

Introducción .....	164	Cartas Psicrométricas .....	180
Definición .....	164	Temperatura de Bulbo Seco .....	182
Aire y Humedad y las Tablas Psicrométricas .....	165	Temperatura de Bulbo Húmedo .....	182
Propiedades del Aire .....	165	Temperatura de Punto de Rocío .....	182
Propiedades del Vapor de Agua (Humedad) .....	166	Humedad Relativa .....	183
Aire Saturado (con Humedad) .....	169	Humedad Absoluta .....	183
Humedad Relativa .....	170	Entalpía .....	185
Humedad Absoluta .....	170	Volumen Específico .....	185
Humedad Específica .....	171	Enfriamiento de Aire .....	187
Porcentaje de Saturación .....	171	Enfriamiento Sensible .....	187
Punto de Rocío .....	171	Enfriamiento y Deshumidificación .....	189
Humedad por Kilogramo de Aire Seco .....	172	Cambios de Calor Latente y Sensible .....	190
Entalpía de las Mezclas de Aire y Vapor de Agua .....	174	Remoción de Humedad .....	190
Termómetro de Bulbo Seco .....	176	Mezclando Aire a Diferentes Condiciones .....	192
Termómetro de Bulbo Húmedo .....	176	Función del Serpentin .....	198
Psicrómetro .....	176	Procesos del Serpentin .....	198
Indicativos de Baja Humedad .....	177	Enfriamiento y Deshumidificación .....	200
Medición de la Humedad .....	177	Enfriamiento Sensible .....	202
Controles de Humedad .....	177	Zona de Confort .....	206
¿Porque Humidificar? .....	178		
¿Cuál es la Humedad Relativa Correcta para Interiores? .....	180		

## Introducción

La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) define el acondicionamiento del aire como: "El proceso de tratar el aire, de tal manera, que se controle simultáneamente su temperatura, humedad, limpieza y distribución, para que cumpla con los requisitos del espacio acondicionado".

Como se indica en la definición, las acciones importantes involucradas en la operación de un sistema de aire acondicionado son:

1. Control de la temperatura.
2. Control de la humedad.
3. Filtración, limpieza y purificación del aire.
4. Circulación y movimiento del aire.

El acondicionamiento completo de aire, proporciona el control automático de estas condiciones, tanto para el verano como para el invierno. El control de temperatura en verano se logra mediante un sistema de refrigeración, y en invierno, mediante una fuente de calor. El control de humedad en verano requiere de deshumidificadores, lo que se hace normalmente al pasar el aire sobre la superficie fría del evaporador. En el invierno, se requiere de humidificadores, para agregarle humedad al aire en el sistema de calentamiento. La filtración del aire, en general, es la misma en verano que en invierno.

El acondicionamiento de aire en casas, edificios o en industrias, se hace por dos razones principales: proporcionar confort al humano, y para un control más completo

del proceso de manufactura; el control de la temperatura y la humedad, mejora la calidad del producto terminado.

Para acondicionar aire en un espacio, se requiere tener conocimientos básicos de las propiedades del aire y la humedad, del cálculo de cargas de calentamiento y de enfriamiento, manejo de las tablas o carta psicrométrica, y del cálculo y selección de equipo. También se requiere del conocimiento y manejo de instrumentos, como termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo (psicrómetro), el higrómetro, tubo de pitot, registradores, manómetros y barómetros.

En este capítulo, se verán los fundamentos del aire acondicionado. Se verán las propiedades del aire y la humedad, el manejo de la carta psicrométrica y algunos ejemplos prácticos.

## Definición

Psicrometría es una palabra que impresiona, y se define como la medición del contenido de humedad del aire. Ampliando la definición a términos más técnicos, psicrometría es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. Ampliando aún más, incluiríamos el método de controlar las propiedades térmicas del aire húmedo. Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica.

Las tablas psicrométricas ofrecen una gran precisión, ya que sus valores son de hasta cuatro decimales; sin

embargo, en la mayoría de los casos, no se requiere tanta precisión; y con el uso de la carta psicrométrica, se puede ahorrar mucho tiempo y cálculos.

En seguida, se verán las propiedades del aire y de la humedad conjuntamente con las tablas psicrométricas, y posteriormente, se verá la carta psicrométrica.

## Aire y Humedad y las Tablas Psicrométricas

¿Cuál es el significado de humedad relativa? ¿Cómo se produce la condensación de la humedad en un serpentín de enfriamiento? ¿Por qué "suda" un ducto de aire frío?

Las respuestas a las preguntas anteriores, tienen que ver con las propiedades de la mezcla de aire y vapor de agua (humedad). El conocimiento de estas propiedades, es requisito para el acondicionamiento del aire en forma apropiada y económica.

## Propiedades del Aire

El aire es una mezcla de gases incolora, inolora e insabora que rodea a la tierra. Este aire que envuelve a la tierra se conoce como atmósfera. Se extiende hasta una altura de aproximadamente 645 kms, y se divide en varias capas. La capa más cercana a la tierra se llama tropósfera, y va desde el nivel del mar hasta los 15 kms. La capa que se extiende desde los 15 hasta los 50 kms, se llama estratósfera. La capa de los 50 kms hasta los 95 kms, se llama mesósfera, y de los 95 a los 400 kms, se llama ionósfera.

Puesto que nosotros podemos movernos tan libremente en el aire, podríamos suponer que el aire no tiene peso, o por lo menos, tiene tan poco peso, que es despreciable. El aire sí tiene peso, y es sorprendentemente pesado. Su densidad (o peso por metro cúbico) varía, siendo mayor a nivel del mar (donde es comprimido por todo el aire encima del mismo) que en la cima de una alta montaña.

Un manto de aire cubre la tierra completa, y literalmente, nosotros vivimos en el fondo de ese mar de aire. Es más denso en el fondo, y se vuelve más delgado y ligero al ir hacia arriba. Todo este peso de aire ejerce una presión de 101.325 kPa (1.033 kg/cm<sup>2</sup>) al nivel del mar, pero esta presión disminuye más y más, mientras más alto subimos.

El aire, no es un vapor saturado que esté cercano a temperaturas donde pueda ser condensado. Es siempre un gas altamente sobrecalentado, o más precisamente, es una mezcla de gases altamente sobrecalentados.

Así, cuando calentamos o enfriamos aire seco, solamente estamos agregando o quitando calor sensible.

Podemos enfriar o calentar el aire, limpiarlo y moverlo, pero esto no cambia significativamente sus propiedades; ya que, los relativamente pequeños cambios de temperatura que le hagamos, sólo causan pequeñísimos cambios en el volumen y la densidad.

Si el aire seco se calienta, se expande; y su densidad disminuye, cuando la presión permanece constante. Inversamente, si se enfría el aire seco, aumenta su

densidad. Aún más, las temperaturas, densidades, volúmenes y presiones, todas varían proporcionalmente.

En la tabla 13.1, se muestran las propiedades del aire seco a la presión atmosférica, en un rango de temperaturas de -15°C a 50°C.

El aire atmosférico es una mezcla de oxígeno, nitrógeno, bióxido de carbono, hidrógeno, vapor de agua, y un porcentaje muy pequeño de gases raros como argón, neón, ozono, etc. En la tabla 13.2, se muestran los porcentajes de estos gases, tanto en peso, como en volumen, para el aire seco (sin vapor de agua).

Nombre	Símbolo Químico	AIRE SECO	
		% en Peso	% en Volumen
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	75.47	78.03
Oxígeno	O <sub>2</sub>	23.19	20.99
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.04	0.03
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0.00	0.01
Gases raros	----	1.30	0.94

Tabla 13.2 - Gases que componen el aire en la atmósfera.

En áreas congestionadas o industriales, también puede haber gases conteniendo azufre, carbono, plomo y ciertos ácidos.

Cada uno de estos gases que componen el aire, se comporta de acuerdo a la ley de Dalton. Brevemente, esta ley nos dice que una mezcla de dos o más gases, pueden ocupar el mismo espacio al mismo tiempo, y que cada uno actúa independientemente de los otros, como si los otros no estuvieran allí. Esto es, si un cuarto está completamente lleno de aire, también está completamente lleno de oxígeno, de nitrógeno, vapor de agua, etc., cada uno independiente del otro.

Cada uno tiene su propia densidad, su propia presión (presión parcial), y cada uno responde a los cambios de volumen y temperatura a su propia manera, sin "hacer caso" uno al otro, y cada uno se comporta según las leyes que lo gobiernan en lo particular. Es esencial que esto sea entendido y recordado. Realmente, el aire seco no es un gas puro, ya que es una mezcla como se mencionó anteriormente, y por lo tanto, no se conforma exactamente a las leyes de los gases, pero los gases que los componen son verdaderos gases; así que, para el propósito práctico de este capítulo, se considera a esta mezcla de gases (aire seco sin vapor de agua) como un solo compuesto, que sigue la ley de los gases.

El aire como ya vimos, tiene peso, densidad, temperatura, calor específico y además, cuando está en movimiento, tiene momento e inercia. Retiene sustancias en suspensión y en solución.

El aire tiene conductividad térmica, pero ésta es muy pobre.

Tabla 13.1  
Propiedades del  
aire seco a la  
presión atmosférica.

TEMP. °C	Volumen Específico	Densidad	Entalpía
	(m³/kg)	(kg/m³)	(kcal/kg)
-15	0.7304	1.3691	0.6722
-14	0.7332	1.3638	0.9123
-13	0.7363	1.3581	1.1523
-12	0.7391	1.3530	1.3923
-11	0.7422	1.3473	1.6323
-10	0.7453	1.3416	1.8779
-9	0.7480	1.3369	2.1179
-8	0.7511	1.3313	2.3579
-7	0.7538	1.3266	2.5980
-6	0.7563	1.3222	2.8390
-5	0.7591	1.3173	3.0835
-4	0.7619	1.3125	3.3235
-3	0.7650	1.3072	3.5636
-2	0.7678	1.3024	3.8036
-1	0.7706	1.2977	4.0447
0	0.7734	1.2928	4.2892
1	0.7756	1.2893	4.5292
2	0.7790	1.2837	4.7692
3	0.7822	1.2784	5.0148
4	0.7850	1.2739	5.2547
5	0.7878	1.2693	5.4948
6	0.7908	1.2645	5.7404
7	0.7933	1.2605	5.9803
8	0.7961	1.2562	6.2204
9	0.7988	1.2518	6.4615
10	0.8015	1.2476	6.7060
11	0.8044	1.2431	6.9460
12	0.8076	1.2381	7.1860
13	0.8104	1.2339	7.3983
14	0.8131	1.2297	7.6716
15	0.8159	1.2256	7.9116
16	0.8188	1.2213	8.1183
17	0.8217	1.2168	8.3972

TEMP. °C	Volumen Específico	Densidad	Entalpía
	(m³/kg)	(kg/m³)	(kcal/kg)
18	0.8244	1.2130	8.6372
19	0.8274	1.2086	8.8772
20	0.8302	1.2044	9.1228
21	0.8329	1.2006	9.3628
22	0.8360	1.1961	9.6028
23	0.8389	1.1920	9.8484
24	0.8418	1.1880	10.0706
25	0.8446	1.1839	10.3284
26	0.8474	1.1800	10.5740
27	0.8501	1.1763	10.7640
28	0.8529	1.1725	11.0540
29	0.8556	1.1687	11.2996
30	0.8583	1.1650	11.5396
31	0.8612	1.1611	11.7796
32	0.8645	1.1567	12.0252
33	0.8672	1.1531	12.2652
34	0.8700	1.1494	12.5052
35	0.8727	1.1458	12.7564
36	0.8756	1.1420	12.9908
37	0.8786	1.1382	13.2308
38	0.8816	1.1343	13.4764
39	0.8843	1.1308	13.7164
40	0.8871	1.1273	13.9620
41	0.8900	1.1236	14.2020
42	0.8932	1.1196	14.4420
43	0.8957	1.1164	14.6820
44	0.8987	1.1127	14.9276
45	0.9014	1.1093	15.1676
46	0.9042	1.1059	15.4132
47	0.9073	1.1021	15.6532
48	0.9100	1.0988	15.8955
49	0.9129	1.0954	16.1400
50	0.9158	1.0919	16.3900

Debido a que el aire tiene peso, se requiere energía para moverlo. Una vez en movimiento, el aire posee energía propia (cinética).

