

TP05

SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN Psicrometría. Definiciones y conceptos básicos

Autor: Dr. Ing. Arq. Jorge D. Czajkowski - Profesor Titular

1. BASES FISIOLÓGICAS DEL ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE

Las variaciones estacionales extremas de calor y frío son mayores que las que la mayoría de la gente puede soportar aun en las zonas templadas. Los márgenes de temperatura dentro de los cuales la gente se siente cómoda depende en gran parte de la ropa que usa, el grado de actividad física y el contenido de humedad de la atmósfera, pero para las personas ocupadas en actividades ligeras, puertas adentro, los márgenes siguientes indican de una manera general los límites de confort:

Invierno (ropaje normal)	18 -23°C
Verano (ropas livianas)	22 -28°C

El hecho de que los márgenes sean diferentes según se trate de invierno o verano se deben, en parte, al distinto ropaje, y en parte, a la modificación del metabolismo. La consideración de estos márgenes de confort indica que hay probablemente muy pocos lugares en cualquier país de zona templada en la que no se necesite algún tipo de acondicionamiento de aire (calefacción en invierno o refrigeración en verano) a lo largo del año. La calefacción invernal, por supuesto, es una costumbre de siglos, y muchas regiones clasificadas como templadas serían inhabitables sin ella. La refrigeración veraniega, aunque no absolutamente esencial para la existencia, es necesaria en muchas partes para confort y vida saludable.

El acondicionamiento del aire implica mucho más que el mero control de la temperatura. Son cuatro las condiciones atmosféricas que afectan al confort humano:

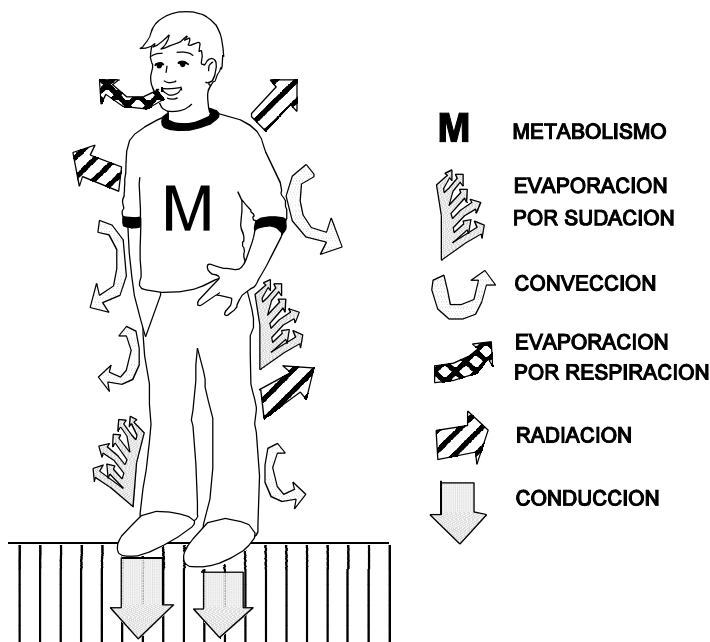


Figura 2: Formas de trasmisión del calor entre el cuerpo y el ambiente.

1.1. TEMPERATURA

Puesto que no es posible la conservación de la vida por sí misma sin el mantenimiento de la temperatura propia del cuerpo humano, la calefacción artificial dentro de los recintos fue el intento más remoto [lecho con miras a la modificación de algunos de estos factores. La regulación de la temperatura, dentro de límites propiamente dichos Y considerados como óptimos mediante una calefacción o refrigeración perfectamente reguladas, se obtuvo en época relativamente reciente.

El adecuado control de la temperatura del medio ambiente que circunda al cuerpo humano elimina el esfuerzo fisiológico de acomodación, obteniéndose con ellos un mayor confort y la consiguiente mejora del bienestar físico y de las condiciones de salubridad.

1.2. HUMEDAD

Una gran parte del calor que posee el cuerpo humano se disipa por evaporación a través de la piel.

Como quiera que la evaporación se favorece con una humedad relativa del aire baja y se retarda si ésta es alta, de ello se deduce que la regulación de la humedad tenga una importancia tan vital como la temperatura, pero no es menos cierto que su influencia en el confort y demás sensaciones físicas no es de desdeñar; un

exceso de humedad no sólo da como resultado reacciones fisiológicas perjudiciales, sino que también afecta (por lo común en forma perjudicial) a las cualidades de muchas de las sustancias contenidas en el lugar de que se trate, y muy particularmente sobre los vestidos y muebles.

1.3. MOVIMIENTO DEL AIRE

El movimiento del aire sobre el cuerpo humano incrementa la proporción de humedad y calor disipados con respecto a la que correspondería a un aire en reposo, dando ello lugar a que la sensación de calor o de frío experimente variación. Por razones de más difícil comprensión, también es causa de otras alteraciones, que pueden ser agradables según su intensidad.

1.4. PUREZA DEL AIRE

La composición física y química del aire comprende un determinado número de elementos diversos. La disminución de la proporción de oxígeno contenido, así como el aumento del anhídrido carbónico, debido a la combustión fisiológica son factores raramente importantes a causa de la pequeña ventilación que se requiere para anular sus efectos. La dilución de los olores humanos exige una gran ventilación y otros medios de eliminación de olores. La eliminación de las partículas sólidas, en suspensión en el aire introducido en el recinto, es importante no sólo por lo que concierne a la salud, sino también por lo que tienen de molestas así como por el detrimento que frecuentemente representa la suciedad depositada en los mobiliarios y demás objetos.

El humo ya sea producido en el interior de la habitación, ya en el exterior de la misma debe ser evacuado a causa de lo pernicioso que resulta para la vista y el aparato respiratorio. La mayoría de los médicos convienen en que la expulsión del polen del heno del aire es en extremo beneficioso para los atacados de la fiebre del heno o del asma. La regulación de la proporción de iones contenidos en el aire puede resultar de importancia en el futuro, pero en la actualidad son demasiado escasos los conocimientos que se poseen sobre el particular para poder deducir conclusiones. Sin embargo es posible que la esterilización del aire para la destrucción de las bacterias pueda llegar a revestir la mayor importancia.

2. DEFINICIONES Y TÉRMINOS EMPLEADOS CORRIENTEMENTE EN AIRE ACONDICIONADO

FRÍO: El frío, por definición, no existe. Es simplemente una sensación de falta de calor.

