h';
111    DAEsolver(File="dassl");
112    Dynamic=fals1111e;
113
114    end

```

Símbolos del capítulo:

Letras Latinas	Descripción
P	Presión
n	Moles
HA	Humedad absoluta
V	Volumen
R	Constante de los gases
T	Temperatura absoluta
t	Temperatura en °C
PM	Peso molecular
HR	Humedad Relativa
ΔH	Entalpía (siempre relativa a un estado de referencia)
Pv	Presión de vapor
A,B, C	Coeficientes de Antoine

Subíndices	Descripción
G	Gas
T	Total
V	Vapor
S	Saturado
m	molar
AS	Aire seco
V	Vapor
AH	Aire húmedo
E	Entrada
S	Salida
BH	Bulbo húmedo
SA	Saturación adiabática
w	Agua

Letras griegas	Descripción
ϕ	Grado de saturación

Especiales	Descripción
$\bar{P}$	Propiedad "P" específica

ANEXO: Estudio de los grados de libertad en gases húmedos.

Aire Húmedo

Una corriente de aire húmedo (EA) conformada por vapor de agua y aire se define con las siguientes variables

1) Flujo másico:	F_EA	[kg/hr]
2) Flujo molar.	Fm_EA	[kmol/hr]
3) Presión:	P_EA	[mmHg]
4) Temperatura:	T_EA	[°C]
5) Composición:	y_EA	[fracción molar]
6) Humedad relativa:	HR_EA	[fracción]
7) Humedad absoluta molar:	HAm_EA	[kmol de agua/kmol de aire seco]
8) Humedad absoluta másica:	HA_EA	[kg de agua/kg de aire seco]
9) Peso molecular:	PM_EA	[kg/kmol]
10) Entalpía másica:	DH_EA	[Kcal/kg de aire seco]
11) Presión de saturación:	PS_EA	[mmHg]
12) Presión parcial del vapor:	PV_EA	[mmHg]
13) Volumen específico:	Ve_EA	[m3/kmol]

A través de la siguientes ecuaciones

$$\text{EC 1)} \quad \log_{10}(PS_EA) - \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_EA} \right) = 0$$

$$\text{EC 2)} \quad DH_EA - (0,24 \times T_EA + HA_EA \times (595 + 0,46 \times T_EA)) = 0$$

$$\text{EC 3)} \quad HR_EA - \left(\frac{PV_EA}{PS_EA} \times 100 \right) = 0$$

$$\text{EC 4)} \quad HAm_EA - \frac{PV_EA}{P_EA - PV_EA} = 0$$

$$\text{EC 5)} \quad HA_EA - \frac{PM_{agua}}{PM_{aire\ seco}} HAm_EA = 0$$

$$\text{EC 6)} \quad y_EA - \frac{PV_EA}{P_EA} = 0 \quad \text{agua, para el aire } 1-y$$

$$\text{EC 7)} \quad PM_EA - \{ y_EA \times PM_{agua} + (1 - y_EA) \times PM_{aire\ seco} \} = 0$$

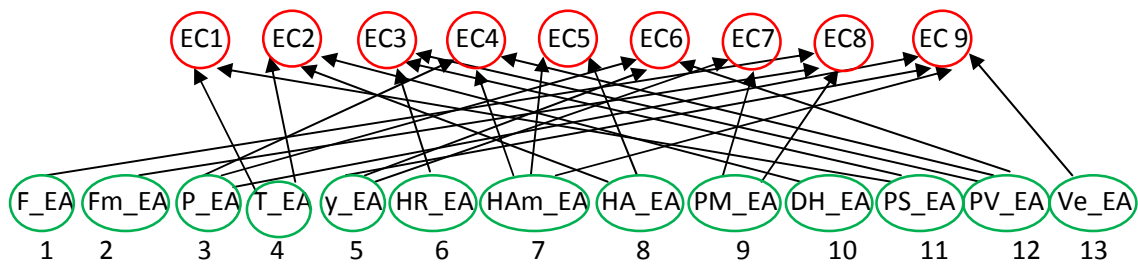
$$EC\ 8) \ F_EA - (PM_EA \times Fm_EA) = 0$$

$$EC\ 9) \ Ve_EA - \frac{R \times (T_EA + 273,15)}{P_EA} \times (1 + HAm_E) = 0$$

El sistema está, así definido, por 13 variables y 9 ecuaciones:

$$GL = N_{vbles} - N_{Ec} = 13 - 9 = 4$$

Así pués, se requiere definir 4 variables como parámetros.



$$EC\ 1) \ f_1(PS_EA, T_EA) = 0$$

$$EC\ 2) \ f_2(DH_EA, T_EA, HA_EA) = 0$$

$$EC\ 3) \ f_3(HR_EA - \left(\frac{PV_EA}{PS_EA} \times 100 \right)) = 0$$

$$EC\ 4) \ f_4(HAm_EA, PV_EA, PV_EA) = 0$$

$$EC\ 5) \ f_5(HA_EA, HAm_EA) = 0$$

$$EC\ 6) \ f_6(y_EA, P_EA, PV_EA) = 0 \quad \text{agua, para el aire 1-y}$$

$$EC\ 7) \ f_7(PM_EA, y_EA) = 0$$

$$EC\ 8) \ f_8(F_EA, PM_EA, Fm_EA) = 0$$

$$EC\ 9) \ f_9(Ve_EA, T_EA, P_EA, HAm_E) = 0$$

Si representamos al sistema como una matriz con las variables como filas y las ecuaciones como columnas:

Matricialmente:

	Entrada de aire	EA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	T
1	Flujo másico:	F_EA								1		1
2	Flujo molar:	Fm_EA								1		1
3	Presión:	P_EA				1		1			1	3
4	Temperatura:	T_EA	1	1							1	3
5	Composición:	y_EA						1	1			2
6	Humedad relativa:	HR_EA			1							1
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1	3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1					2
9	Peso molecular:	PM_EA							1	1		2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1								1
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1							2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1				3
13	Volumen específico	Ve_EA									1	1
	Total		2	3	3	3	2	3	2	3	4	

La última fila y la última columna suman las cantidades de elementos

Ejemplo de un problema típico. De una corriente de aire húmedo sabemos: flujo másico, temperatura, presión total, humedad relativa. Con esos parámetros nos queda un sistema de 9 ecuaciones con 9 incógnitas:

Así planteado el problema se eliminan las variables ya definidas, notamos hay una ecuación con una sola incógnita (EC 1 y PS_EA). Se elimina fila y columna:

	Entrada de aire	EA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	T
1	Flujo molar:	Fm_EA								1		1
2	Composición:	y_EA						1	1			2
3	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1	3
4	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1					2
5	Peso molecular:	PM_EA							1	1		2
6	Entalpía másica:	DH_EA		1								1
7	Presión de saturación:	PS_EA	1		1							2