La energía cinética del aire en movimiento, es igual a la mitad de su masa, multiplicada por el cuadrado de su velocidad. La velocidad se mide en metros por segundo. De acuerdo a la ecuación de Bernoulli, al aumentar la velocidad disminuye la presión.

La densidad del aire, varía con la presión atmosférica y la humedad. Un kilogramo de aire seco en condiciones normales (21°C y 101.3 kPa), ocupa 0.8329 metros cúbicos, tal como se puede apreciar en la tabla 13.1.

El calor específico del aire, es la cantidad de calor que se requiere para aumentar la temperatura de un kilogramo de aire en un grado centígrado. El valor del calor específico del aire seco, a nivel del mar, es 0.244 kcal/kg °C.

### Propiedades del Vapor de Agua (Humedad)

La humedad es un término utilizado para describir la presencia de vapor de agua en el aire, ya sea a la intemperie, o dentro de un espacio. Nuevamente, hacemos énfasis en que la humedad está "en el aire", solamente en el sentido de que los dos, aire y vapor de agua, existen juntos en un espacio dado al mismo tiempo.

Por costumbre común, decimos que el aire contiene humedad, y es conveniente hacerlo así, en el entendido de que siempre recordemos que es meramente una manera de hablar, y que en realidad, los dos son independientes uno del otro, y que no responden de la misma manera a los cambios de condiciones, especialmente a los cambios de temperatura.

Las palabras "vapor" y "gas", comúnmente las empleamos para referirnos a lo mismo; pero en realidad, un gas es un vapor altamente sobrecalentado, muy lejos de su temperatura de saturación, como el aire. Un vapor está en sus condiciones de saturación o no muy lejos de ellas, como el vapor de agua. Así pues, el vapor de agua o "humedad" en un espacio, puede estar en una condición de saturación o ligeramente arriba de ella. Si lo enfriamos unos cuantos grados, hacemos que se condense, y si le aplicamos calor, lo sobrecalentamos.

Como ya sabemos, dos terceras partes de la superficie de la tierra están cubiertas por agua: océanos, lagos y ríos, de las cuales se desprende el vapor de agua. Las nubes, también producto de esta evaporación, contribuyen a la humedad del ambiente al condensarse y precipitarse en forma de lluvia o nieve.

Todo lo anterior es lo que sucede a la intemperie. Dentro de una casa, edificio o fábrica, el vapor de agua puede provenir de la cocina, baño, máquinas, personas, etc. Así pues, la cantidad de humedad en el aire en un lugar y tiempo determinados, puede variar considerablemente.

El vapor de agua es producido por el agua, a cualquier temperatura (aún por el hielo). El agua no tiene que estar en ebullición, aunque si lo está, el vapor de agua es producido con mayor rapidez.

El vapor ejerce una presión definida encima del agua, la cual es determinada solamente por la temperatura del agua misma, independientemente de si el agua está o no en ebullición o de si el espacio por encima del agua contiene aire. Tampoco la presión del aire ejerce efecto alguno sobre la presión del vapor.

Si el agua está a una temperatura de 4°C, la presión del vapor de agua sobre la misma es de 0.81 kPa ó 0.1179 psia, la cual es una presión menor que la atmosférica (vacío). Si la temperatura del agua aumenta a 15°C, la presión del vapor de agua sobre la misma, aumenta más del doble, es decir, a 1.70 kPa (0.2472 psia).

En la tabla 13.3, se muestran las propiedades del vapor de agua saturado. Los valores de la primer columna, son las temperaturas en grados centígrados.

Los valores de la segunda y tercer columna, son las presiones del vapor sobre el agua, correspondientes a las temperaturas de la primer columna; este vapor se conoce como "saturado", porque es todo el vapor de agua que puede contener ese espacio a esa temperatura. Tenga en cuenta que no hay diferencia, si hay o no aire en ese espacio; la presión del vapor de agua será la misma, ya que ésta depende totalmente de la temperatura del agua.

Cuando comúnmente nos referimos a la presión atmosférica o barométrica, estamos incluyendo la presión del aire y la presión del vapor de agua que éste contiene. La presión atmosférica "normal" a nivel del mar, es de 101.325 kPa o de 760 mm. de mercurio. Si la presión del vapor de agua en el aire a 15°C es 1.70 kPa, entonces, la presión del aire seco sería 99.625 kPa (101.325 - 1.70); ya que, de acuerdo a la ley de Dalton, la presión total es la suma de las presiones parciales de los componentes: la del aire seco y la del vapor de agua.

En la cuarta columna de la tabla, tenemos los valores de volumen específico. Estos nos indican el volumen en m<sup>3</sup>, que ocupa un kilogramo de agua en forma de vapor saturado.

Si tenemos un cuarto de 8 x 5 x 2.5 metros (100 m<sup>3</sup>) lleno de vapor de agua a 15°C, dentro de éste habrá poco más de un kilogramo de vapor saturado; esto es,  $100 \text{ m}^3 \div 77.97 \text{ m}^3/\text{kg} = 1.283 \text{ kg}$ .

Otra manera de calcularlo es utilizando el valor de la densidad. En la quinta columna tenemos los valores de la densidad en kg/m<sup>3</sup>; así que, el peso de 100 m<sup>3</sup> de vapor saturado a 15°C es de 1.283 kg ( $100 \text{ m}^3 \times 0.01283 \text{ kg/m}^3$ ). Como ya sabemos, el volumen específico es la inversa de la densidad, y viceversa.

En las sexta y séptima columnas, tenemos el peso del vapor de agua en dos unidades: en gramos por metro cúbico (g/m<sup>3</sup>) en el sistema internacional, y en "granos" por pie cúbico (granos/pie<sup>3</sup>) en el sistema inglés. La cantidad de vapor de agua que contiene el aire, es tan pequeña, que para fines prácticos, se utilizan gramos en lugar de kilogramos o "granos" en lugar de libras. El "grano" (grain) es una unidad comúnmente utilizada para cálculos psicrométricos en aire acondicionado. Es una unidad tan pequeña, que se requieren 15,415 granos para formar un kilogramo. Para fines prácticos, se considera que una libra contiene 7,000 granos. Para visualizarlo mejor, un grano es casi del tamaño de una "gotita" de agua. Así que, en el espacio de 100 m<sup>3</sup> del cuarto de nuestro ejemplo, habrá 1,283 gramos de agua ( $100 \text{ m}^3 \times 0.01283 \text{ kg/m}^3 \times 1,000$ ), lo que equivale a 12.83 gramos por m<sup>3</sup>, tal como se indica en la tabla. La densidad es igual a peso por volumen, así que, podríamos decir que el vapor de agua tiene una densidad 12.83 g/m<sup>3</sup> ó 0.01283 kg/m<sup>3</sup>.

Para que el vapor de agua dentro del cuarto se mantenga saturado a 15°C, como suponemos que lo hace, el espacio completo de 100 m<sup>3</sup> en el cuarto, tendría que permanecer a 15°C. Si hubiese aire en el cuarto como sería lo normal, éste también tendría que estar a 15°C.

Obviamente, hay 100 m<sup>3</sup> de aire en el cuarto, igual que hay 100 m<sup>3</sup> de vapor de agua. Con una presión total de 101.3 kPa, encontramos que la presión del aire es solamente 99.6 kPa (101.3 - 1.70).

En la tabla 13.1, se tiene el volumen específico para el aire seco, pero basado en una presión de 101.3 kPa; mientras que el aire en el cuarto de nuestro ejemplo, está a 99.6 kPa. Por lo tanto, el aire del cuarto está menos

Temp. de Saturación °C	Presión de Vapor (Absoluta)		Volumen Específico m³/kg	Peso del Vapor			Entalpía kcal/kg		
				Densidad kg/m³	Humedad Absoluta				
	kPa	psia			g/m³	granos/pie³	Sensible	Latente	Total
0	0.61	0.0885	206.32	0.004847	4.84	2.11	0	597.66	597.66
1	0.65	0.0945	194.10	0.005152	5.15	2.25	1	596.87	597.87
2	0.7	0.1023	179.58	0.005569	5.57	2.43	2	596.28	598.28
3	0.76	0.1098	168.18	0.005946	5.95	2.60	3	595.68	298.68
4	0.81	0.1179	157.40	0.006353	6.35	2.77	4	595.09	599.09
5	0.87	0.1265	147.14	0.006796	6.79	2.97	5	594.53	599.53
6	0.93	0.1356	137.74	0.007260	7.26	3.18	6	593.93	599.93
7	1.00	0.1452	129.04	0.007750	7.75	3.38	7	593.37	600.37
8	1.07	0.1556	120.95	0.008268	8.27	3.61	8	592.79	600.79
9	1.15	0.1664	113.39	0.008819	8.82	3.85	9	592.25	601.25
10	1.23	0.1780	106.37	0.009401	9.40	4.10	10	292.03	602.03
11	1.31	0.1903	99.90	0.01001	10.01	4.37	11	591.10	602.10
12	1.40	0.2033	93.82	0.01066	10.66	4.66	12	590.56	602.56
13	1.50	0.2187	88.13	0.01135	11.35	4.96	13	589.98	602.98
14	1.60	0.2317	82.85	0.01207	12.07	5.27	14	589.41	603.41
15	1.70	0.2472	77.97	0.01283	12.83	5.60	15	588.87	603.87
16	1.82	0.2636	73.35	0.01363	13.63	5.96	16	588.31	604.31
17	1.94	0.2809	69.09	0.01447	14.47	6.32	17	587.72	604.72
18	2.06	0.2992	65.07	0.01537	15.37	6.72	18	587.18	605.18
19	2.20	0.3186	61.32	0.01631	16.31	7.13	19	586.59	605.59
20	2.33	0.3390	57.81	0.01730	17.30	7.56	20	586.03	606.03
21	2.48	0.3606	54.54	0.01834	18.34	8.01	21	585.48	606.48
22	2.64	0.3834	51.48	0.01943	19.43	8.48	22	584.89	606.89
23	2.83	0.4102	48.60	0.02058	20.58	8.99	23	584.34	607.34
24	2.98	0.4327	45.91	0.02178	21.78	9.52	24	583.76	607.76
25	3.16	0.4593	43.38	0.02305	23.05	10.07	25	583.20	608.20
26	3.36	0.4875	41.02	0.02438	24.38	10.65	26	582.65	608.65
27	3.56	0.5171	38.80	0.02577	25.77	11.26	27	582.09	609.09
28	3.78	0.5482	36.72	0.02723	27.23	11.90	28	581.45	609.45
29	4.00	0.5810	34.76	0.02876	28.76	12.57	29	580.93	609.93
30	4.24	0.6154	32.91	0.03038	30.38	13.27	30	580.43	610.43
31	4.49	0.6517	31.18	0.03207	32.07	14.01	31	579.87	610.87
32	4.75	0.6897	29.56	0.03383	33.83	14.78	32	579.28	611.28
33	5.03	0.7297	28.03	0.03568	35.68	15.59	33	578.74	611.74
34	5.32	0.7717	26.59	0.03761	37.61	16.43	34	578.15	612.15
35	5.62	0.8157	25.23	0.03964	39.64	17.32	35	577.59	612.59
36	5.94	0.8619	23.96	0.04174	41.74	18.24	36	576.99	612.99
37	6.27	0.9104	22.88	0.04370	43.70	19.09	37	576.45	613.45
38	6.63	0.9612	21.62	0.04625	46.25	20.21	38	575.87	613.87
39	6.99	1.0144	20.55	0.04866	48.66	21.26	39	575.30	614.30
40	7.38	1.0700	19.54	0.05118	51.18	22.36	40	574.70	614.70
41	7.78	1.1285	18.58	0.05382	53.82	23.52	41	574.16	615.16
42	8.08	1.1723	17.69	0.05653	56.53	24.70	42	573.59	615.59
43	8.64	1.2536	16.83	0.05942	59.42	25.97	43	573.08	616.08
44	9.10	1.3204	16.03	0.06238	62.38	27.26	44	572.42	616.42
45	9.58	1.3903	15.27	0.06549	65.49	28.62	45	571.87	616.87
46	10.09	1.4634	14.55	0.06873	68.73	30.03	46	571.27	617.27
47	10.62	1.5398	13.88	0.07205	72.05	31.48	47	570.72	617.72
48	11.17	1.6196	13.02	0.07680	76.80	33.56	48	570.13	618.13
49	11.75	1.7024	12.42	0.08052	80.52	35.18	49	569.59	618.59

Tabla 13.3 - Propiedades del vapor de agua saturado.

denso, ya que está a menor presión, y consecuentemente, tendrá un volumen específico mayor que el mostrado en la columna 2 de la tabla 13.1.