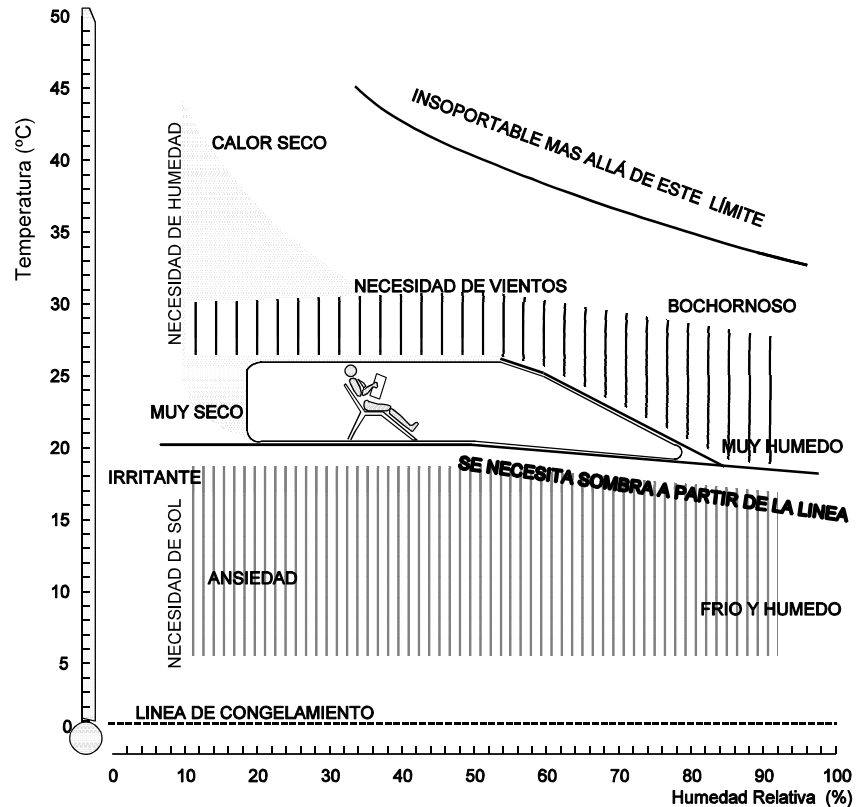


Figura 3: Condiciones de confort bioclimático según modelo del Dr. Arq. Víctor Olgay.

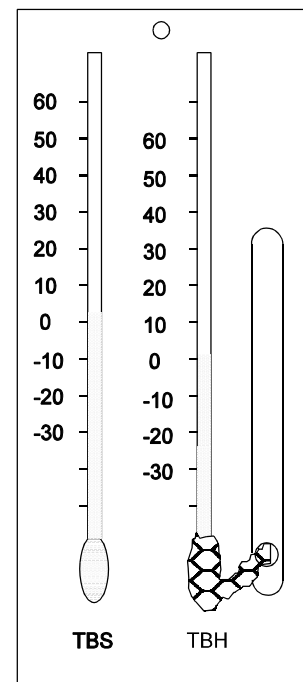


Figura 4: Higrómetro para la medición de temperaturas de bulbo seco y húmedo

CALORÍA: Una caloría es la cantidad de calor que tenemos que añadir a 1 Kg de agua a 15°C de temperatura para aumentar esta temperatura en 1°C. Es equivalente a 4 BTU.

FRIGORÍA: Una frigoría es la cantidad de calor que tenemos que sustraer a 1 Kg de agua a 15°C de temperatura para disminuir esta temperatura en 1°C. Es equivalente a 4 BTU.

BTU: British Thermal Unit. Unidad térmica inglesa. Es la cantidad de calor necesario que hay que sustraer a 1 libra de agua para disminuir su temperatura 1°F. Una BTU equivale a 0,252 Kcal.

TONELADA DE REFRIGERACIÓN (TON): Es equivalente a 3.000 F/h., y por lo tanto, a 12.000 BTU/h.

SALTO TÉRMICO: Es toda diferencia de temperaturas. Se suele emplear para definir la diferencia entre la temperatura del aire de entrada a un acondicionador y la de salida del mismo y también para definir la diferencia entre la temperatura del aire en el exterior y la del interior.

ZONA DE CONFORT: Son unas condiciones dadas de temperatura y humedad relativa bajo las que se encuentran confortables la mayor parte de los seres humanos. Estas condiciones oscilan entre los 22° y los 27°C (71-80°F) de temperatura y el 40 al 60 por 100 de humedad relativa.

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO o TERMÓMETRO HÚMEDO (BH): Es la temperatura indicada por un termómetro, cuyo depósito está envuelto con una gasa o algodón empapados en agua, expuesto a los efectos de una corriente de aire intensa. Las temperaturas de bulbo húmedo se representan por rectas que se originan en la línea de saturación y caen hacia abajo y la derecha.

TEMPERATURA DE BULBO SECO o TERMÓMETRO SECO (BS): Es la temperatura del aire, indicada por un termómetro ordinario. Las temperaturas de bulbo seco se representan como líneas verticales que tienen su origen en la escala de temperaturas de bulbo seco (eje horizontal).

TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO (PR): Es la temperatura a que debe descender el aire para que se produzca la condensación de la humedad contenida en el mismo. Las temperaturas de punto de rocío están representadas por puntos de la línea de saturación. En saturación, punto de rocío = bulbo húmedo = bulbo seco.

DEPRESIÓN DEL TERMÓMETRO HÚMEDO, O DIFERENCIA PSICROMÉTRICA: Es la diferencia de temperatura entre el termómetro seco y el termómetro húmedo.

HUMEDAD: Es la condición del aire con respecto a la cantidad de vapor de agua que contiene.

HUMEDAD ABSOLUTA (DENSIDAD DEL VAPOR): Es el peso del vapor de agua por unidad de volumen de aire, expresada en gramos por metro cúbico de aire.

HUMEDAD ESPECÍFICA (W): Es el peso del vapor de agua por unidad de peso de aire seco, expresada en gramos por kilogramo de aire seco. El aire atmosférico contiene cierta cantidad de humedad pero su capacidad no es ilimitada. Cuando contiene el máximo posible, se dice que está saturado y constituye la humedad específica de saturación (W_s).

HUMEDAD RELATIVA (HR) es la relación de la presión de vapor de agua en el aire a la presión del vapor saturado a la misma temperatura. Con sólo un pequeño error, puede decirse que la humedad relativa es igual al tanto por ciento de saturación del aire, es decir; la relación de la humedad específica verdadera W a la

humedad específica de saturación W_s . En otros términos, $HR = W/W_s$. Las líneas de humedad relativa son curvas que comienzan abajo a la izquierda y se curvan hacia arriba y la derecha.

VOLUMEN ESPECÍFICO: es la recíproca de la densidad y se expresa en metro cúbico por kilogramo de aire seco. Las líneas de volumen específico constante se originan en el eje de BS y suben hacia arriba con ligera



Figura 5: Psicrómetro de voleo.

inclinación hacia la izquierda.