8	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1				3
9	Volumen específico	Ve_EA									1	1
	Total		1	2	2	2	2	2	2	2	2	

Queda:

	Entrada de aire	EA	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
1	Flujo molar.	Fm_EA							1		1
2	Composición:	y_EA					1	1			2
3	Humedad absoluta molar:	HAm_EA			1	1				1	3
4	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1			1					2
5	Peso molecular:	PM_EA						1	1		2
6	Entalpía másica:	DH_EA	1								1
8	Presión parcial del vapor:	PV_EA		1	1		1				3
9	Volumen específico	Ve_EA								1	1
			2	1	2	2	2	2	2	2	

Eliminamos EC 3 con PV_EA

	Entrada de aire	EA	E2	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
1	Flujo molar.	Fm_EA						1		1
2	Composición:	y_EA				1	1			2
3	Humedad absoluta molar:	HAm_EA		1	1				1	3
4	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1		1					2
5	Peso molecular:	PM_EA					1	1		2
6	Entalpía másica:	DH_EA	1							1
9	Volumen específico	Ve_EA							1	1
			2	1	2	1	2	2	2	

Eliminamos EC 4 con HAm_EA y EC 6 con y_EA

	Entrada de aire	EA	2	5	7	8	9	
			E2	E5	E7	E8	E9	
1	Flujo molar.	Fm_EA				1		1
4	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1	1				2
5	Peso molecular:	PM_EA			1	1		2
6	Entalpía másica:	DH_EA	1					1
9	Volumen específico	Ve_EA					1	1
			2	1	1	2	1	

Eliminamos EC 5 con HA_EA y EC 9 con Ve_EA

	Entrada de aire	EA	E2	E7	E8	T
1	Flujo molar.	Fm_EA			1	1
5	Peso molecular:	PM_EA		1	1	2
6	Entalpía másica:	DH_EA	1			1
			1	1	2	

Eliminando EC 2 con DH_EA y EC 7 con PM_EA

	Entrada de aire	EA	E8	T
1	Flujo molar.	Fm_EA	1	1
			1	

Por último se elimina EC 8 con PM_EA y queda el sistema resuelto. La secuencia completa resulta:

$$\text{EC 1)} \quad \log_{10}(PS_EA) = \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_EA} \right)$$

$$\text{EC 3)} \quad PV_EA = \frac{HR_EA \times PS_EA}{\times 100}$$

$$\text{EC 4)} \quad HAM_EA = \frac{PV_EA}{P_EA - PV_EA}$$

$$\text{EC 6)} \quad y_EA = \frac{PV_EA}{P_EA} \quad \text{agua, para el aire } 1-y$$

$$\text{EC 5)} \quad HA_EA = \frac{PM_{agua}}{PM_{aire\ seco}} HAM_EA$$

$$\text{EC 9)} \quad Ve_EA = \frac{R \times (T_EA + 273,15)}{P_EA} \times (1 + HAM_EA)$$

$$\text{EC 2)} \quad DH_EA = (0,24 \times T_EA + HA_EA \times (595 + 0,46 \times T_EA))$$

$$\text{EC 7)} \quad PM_EA = \{ y_EA \times PM_{agua} + (1 - y_EA) \times PM_{aire\ seco} \}$$

$$\text{EC 8)} \quad Fm_EA = \frac{F_EA}{PM_EA}$$

El sistema resulta ser acíclico en su resolución.

Cuando consideramos una corriente de agua (EW) en los problemas de psicrometría (los que representan un gran porcentaje) podemos tomar ciertas licencias en el cálculo de algunas de sus propiedades, como se la entalpía. El modelo resultante emplea las siguientes variables:

1) Flujo másico:	F_EW	[kg/hr]
2) Flujo molar.	Fm_EW	[kmol/hr]
3) Presión:	P_EW	[mmHg]
4) Temperatura:	T_EW	[°C]
5) Composición:	y_EW	[fracción molar]
6) Peso molecular:	PM_EW	[kg/kmol]
7) Entalpía másica:	DH_EW	[Kcal/kg]
8) Densidad másica:	Ro_EW	[kg/m3]
9) Caudal:	q_EW	[m3/hr]

Asumiendo que el peso molecular, la presión, la composición y la densidad son constantes:

1) Flujo másico:	F_EW
2) Flujo molar.	Fm_EW
3) Temperatura:	T_EW
4) Entalpía másica:	DH_EW
5) Caudal:	q_EW

Que se modelan a través de las siguientes ecuaciones:

$$EC\ 1) DH_EW - 1 \times T_EW = 0$$

$$EC\ 2) Fm_EW - F_EW \times PM_EW = 0$$

$$EC\ 3) F_EW - q_EW \times RO_EW = 0$$

Esta corriente tiene pues 2 grados de libertad = 5- 3

	Entrada de agua	EW	EC1	EC2	EC3	T
1	Flujo másico	F_EW		1	1	2
2	Flujo molar	Fm_EW		1		1
3	Temperatura	T_EW	1			1
4	Entalpía	DH_EW	1			1
5	Caudal	q_EW			1	1
T			2	2	2	

Si asumimos conocidos su flujo másico (F_{EW}) y su temperatura (T_{EW}):

	Entrada de agua	EW	EC1	EC2	EC3	T
1	Flujo molar	Fm_{EW}		1		1
2	Entalpía	DH_{EW}	1			1
3	Caudal	q_{EW}			1	1
T			1	1	1	

Las 3 ecuaciones pueden resolverse acíclicamente:

$$EC\ 1) \ DH_{EW} = 1 \times T_{EW}$$

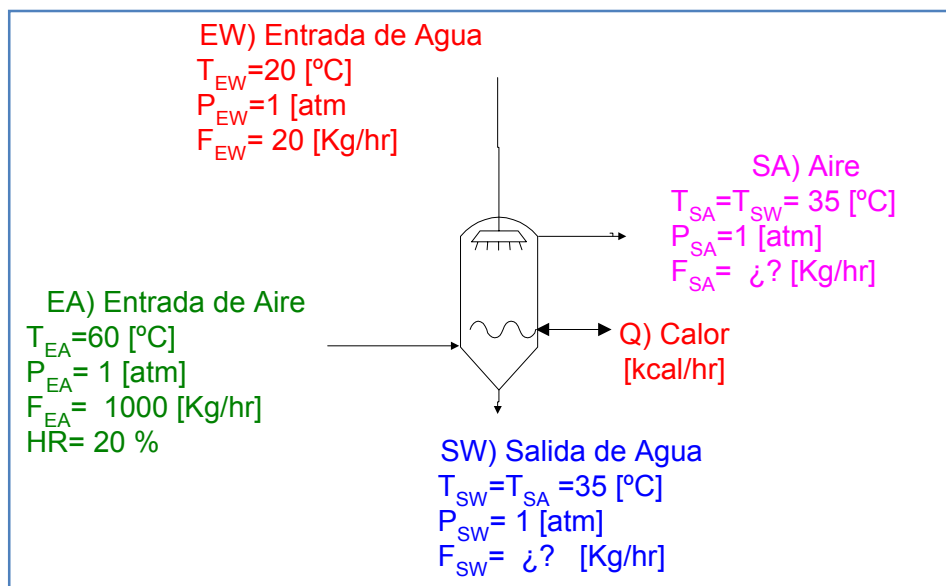
$$EC\ 2) \ Fm_{EW} = F_{EW} \times PM_{EW}$$

$$EC\ 3) \ q_{EW} = \frac{F_{EW}}{RO_{EW}}$$

Caso A:

Sea una corriente de aire de flujo másico, temperatura, presión y humedad relativa conocidos que se pone en contacto con otra de agua pura de temperatura y flujo másico conocido. El sistema, una vez alcanzado el equilibrio, se separa en dos corrientes, una de agua (suponemos que el aire no se disuelve) con otra de aire saturado. La temperatura de salida del agua es conocida pero no el calor a entregar o quitar.