De acuerdo a la ley de Boyle, sabemos que el volumen de un gas varía inversamente con la presión, si la temperatura permanece constante, lo que en este caso es cierto. Vemos que el volumen del aire seco a 15°C es 0.8159 m³/kg a la presión de 101.3 kPa; así que, su volumen a la presión de 99.6 kPa será:

$$\frac{V}{0.8159} = \frac{101.3}{99.6}$$

$$V = 0.8298 \text{ m}^3 \text{ a la presión de } 99.6 \text{ kPa.}$$

Puesto que hay 100 m³ de aire en el cuarto, el peso del aire seco en el cuarto es de 120.51 kg ( $100 \div 0.8298$ ). Así, el aire es menos denso a la presión parcial de 99.6 kPa que si no hubiera vapor de agua mezclado con éste. Como vemos en la tabla 13.1, la densidad del aire seco a 15°C es 1.2256 kg/m³, y la presión de 101.3 kPa; así que, 100 m³ de aire, deberían pesar 122.56 kg ( $100 \times 1.2256$ ). Sin embargo, como ya vimos, los 100 m³ de aire saturado de humedad, pesan sólo 120.51 kg. Aún sumándole el peso del vapor de agua ( $120.51 + 1.283 = 121.793$  kg), el aire húmedo es más ligero que el aire seco.

### Aire Saturado (con Humedad)

Hasta ahora, hemos supuesto que el vapor de agua en el cuarto está saturado. El cuarto está también lleno de aire seco, así que esta condición se refiere a "aire seco saturado con humedad", o algunas veces solamente a "aire saturado". Ninguno de estos términos es correcto, porque el aire en sí permanece seco, solamente está mezclado con el vapor de agua saturado. Pero estos términos son convenientes, y pueden usarse, si tenemos en mente la verdadera condición que representan.

Si en nuestro ejemplo hemos supuesto que el aire está saturado con humedad, no será difícil suponer tampoco que haya presente un abastecimiento continuo de agua, de tal forma, que el aire pueda estar todo el tiempo saturado, aún cuando cambie la temperatura. Así pues, imaginemos que en el piso del cuarto hay una gran charola con agua, y que al igual que el aire y el vapor, están todos a la misma temperatura de 15°C. Supongamos que de alguna manera aplicamos calor suficiente, para que los tres componentes aumenten su temperatura a 21°C, y se mantenga así. Algo del agua se evaporaría, y este vapor, también a 21°C, ocuparía todo el espacio del cuarto, mezclándose con el vapor ya existente. Todo el vapor de agua ahora se volverá más denso y a más alta presión; de la tabla 13.3, su presión será 2.48 kPa y su volumen específico será 54.54 m³/kg (en lugar de 77.97 que tenía a 15°C). El peso del vapor de agua también aumenta, siendo ahora de 1.834 kg ( $100 \div 54.54$ ), o sea, 18.34 g/m³ en lugar de 12.83 que tenía a 15°C.

Por su parte, el aire por ser un gas altamente sobrecalentado, se expande al ser calentado. El volumen específico

a 21°C, es 0.8329 m³/kg a la presión atmosférica, así que calcularemos su volumen en la mezcla a la nueva presión, tal como lo hicimos a 15°C.

$$V = \frac{0.8329 \times 101.3}{98.82} = 0.8538 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Así, cuando el aire se calienta de 15 a 21°C, éste se expande, así que también tenemos que suponer que el cuarto no está sellado y algo del aire se escapa. El volumen interno del cuarto es de 100 m³, así que si el volumen específico del aire ha aumentado de 0.8298 a 0.8538 m³/kg, algo del aire tiene que escapar, de otra manera se acumularía presión en el cuarto. De aquí, podemos calcular también que el peso del aire seco en el cuarto es de 117.12 kg ( $100 \div 0.8538$ ).

De lo anterior, se puede notar que el peso del aire seco en el cuarto, tiene un peso real de casi 64 veces el peso del vapor de agua, aún con el vapor saturado; esto es, reteniendo toda la humedad que puede a esa temperatura.

En algunas épocas del año, el aire atmosférico contiene más humedad que en otras. En realidad, la máxima variación en el contenido de humedad, nunca pasa de más de unos cuantos gramos por metro cúbico, lo que es una fracción extremadamente pequeña del peso total del aire y humedad en la atmósfera (a menos que esté lloviendo).

Sin embargo, aunque la cantidad de agua en la atmósfera sea muy pequeña, como lo es su variación de una estación a otra, es muy importante para el confort de los seres humanos. Una diferencia de tan sólo unos cuantos gramos por metro cúbico, puede significar la diferencia entre un placentero confort y un desagradable malestar.

Como vimos en nuestro ejemplo, a 15°C había en el cuarto 12.83 g/m³ de vapor de agua. A 21°C este aumentó hasta 18.34. Los 5.51 gramos aumentados provienen de la charola, para poder mantener el espacio saturado a temperaturas más altas.

Si ahora dejamos de aplicar calor, el aire, el agua y el vapor se enfriarán gradualmente. El aire disminuirá su volumen, así que, algo de aire exterior entrará al cuarto para compensar la diferencia. Supongamos que el aire exterior está perfectamente seco.

La densidad del vapor de agua disminuirá gradualmente, o como se dice algunas veces, aunque no es lo apropiado, "el aire perderá algo de su capacidad para retener humedad". En realidad, el aire nada tiene que ver con eso. La temperatura del espacio es lo que cuenta.

Al alcanzar nuevamente la temperatura de 15°C, la densidad del vapor será de 12.83 g/m³, los 5.51 g/m³ restantes se condensarán en agua líquida, y la presión de vapor también disminuirá gradualmente de 2.48 a 1.70 kPa, de tal forma, que al llegar a los 15°C, las condiciones habrán regresado exactamente a las mismas antes de aplicar calor. Es importante hacer la observación de que en todo momento, durante el calentamiento y nuevamente al enfriar, el vapor de agua estaba en una condición de saturación.

Si retiramos la charola de agua y enfriamos el cuarto a menos de 15°C, el vapor saturado se condensa gradualmente. El agua condensada se acumula en el suelo, pero el vapor de agua que queda, está en una condición de saturación, y sus nuevas características (presión, volumen, densidad y otras) son las que se encuentran en la tabla 13.3.

Ahora, si partimos de la temperatura de 15°C, y calentamos el cuarto, pero sin un abastecimiento de agua, el aire seco se expande y su volumen aumenta, igual que cuando había una reserva de agua. Como vemos, el aire seco se expande y se contrae al calentarlo o enfriarlo, haya o no haya agua o vapor de agua presentes en el cuarto.

En cambio, el vapor de agua no se comporta como lo hizo antes, ya que si se calienta arriba de 15°C, como no hay reserva de donde absorber más vapor, el aumento de temperatura no causa incremento en su densidad como anteriormente. El aumento de temperatura de 15 a 21°C, sobrecalienta el vapor de agua, y algo muy importante, su presión de vapor permanece la misma no sólo a 21°C, sino más arriba.

## Humedad Relativa

La humedad relativa (*hr*), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en por ciento, tal como 50%, 75%, 30%, etc.

De acuerdo a la ASHRAE, una definición más técnica de la *hr*, sería la relación de la fracción mol del vapor de agua presente en el aire, con la fracción mol del vapor de agua presente en el aire saturado, a la misma temperatura y presión.

Volviendo a nuestro ejemplo, para comprender mejor el significado de humedad relativa, decíamos que el vapor de agua a 15°C estaba saturado, y a 21°C estaba sobrecalentado. Para conocer la humedad relativa del aire en el cuarto a 21°C, se puede calcular usando los valores de la densidad del vapor de agua saturado (15°C) y la del vapor de agua sobrecalentado (21°C), que en este caso sería 0.01834 kg/m<sup>3</sup> (de la tabla 13.3).

$$hr = 0.01283 \div 0.01834 \times 100 = 69.95\%$$

Esto significa que en el espacio del cuarto a 21°C, la humedad es el 69.95% de la que tendría si estuviera en condiciones de saturación. Este porcentaje es la "humedad relativa".

El otro método para calcularla, es utilizando los valores de la presión del vapor, en lugar de los de la densidad. Es más preciso y es el que se recomienda utilizar; ya que la presión de vapor, es la que realmente determina la velocidad de la evaporación, y por lo tanto, en el acondicionamiento de aire es lo que directamente afecta el confort, la conservación de alimentos y la mayoría de los demás procesos.

La presión del vapor de agua saturado a 21°C, es 2.48 kPa, y la del vapor de agua sobrecalentado es de 1.70 kPa; ya que su presión de vapor es la misma que tenía a 15°C, no aumentó al ser sobrecalentado.

La humedad relativa será:

$$hr = 1.70 \div 2.48 \times 100 = 68.55\%$$

Este resultado es algo diferente que el cálculo utilizando las densidades del vapor, pero es más preciso. La diferencia no afecta en la mayoría de los cálculos de aire acondicionado.

## Humedad Absoluta

El término "humedad absoluta" (*ha*), se refiere al peso del vapor de agua por unidad de volumen. Esta unidad de volumen, generalmente es un espacio de un metro cúbico (o un pie cúbico). En este espacio, normalmente hay aire también, aunque no necesariamente. La humedad relativa está basada en la humedad absoluta, bajo las condiciones establecidas; es decir, la humedad relativa es una comparación con la humedad absoluta a la misma temperatura, si el vapor de agua está saturado.

Tanto la humedad absoluta, como la relativa, están basadas en el peso del vapor de agua en un volumen dado.

En nuestro ejemplo, a 15°C la humedad relativa es del 100%, ya que el espacio (o el aire, si preferimos llamarlo así) está saturado con humedad. Al calentar el aire sin agregarle humedad, su humedad relativa disminuye hasta que a 21°C, es 68.55%; esto es, el aire retiene solamente un 68.55% de la humedad que podría tener a 15°C.

Si se continúa calentando el aire, la humedad relativa se vuelve aún menor, hasta que a 27°C, es de 47.75% ( $1.70 \div 3.56 \times 100$ ), ya que la presión del vapor de agua a 27°C de saturación, es 3.56 kPa. A 32°C la *hr* sería 35.79%; a 40°C, sería 23.03%, y así sucesivamente. Decimos que el aire está "más seco", ya que a más altas temperaturas se incrementa su capacidad de absorber más y más agua, pero la cantidad real de vapor de agua por metro cúbico (su humedad absoluta) no ha cambiado, como tampoco ha cambiado su presión de vapor de 1.70 kPa.

Esta habilidad para retener más agua a más altas temperaturas, no depende del aire. Se conoce el hecho de que las densidades y presiones del vapor de agua saturado, son mayores a más altas temperaturas que a bajas temperaturas.

Para ilustrar aún más esto, volvamos a nuestro ejemplo del cuarto con aire sobrecalentado a 21°C y a una *hr* de 68.55%. Si colocamos dentro del cuarto algún abastecimiento de agua a cualquier temperatura arriba de 15°C, digamos 27°C; ya sea tela húmeda, frutas, carne, vegetales, flores, un rociador de agua, etc., la presión de vapor del agua de cualquiera de estos objetos sería 3.56 kPa, correspondientes a la temperatura de saturación de 27°C. Esta presión es casi el doble de la presión en el cuarto (1.70 kPa), así que el vapor de agua sería obligado a salir de la tela, alimentos, etc., hacia el vapor de agua en el cuarto, por la diferencia de presiones.

El agua de la tela o alimentos se evapora hacia el cuarto, y esta evaporación agregará agua al aire del cuarto, aumentando gradualmente su humedad relativa, así como la presión de vapor de la humedad en el cuarto. Esto continuará hasta que la *hr* sea del 100%; en ese momento, la presión de vapor de la humedad en el cuarto, será de 2.48 kPa, correspondiente a la temperatura de 21°C, con el entendido de que aún hay suficiente humedad para saturar el aire.