CALOR SENSIBLE: Es el calor empleado en la variación de temperatura de una sustancia cuando se le comunica o sustrae calor.

CALOR LATENTE: Es el calor que, sin afectar a la temperatura, es necesario adicionar o sustraer a una sustancia para el cambio de su estado físico. Específicamente en psicrometría, el calor latente de fusión del hielo es $h_f = 79,92$ Kcal/kg.

ENTALPIA o CALOR TOTAL (H o H_t): es una cantidad que indica el contenido de calor de la mezcla de aire y vapor de agua, por encima de 0°C ⁽¹⁾. Se expresa en Kcal por kilogramo de aire seco. Los valores de entalpía se marcan sobre una escala especial arriba de la línea de saturación. Es la suma del calor sensible y el latente en kilocalorías, por kilogramo de una sustancia, entre un punto arbitrario de referencia y la temperatura y estado considerado. En el ábaco se lee en una escala marginal siguiendo las líneas de TBH.

Se puede plantear que:

$$H_t = H_a + H_v$$

Donde: H_t es la entalpía o cantidad de calor total de la mezcla de aire (kcal/kg); H_a es la cantidad de calor sensible del aire seco (kcal/kg); y H_v es la cantidad de calor total del vapor de agua (kcal/kg).

NORMAS UNE, ARI Y ASHRAE (capacidad): Son las frigorías hora producidas por un acondicionador a 35°C de temperatura seca exterior y $23,8^\circ\text{C}$ de temperatura húmeda exterior, con el aire de la habitación retornando al acondicionador a $26,6^\circ\text{C}$ de temperatura seca y $19,4^\circ\text{C}$ de temperatura húmeda.

COP (Coeficient of Performance): Coeficiente de prestación. Es el cociente entre la potencia calorífica total disipada en vatios y la potencia eléctrica total consumida, durante un período típico de utilización.

3. PSICROMETRÍA

Es la ciencia del aire que estudia las propiedades físicas del aire atmosférico. Este aire está constituido por una mezcla de aire seco y vapor de agua. El aire seco es una mezcla de varios gases, siendo la composición general la siguiente:

Nitrógeno	: 77 %
Oxígeno	: 22 %
Anhídrido carbónico y otros gases	: 1 %

El aire tiene la capacidad de retener una cantidad variable de vapor de agua en relación a la temperatura del aire.

A menor temperatura, menor cantidad de vapor y a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua; a presión atmosférica constante.

¹En el sistema inglés de unidades, el calor del aire se cuenta a partir de 0°F y el del agua a partir de 32°F ($= 0^\circ\text{C}$)

3.1. LECTURA DEL ÁBACO PSICOMÉTRICO

- BS = TEMPERATURA DE BULBO SECO
- BH = TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO
- HR = HUMEDAD RELATIVA
- PR = TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO
- W = HUMEDAD ESPECÍFICA
- H = ENTALPÍA
- VESP = VOLUMEN ESPECÍFICO

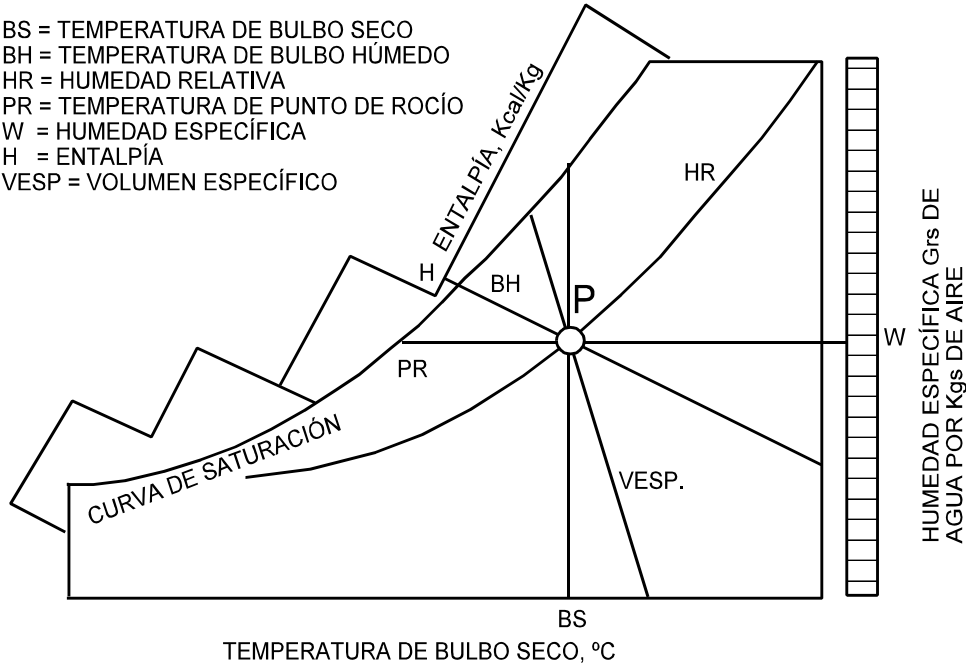


Figura 6: Esquema de un ábaco psicrométrico con ilustración de siete propiedades conexas de las mezclas de aire y vapor de agua. Conocidas dos propiedades cualesquiera, el punto de estado queda determinado y pueden leerse las otras cinco.

El diagrama que se representa es un ábaco psicrométrico para temperaturas normales (el rango habitual en la práctica del acondicionamiento) y para la presión atmosférica normal, 760 mm de HG. Es útil repasar ahora las definiciones de algunos de los términos utilizados en relación con el ábaco psicrométrico. Si se conocen dos cualesquiera de las siete anteriores propiedades de la mezcla de aire y vapor de agua, las otras pueden obtenerse inmediatamente del ábaco.

La figura 5 muestra una condición del aire o punto de estado como punto **P** sobre un ábaco simplificado con indicación de las líneas y escalas sobre las cuales pueden leerse las propiedades psicrométricas. Como ejercicio preliminar en la lectura del ábaco, supongamos que en un psicrómetro de revoleo se obtienen las lecturas BS = 35°C, BH = 24,5°C.