Las dos entradas (ver figura) están totalmente definidas por lo visto anteriormente. La corriente de aire por 9 ecuaciones y 4 parámetros mientras que la de agua con 3 ecuaciones y 2 parámetros. La corriente de salida la llamaremos SA y la de agua SW.



A las 13 variables del aire húmedo de entrada (V1 a V13) con sus 9 ecuaciones (E1 a E9) se le suman las 5 variables de la entrada de agua (V14 a V18) con sus 3 ecuaciones (E10 a E12) se le suman iguales números de ecuaciones y variables para las salidas de aire y agua (V19 a V31 con E13 a E21 para el aire y V32 a V36 con E22 a E24 para el agua) y las ecuaciones del modelo: balance global de materia (E25), por componente (E26), de energía (E27) y la condición de equilibrio térmico (E28). El calor intercambiado aporta una variable adicional (V37). Así el modelo tiene 28 ecuaciones y 37 variables:

$$GL = N_{vbles} - N_{Ec} = 37 - 28 = 9$$

Modelo matemático:

Parámetros (9):

F_{EA} , P_{EA} , T_{EA} , HR_{EA} , F_{EW} , T_{EW} , P_{SA} , HR_{SA} y T_{SW} .

Ecuaciones:

Entrada de aire húmedo

$$\begin{aligned}
 E1) \quad & \log_{10}(PS_EA) - \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_EA} \right) = 0 \\
 E2) \quad & DH_EA - (0,24 \times T_EA + HA_EA \times (595 + 0,46 \times T_EA)) = 0 \\
 E3) \quad & HR_EA - \left(\frac{PV_EA}{PS_EA} \times 100 \right) = 0 \\
 E4) \quad & HAM_EA - \frac{PV_EA}{P_EA - PV_EA} = 0 \\
 E5) \quad & HA_EA - \frac{PM_{agua}}{PM_{aire\ seco}} HAM_EA = 0 \\
 E6) \quad & y_EA - \frac{PV_EA}{P_EA} = 0 \quad \text{agua, para el aire 1-y} \\
 E7) \quad & PM_EA - \{ y_EA \times PM_{agua} + (1 - y_EA) \times PM_{aire\ seco} \} = 0 \\
 E8) \quad & F_EA - (PM_EA \times Fm_EA) = 0 \\
 E9) \quad & Ve_EA - \frac{R \times (T_EA + 273,15)}{P_EA} \times (1 + HAM_EA) = 0
 \end{aligned}$$

Entrada de agua

$$\begin{aligned}
 E10) \quad & DH_EW - 1 \times T_EW = 0 \\
 E11) \quad & Fm_EW - F_EW \times PM_EW = 0 \\
 E12) \quad & q_EW - \frac{F_EW}{RO_EW} = 0
 \end{aligned}$$

Salida de aire húmedo

$$\begin{aligned}
 E13) \quad & \log_{10}(PS_SA) - \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_SA} \right) = 0 \\
 E14) \quad & DH_SA - (0,24 \times T_SA + HA_SA \times (595 + 0,46 \times T_SA)) = 0
 \end{aligned}$$

$$E15) \quad HR_SA - \left(\frac{PV_SA}{PS_SA} \times 100 \right) = 0$$

$$E16) \quad HAM_SA - \frac{PV_SA}{P_SA - PV_SA} = 0$$

$$E17) \quad HA_SA - \frac{PM_{agua}}{PM_{aire seco}} HAM_SA = 0$$

$$E18) \quad y_SA - \frac{PV_SA}{P_SA} = 0 \quad \text{agua, para el aire 1-y}$$

$$E19) \quad PM_SA - \{ y_SA \times PM_{agua} + (1 - y_SA) \times PM_{aire seco} \} = 0$$

$$E20) \quad F_SA - (PM_SA \times Fm_SA) = 0$$

$$E21) \quad Ve_SA - \frac{R \times (T_SA + 273,15)}{P_SA} \times (1 + HAM_SA) = 0$$

Salida de agua

$$E22) \quad DH_SW - 1 \times T_SW = 0$$

$$E23) \quad Fm_SW - F_SW \times PM_SW = 0$$

$$E24) \quad q_SW - \frac{F_SW}{RO_SW} = 0$$

Balance de Materia global:

$$E25) \quad F_EA + F_EW - F_SA - F_SW = 0$$

Balance de Materia por componente (aire)

$$E26) \quad F_EA \times (1 - HA_EA) - F_SA \times (1 - HA_SA) = 0$$

Balance de energía

E27)

$$F_EA \times DH_EA + F_EW \times DH_EW - F_SA \times DH_SA - F_SW \times DH_SW + Q = 0$$

Equilibrio térmico

$$E28) \quad T_SA - T_SW = 0$$

Matricialmente:

			E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMG	BxC	BGE	EqT	
																											E25	E26	E27	E28	T
1	Flujo másico:	F_EA							1																		1	1	1		4
2	Flujo molar:	Fm_EA							1																						1
3	Presión:	P_EA				1		1			1																				3
4	Temperatura:	T_EA	1	1						1																					3
5	Composición:	y_EA						1	1																						2
6	Humedad relativa:	HR_EA			1																										1
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1																				3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1																					1			3
9	Peso molecular:	PM_EA							1	1																					2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1																									1		2
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1																										2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1																							3
13	Volumen específico	Ve_EA									1																				1
14	Flujo másico	F_EW										1	1														1		1		4
15	Flujo molar	Fm_EW											1																		1
16	Temperatura	T_EW										1																			1
17	Entalpía	DH_EW										1																	1		2
18	Caudal	q_EW											1																		1
19	Flujo másico:	F_SA																				1					1	1	1		4
20	Flujo molar:	Fm_SA																				1									1
21	Presión:	P_SA																1		1			1								3
22	Temperatura:	T_SA													1	1							1							1	4
23	Composición:	y_SA																	1	1											2
24	Humedad relativa:	HR_SA															1														1
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA																1	1				1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA																	1									1			3
27	Peso molecular:	PM_SA																				1	1								2
28	Entalpía másica:	DH_SA																											1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA													1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA															1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA																					1								1
32	Flujo másico	F_SW																							1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																							1						1
34	Temperatura	T_SW																							1					1	2
35	Entalpía	DH_SW																							1				1		2
36	Caudal	q_SW																								1					1
37	Calor Intercambiado	Q																											1		1
	Total		2	3	3	3	2	3	2	3	4	2	2	2	2	3	3	3	2	3	2	3	4	2	2	2	4	4	9	2	

Habiendo eliminado los parámetros:

			E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	T
2	Flujo molar.	Fm_EA								1																					1
5	Composición:	y_EA						1	1																						2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1																				3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1																					1			3
9	Peso molecular:	PM_EA							1	1																					2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1																									1		2
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1																										2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1																							3
13	Volumen específico	Ve_EA									1																				1
15	Flujo molar	Fm_EW										1																			1
17	Entalpía	DH_EW									1																		1		2
18	Caudal	q_EW											1																		1
19	Flujo másico:	F_SA																			1						1	1	1		4
20	Flujo molar.	Fm_SA																			1										1
22	Temperatura:	T_SA												1	1							1								1	4
23	Composición:	y_SA																		1	1										2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA														1	1					1									3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA												1			1											1			3