Si entra una persona al cuarto cuando la humedad relativa es de 68.55%, la humedad de su piel se evaporará hacia el aire del cuarto. La temperatura corporal normal de una persona es de 36.5°C, pero la de la piel es un poco menor, aproximadamente 35°C. Si la humedad de su piel está a 35°C, su presión de vapor es de 5.62 kPa. Esto es más de tres veces que la presión de vapor en el cuarto a 21°C, con una humedad relativa de 68.55%; así que, su mayor presión de vapor, provoca que la humedad de la piel se evapore rápidamente hacia el aire del cuarto.

Cuando se calentó el aire, decimos que se "secó". En realidad no se ha secado el aire, ya que no se le quitó humedad. Solamente está teniendo a 21°C la misma humedad que tenía a 15°C, pero se le ha incrementado su capacidad para retener humedad; así que, "relativamente" o comparativamente está más seco.

### Humedad Específica

La humedad específica, o también llamada contenido de humedad, es el peso de vapor de agua en gramos por kilogramo de aire seco (o bien, granos por libra).

La humedad específica, se refiere a la cantidad de humedad en peso, que se requiere para saturar un kilogramo de aire seco, a una temperatura de saturación (punto de rocío) determinada. En las columnas cuarta y quinta de la tabla 13.5, se muestran estos valores en gramos por kilogramo de aire seco (en el sistema internacional), y en granos por libra de aire seco (en el sistema inglés). La humedad específica es muy similar a la humedad absoluta, excepto que esta última, está basada en gramos por metro cúbico, y la humedad específica, está basada en gramos de humedad por kilogramo de aire seco.

### Porcentaje de Saturación

El porcentaje de saturación (o porcentaje de humedad), es un término que algunas veces se confunde con la humedad relativa. El porcentaje de saturación, es 100 veces la relación del peso de vapor de agua con el peso del vapor de agua necesario para saturar un kilogramo de aire seco a la temperatura del bulbo seco. Esto se puede expresar en una ecuación:

$$\text{porcentaje de saturación} = \frac{w_1}{w_s} \times 100$$

donde:

**w<sub>1</sub>** = humedad específica en el punto de rocío de la mezcla de aire seco y vapor de agua.

**w<sub>s</sub>** = humedad específica en el punto de saturación.

Si deseamos calcular la humedad relativa y el porcentaje de saturación a la temperatura de bulbo seco de 35°C, y a la temperatura de punto de rocío de 15°C, usamos los valores de presión de vapor y los de humedad específica de las tablas 13.3 y 13.5, respectivamente.

$$hr = 1.70 \div 5.62 \times 100 = 30.25\%$$

$$\% \text{ saturación} = (4.835 \div 16.611) \times 100 = 29.10\%$$

Nuevamente, hay una diferencia entre los dos resultados. La humedad relativa está basada en las presiones, las cuales son afectadas por la temperatura y el volumen. El porcentaje de saturación está basado en el peso, el cual no es afectado por los cambios de temperatura, y éste es el más preciso de los dos.

### Punto de Rocío

El punto de rocío se define como: la temperatura abajo de la cual el vapor de agua en el aire, comienza a condensarse. También es el punto de 100% de humedad. La humedad relativa de una muestra de aire, puede determinarse por su punto de rocío. Existen varios métodos para determinar la temperatura del punto de rocío.

Un método para determinar el punto de rocío con bastante precisión, es colocar un fluido volátil en un recipiente de metal brillante; después, se agita el fluido con un aspirador de aire. Un termómetro colocado dentro del fluido indicará la temperatura del fluido y del recipiente. Mientras se está agitando, debe observarse cuidadosamente la temperatura a la cual aparece una niebla por fuera del recipiente de metal. Esto indica la temperatura del punto de rocío. La niebla por fuera del recipiente, no es otra cosa que la humedad en el aire, que comienza a condensarse sobre el mismo. No deben emplearse fluidos inflamables o explosivos para esta prueba.

Otro medio para determinar el punto de rocío indirectamente, es con un instrumento llamado Psicrómetro, el cual se describirá más adelante. Este método se basa en las temperaturas de "bulbo húmedo" y la de "bulbo seco", las cuales también se definirán más adelante.

Durante la temporada de invierno, una ventana ofrece un buen ejemplo del punto de rocío. En la tabla 13.4, se muestran las temperaturas de superficie, las cuales causarán condensación (punto de rocío) para varias condiciones de humedad. Las temperaturas interiores utilizadas son 21 y 27°C.

Volviendo a nuestro ejemplo del cuarto, y partiendo de las condiciones a 21°C con el aire sobrecalentado, con una humedad relativa de 68.55% y en esta ocasión sin abastecimiento de agua, si enfiamos el espacio dentro del cuarto, su humedad relativa disminuye gradualmente, pero su presión de vapor permanece igual, hasta que al llegar a 15°C, la humedad relativa será del 100% y estará en su punto de saturación. Si tratamos de enfriarlo a menos de 15°C, encontramos que la humedad comienza a condensarse. La temperatura a la que esto sucede se le llama «punto de rocío»; ya que, en la naturaleza a la humedad que se condensa se le llama rocío.



HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE %	TEMPERATURA DE BULBO SECO DE LA SUPERFICIE CUANDO SE INICIA LA CONDENSACION	
	TEMP. DEL AIRE DEL CUARTO	
	21°C	27°C
100	21	27
90	19	25
80	18	23
70	15	20
60	13	18
50	10	15
40	7	12
30	3	8

Tabla 13.4 - Temperaturas de superficie a las que habrá condensación.

Si continuamos enfriando el aire por abajo de su punto de rocío, la humedad continuará condensándose y la presión de vapor se reducirá también, de acuerdo a los valores de la segunda columna en la tabla 13.3, correspondiente a cada temperatura.

A 10°C, el vapor sigue siendo saturado con una humedad relativa = 100%, pero su volumen específico es ahora 106.37 m³/kg, su densidad de 0.0094 kg/m³ y su humedad absoluta de 9.4 g/m³. Es decir, al bajar de 15 a 10°C, perdió 3.43 g/m³ de humedad, lo que significa un 26.7% ( $3.43 \div 12.83 \times 100$ ), pero sigue siendo un vapor saturado y su humedad relativa es del 100%.

Al enfriar este aire de 15 a 10°C, algo del vapor de agua se condensa, separándose de la mezcla de aire y vapor. En realidad, de alguna manera se ha secado el aire; sin embargo, como el aire a 10°C sigue siendo saturado, y su humedad relativa es de 100%, aunque en realidad, se haya «secado» casi un 27%, no puede absorber más humedad, a menos que se caliente arriba de 10°C y reduzca así su humedad relativa. Relativamente hablando, en cuanto a su habilidad para absorber humedad, el aire a 10°C no está más seco que lo que estaba a 15°C, aunque tenga casi una tercera parte menos de humedad que a 15°C, ya que a ambas temperaturas sigue estando saturado.

Así que, arriba del punto de rocío, la humedad relativa siempre es menor al 100%. Se puede calentar para que relativamente esté más seco, o enfriarse, para que relativamente esté más húmedo; pero mientras se mantenga arriba del punto de rocío, con enfriarlo o calentarlo, ni se le quita ni se le agrega nada.

No se remueve humedad del aire, a menos que se enfríe por abajo del punto de rocío. Lo anterior es cierto, pero sólo cuando se refiere al volumen completo del aire. Se puede remover humedad si una parte de ese volumen de aire, entra en contacto con un objeto más frío que el punto de rocío, que en este ejemplo es de 15°C.

Si se coloca un bloque de metal o de madera, o de cualquier otro material; un trozo de carne, una lata de leche, jugo o cualquier otro líquido; o cualquier cosa que tenga una temperatura menor a los 15°C, digamos 10°C, la humedad en el aire que entre en contacto con ese objeto frío, se condensará sobre el mismo, como agua líquida. Es común escuchar decir que el objeto está «sudado», lo cual es un término incorrecto, ya que esta agua viene de la humedad del aire, y no de adentro del objeto.

Así que, cualquier objeto a una temperatura menor a la del punto de rocío del aire, condensará algo de agua de ese aire. Su tamaño y temperatura determinarán qué tanta humedad removerá del aire. Si es muy grande, en relación con la cantidad de aire en el cuarto, puede ser que «seque» todo el aire, hasta un punto de rocío correspondiente a su temperatura, pero no más abajo.

Cuando se habla de la temperatura de punto de rocío del aire, generalmente, se refiere a su temperatura promedio. Si a una pequeña porción de aire se le remueve calor (se calienta o se enfría), el contenido total de humedad y su temperatura promedio, eventualmente se verán afectadas, después que la circulación del aire lo haya mezclado completamente de nuevo.

## Humedad por Kilogramo de Aire Seco

Hasta ahora, para simplificar la explicación, nos hemos referido mayormente a la cantidad de vapor de agua por metro cúbico, en un cuarto de 100 m³. Sin embargo, si estas mezclas de aire y humedad se calientan, o si se enfrían, y si son manejadas por abanicos a través de ductos, sus volúmenes variarán ampliamente.

En el acondicionamiento de aire se manejan cuartos o edificios de un volumen determinado; así que es necesario considerar las mezclas de aire y humedad, pero generalmente, es más simple determinar a partir de dichos volúmenes, los kilogramos de aire y vapor de agua que se manejarán. De allí en adelante, se sacarán los cálculos sobre la base de dichos kilogramos de aire manejados, enfriados o calentados.

En la tabla 13.5, se muestran las propiedades de las mezclas de aire seco y vapor de agua saturado, en un rango amplio de temperaturas. Estos valores están basados en un kilogramo de aire seco saturado con humedad, a una presión total de 101.3 kPa (presión atmosférica).

La primera columna corresponde, nuevamente, a la temperatura de saturación en grados centígrados. Las columnas 2 y 3 corresponden al volumen específico en m³/kg y a la densidad en kg/m³, respectivamente, de la mezcla de aire seco y humedad.

La columna 4, muestra la cantidad de humedad por peso en gramos, que se necesita para saturar (100% de *hr*) el espacio ocupado por un kilogramo de aire seco, a la temperatura de la columna 1. La columna 5 es similar, pero en unidades del sistema inglés, es decir, granos de humedad requeridos para saturar el espacio ocupado por una libra de aire seco a la temperatura de la columna 1.