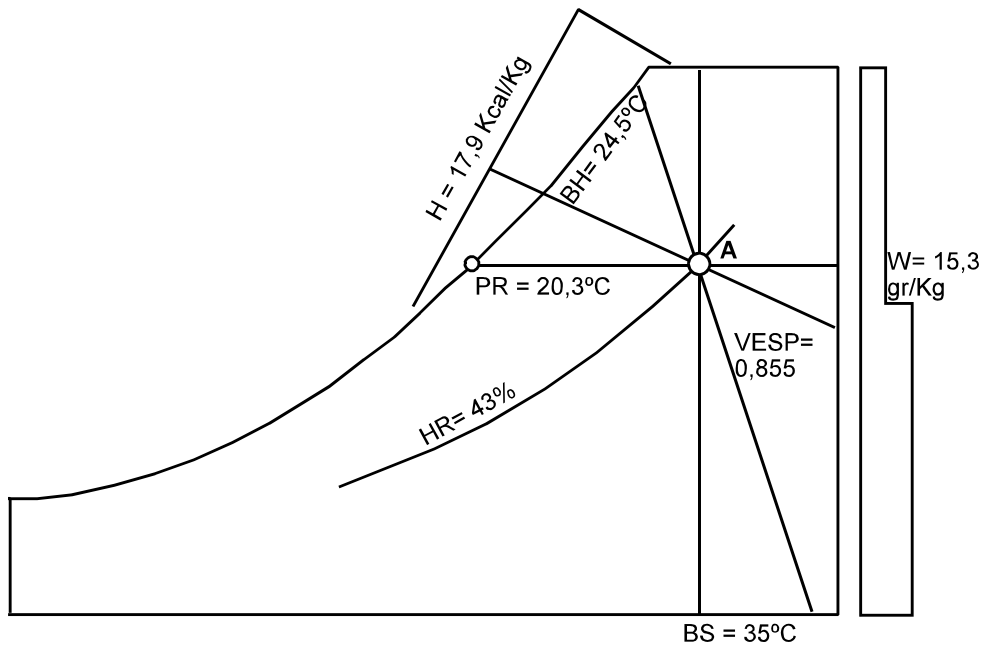


Figura 7: Lectura del ábaco psicrométrico

Para hallar las otras cinco propiedades psicrométricas de este aire, véase la figura 6, donde las condiciones dadas están representadas por el punto de estado **A**.

Consultando ahora el ábaco psicrométrico completo se obtendrá (por interpolación) $HR = 43\%$. Siguiendo una línea horizontal hacia la derecha, hasta la escala de humedad específica, se obtiene $W = 15,3$ gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Siguiendo la misma línea hasta la línea de saturación, se obtiene $PR = 20,3^\circ \text{C}$.

Interpolando entre las líneas de volumen específico de $0,85$ y $0,9 \text{ m}^3/\text{kg}$, se obtiene un volumen específico de aproximadamente $0,895 \text{ m}^3/\text{kg}$. La entalpía se encuentra siguiendo la línea BH hacia la izquierda y arriba, hasta la línea de saturación y la escala de entalpía. Para la condición dada, $H = 17,9 \text{ Kcal}$ por kilogramo de aire seco.

La psicrometría es una ciencia muy interesante en sí misma, pero nuestro interés aquí está en su aplicación al acondicionamiento del aire. Pasaremos ahora al análisis de los procesos básicos de acondicionamiento y explicaremos cómo puede utilizarse el ábaco psicrométrico para resolver los problemas que se presentan.

3.2. CAMBIO DE LA CONDICIÓN DEL AIRE

Los procesos de calefacción, refrigeración, humidificación y deshumidificación que tienen lugar en el acondicionamiento del aire modifican la condición del aire desde la representada por el punto de estado inicial en el ábaco hasta una condición diferente, representada por un segundo punto en el ábaco.

Hay cinco procesos posibles:

- Procesos de calor sensible constante (indicados por una temperatura de bulbo seco constante).
- Procesos de calor latente constante (indicados por un contenido de humedad constante y una temperatura de punto de rocío constante).
- Procesos de entalpía constante o adiabáticos (indicados por una temperatura de bulbo húmedo constante).
- Procesos de humedad relativa constante (todos los demás factores varían).
- O, finalmente, una modificación que representa una combinación cualquiera de los anteriores y que no procede a lo largo de ninguna de las líneas de procesos anteriores.

Ustedes deben observar nuevamente:

- Las líneas de bulbo seco son líneas de calor sensible constante.
- Las líneas de punto de rocío son líneas de calor latente constante.
- Las líneas de bulbo húmedo son líneas de calor total constante (entalpía constante).

Veremos ahora algunos de los procesos de acondicionamiento por medio de ejemplos.

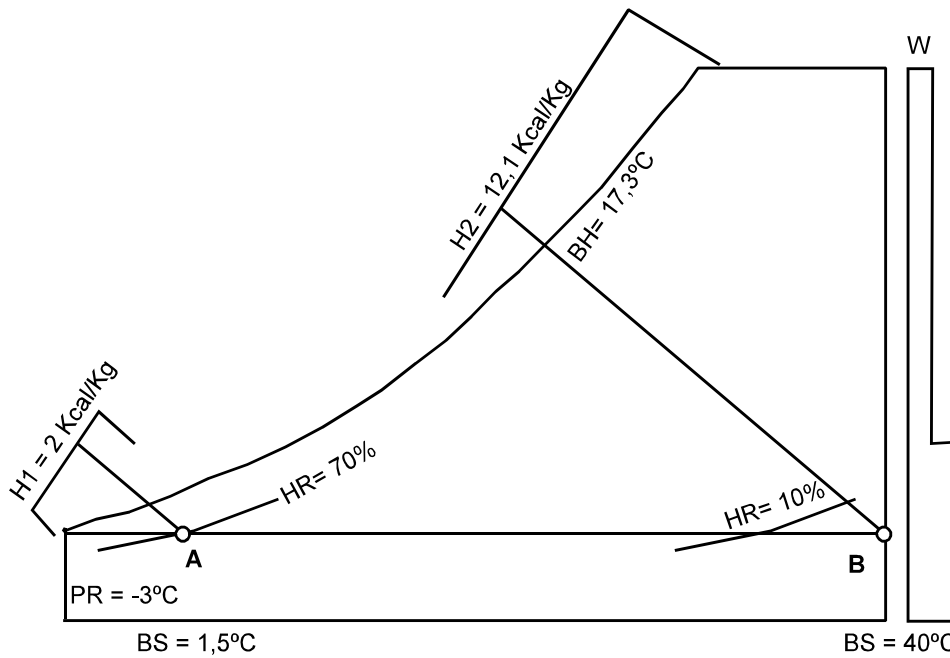


Figura 8: Proceso de calefacción a humedad constante interpretado sobre ábaco psicrométrico.

3.3. CALEFACCIÓN DEL AIRE SIN AGREGADO DE HUMEDAD

Es éste un proceso de calor latente constante, o un proceso de humedad específica constante, y la temperatura de punto de rocío permanece constante en él. Sólo se agrega al aire *calor sensible*. Es el proceso que tiene lugar en los sistemas de calefacción por gravedad o forzados cuando no están equipados con humidificadores.