27	Peso molecular:	PM_SA																			1	1									2
28	Entalpía másica:	DH_SA													1														1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA													1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA														1	1		1												3
31	Volumen específico	Ve_SA																				1									1
32	Flujo másico	F_SW																						1	1		1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																							1						1
35	Entalpía	DH_SW																						1					1		2
36	Caudal	q_SW																								1					1
37	Calor Intercambiado	Q																											1		1
	Total		1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2	2	3	7	1	

Se eliminan las variables y ecuaciones pintadas (ecuaciones con una sola variable): E1 con V11, E10 con V17, E11 con V15, E12 con V18, E22 con V35 y E28 con V22

			E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T	
2	Flujo molar.	Fm_EA							1																	1
5	Composición:	y_EA					1	1																		2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA			1	1				1																3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1			1																	1			3
9	Peso molecular:	PM_EA						1	1																	2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																						1	2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA		1	1		1																			3
13	Volumen específico	Ve_EA								1																1
19	Flujo másico:	F_SA																1				1	1	1		4
20	Flujo molar.	Fm_SA																1								1
23	Composición:	y_SA														1	1									2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA											1	1				1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA										1		1								1				3
27	Peso molecular:	PM_SA															1	1								2
28	Entalpía másica:	DH_SA										1												1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA									1		1													2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA										1	1			1										3
31	Volumen específico	Ve_SA																	1							1
32	Flujo másico	F_SW																		1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																		1						1
36	Caudal	q_SW																			1					1
37	Calor Intercambiado	Q																							1	1
	Total		2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	5		

Se eliminan: E3 con V12 y E13 con V29

			E02	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T
2	Flujo molar.	Fm_EA						1															1
5	Composición:	y_EA				1	1																2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA		1	1				1														3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1		1																1		3
9	Peso molecular:	PM_EA					1	1															2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																			1	2
13	Volumen específico	Ve_EA							1														1
19	Flujo másico:	F_SA														1				1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA														1							1
23	Composición:	y_SA												1	1								2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA									1	1					1						3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA								1		1									1		3
27	Peso molecular:	PM_SA													1	1							2
28	Entalpía másica:	DH_SA								1												1	2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA									1	1		1									3
31	Volumen específico	Ve_SA															1						1
32	Flujo másico	F_SW																1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW																1					1
36	Caudal	q_SW																	1				1
37	Calor Intercambiado	Q																				1	1
	Total		2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	5	

Se eliminan: E4 con V7, E6 con V5 y E15 con V30

			E02	E05	E07	E08	E09	E14	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T
2	Flujo molar.	Fm_EA				1														1
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1	1														1		3
9	Peso molecular:	PM_EA			1	1														2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																1	2
13	Volumen específico	Ve_EA					1													1
19	Flujo másico:	F_SA											1				1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA											1							1
23	Composición:	y_SA									1	1								2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA							1	1				1						3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA						1		1								1		3
27	Peso molecular:	PM_SA										1	1							2
28	Entalpía másica:	DH_SA						1											1	2
31	Volumen específico	Ve_SA												1						1
32	Flujo másico	F_SW													1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW													1					1
36	Caudal	q_SW														1				1
37	Calor Intercambiado	Q																	1	1
	Total		2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	3	2	2	2	2	3	5	

Se eliminan: E5 con V8, E7 con V9, E9 con V13, E16 con V25 y E18 con V23

			E02	E08	E14	E17	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T
2	Flujo molar.	Fm_EA		1											1
10	Entalpía másica:	DH_EA	1											1	2
19	Flujo másico:	F_SA						1				1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA						1							1
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA			1	1							1		3
27	Peso molecular:	PM_SA					1	1							2
28	Entalpía másica:	DH_SA			1									1	2
31	Volumen específico	Ve_SA							1						1
32	Flujo másico	F_SW								1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW								1					1
36	Caudal	q_SW									1				1
37	Calor Intercambiado	Q												1	1
	Total		1	1	2	1	1	3	1	2	2	2	2	5	

Se eliminan: E2 con V10, E8 con V2, E17 con V26, E19 con V27 y E21 con V31

			E14	E20	E23	E24	E25	E26	E27	T
19	Flujo másico:	F_SA		1			1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA		1						1
28	Entalpía másica:	DH_SA	1						1	2
32	Flujo másico	F_SW			1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW			1					1
36	Caudal	q_SW				1				1
37	Calor Intercambiado	Q							1	1
	Total		1	2	2	2	2	1	4	

Se eliminan: E14 con V28 y E26 con V19

			E23	E24	E27	T
33	Flujo molar	Fm_SW	1			1
36	Caudal	q_SW		1		1
37	Calor Intercambiado	Q			1	1
	Total		1	1	1	

Se eliminan finalmente: E23 con V33, E24 con V36 y E27 con V37. Con lo que el problema queda resuelto acíclicamente:

$$E1) \quad \log_{10}(PS_EA) = \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_EA} \right)$$

$$E10) \quad DH_EW = 1 \times T_EW$$

$$E11) \quad Fm_EW = F_EW \times PM_EW$$

$$E12) \quad q_EW = \frac{F_EW}{RO_EW}$$

$$E22) \quad F_SA = \frac{F_EA \times (1 - HA_EA)}{(1 - HA_SA)}$$

$$E28) \quad T_SA = T_SW$$

$$E3) \quad HAM_EA = \frac{PV_EA}{P_EA - PV_EA}$$

$$E13) \quad \log_{10}(PS_SA) = \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_SA} \right)$$

$$E4) \quad y_EA = \frac{PV_EA}{P_EA} \quad \text{agua, para el aire 1-y}$$

$$E6) \quad Ve_EA = \frac{R \times (T_EA + 273,15)}{P_EA} \times (1 + HAM_E)$$

$$E15) \quad HAM_SA = \frac{PV_SA}{P_SA - PV_SA}$$