TEMP. °C	Volumen Específico m³/kg	Densidad kg/m³	Contenido de Humedad		Entalpía (cont. de calor) kcal/kg		
			g/kg	granos/lb	aire seco (sensible)	humedad (latente)	Total
-10	0.7472	1.3383	0.725	11.19	1.8778	0.9613	2.8391
-9	0.7501	1.3332	0.793	12.24	2.1179	1.0512	3.1691
-8	0.7515	1.3307	0.841	12.98	2.3580	1.1467	3.5047
-7	0.7561	1.3226	0.945	14.58	2.5980	1.2522	3.8502
-6	0.7595	1.3167	1.026	15.83	2.8391	1.3623	4.2014
-5	0.7628	1.3110	1.124	17.35	3.0835	1.4835	4.5670
-4	0.7656	1.3062	1.224	18.89	3.3235	1.6124	4.9359
-3	0.7690	1.3004	1.333	20.57	3.5636	1.7556	5.3192
-2	0.7720	1.2953	1.450	22.38	3.8035	1.9102	5.7137
-1	0.7751	1.2902	1.577	24.34	4.0447	2.0757	6.1204
0	0.7785	1.2845	1.716	26.48	4.2892	2.2557	6.5449
1	0.7812	1.2801	1.845	28.47	4.5292	2.4246	6.9538
2	0.7846	1.2745	1.983	30.60	4.7692	2.4879	7.2571
3	0.7880	1.2690	2.13	32.87	5.0148	2.7890	7.8038
4	0.7913	1.2637	2.287	35.29	5.2548	2.9957	8.2505
5	0.7947	1.2583	2.454	37.87	5.4948	3.2113	8.7061
6	0.7981	1.253	2.632	40.62	5.7404	3.4402	9.1806
7	0.8014	1.2478	2.823	43.56	5.9804	3.6832	9.6639
8	0.8048	1.2425	3.024	46.67	6.2204	3.9436	10.1640
9	0.8082	1.2373	3.239	49.98	6.4615	4.2203	10.6818
10	0.8116	1.2321	3.467	53.50	6.7060	4.5114	11.2174
11	0.8154	1.2264	3.708	57.22	6.9460	5.1414	12.0874
12	0.8189	1.2212	3.967	61.22	7.1860	5.1581	12.3441
13	0.8250	1.2121	4.237	65.38	7.3983	5.5359	12.9342
14	0.8263	1.2102	4.529	69.89	7.6716	5.8715	13.5431
15	0.8303	1.2044	4.835	74.61	7.9116	6.2671	14.1787
16	0.8336	1.1996	5.161	79.64	8.1183	6.7204	14.8387
17	0.8376	1.1939	5.408	83.45	8.3972	7.1260	15.5232
18	0.8416	1.1882	5.873	90.63	8.6372	7.5961	16.2333
19	0.8458	1.1823	6.260	96.60	8.8772	8.0917	16.9689
20	0.8496	1.1770	6.672	102.96	9.1228	8.6117	17.7345
21	0.8541	1.1708	7.109	109.71	9.3628	9.1662	18.5290
22	0.8583	1.1651	7.438	114.78	9.6028	9.7507	19.3535
23	0.8625	1.1594	8.055	124.30	9.8484	10.3651	20.2135
24	0.8670	1.1534	8.573	132.30	10.0706	11.0385	21.1091
25	0.8715	1.1474	9.117	140.69	10.3284	11.7119	22.0403
26	0.8765	1.1409	9.696	149.63	10.5740	12.4453	23.0193
27	0.8811	1.1349	10.306	159.04	10.7640	13.2698	24.0338
28	0.8858	1.1289	10.949	168.96	11.0540	14.0320	25.0860
29	0.8908	1.1226	11.632	179.50	11.2996	14.8887	26.1883
30	0.8958	1.1163	12.351	190.60	11.5396	15.7955	27.3351
31	0.9014	1.1094	13.114	202.38	11.7796	16.7589	28.5385
32	0.9071	1.1024	13.919	214.80	12.0252	17.7657	29.7919
33	0.9127	1.0957	14.768	227.90	12.2652	18.8346	31.0998
34	0.9183	1.0890	15.662	241.70	12.5052	19.9591	32.4643
35	0.9239	1.0824	16.611	256.34	12.7564	21.1402	33.8966
36	0.9302	1.0750	17.613	271.80	12.9908	22.3981	35.3889
37	0.9364	1.0679	18.669	288.10	13.2308	23.7216	36.9524
38	0.9429	1.0606	19.783	305.29	13.4764	25.1165	38.5925
39	0.9496	1.0531	20.961	323.47	13.7164	26.5828	40.2992
40	0.9570	1.0449	22.204	342.65	13.9620	28.1351	42.0971
41	0.9643	1.0370	23.524	363.02	14.2020	29.7730	43.9750
42	0.9715	1.0293	24.912	384.44	14.4020	31.5032	45.9452
43	0.9802	1.0202	26.381	407.11	14.6820	33.3311	48.0131
44	0.9872	1.0130	27.846	429.72	14.9276	35.2467	50.1743
45	0.9957	1.0043	29.575	456.40	15.1676	37.2802	52.4478
46	1.0040	0.9960	31.289	482.85	15.4132	39.3870	54.8002
47	1.0131	0.9871	33.122	511.14	15.6532	41.6927	57.3459
48	1.0227	0.9778	35.063	541.09	15.8955	44.0783	59.9738
49	1.0323	0.9687	36.901	569.46	16.1400	46.5840	62.7240

Tabla 13.5  
Propiedades de  
mezclas de aire  
seco y vapor de  
agua saturado,  
a la presión  
atmosférica  
(101.3 kPa).

Estos valores corresponden a la «humedad específica». Es muy similar a la humedad absoluta, excepto que, como ya mencionamos, la humedad absoluta está basada en gramos de humedad por metro cúbico, mientras que la humedad específica, está basada en gramos de humedad por kilogramos de aire seco.

Las columnas 6, 7 y 8, corresponden a la entalpía o contenido de calor de la mezcla en kcal/kg de mezcla (aire y humedad), en fase líquida (sensible), al pasar de fase líquida a vapor o viceversa (latente), y el contenido total de ambas (sensible más latente).

Si un kilogramo de aire seco, tiene tanta humedad como se muestra en las columnas 4 y 5, está saturado con humedad, por lo tanto, el espacio que ocupa tiene una humedad relativa de 100%. Si sólo tiene la mitad de humedad mezclada con el kilogramo de aire seco, se dice que tiene un porcentaje de humedad del 50%. Si tiene una cuarta parte, su porcentaje de humedad es del 25%, y así sucesivamente.

Si el aire está saturado, esto es, que tiene toda la humedad que puede retener a esa temperatura, entonces su porcentaje de humedad y su humedad relativa serán las mismas, 100%.

Si el aire no está saturado, tanto el porcentaje de humedad como la humedad relativa serán menores de 100%, pero pueden no ser iguales, ya que la humedad relativa al cambiar el volumen del aire, el porcentaje de humedad permanece igual, mientras se trate de la misma cantidad de aire y agua por peso. Sin embargo, el porcentaje de humedad de la mezcla de aire y humedad, aproximadamente es la misma que su humedad relativa, la diferencia es muy pequeña. Veamos un ejemplo:

Habíamos visto que un metro cúbico de espacio saturado a 15°C pero calentado a 21°C, tiene una *hr* de 68.5% ( $1.70 \div 2.48 \times 100$ ) de la tabla 13.3, la cual se basa en humedad por metro cúbico.

De la tabla 13.5, la cual se basa en humedad por kilogramo de aire seco, vemos que a 15°C de saturación, un kilogramo de aire seco tiene 4.835 gramos mezclados en sí, a 21°C de saturación tendría 7.109 gramos de humedad. Sin embargo, si un kilogramo de aire saturado a 15°C se calienta hasta 21°C, seguirá teniendo 4.835 gramos de humedad mezcladas. Puesto que 21°C podría tener 7.109 gramos, su porcentaje de humedad es 68.0% ( $4.835 \div 7.109 \times 100$ ).

Así pues, su *hr* es 68.5%, pero su porcentaje de humedad es 68.0%. Desde luego, su punto de rocío sigue siendo 15°C, ya que es la temperatura a la que la humedad del aire comienza a condensarse.

Si cambia el volumen de la mezcla de aire y humedad (aire seco parcialmente saturado con humedad), la *hr* cambiará, puesto que está basada en la cantidad de humedad por metro cúbico. Pero el porcentaje de humedad no está basado en el volumen, está basado en el peso (la cantidad de humedad mezclada con un kilogramo de aire seco). Por lo tanto, el aire puede ser manejado y cambiar

su volumen, pero mientras la cantidad real de aire y humedad por peso permanezca igual, su porcentaje de humedad también permanece la misma, suponiendo, desde luego, que no cambia la temperatura.

## Entalpía de las Mezclas de Aire y Vapor de Agua

Hasta ahora, hemos estado tratando con cantidades y presiones de aire y vapor de agua, a diferentes temperaturas. Se han mencionado los efectos de aumentar y disminuir la temperatura, para lo cual hay que agregar o quitar calor.

Ahora debemos ver cuánto calor hay que agregar o quitar, para efectuar los cambios que hemos estado estudiando. De la misma manera que es necesario saber cuánta humedad y aire hay en las diferentes mezclas, también es necesario conocer cuánto calentamiento o enfriamiento se requiere, para hacer cambios en la condición de las mezclas de aire y humedad. Esto es tan cierto para las temperaturas en refrigeración (conservación y congelación), como lo es para las temperaturas del aire acondicionado para el confort humano.

Si tuviéramos que considerar solamente calentar y enfriar el aire en las mezclas, la cantidad de calor agregado o removido, sería comparativamente simple. Solo tendríamos que agregar o quitar «calor sensible» del aire, el cual es aproximadamente 0.24 kcal/kg °C, según se muestra en la columna 4 de la figura 13.1 para el aire seco. Puesto que el calor sensible en la mezcla proviene casi totalmente del aire, el contenido de calor por kilogramo de aire seco, como se muestra en la columna 4 de la tabla 13.1, es el mismo que el calor sensible de la mezcla, como se muestra en la columna 6 de la tabla 13.5.

Es el contenido de humedad el que complica el problema. Esto no sería tan difícil si la humedad permaneciera siempre como vapor, ya que siempre estaríamos tratando con el «calor sensible» del vapor, el cual es aproximadamente 0.45 kcal/kg °C (de la humedad, no de la mezcla).

En la mayoría de las aplicaciones donde el aire y la humedad tengan que calentarse o enfriarse, algo del vapor de agua se vuelve líquido (condensado), o el agua líquida se evapora. Cuando un kilogramo de vapor de agua se condensa, libera aproximadamente 539 kcal, mismas que debe absorber el equipo de enfriamiento. Cuando se evapora un kilogramo de agua, deben agregarse aproximadamente 539 kcal, las cuales deben ser suministradas por el equipo de calefacción.

Esto se llama «calor latente» y la carga de este calor puede ser muy grande, algunas veces más grande que la carga completa de calor sensible, requerida para cambiar la temperatura del aire y humedad en unos 28 o 35 grados. Por otra parte, la carga latente no incluye cambio de temperatura, sólo un cambio en el contenido de vapor a líquido.

En la columna 7 de la tabla 13.3, se muestran los contenidos de calor latente del vapor de agua, a temperaturas desde 0°C hasta 45°C. Estos valores son la

cantidad de calor en kilocalorías, que se requieren para cambiar un kilogramo de agua de líquido a vapor a la misma temperatura. Deberá notarse que este valor no siempre es el mismo; ya que se requiere menos calor para evaporar un kilogramo de agua a 15°C (588.87 kcal), que un kilogramo de agua a 0°C (597.66 kcal). A más altas temperaturas, el calor latente sigue siendo menor, hasta que a 100°C es 539 kcal/kg, cantidad que se considera generalmente como calor latente de evaporación del agua.

La columna 8 es el calor total, y es la suma del calor sensible más el calor latente. Por lo tanto, a 15°C, el calor total es 603.87 kcal/kg (15+588.87). Como el nombre implica, el calor total es la cantidad total de calor en el vapor de agua saturado. Así, si calentamos un kilogramo de agua de 0°C a 15°C, y luego se evapora a 15°C, deben agregarse 603.87 kcal.

La misma cantidad de calor deberá removerse, al enfriar un kilogramo de vapor de agua saturado, de 15 a 0°C y luego condensarlo a 0°C.

El contenido de calor (o entalpía), como se muestra en la tabla 13.3, está basado en un kilogramo de vapor de agua por peso. Tal como se mencionó anteriormente, es más conveniente tratar con el aire saturado sobre la base del peso, de tal manera que los valores de la tabla 13.5, sean manejados como mezclas de aire y vapor de agua consistentes, de un kilogramo de aire saturado con vapor de agua. El contenido de calor sensible, como se muestra en la columna 6 de la tabla 13.5, es el calor sensible de un kilogramo de aire.

Sin embargo, un kilogramo de aire contiene solamente una pequeña fracción de agua. Como se muestra en las columnas 4 y 5 de la misma tabla, a 15°C hay solamente 4.835 gramos de humedad en un kilogramo de aire seco, aún cuando esté saturado. Por lo tanto, el calor latente de esta humedad, es solamente de 6.2671 kcal. El calor sensible del aire seco a 15°C, es 7.91 kcal, y el calor latente del vapor de agua que contiene es 6.27 kcal, así que, el calor total del kilogramo de aire saturado a 15°C es 14.18 kcal (7.91 + 6.27).

Existe otra pequeña fuente de calor en la mezcla: el calor sensible del vapor de agua. Sin embargo, aún en el punto de saturación, la cantidad de vapor de agua en peso es muy pequeña (aproximadamente 1% a 15°C), así que su calor sen-

sible normalmente se desprecia. En instalaciones muy grandes o en aplicaciones especiales, puede ser suficiente que tenga que ser considerado, pero en la práctica común, el calor total incluye solamente el calor sensible del aire y el calor latente de la humedad.