3.4. SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO

Ejemplo: Se calienta aire, inicialmente a 1,5°C (BS), HR = 70% hasta 40°C. Hallar BH, PR y HR para el aire final y el calor agregado por kilogramo de aire.

Solución: Véase el ábaco psicrométrico y la figura 7. Situemos la condición inicial sobre el ábaco. Esta condición está dada por el punto A de la figura 7. Observemos que $H_1 = 2$ Kcal por kilogramo. Sigamos la línea horizontal de humedad constante (PR) hasta la condición final y leamos $BH = 17,3^\circ\text{C}$; $PR = -30^\circ\text{C}$; $HR = 8\%$ (estimado).

Esta condición está ilustrada por el punto B de la figura 7. Para hallar el contenido final de calor, sigamos la línea $BH = 17,3^\circ\text{C}$ hasta la escala de entalpía y leamos $H_2 = 12,1$ Kcal por kilogramo. Calor agregado = $H_2 - H_1 = 10,1$ Kcal por kilogramo de aire.

3.5. CALEFACCIÓN CON HUMIDIFICACIÓN

El buen acondicionamiento invernal exige humidificación durante el proceso de calefacción. Se agrega por lo general la humedad suficiente para mantener la humedad relativa entre el 40 y el 50% en el espacio acondicionado ver Figura 8.

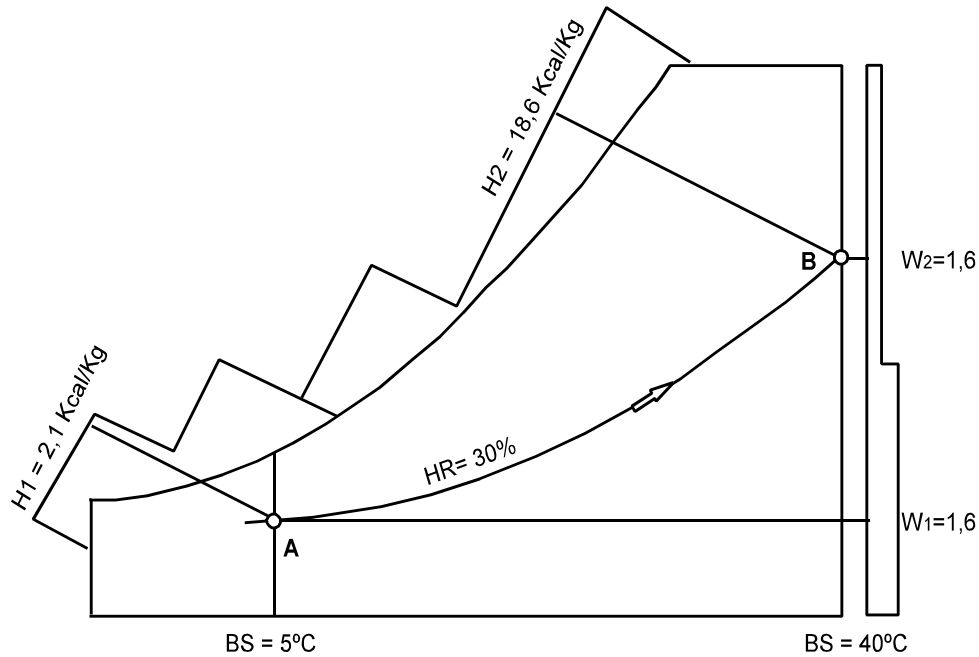


Figura 9: Proceso de calefacción a humedad relativa constante interpretado en el ábaco psicrométrico.

Ejemplo: Hay que calentar aire a BS = 5°C, HR = 30% hasta 40°C, agregando la humedad necesaria para mantener la HR en 30% (proceso de HR constante). Hallar las cantidades de calor y de humedad que deben agregarse por kilogramo de aire.

Solución: Determinemos el punto A de estado inicial, figura 8, con $H_1 = 2,1$ Kcal por kilogramo, $W_1 = 1,6$ gramo por kilogramo. Siguiendo la línea de HR = 30%, hasta su intersección con la línea BS = 40°C, determinemos el punto B en la figura 8, ó estado final.

Leemos $H_2 = 18,6$ Kcal por kilogramo y $W_2 = 14,1$ gramo por kilogramo.

Calor agregado = $18,6 - 2,1 = 16,5$ Kcal/Kg
 Agua agregada = $14,1 - 1,6 = 12,5$ g/Kg

3.6. REFRIGERACIÓN CON DESHUMIDIFICACIÓN

Un buen ejemplo de este proceso es la refrigeración en verano, o acondicionamiento de aire. Teóricamente se enfría primero la mezcla de aire y vapor de agua (se elimina calor sensible) a lo largo de una línea de humedad absoluta constante hasta alcanzar la línea de saturación. La posterior eliminación de calor resulta en la condensación del vapor de agua, extrayéndose así agua del aire al mismo tiempo que sigue reduciéndose la temperatura de BS y el proceso se aleja de la línea de saturación en su segunda fase. La refrigeración puede obtenerse haciendo pasar el aire a través de las aletas de un serpentín que contiene agua fría o gas refrigerante evaporándose, cuya temperatura está muy por debajo de la temperatura de punto de rocío del aire que se quiere acondicionar.

Ejemplo: El aire, a BS = 40°C y HR = 60% pasa por un serpentín de refrigeración a expansión directa y sale a 18°C, saturado. Hallar las cantidades de calor y de agua extraídas por kilogramo de aire.