$$E5) \quad HA_EA = \frac{PM_{agua}}{PM_{aire seco}} HAM_EA$$

$$E7) \quad DH_EA = (0,24 \times T_EA + HA_EA \times (595 + 0,46 \times T_EA))$$

$$E9) \quad Fm_EA = \frac{F_EA}{PM_EA}$$

$$E16) \quad y_SA = \frac{PV_SA}{P_SA} \quad \text{agua, para el aire 1-y}$$

$$E18) \quad PM_SA = \{y_SA \times PM_{agua} + (1 - y_SA) \times PM_{aire\ sec\ o}\}$$

$$E2) \quad PV_EA = \frac{HR_EA \times PS_EA}{\times 100}$$

$$E8) \quad PM_EA = \{y_EA \times PM_{agua} + (1 - y_EA) \times PM_{aire\ sec\ o}\}$$

$$E17) \quad HA_SA = \frac{PM_{agua}}{PM_{aire\ sec\ o}} HA\overline{m}_SA$$

$$E19) \quad Ve_SA = \frac{R \times (T_SA + 273,15)}{P_SA} \times (1 + Ham_SA)$$

$$E21) \quad DH_SW = 1 \times T_SW$$

$$E14) \quad PV_SA = \frac{HR_SA \times PS_SA}{\times 100}$$

$$E26) \quad q_SW = \frac{F_SW}{RO_SW}$$

$$E20) \quad DH_SA = (0,24 \times T_SA + HA_SA \times (595 + 0,46 \times T_SA))$$

$$E25) \quad Fm_SW = F_SW \times PM_SW$$

$$E23) \quad Fm_SA = F_SA \times PM_SA$$

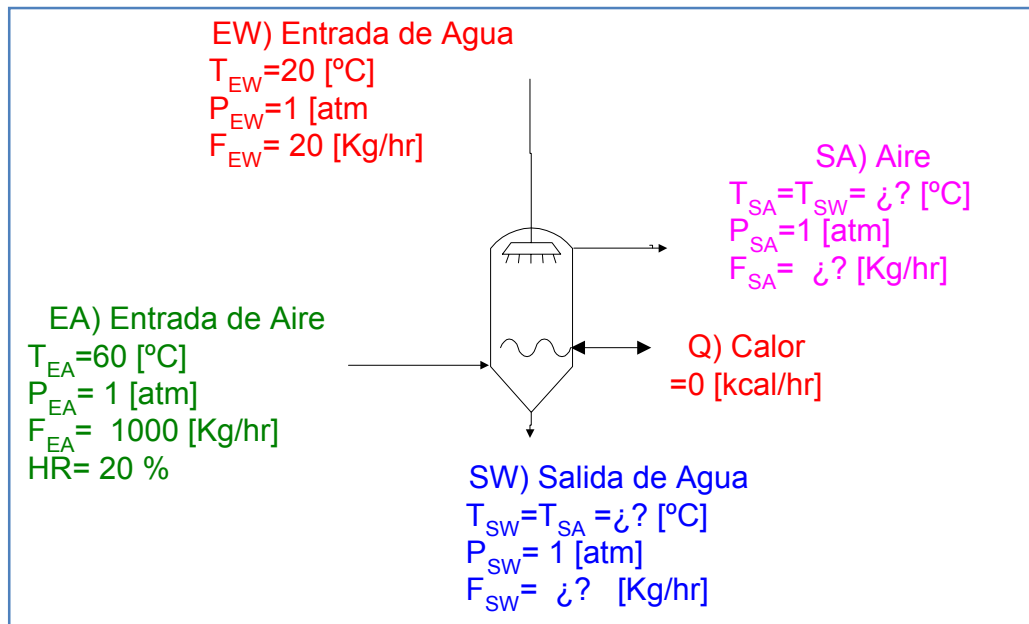
$$E24) \quad F_SW = F_EA + F_EW - F_SA$$

$$E27)$$

$$Q = F_SA \times DH_SA + F_SW \times DH_SW - F_EA \times DH_EA - F_EW \times DH_EW$$

Caso B:

Sean una corriente de aire de flujo másico, temperatura, presión y humedad relativa conocidos que se pone en contacto con otra de agua pura de temperatura y flujo másico conocido. El sistema, una vez alcanzado el equilibrio, se separa en dos corrientes, una de agua (suponemos que el aire no se disuelve) con otra de aire saturado. La temperatura es desconocida mientras que el calor intercambiado es cero (adiabático). Veremos cómo esta mínima diferencia cambia el problema.



El modelo completo en forma matricial queda

			E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMG	BxC	BGE	EqT	
																											E25	E26	E27	E28	Total
1	Flujo másico:	F_EA							1																		1	1	1		4
2	Flujo molar:	Fm_EA							1																						1
3	Presión:	P_EA				1		1			1																				3
4	Temperatura:	T_EA	1	1							1																				3
5	Composición:	y_EA						1	1																						2
6	Humedad relativa:	HR_EA			1																										1
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1																				3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1																					1			3
9	Peso molecular:	PM_EA							1	1																					2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1																									1		2
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1																										2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1																							3
13	Volumen específico	Ve_EA									1																				1
14	Flujo másico	F_EW											1	1													1		1		4
15	Flujo molar	Fm_EW											1																		1
16	Temperatura	T_EW										1																			1
17	Entalpía	DH_EW										1																	1		2
18	Caudal	q_EW												1																	1
19	Flujo másico:	F_SA																				1					1	1	1		4
20	Flujo molar:	Fm_SA																				1									1
21	Presión:	P_SA															1			1				1							3
22	Temperatura:	T_SA													1	1							1							1	4
23	Composición:	y_SA																	1	1											2
24	Humedad relativa:	HR_SA															1														1
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA																1	1				1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA																	1									1			3
27	Peso molecular:	PM_SA																			1	1									2
28	Entalpía másica:	DH_SA														1													1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA													1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA															1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA																					1								1
32	Flujo másico	F_SW																							1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																							1						1
34	Temperatura	T_SW																						1						1	2
35	Entalpía	DH_SW																						1					1		2
36	Caudal	q_SW																								1					1
37	Calor Intercambiado	Q																											1		1
	Total		2	3	3	3	2	3	2	3	4	2	2	2	2	3	3	3	2	3	2	3	4	2	2	2	4	4	9	2	

Habiendo eliminado los parámetros:

			E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMG	BxC	BGE	EqT	Total
2	Flujo molar.	Fm_EA							1																						1
5	Composición:	y_EA					1	1																							2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1																				3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1																					1			3
9	Peso molecular:	PM_EA						1	1																						2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1																									1		2
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1																										2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1																							3
13	Volumen específico	Ve_EA									1																				1
15	Flujo molar	Fm_EW										1																			1
17	Entalpía	DH_EW									1																		1		2
18	Caudal	q_EW										1		1																	1
19	Flujo másico:	F_SA																			1						1	1	1		4
20	Flujo molar.	Fm_SA																			1										1
22	Temperatura:	T_SA													1	1						1								1	4
23	Composición:	y_SA																			1	1									2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA															1	1				1									3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA													1			1										1			3
27	Peso molecular:	PM_SA																			1	1									2
28	Entalpía másica:	DH_SA														1													1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA													1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA															1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA																				1									1
32	Flujo másico	F_SW																							1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																							1						1
34	Temperatura	T_SW																						1						1	2
35	Entalpía	DH_SW																						1					1		2
36	Caudal	q_SW																								1					1
	Total		1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	6	2	

Se eliminan: E1 con V11, E10 con V17, E11 con V15 y E12 con V18

			E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMC	BxC	BGE	EqT	
																							E25	E26	E27	E28	Total
2	Flujo molar.	Fm_EA							1																		1
5	Composición:	y_EA					1	1																			2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA			1	1				1																	3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1			1																			1		3
9	Peso molecular:	PM_EA						1	1																		2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																							1	2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA		1	1		1																				3
13	Volumen específico	Ve_EA								1																	1
19	Flujo másico:	F_SA																1						1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA																1									1
22	Temperatura:	T_SA									1	1							1								4