Si esta mezcla la calentamos hasta 21°C, seguirá conteniendo 4.835 gramos de humedad y su porcentaje de humedad será 68.0% ya que a 21°C debería contener 7.109 gramos de humedad en el punto de saturación ( $4.835 \div 7.109 \times 100$ ). Pero aún se necesitan 9.166 kcal para calentar al aire a 21°C, pero como sólo contiene 4.835 gramos de humedad, el calor latente será 6.27 kcal, el mismo que a 15°C.

Así que, para encontrar el contenido de calor total de un kilogramo de aire seco parcialmente saturado con humedad, sumamos el calor sensible del aire (de la columna 6, tabla 13.5) a la temperatura del aire, más el calor latente en su punto de rocío ( $9.3628 + 6.2671 = 15.6299$  kcal).

Otra manera de encontrar el calor total, es sumando el calor sensible del aire a esta temperatura, más el calor latente del aire multiplicado por el porcentaje de humedad:  $(9.3628) + (0.68 \times 9.1662) = 15.5958$  kcal.

Para poder resolver problemas de mezclas de aire y humedad, las «Tablas Psicrométricas» como las de las tablas 13.1, 13.3 y 13.5, nos proporcionan todos los datos que necesitamos, de tal manera que si tenemos:

1. El volumen del espacio del cual podamos calcular el número de kilogramo de aire seco.
2. La temperatura de la mezcla de aire y agua.
3. La temperatura del punto de rocío.

En algunos lugares, particularmente a grandes alturas, también puede ser necesario utilizar un barómetro para hacer los ajustes necesarios a las bajas presiones, como se muestra en la tabla 13.6.

ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (m)	PRESION		
	ABSOLUTA		BARO- METRICA mm Hg
	kPa	psia	
-300	105.21	15.26	789
-150	103.21	14.97	774
nivel del mar	101.325	14.696	760
150	99.49	14.430	746
300	97.65	14.163	732
450	96.03	13.928	720
600	94.33	13.682	708
750	92.60	13.430	695
900	90.97	13.194	682
1,050	89.34	12.958	670
1,200	97.71	12.722	658
1,350	86.15	12.495	646
1,500	84.52	12.259	634
1,650	83.03	12.042	623
1,800	81.54	11.826	612
1,950	79.98	11.600	600

ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (m)	PRESION		
	ABSOLUTA		BARO- METRICA mm Hg
	kPa	psia	
2,100	78.55	11.393	589
2,250	77.06	11.176	578
2,400	75.63	10.970	567
2,550	74.21	10.763	557
2,700	72.85	10.566	546
2,850	71.49	10.370	536
3,000	70.20	10.182	527
3,200	68.45	9.928	513
3,400	67.06	9.726	503
3,600	65.05	9.434	488
3,800	63.53	9.214	477
4,000	62.12	9.010	466
4,500	57.82	8.391	434
5,000	54.52	7.908	409
5,500	53.02	7.689	398
6,000	48.62	7.052	365

Tabla 13.6 - Presión atmosférica a diferentes altitudes.

El volumen del espacio puede sacarse midiéndolo. A éste se le agregará el aire fresco requerido para ventilación. La temperatura puede tomarse con un termómetro ordinario pero preciso.

### Termómetro de Bulbo Seco

El confort humano y la salud, dependen grandemente de la temperatura del aire. En el acondicionamiento de aire, la temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de «bulbo seco» (*bs*), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca. Es la temperatura medida por termómetros ordinarios en casa.

Hasta este punto, todas las temperaturas a que nos hemos referido han sido temperaturas de bulbo seco, tal como se leen en un termómetro ordinario, excepto donde nos hemos referido específicamente a la temperatura del punto de rocío.

### Termómetro de Bulbo Húmedo

Básicamente, un termómetro de bulbo húmedo no es diferente de un termómetro ordinario, excepto que tiene una pequeña mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo. Si esta mecha se humedece con agua limpia, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura (temperatura) del termómetro. Esta temperatura se conoce como de «bulbo húmedo» (*bh*). Si el aire estuviese saturado con humedad (100% *hr*), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco. Sin embargo, la *hr* normalmente es menor de 100% y el aire está parcialmente seco, por lo que algo de la humedad de la mecha se evapora hacia el aire. Esta evaporación de la humedad de la mecha, provoca que la mecha y el bulbo del termómetro se enfríen, provocando una temperatura más baja que la del bulbo seco.

Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha. Así que, la lectura de la temperatura del bulbo húmedo, varía de acuerdo a qué tan seco esté el aire.

La precisión de la lectura del bulbo húmedo, depende de qué tan rápido pase el aire sobre el bulbo. Las velocidades hasta de 1,500 m/min (90 km/hr), son mejores pero peligrosas, si el termómetro se mueve a esta velocidad. También, el bulbo húmedo deberá protegerse de superficies que radien calor (sol, radiadores, calentadores eléctricos, calderas, etc.). Se pueden tener errores hasta del 15% si el movimiento de aire es muy lento, o si hay mucha radiación presente.

Cuando la *hr* es de 100% (saturación), las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y del punto de rocío son todas la misma. Abajo de 100% de *hr*, la temperatura del bulbo húmedo es siempre algo menor que la del bulbo seco y mayor que el punto de rocío.

En la figura 13.7, se ilustran los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo. "A" representa la temperatura de bulbo seco, "B" la temperatura de bulbo húmedo y "C" la

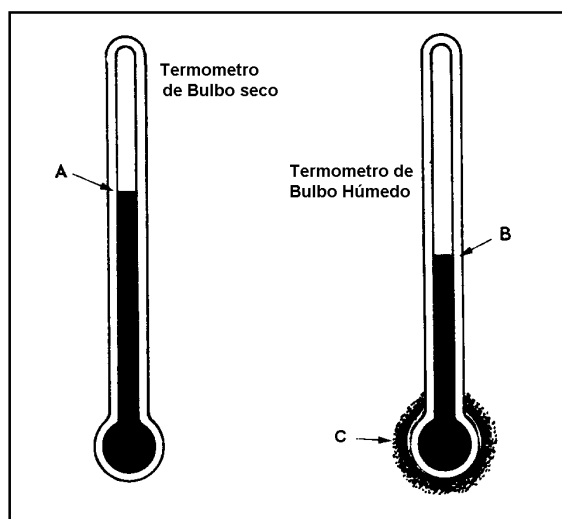


Tabla 13.7 - Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo

mecha que envuelve al bulbo húmedo. Nótese que la temperatura mostrada en el termómetro de bulbo húmedo, es considerablemente menor que la del termómetro de bulbo seco.

También, la temperatura de bulbo húmedo varía de acuerdo a la temperatura del cuarto; así que, es afectada tanto por el calor sensible del aire en el cuarto, como por el calor latente de la humedad del aire. Por lo tanto, la temperatura de bulbo húmedo, es una indicación del calor total en el aire y la humedad.

### Psicrómetro

Para asegurarse que la temperatura del bulbo húmedo registrada sea precisa, el flujo de aire sobre el bulbo húmedo debe ser bastante rápido. El dispositivo diseñado para girar un par de termómetros, uno de bulbo seco y otro de bulbo húmedo, se conoce como psicrómetro de onda. El instrumento consiste de dos termómetros, el de bulbo seco y el de bulbo húmedo. Para operarlo, la mecha se satura sobre el bulbo húmedo con agua limpia, o de preferencia, con agua destilada y se gira.

Para tomar las lecturas con el psicrómetro de onda, se recomiendan los siguientes pasos:

1. Sumerja la mecha sobre el bulbo húmedo en el agua. Sólo una vez por cada determinación de la *hr*, pero nunca entre una lectura y otra. La evaporación progresiva de la humedad en la mecha, hasta que alcanza el equilibrio con la humedad en el aire, es el factor que determina la lectura de bulbo húmedo.
2. Gire el psicrómetro durante 30 segundos. Rápidamente tome las lecturas, primero en el termómetro de bulbo húmedo y luego en el de bulbo seco y anótelas. Gire de nuevo el psicrómetro, tomando lecturas a intervalos de 30 segundos durante cinco lecturas sucesivas, y anote las temperaturas en cada ocasión, o hasta que se haya obtenido la lectura más baja y que la última lectura revele una nivelación o curva de retorno. (Dos o más lecturas sucesivas casi idénticas).

3. Utilice las tablas o la carta psicrométrica para obtener la *hr*. Normalmente, los psicrómetros de onda vienen acompañados de una regla deslizante con las dos escalas de temperaturas (bulbo húmedo y bulbo seco) y su *hr* correspondiente.

Existen otros tipos de psicrómetros que se utilizan en los lugares donde es difícil girar el psicrómetro de onda, por lo estrecho del pasadizo, etc. Uno de ellos es el psicrómetro de aspiración. Con este instrumento, la muestra de aire es soplada sobre los bulbos de los termómetros, por medio de una sección creada por una bomba de aire manual.

Otro modelo de psicrómetro de aspiración, en lugar de bomba de aire manual, utiliza un pequeño ventilador operado por un motorcito de baterías, con lo cual se impulsa el aire, forzándolo a pasar sobre los bulbos de los termómetros.

En la práctica, cualquier temperatura que se mencione, se supone que es la temperatura de bulbo seco, a menos que se refiera específicamente como la temperatura de bulbo húmedo (*bh*).

En párrafos anteriores, se estableció que la temperatura del punto de rocío podía sacarse indirectamente de la temperatura de bulbo seco. Por ejemplo, en un cuarto con una temperatura de bulbo seco de 21°C, si utilizamos el psicrómetro de onda y obtenemos una temperatura de bulbo húmedo de 17.5°C, en la columna 8 de la tabla 13.5, el contenido de calor total es aproximadamente de 15.88 kcal/kg (promedio entre 16.23 y 15.52). Puesto que la temperatura de bulbo húmedo es la indicación de la entalpía total del aire y la humedad, entonces, en este ejemplo, la entalpía total del aire y la humedad a una temperatura de bulbo seco de 21°C, y de bulbo húmedo de 17.5°C, es de 15.88 kcal/kg.

Los valores de esta tabla se basan en un kilogramo de aire, y en la columna 6, encontramos que el calor sensible de este kilogramo de aire seco a 21°C es de 9.363 kcal. Esto deja 6.517 kcal (15.88 - 9.363) como el calor latente de la humedad mezclada con un kilogramo de aire seco. Si seguimos por la columna 7 hacia arriba, encontramos que este valor de calor latente de 6.517, corresponde a una temperatura de 15.6°C.

El calor latente depende de la cantidad de humedad en la mezcla, y la cantidad de humedad depende de la temperatura del punto de rocío de la mezcla; así que, 15.6°C es el punto de rocío de esta mezcla, cuyo calor latente es 6.517 kcal/kg de aire seco parcialmente saturado con humedad.

Así pues, encontrando las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo con un psicrómetro, podemos determinar la temperatura del punto de rocío. Conocer esta temperatura, nos permite determinar la humedad específica o la relativa, ya que la humedad específica se saca a partir de las presiones de vapor, a las temperaturas de bulbo seco y del punto de rocío (columna 2 de la tabla 13.3), y el porcentaje de humedad, se saca de los gramos de humedad por kilogramos de aire seco (columna 4 de la

tabla 13.5), a las temperaturas de bulbo seco y del punto de rocío.

Además, los demás valores de las tablas psicrométricas (tablas 13.1, 13.3 y 13.5) también pueden sacarse, conociendo las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y punto de rocío.

## Indicativos de Baja Humedad

El principal indicativo de la baja humedad atmosférica, es el incremento en la cantidad de energía electrostática notable. Cuando uno anda en movimiento de aquí para allá, y toca a otra persona o algún objeto metálico aterrizado, salta una chispa de la mano o los dedos hacia la persona u objeto. Otros indicativos, son que el cabello humano tiende a ser menos manejable; las uniones de los muebles se contraen y se aflojan; los trabajos de madera como puertas, pisos, etc., se agrietan; la superficie de la piel se reseca y las membranas de la nariz tienden a resecarse también. Para sentirse más confortables, generalmente es necesario elevar la temperatura ambiente (*bs*) arriba de la normal.

## Medición de la Humedad

En la sección anterior, se explicó cómo medir la humedad usando los termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo. Esto implica el uso de las tablas o de la carta psicrométrica.