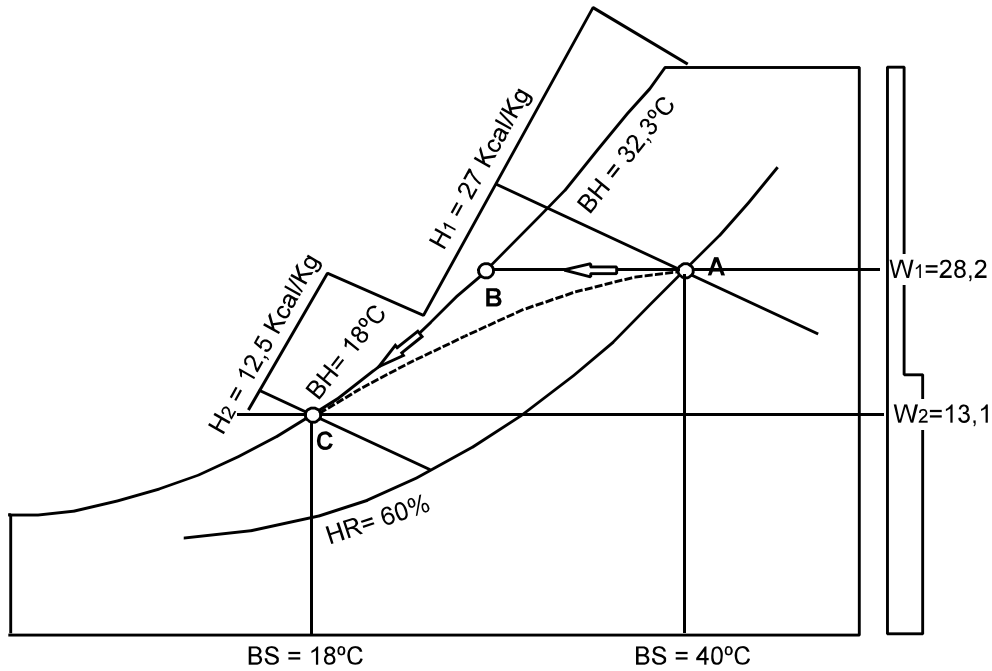


Figura 10: Refrigeración y deshumidificación del aire. Es este un proceso psicrométrico típico en el acondicionamiento del aire.

Solución: La condición inicial está representada por el punto A en la Figura 9. En el ábaco psicrométrico se lee $W_1 = 28,2$ g/Kg. Siguiendo la línea BH = $32,3^\circ\text{C}$ hasta la escala de entalpía, se lee $H_1 = 27$ Kcal/Kg. La primera fase del proceso es de refrigeración sensible y se realiza sobre una línea (AB) de humedad constante. Aquí comienza la segunda fase y el proceso sigue la línea de saturación hasta la temperatura de 18°C sobre la línea de saturación (BS = BH = PR), llegando al punto de estado final C. En la fase BC del proceso se elimina a la vez calor, sensible y calor latente. En el punto de estado C se tiene $W_2 = 13,1$ g/Kg y $H_2 = 12,5$ Kcal/Kg.

Calor extraído = $27 \text{ Kcal/Kg} - 12,5 \text{ Kcal/Kg} = 14,5 \text{ Kcal/Kg}$.

Agua extraída = $28,2 \text{ g/Kg} - 13,1 \text{ g/Kg} = 15,1 \text{ g/Kg}$.

Debe puntualizarse que el proceso descrito por la trayectoria ABC es puramente teórico y se basa en la hipótesis de que el aire entra en contacto físico real con la superficie metálica fría de las aletas o con el agua fría. Esta hipótesis se cumple satisfactoriamente en los pulverizadores bien proyectados, pero en el caso del serpentín, la mayor parte del aire lo atraviesa sin contacto real con la superficie fría. Parte del aire, por lo tanto, jamás alcanza la temperatura de rocío, y el verdadero proceso, en este caso, está mejor representado por una línea curva como la AC (de trazos) en la Figura 9.

4. PUNTO DE ROCÍO DEL APARATO

Se ha dicho antes que los serpentines de refrigeración no entran en contacto físico con todo el aire que pasa por ellos. Como consecuencia la temperatura del aire saliente no es tan baja como la del aparato. Hablamos por tanto, de dos puntos de rocío: el punto de rocío del aire y el punto de rocío del aparato.

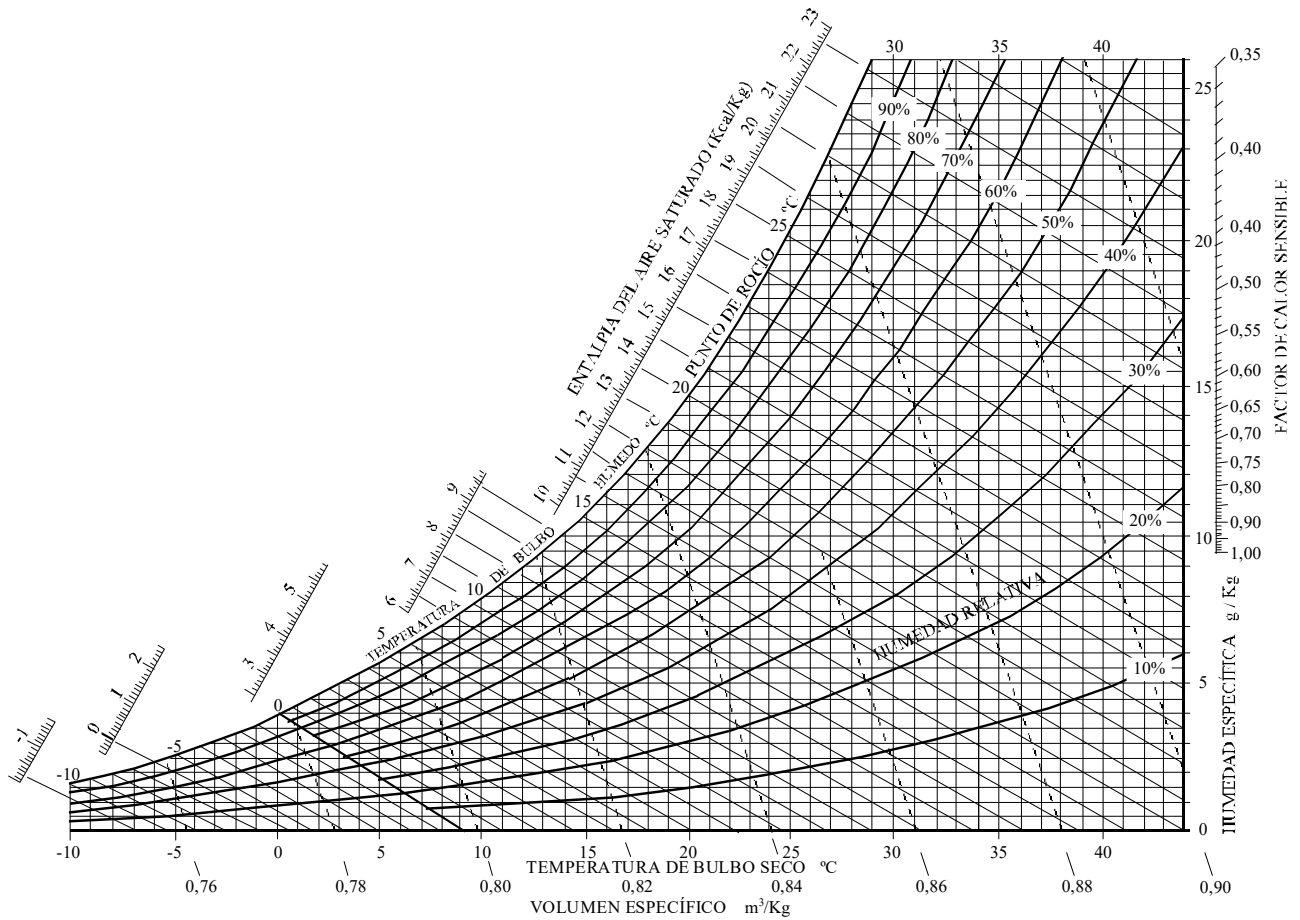
Las superficies de los serpentines deben mantenerse a una temperatura más baja que la deseada para el aire de salida. En otros términos, el punto de rocío del aparato será más bajo que el punto de rocío del aire. Cuanto más bajo, depende de la eficacia del serpentín o del pulverizador. En los serpentines de cuatro filas provistos de aletas, la superficie fría entra en contacto con el 80% del aire que los atraviesa; en los serpentines de 6 filas, este tanto por ciento se eleva a 92. Como *punto de rocío del aparato* puede definirse, prácticamente, *la temperatura media de la superficie del serpentín*.