23	Composición:	y_SA														1	1										2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA												1	1				1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA										1			1										1		3
27	Peso molecular:	PM_SA															1	1									2
28	Entalpía másica:	DH_SA										1														1	2
29	Presión de saturación:	PS_SA									1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA											1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA																	1								1
32	Flujo másico	F_SW																			1	1		1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW																			1						1
34	Temperatura	T_SW																		1							2
35	Entalpía	DH_SW																		1						1	2
36	Caudal	q_SW																					1				1
	Total		2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	5	2

Se elimina: E3 con V12

			E02	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMG	BxC	BGE	EqT	
																						E25	E26	E27	E28	Total
2	Flujo molar.	Fm_EA					1																			1
5	Composición:	y_EA				1	1																			2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA		1	1				1																	3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1		1																		1			3
9	Peso molecular:	PM_EA					1	1																		2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																					1		2
13	Volumen específico	Ve_EA							1																	1
19	Flujo másico:	F_SA															1					1	1	1		4
20	Flujo molar.	Fm_SA															1									1
22	Temperatura:	T_SA								1	1							1							1	4
23	Composición:	y_SA													1	1										2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA											1	1				1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA									1			1									1			3
27	Peso molecular:	PM_SA															1	1								2
28	Entalpía másica:	DH_SA									1													1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA								1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA										1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA																1								1
32	Flujo másico	F_SW																		1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																		1						1
34	Temperatura	T_SW																	1						1	2
35	Entalpía	DH_SW																	1					1		2
36	Caudal	q_SW																			1					1
	Total		2	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	5	2	

Se eliminan: E4 con V7 y E6 con V5

			E02	E05	E07	E08	E09	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMG	BxC	BGE	EqT	
																				E25	E26	E27	E28	Total
2	Flujo molar.	Fm_EA				1																		1
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1	1																	1			3
9	Peso molecular:	PM_EA			1	1																		2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																			1		2
13	Volumen específico	Ve_EA					1																	1
19	Flujo másico:	F_SA													1					1	1	1		4
20	Flujo molar.	Fm_SA													1									1
22	Temperatura:	T_SA						1	1							1							1	4
23	Composición:	y_SA											1	1										2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA									1	1				1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA							1			1									1			3
27	Peso molecular:	PM_SA												1	1									2
28	Entalpía másica:	DH_SA							1													1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA						1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA								1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA														1								1
32	Flujo másico	F_SW																1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																1						1
34	Temperatura	T_SW															1						1	2
35	Entalpía	DH_SW															1					1		2
36	Caudal	q_SW																	1					1
	Total		2	1	1	2	1	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	5	2	

Se eliminan: E5 con V8, E7 con V9 y E9 con V13

																		BMG	BxC	BGE	EqT	
			E02	E08	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	Total	
2	Flujo molar.	Fm_EA		1																	1	
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																1		2	
19	Flujo másico:	F_SA										1					1	1	1		4	
20	Flujo molar.	Fm_SA										1									1	
22	Temperatura:	T_SA			1	1							1							1	4	
23	Composición:	y_SA								1	1										2	
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA						1	1				1								3	
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA				1			1									1			3	
27	Peso molecular:	PM_SA									1	1									2	
28	Entalpía másica:	DH_SA				1													1		2	
29	Presión de saturación:	PS_SA				1		1													2	
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA					1	1		1											3	
31	Volumen específico	Ve_SA											1								1	
32	Flujo másico	F_SW													1	1	1		1		4	
33	Flujo molar	Fm_SW													1						1	
34	Temperatura	T_SW												1						1	2	
35	Entalpía	DH_SW												1					1		2	
36	Caudal	q_SW														1					1	
	Total		1	1	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	5	2		

Se eliminan: E2 con V10 y E8 con V2

																BMC	BxC	BGE	EqT	
			E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	Total	
19	Flujo másico:	F_SA								1					1	1	1		4	
20	Flujo molar.	Fm_SA								1									1	
22	Temperatura:	T_SA	1	1							1							1	4	
23	Composición:	y_SA						1	1										2	
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA				1	1				1								3	
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA		1			1									1			3	
27	Peso molecular:	PM_SA							1	1									2	
28	Entalpía másica:	DH_SA		1													1		2	
29	Presión de saturación:	PS_SA	1		1														2	
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA			1	1		1											3	
31	Volumen específico	Ve_SA									1								1	
32	Flujo másico	F_SW											1	1	1		1		4	
33	Flujo molar	Fm_SW											1						1	
34	Temperatura	T_SW										1						1	2	
35	Entalpía	DH_SW										1					1		2	
36	Caudal	q_SW												1					1	
	Total		2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	4	2		

Se eliminan: E2 con V10 y E8 con V2

Llegado a este punto vemos que no quedan más ecuaciones con una sola incógnita por lo que el problema es cíclico y debe resolverse en forma iterativa, por ejemplo, suponiendo la temperatura de salida del agua.

Caso C:

Sea una corriente de aire de flujo másico, temperatura, presión y humedad relativa conocidos que se pone en contacto con otra de agua pura de temperatura conocida. El sistema, una vez alcanzado el equilibrio, se separa en dos corrientes, una de agua (suponemos que el aire no se disuelve) con otra de aire saturado. La temperatura de salida del agua es conocida. El sistema es adiabático ($Q=0$).

Las dos entradas (ver figura) están totalmente definidas por lo visto anteriormente. La corriente de aire por 9 ecuaciones y 4 parámetros mientras que la de agua con 3 ecuaciones y 2 parámetros. La corriente de salida la llamaremos SA y la de agua SW.