Se han desarrollado instrumentos, los cuales dan una lectura directa de la humedad relativa. La operación de estos instrumentos se basa en la propiedad de algunos materiales para absorber humedad y luego cambiar su forma o tamaño, dependiendo de la humedad relativa de la atmósfera. Se pueden utilizar materiales, tales como cabello humano, madera y algunas otras fibras. Los más comunes son los de tipo colgables en la pared, con una carátula graduada y una aguja que indica la *hr* en %.

También es posible medir la *hr* electrónicamente. Esto se hace utilizando una sustancia, en la cual, la conductividad eléctrica cambia con el contenido de humedad. Cuando el instrumento está en operación, el elemento sensor se coloca en el espacio donde se va a medir la humedad. Este elemento sensor puede ser una sonda conectada mediante un cable al instrumento, o en instrumentos portátiles, viene integrado a los mismos. Estos instrumentos tienen una pantalla digital, donde se puede indicar, además, las temperaturas de bulbo seco y del punto de rocío.

Algunas veces, se requiere una lectura continua en un espacio controlado. Aquí, se utiliza un instrumento registrador que indica la humedad y la temperatura. Los hay para 24 horas o para siete días en gráficas de papel circulares, o en gráficas cilíndricas de papel rígido.

## Controles de Humedad

Los controles de humedad, se utilizan para mantener la *hr* de los cuartos con aire acondicionado, en un nivel

satisfactorio. Estos controles determinan el estado higrométrico del aire, por lo que también se les llama higrómetros.

Los controles de humedad operan durante la temporada de calefacción en invierno, agregando humedad al aire, para mantener la humedad aproximadamente constante.

Estos controles operan en el verano para remover humedad del aire. Para esto, el control de humedad, generalmente opera un desviador (bypass) de aire para variar el flujo de éste sobre los evaporadores. Estos controles, por lo general, operan eléctricamente para regular válvulas solenoides. El elemento de control puede ser una fibra sintética o cabello humano, los cuales son sensibles a la cantidad de humedad en el aire. En la figura 13.8, se muestran los principios de construcción de uno de estos dispositivos de control de humedad.

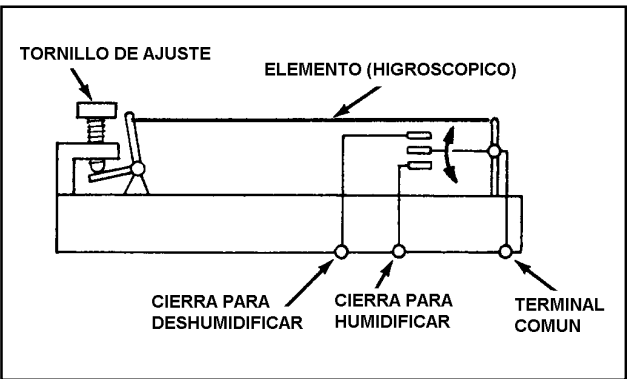


Tabla 13.8 - Diagrama esquemático de un control de humedad relativa.

Como se puede apreciar en la ilustración, el mecanismo consta de un elemento higroscópico, que generalmente son cabellos humanos, un tornillo de ajuste y un interruptor eléctrico de doble acción. La tensión del elemento higroscópico se ajusta a la humedad deseada, mediante el tornillo de ajuste.

Este elemento es muy sensible a los cambios de humedad. En el ciclo de calefacción, si disminuye la humedad relativa del aire, el elemento se contrae y cierra el contacto que acciona al humidificador. Cuando la *hr* regresa a su nivel apropiado, el elemento regresa a su posición normal y desconecta el humidificador.

En el ciclo de enfriamiento, si la humedad aumenta arriba del nivel fijado, el elemento aumenta su longitud y se cierra el contacto del deshumidificador. Cuando la *hr* vuelve al nivel apropiado, el elemento se contrae y desconecta el deshumidificador.

En cuartos de computadoras y otras instalaciones, donde se requiera un control estricto de la humedad, se utilizan los termohumidígrafos (registradores de temperatura y humedad), los cuales se equipan con alarmas que alertarán a las personas de servicio, en caso de que la temperatura o la humedad falle o deje de permanecer en el nivel apropiado.

### ¿Por qué Humidificar?

En cualquier casa o edificio donde prevalezca la calefacción en invierno, y que no haya humidificación, se lleva a cabo una reducción substancial de la *hr*.

Como ya sabemos, mientras más caliente está el aire, puede retener más humedad. El aire en un hogar calentado a 21°C, puede tener aproximadamente 7.1 gramos de humedad por cada kilogramo de aire seco. Esto es, 100% de humedad relativa. Si solamente hubiese 1.77 gramos/kg en el hogar, esto es, una cuarta parte de la capacidad del aire para retener humedad, la *hr* sería también la cuarta parte o 25%. El aire podría retener hasta cuatro veces esa cantidad de agua.

Este fenómeno es muy importante, y es lo que sucede al aire cuando se calienta. En la figura 13.9, se muestra una tabla de conversión de la humedad relativa interior-exterior, que nos ilustra cómo disminuye la *hr* al calentar el aire dentro de una casa o un edificio, a aproximadamente 22°C, en base a la temperatura y *hr* del exterior.

Para usar esta tabla, primero se determinan la humedad relativa y la temperatura exteriores, mediante un psicrómetro o con las tablas psicrométricas. Teniendo esos dos valores, se localiza la *hr* exterior en el lado izquierdo de la tabla y la temperatura exterior en la escala inferior. La intersección indica la *hr* interior cuando el aire exterior se calienta dentro del cuarto a 22°C. Por ejemplo, si la humedad relativa y la temperatura exteriores son de 70% y -4°C, respectivamente, la humedad relativa interior, será de 12%.

100	2	3	4	6	7	9	11	14	17	21	26	31	38	46
95	2	3	4	5	7	8	10	13	16	20	24	30	36	44
90	2	2	4	5	6	8	10	12	15	19	23	28	34	41
85	2	2	4	5	6	8	9	12	15	18	22	27	32	39
80	2	2	4	5	6	7	9	11	14	17	20	25	30	37
75	2	2	3	4	5	7	8	10	13	16	19	23	28	36
70	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	18	22	26	32
65	1	2	3	4	5	6	7	8	11	14	17	20	25	30
60	1	2	3	3	4	5	7	8	10	13	15	19	23	28
55	1	1	2	3	4	5	6	8	9	12	14	17	21	25
50	1	1	2	3	4	4	6	7	9	10	13	16	19	23
45	1	1	2	3	3	4	5	6	8	9	12	14	17	21
40	1	1	2	2	3	4	4	6	7	8	10	12	15	18
35	1	1	2	2	3	3	4	5	6	7	9	11	13	16
30	1	1	2	2	2	3	3	4	5	6	8	9	11	14
25	1	1	1	1	2	2	3	3	4	5	6	8	10	12
20	--	1	1	1	1	2	2	3	3	4	5	6	8	10
15	--	--	1	1	1	1	2	2	3	3	4	5	6	7
10	--	--	--	1	1	1	1	2	2	3	3	4	5	
5	--	--	--	--	--	--	1	1	1	1	1	1	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-35	-25	-20	-18	-15	-12	-10	-7	-4	-1	2	4	7	10
	TEMPERATURA EXTERIOR (°C)													

Tabla 13.9 - Tabla de conversión de humedad relativa exterior - interior.

Para superar esto, se agrega humedad artificialmente para que haya disponible más humedad para ese aire seco, y aprovechar esa habilidad mayor de retención de humedad. Se humidifica porque hay beneficios que son tan importantes, como el calentar para un confort y bienestar interior durante el invierno. Estos beneficios, pueden agruparse en tres clasificaciones generales:

1. Confort
2. Conservación
3. Salud

**1. Confort.-** Cuando uno sale de la regadera en un baño cerrado, generalmente se siente tibio y húmedo. Probablemente la temperatura esté en el rango de 21°C a 22°C, con una *hr* de aproximadamente 70 a 80%. Esta alta humedad, resulta del vapor de agua agregado al aire durante el baño.

Cuando hay que salir del cuarto de baño a otra parte de la casa, se siente notablemente más frío, y no es que la temperatura esté más baja, porque puede ser casi la misma. Se debe a que probablemente la *hr* en el resto de la casa, esté entre un 10 ó 15%. Debido a lo seco de este aire, la humedad de la piel comienza a evaporarse inmediatamente, produciendo un efecto de enfriamiento, exactamente como un enfriador evaporativo.

Este tipo de fenómeno se presenta día tras día, cada invierno, en millones de casas. La gente que tiene calefacción, gira sus termostatos hasta 24 o 25°C, para no sentir ese frío. Aun así, se sienten como corrientes de aire y frío porque el proceso evaporativo continúa. Un nivel adecuado de humedad relativa hace que a 20°C, se sienta igual o más agradable que a 25°C.

Este efecto de frío no es el único desconfort causado por el aire seco. La electricidad estática, como ya vimos, es una indicación definitiva de bajos niveles de humedad relativa, y es una condición que es consistentemente molesta. Una *hr* adecuada eliminará, o por lo menos, reducirá ese desconfort.

**2. Conservación.-** La adición o reducción de humedad, afecta drásticamente las cualidades, dimensiones y peso, de los materiales higroscópicos.

La madera, el papel, las telas, aunque se sienten secos al tacto, contienen agua. No una cantidad fija de agua, sino una cantidad que varía grandemente con el nivel de *hr* del aire circundante. Tomemos, por ejemplo, un metro cúbico de madera seca con un peso de 480 kg. A una *hr* de 60%, la madera tendrá aproximadamente 50 lts. de agua. Si la *hr* disminuye a 10%, el agua retenida por la madera no llegaría ni a 10 litros.

Este tipo de acción sucede no solo con la madera, sino con todo tipo de materiales en casa, que tengan la capacidad de absorber y despedir humedad. Estos materiales se encogen al perder humedad, y se hinchan al absorberla. Si la pérdida de agua es rápida, se suscitan torceduras y grietas. Al cambiar la *hr*, cambian las condiciones y las dimensiones de los materiales. Es por esto que se debe

humidificar, se debe controlar la *hr*. Por todo lo anterior, es que la humedad adecuada es importante.

**Efectos de Baja Humedad.** En el párrafo anterior sobre indicativos de baja humedad, se mencionaron algunos de los efectos ocasionados por la falta de humedad. Esto afecta, principalmente, a la construcción de muebles; las gomas se resecan, las uniones se separan, los escalones se caen, aparecen grietas, etc.

Los emplastes y los entrepaños de madera se separan y se agrietan, al igual que los pisos. Los pianos, órganos y otros instrumentos musicales, pierden su afinación. Obras de arte, libros y documentos se resecan, se rompen o se agrietan.

Las alfombras y tapetes se desgastan rápidamente, simplemente porque una fibra seca se rompe y una húmeda se dobla.

**Efectos por Exceso de Humedad.** Todos hemos visto ventanas empañadas durante el invierno; esto es indicativo de una humedad relativa interior muy alta. Esta condensación se debe al efecto de la presión de vapor. Las moléculas del vapor de agua se mueven a través de toda la casa. Debido a la tendencia de estas moléculas a dispersarse igualmente o de mezclarse, la humedad del aire se mueve hacia el aire más seco. En una casa, el aire húmedo interior, tiende a alcanzar el aire más seco del exterior; se mueve hacia las ventanas donde hay una temperatura más baja. Por lo tanto, hay un incremento en la *hr*, hasta un punto en el cual el vapor de agua se condensa en las superficies más frías de las ventanas. Este es el punto de rocío y ocurre a varias condiciones, dependiendo del tipo de ventanas en la casa.

Generalmente, la condensación por dentro de las ventanas, es un tipo de medida de la *hr* permisible dentro de la casa. Puede asumirse que, si esta condensación se está llevando a cabo sobre la ventana, también puede estar ocurriendo dentro de los muros, si no hubiera una barrera de vapor.

Una barrera de vapor, como el nombre implica, es un material que restringe el movimiento de las moléculas de vapor de agua. Ejemplos de una barrera de vapor típica, son papel de aluminio, película de polietileno, cubiertas de plástico, azulejo de plástico y algunos tipos de pinturas o barnices. En realidad, prácticamente cada casa tiene algún tipo de barrera de vapor, la cual por lo menos retarda el movimiento de las moléculas de agua, desde una área de alta presión de vapor (interior), hacia una área de baja presión de vapor (exterior).