5. USO DE APLICACIONES

En los entornos IOS y Android hay numerosas aplicaciones psicrométricas y la cátedra recomienda "PsicroApp^(R) de Munters".

Para la realización del presente trabajo práctico solicitar al docente los parámetros para realizar una ejercitación sobre el diagrama psicrométrico para:

a) Calefacción del aire a humedad constante

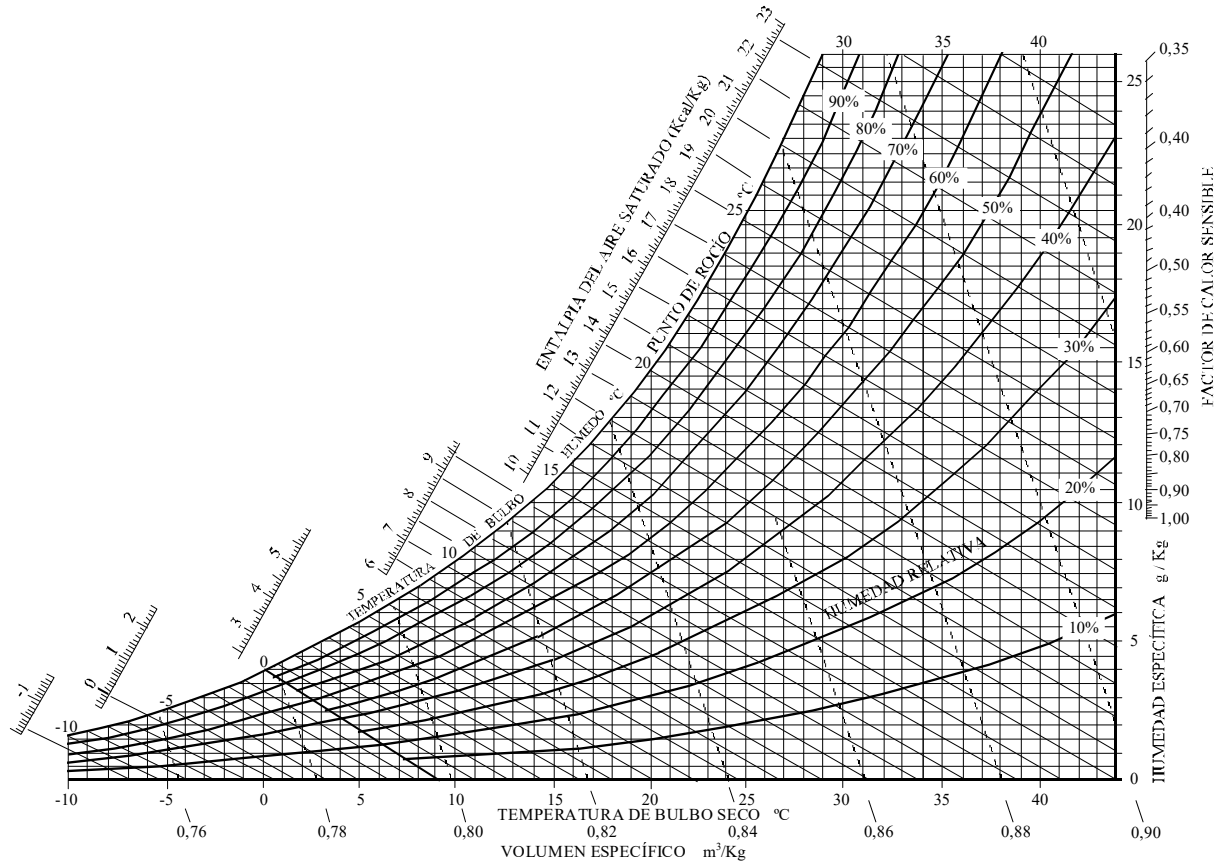


Se calienta el aire, inicialmente a _____ °C (BS), HR= _____ %, hasta _____ °C.

Hallar:

BH= _____ °C ; PR= _____ °C ; HR= _____ % ; Calor agregado= $H_2 - H_1 =$ _____ Kcal/Kg aire