Matricialmente:

			E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27	E28	T	
1	Flujo másico:	F_EA								1																		1	1	1		4
2	Flujo molar:	Fm_EA								1																		1	1	1		1
3	Presión:	P_EA				1		1			1																					3
4	Temperatura:	T_EA	1	1							1																					3
5	Composición:	y_EA						1	1																							2
6	Humedad relativa:	HR_EA			1																											1
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1																					3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1																						1			3
9	Peso molecular:	PM_EA							1	1																						2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1																										1		2
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1																											2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1																								3
13	Volumen específico	Ve_EA									1																					1
14	Flujo másico	F_EW											1	1														1		1		4
15	Flujo molar	Fm_EW											1																			1
16	Temperatura	T_EW										1																				1
17	Entalpía	DH_EW										1																		1		2
18	Caudal	q_EW												1																		1
19	Flujo másico:	F_SA																				1						1	1	1		4
20	Flujo molar:	Fm_SA																				1										1
21	Presión:	P_SA															1		1				1									3
22	Temperatura:	T_SA													1	1							1								1	4
23	Composición:	y_SA																		1	1											2
24	Humedad relativa:	HR_SA															1															1
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA																1	1				1									3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA														1			1										1			3
27	Peso molecular:	PM_SA																			1	1										2
28	Entalpía másica:	DH_SA														1														1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA													1		1															2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA															1	1		1												3
31	Volumen específico	Ve_SA																					1									1
32	Flujo másico	F_SW																							1	1		1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																							1							1
34	Temperatura	T_SW																						1							1	2
35	Entalpía	DH_SW																						1						1		2
36	Caudal	q_SW																								1						1
37	Calor Intercambiado	Q																												1		1
	Total		2	3	3	3	2	3	2	3	4	2	2	2	2	3	3	3	2	3	2	3	4	2	2	2	4	4	9	2		

Eliminando los parámetros:

			E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23	E24	BMG	BxC	BGE	EqT	
																											E25	E26	E27	E28	T
2	Flujo molar.	Fm_EA								1																					1
5	Composición:	y_EA						1	1																						2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA				1	1				1																				3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA		1			1																					1			3
9	Peso molecular:	PM_EA							1	1																					2
10	Entalpía másica:	DH_EA		1																									1		2
11	Presión de saturación:	PS_EA	1		1																										2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA			1	1		1																							3
13	Volumen específico	Ve_EA										1																			1
14	Flujo másico	F_EW											1	1													1		1		4
15	Flujo molar	Fm_EW											1																		1
17	Entalpía	DH_EW										1																	1		2
18	Caudal	q_EW												1																	1
19	Flujo másico:	F_SA																				1					1	1	1		4
20	Flujo molar.	Fm_SA																				1									1
22	Temperatura:	T_SA													1	1							1							1	4
23	Composición:	y_SA																		1	1										2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA															1	1					1								3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA														1			1									1			3
27	Peso molecular:	PM_SA																			1	1									2
28	Entalpía másica:	DH_SA														1													1		2
29	Presión de saturación:	PS_SA													1		1														2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA															1	1		1											3
31	Volumen específico	Ve_SA																					1								1
32	Flujo másico	F_SW																							1	1	1		1		4
33	Flujo molar	Fm_SW																							1						1
35	Entalpía	DH_SW																						1					1		2
36	Caudal	q_SW																									1				1
	Total		1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2	3	3	7	1	

Eliminando E1 con V11, E10 con V17, E22 con V35 y E28 con V22

			E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E23	E24	BMC	BxC	BGE	T
2	Flujo molar.	Fm_EA					1	1																			1
5	Composición:	y_EA				1	1																				2
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA			1	1				1																	3
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1			1																			1		3
9	Peso molecular:	PM_EA					1	1																			2
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																							1	2
12	Presión parcial del vapor:	PV_EA		1	1		1																				3
13	Volumen específico	Ve_EA								1																	1
14	Flujo másico	F_EW									1	1												1		1	4
15	Flujo molar	Fm_EW									1																1
18	Caudal	q_EW										1															1
19	Flujo másico:	F_SA																		1				1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA																		1							1
23	Composición:	y_SA																1	1								2
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA														1	1				1						3
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA												1			1								1		3
27	Peso molecular:	PM_SA																		1	1						2
28	Entalpía másica:	DH_SA												1							1	1					2
29	Presión de saturación:	PS_SA											1		1												2
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA													1	1		1									3
31	Volumen específico	Ve_SA																				1					1
32	Flujo másico	F_SW																				1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW																				1					1
36	Caudal	q_SW																					1				1
	Total		2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	5	

Eliminando E3 con V12 y E13 con V28

																							BMC	BxC	BGE	
			E02	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E11	E12	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T	
2	Flujo molar.	Fm_EA						1																	1	
5	Composición:	y_EA				1	1																		2	
7	Humedad absoluta molar:	HAm_EA		1	1				1																3	
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1		1																		1		3	
9	Peso molecular:	PM_EA					1	1																	2	
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																					1	2	
13	Volumen específico	Ve_EA							1																1	
14	Flujo másico	F_EW								1	1											1		1	4	
15	Flujo molar	Fm_EW								1															1	
18	Caudal	q_EW									1														1	
19	Flujo másico:	F_SA																1				1	1	1	4	
20	Flujo molar.	Fm_SA																1							1	
23	Composición:	y_SA														1	1								2	
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA												1	1				1						3	
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA										1			1								1		3	
27	Peso molecular:	PM_SA															1	1							2	
28	Entalpía másica:	DH_SA										1												1	2	
30	Presión parcial del vapor:	PV_SA											1	1		1									3	
31	Volumen específico	Ve_SA																	1						1	
32	Flujo másico	F_SW																		1	1	1		1	4	
33	Flujo molar	Fm_SW																		1					1	
36	Caudal	q_SW																			1				1	
	Total		2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	5		

Eliminando E4 con V7, E6 con V5 y E15 con V30

																				BMC	BxC	BGE	
			E02	E05	E07	E08	E09	E11	E12	E14	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T	
2	Flujo molar.	Fm_EA				1																1	
8	Humedad absoluta másica:	HA_EA	1	1																1		3	
9	Peso molecular:	PM_EA			1	1																2	
10	Entalpía másica:	DH_EA	1																		1	2	
13	Volumen específico	Ve_EA					1															1	
14	Flujo másico	F_EW						1	1										1		1	4	
15	Flujo molar	Fm_EW						1														1	
18	Caudal	q_EW							1													1	
19	Flujo másico:	F_SA													1				1	1	1	4	
20	Flujo molar.	Fm_SA													1							1	
23	Composición:	y_SA											1	1								2	
25	Humedad absoluta molar:	HAm_SA									1	1				1						3	
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA								1		1								1		3	
27	Peso molecular:	PM_SA												1	1							2	
28	Entalpía másica:	DH_SA								1											1	2	
31	Volumen específico	Ve_SA														1						1	
32	Flujo másico	F_SW															1	1	1		1	4	
33	Flujo molar	Fm_SW															1					1	
36	Caudal	q_SW																1				1	
	Total		2	1	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	3	2	2	2	3	3	5		

Eliminando E5 con V8, E7 con V9, E9 con V13, E16 con V25 y E18 con V23

														BMG	BxC	BGE	
			E02	E08	E11	E12	E14	E17	E19	E20	E21	E23	E24	E25	E26	E27	T
2	Flujo molar.	Fm_EA		1													1
10	Entalpía másica:	DH_EA	1													1	2
14	Flujo másico	F_EW			1	1								1		1	4
15	Flujo molar	Fm_EW			1												1
18	Caudal	q_EW				1											1
19	Flujo másico:	F_SA								1				1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA								1							1
26	Humedad absoluta másica:	HA_SA					1	1							1		3
27	Peso molecular:	PM_SA							1	1							2
28	Entalpía másica:	DH_SA					1									1	2
31	Volumen específico	Ve_SA									1						1
32	Flujo másico	F_SW										1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW										1					1
36	Caudal	q_SW											1				1
	Total		1	1	2	2	2	1	1	3	1	2	2	3	2	5	

Eliminando E2 con V10, E8 con V2, E17 con V26, E19 con V27 y E21 con V31

									BMG	BxC	BGE	
			E11	E12	E14	E20	E23	E24	E25	E26	E27	T
14	Flujo másico	F_EW	1	1					1		1	4
15	Flujo molar	Fm_EW	1									1
18	Caudal	q_EW		1								1
19	Flujo másico:	F_SA				1			1	1	1	4
20	Flujo molar.	Fm_SA				1						1
28	Entalpía másica:	DH_SA			1						1	2
32	Flujo másico	F_SW					1	1	1		1	4
33	Flujo molar	Fm_SW					1					1
36	Caudal	q_SW						1				1
	Total		2	2	1	2	2	2	3	1	4	

Eliminando E14 con V28 y E26 con V19

								BMG	BGE	
			E11	E12	E20	E23	E24	E25	E27	T
14	Flujo másico	F_EW	1	1				1	1	4
15	Flujo molar	Fm_EW	1							1
18	Caudal	q_EW		1						1
20	Flujo molar.	Fm_SA			1					1
32	Flujo másico	F_SW				1	1	1	1	4
33	Flujo molar	Fm_SW				1				1
36	Caudal	q_SW					1			1
	Total		2	2	1	2	2	2	2	

Eliminando E20 con V20

							BMQ	BGE	
			E11	E12	E23	E24	E25	E27	T
14	Flujo másico	F_EW	1	1			1	1	4
15	Flujo molar	Fm_EW	1						1
18	Caudal	q_EW		1					1
32	Flujo másico	F_SW			1	1	1	1	4
33	Flujo molar	Fm_SW			1				1
36	Caudal	q_SW				1			1
	Total		2	2	2	2	2	2	

Vemos que no quedan ecuaciones con una única variable pero hay 2 que dependen de la misma variable, las E25 y E27 de las V14 y V32 que forman un sistema de 2 por 2. Una vez resuelto:

			E11	E12	E23	E24	T	
15	Flujo molar	Fm_EW	1				1	
18	Caudal	q_EW		1			1	
33	Flujo molar	Fm_SW			1		1	
36	Caudal	q_SW				1	1	
	Total		1	1	1	1		

Eliminando E11 con V15, E12 con V18, E23 con V33 y E24 con V36 el problema queda resuelto:

$$\begin{aligned}
E1) \quad \log_{10}(PS_EA) &= \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_EA} \right) \\
E10) \quad DH_EW &= 1 \times T_EW \\
E22) \quad F_SA &= \frac{F_EA \times (1 - HA_EA)}{(1 - HA_SA)} \\
E28) \quad T_SA &= T_SW \\
E3) \quad HA\bar{m}_EA &= \frac{PV_EA}{P_EA - PV_EA} \\
E13) \quad \log_{10}(PS_SA) &= \left(8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T_SA} \right) \\
E4) \quad y_EA &= \frac{PV_EA}{P_EA} \quad \text{agua, para el aire 1-y} \\
E6) \quad Ve_EA &= \frac{R \times (T_EA + 273,15)}{P_EA} \times (1 + HAM_E) \\
E15) \quad HA\bar{m}_SA &= \frac{PV_SA}{P_SA - PV_SA} \\
E5) \quad HA_EA &= \frac{PM_{agua}}{PM_{aire seco}} HA\bar{m}_EA \\
E7) \quad DH_EA &= (0,24 \times T_EA + HA_EA \times (595 + 0,46 \times T_EA)) \\
E9) \quad Fm_EA &= \frac{F_EA}{PM_EA} \\
E16) \quad y_SA &= \frac{PV_SA}{P_SA} \quad \text{agua, para el aire 1-y} \\
E18) \quad PM_SA &= \{ y_SA \times PM_{agua} + (1 - y_SA) \times PM_{aire seco} \} \\
E2) \quad PV_EA &= \frac{HR_EA \times PS_EA}{\times 100} \\
E8) \quad PM_EA &= \{ y_EA \times PM_{agua} + (1 - y_EA) \times PM_{aire seco} \}
\end{aligned}$$

$$E17) \quad HA_SA = \frac{PM_{agua}}{PM_{aire seco}} HA\bar{m}_SA$$

$$E19) \quad Ve_SA = \frac{R \times (T_SA + 273,15)}{P_SA} \times (1 + HAm_SA)$$

$$E21) \quad DH_SW = 1 \times T_SW$$

$$E14) \quad PV_SA = \frac{HR_SA \times PS_SA}{\times 100}$$

$$E26) \quad q_SW = \frac{F_SW}{RO_SW}$$

$$E20) \quad DH_SA = (0,24 \times T_SA + HA_SA \times (595 + 0,46 \times T_SA))$$

$$E25) \quad F_EA + F_EW - F_SA - F_SW = 0$$

$$E27)$$

$$Q = F_SA \times DH_SA + F_SW \times DH_SW - F_EA \times DH_EA - F_EW \times DH_EW$$

$$\text{De E25} \quad F_EW = F_SA + F_SW - F_EA$$

$$\text{E E27}$$

$$Q = F_SA \times DH_SA + F_SW \times DH_SW - F_EA \times DH_EA - (F_SA + F_SW - F_EA) \times DH_EW$$

$$Q = F_SA \times DH_SA + F_SW \times DH_SW - F_EA \times DH_EA - (F_SA - F_EA) \times DH_EW - F_SW \times DH_EW$$

$$Q - F_SA \times DH_SA + F_EA \times DH_EA + (F_SA - F_EA) \times DH_EW = F_SW \times (DH_SW - DH_EW)$$

$$F_SW = \frac{Q - F_SA \times DH_SA + F_EA \times DH_EA + (F_SA - F_EA) \times DH_EW}{\times (DH_SW - DH_EW)}$$

$$F_EW = F_SA + F_SW - F_EA$$

$$E11) \quad Fm_EW = F_EW \times PM_EW$$

$$E\ 12) \quad q_{EW} = \frac{F_{EW}}{RO_{EW}}$$

$$E23) \quad Fm_{SA} = F_{SA} \times PM_{SA}$$

$$E24) \quad F_{SW} = F_{EA} + F_{EW} - F_{SA}$$

Que de todos modos puede resolverse en forma acíclica.