b) Calefacción del aire a humedad relativa constante

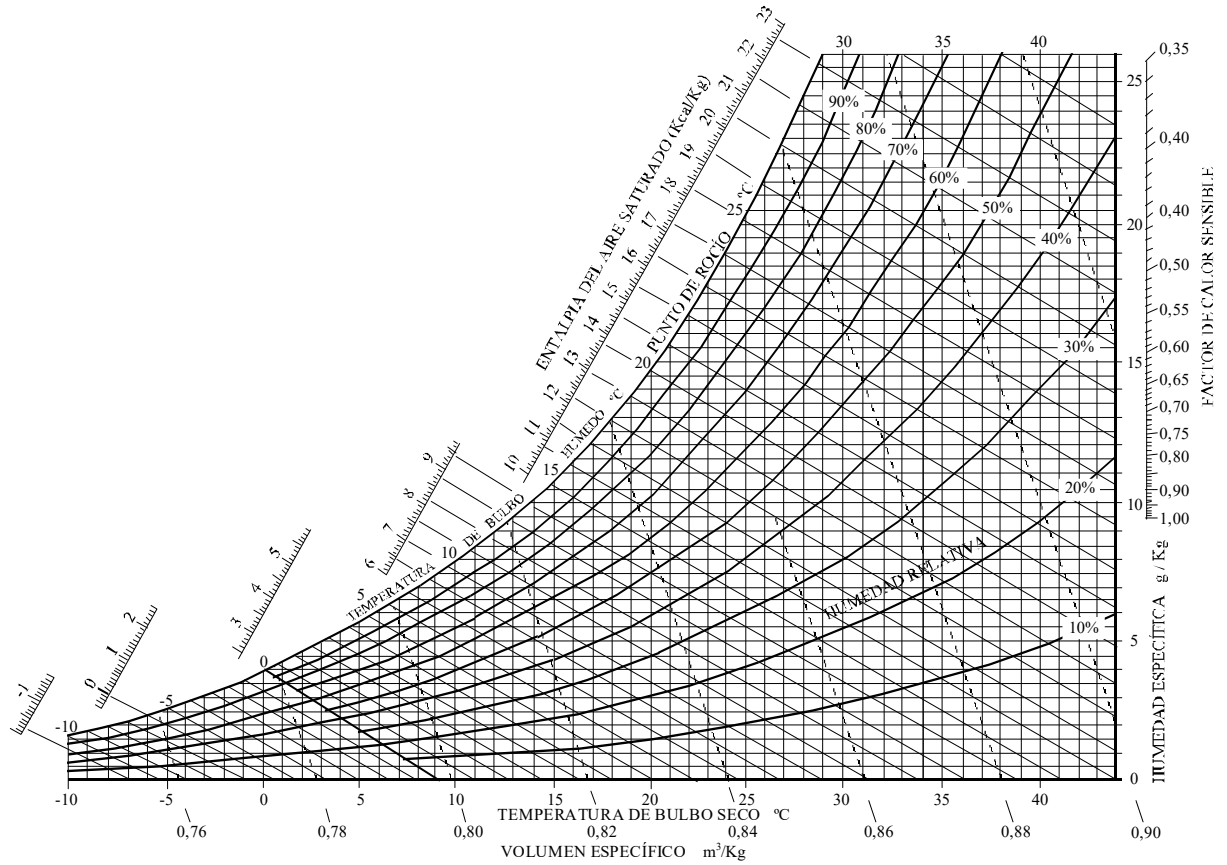


Se calienta el aire, inicialmente a _____ °C (BS), HR= _____ %, hasta _____ °C agregando la humedad necesaria para mantener la HR en _____ % (proceso de HR constante).

Hallar:

Calor agregado= $H_2 - H_1 =$ _____ - _____ Kcal/Kg aire ; Agua agregada= $W_2 - W_1 =$ _____ - _____ gr/Kg

c) Refrigeración y deshumidificación del aire

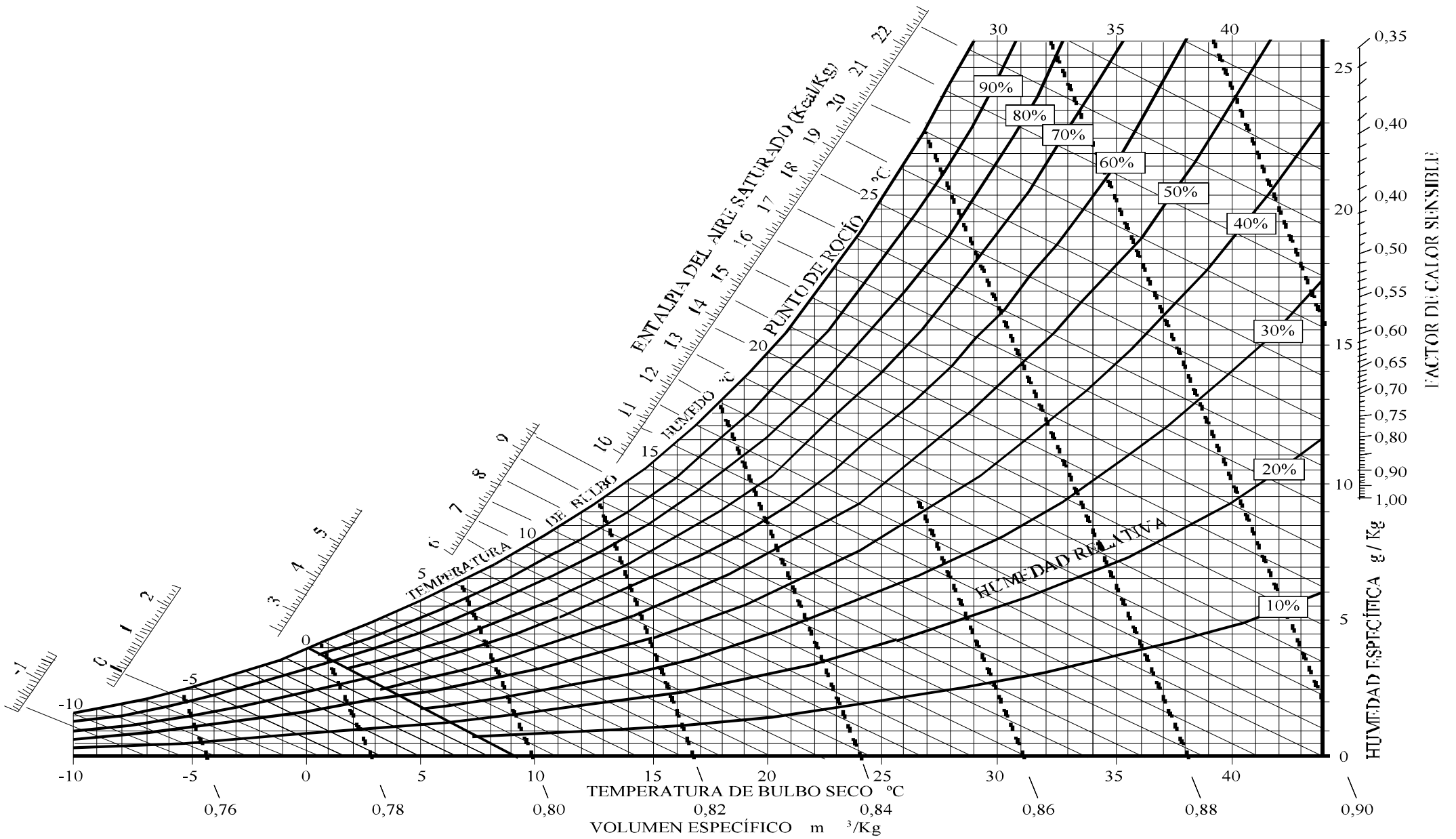


El aire a BS= _____ °C, HR= _____ %, pasa por un serpentín de refrigeración a expansión directa y sale a _____ °C saturado.

Hallar:

Calor extraído = _____ Kcal/Kg - _____ Kcal/Kg = _____ Kcal/Kg.

Agua extraída = _____ g/Kg - _____ g/Kg = _____ g/Kg.



PSYCHROMETRIC CHART
NORMAL TEMPERATURES
SI METRIC UNITS
 Barometric Pressure 101.325 kPa
SEA LEVEL