Se han demostrado que aunque los muros estén aislados, si la humedad relativa en el interior de la casa es muy alta, habrá condensación, ya sea en el interior del aislamiento o entre éste y el muro, y aquí es donde comienzan los problemas si no se tiene una barrera de vapor, o si no está controlado el humidificador.

El aspecto importante es una *hr* controlada adecuadamente, para evitar los dañinos efectos de un aire



demasiado seco e igualmente importante, evitar los efectos dañinos de una *hr* demasiado alta.

**3. Salud.-** ¿Que dicen los médicos acerca de la humedad y la salud? Un doctor especialista en ojos, nariz y garganta dice al respecto:

En la lucha entre la nariz y el equipo acondicionador del aire, algunas veces gana la calefacción y otras la refrigeración, pero rara vez la nariz. La mucosa nasal contiene como 96% de agua. Para empezar, es más viscosa que cualquier otra mucosidad en el cuerpo, y aun la más ligera resequead, aumenta la viscosidad lo suficiente para interferir con la función de los cilios. Las demandas de las glándulas nasales son grandes aún bajo condiciones ordinarias, y no pueden competir con una sequedad externa en el interior de una casa en invierno.

La experiencia ha demostrado, que cuando se aproxima el invierno, aparece la primera ola de pacientes con nariz reseca, cuando la *hr* interior baja a 25%. Parece, por lo tanto, que 35% sería considerada del grado aceptable, pero 40% sería un mejor objetivo. Podría concluirse así, parecería que medio litro de agua, es demasiada agua para ser vertida por una pequeña nariz. En los enfermos y en los ancianos, simplemente no se libera, deteniéndose el flujo, cosa que los gérmenes aprovechan.

Otro médico experto en catarros comunes dice: «La prevención del catarro común es actualmente, la más cercana aproximación a la cura. La medida de prevención más importante, parecería ser la regulación adecuada de la humedad, especialmente durante la temporada de invierno y calefacción, con su desastrosa resequead del aire interior, que crea un ambiente favorable para el virus de la gripe.

Una *hr* adecuada, es útil para aliviar los problemas de salud agravados por un aire demasiado seco. Todos los hechos apuntan hacia una relación positiva entre la humedad y la salud.

### ¿Cuál es la Humedad Relativa Correcta para Interiores?

Mientras que algunas condiciones de humedad son ideales para el confort y la salud, en muchos casos, son menos ideales por otras razones. Una *hr* interior de 60%, puede cumplir con todos los requisitos para salud y confort, pero puede resultar dañina para paredes, muebles, etc.

El empañamiento de las ventanas es, normalmente, una indicación de *hr* demasiado alta, y debe recordarse que esta misma condensación, se lleva a cabo dentro de las paredes y otros lugares vulnerables al daño por exceso de humedad.

Por lo tanto, es necesario fijar límites de seguridad para los niveles de humedad relativa en interiores, a fin de obtener los máximos beneficios de la humedad correcta, sin exponer la estructura a algún daño. Se recomienda que se sigan los datos de la tabla 13.10, para asegurar esos beneficios.

Temperatura Exterior °C	Humedad Relativa Recomendada %
-7 y mayores	35
-12	30
-18	25
-23	20
-30	15

Tabla 13.10 - Humedad relativa recomendada.

## Cartas Psicrométricas

Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, *hr*, volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire.

Las propiedades psicrométricas del aire que se describen en las ilustraciones de las tablas 13.1, 13.3 y 13.5, han sido recopiladas a través de incontables experimentos de laboratorio y de cálculos matemáticos, y son la base para lo que conocemos como la Carta Psicrométrica.

Aunque las tablas psicrométricas son más precisas, el uso de la carta psicrométrica puede ahorrarnos mucho tiempo y cálculos, en la mayoría de los casos donde no se requiere una extremada precisión.

Como se mencionó al inicio de este párrafo, la carta psicrométrica es una gráfica que es trazada con los valores de las tablas psicrométricas; por lo tanto, la carta psicrométrica puede basarse en datos obtenidos a la presión atmosférica normal al nivel del mar, o puede estar basada en presiones menores que la atmosférica, o sea, para sitios a mayores alturas sobre el nivel del mar.

Existen muchos tipos de cartas psicrométricas, cada una con sus propias ventajas. Algunas se hacen para el rango de bajas temperaturas, algunas para el rango de media temperatura y otras para el rango de alta temperatura. A algunas de las cartas psicrométricas se les amplía su longitud y se recorta su altura; mientras que otras son más altas que anchas y otras tienen forma de triángulo. Todas tienen básicamente la misma función; y la carta a usar, deberá seleccionarse para el rango de temperaturas y el tipo de aplicación.

En este texto, utilizaremos una carta psicrométrica basada en la presión atmosférica normal, también llamada presión barométrica, de 101.3 kPa ó 760 mmHg. Esta carta cubre un rango de temperaturas de bulbo seco (*bs*) de -10°C hasta 55°C, y un rango de temperaturas de bulbo húmedo (*bh*) desde -10°C hasta 35°C.

En la figura 13.11, se muestra una carta psicrométrica básica. Está hecha con datos basados a la presión atmosférica normal de 101.325 kPa, y las unidades son las del Sistema Internacional, S.I. (ver capítulo 15 sobre equivalencias entre sistemas de unidades). Las tempera-



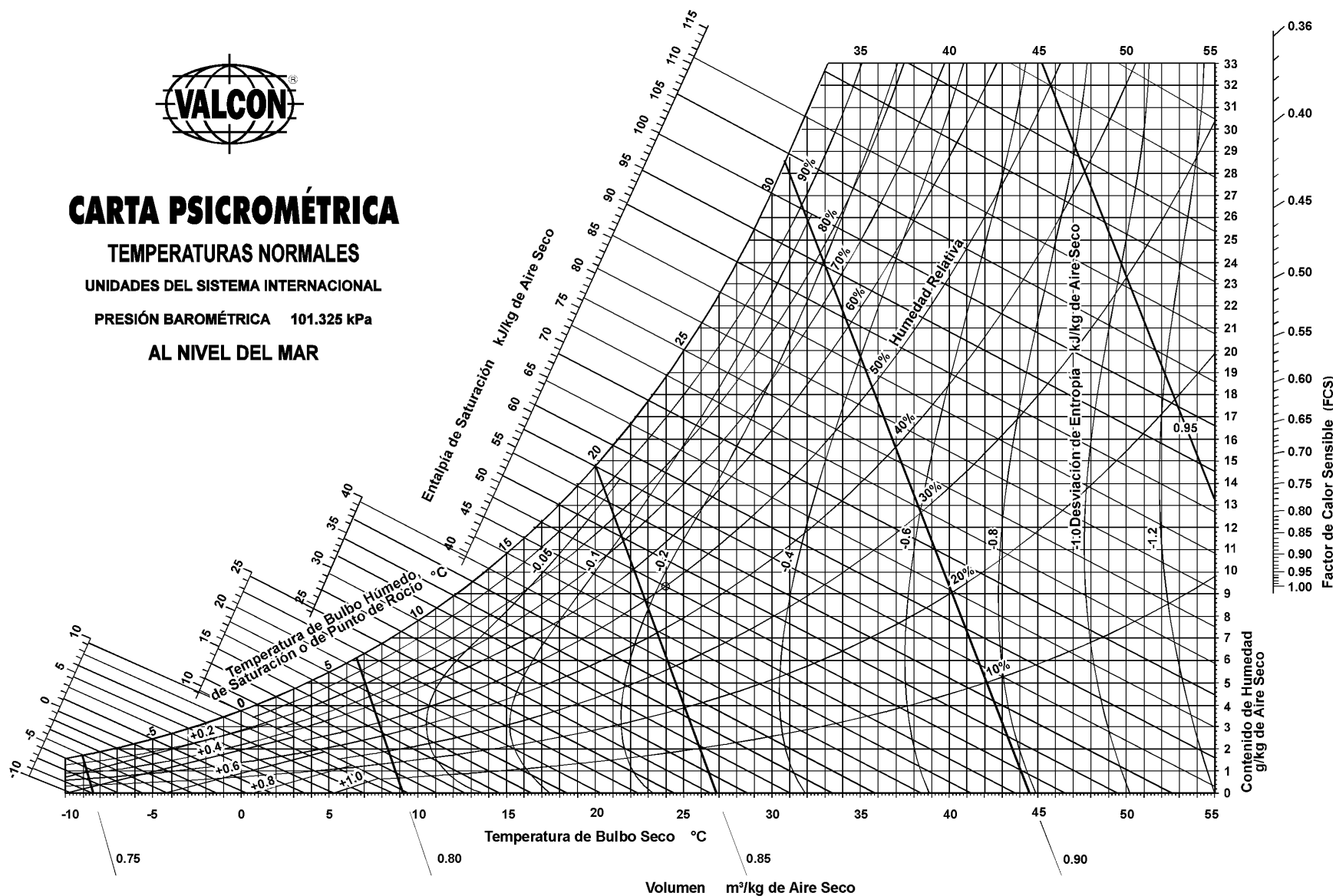
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Figura 13.11 - Carta psicrométrica a temperaturas normales y presión barométrica de 101.325 kPa (al nivel del mar). Las unidades están en el sistema internacional (SI).

turas están en grados centígrados; el volumen en  $\text{m}^3/\text{kg}$ ; la humedad relativa en porcentajes; el contenido de humedad en  $\text{g}/\text{kg}$  aire seco; la entalpía y la entropía están en kilo Joules ( $\text{kJ}$ ) por  $\text{kg}$  de aire seco. Un  $\text{kJ}/\text{kg} = 0.239 \text{ kcal}/\text{kg} = 0.430 \text{ btu}/\text{lb}$ .

En una carta psicrométrica se encuentran todas las propiedades del aire, de las cuales las de mayor importancia son las siguientes:

1. Temperatura de bulbo seco (*bs*).
2. Temperatura de bulbo húmedo (*bh*).
3. Temperatura de punto de rocío (*pr*)
4. Humedad relativa (*hr*).
5. Humedad absoluta (*ha*).
6. Entalpía (*h*).
7. Volumen específico.

Conociendo dos de cualquiera de estas propiedades del aire, las otras pueden determinarse a partir de la carta.

**1. Temperatura de Bulbo Seco.-** En primer término, tenemos la temperatura de bulbo seco. Como ya sabemos, es la temperatura medida con un termómetro ordinario. Esta escala es la horizontal (abcisa), en la parte baja de la carta, según se muestra en la figura 13.12. Las líneas que se extienden verticalmente, desde la parte baja hasta la parte alta de la carta, se llaman líneas de temperatura de bulbo seco constantes, o simplemente «líneas de bulbo seco». Son constantes porque cualquier punto a lo largo de una de estas líneas, corresponde a la misma temperatura de bulbo seco indicada en la escala de la parte baja. Por ejemplo, en la línea de  $40^\circ\text{C}$ , cualquier punto a lo largo de la misma, corresponde a la temperatura de bulbo seco de  $40^\circ\text{C}$ .

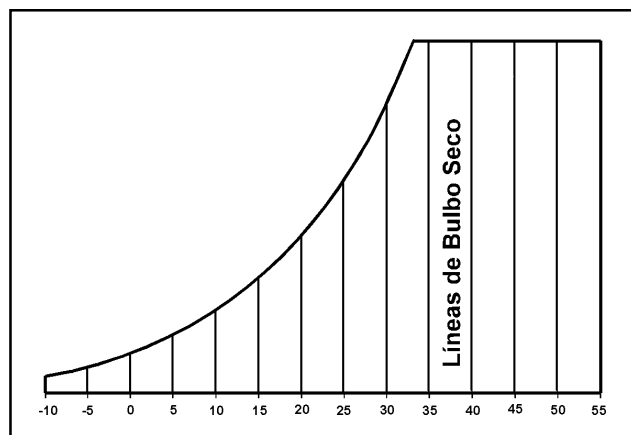


Figura 13.12 - Líneas de temperatura de bulbo seco  $^\circ\text{C}$ .

**2. Temperatura de Bulbo Húmedo.-** Es la segunda propiedad del aire de nuestra carta psicrométrica. Corresponde a la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo. Como ya se explicó en la sección anterior, es la temperatura que resulta cuando se evapora el agua de la mecha, que cubre el bulbo de un termómetro ordinario.

La escala de temperaturas de bulbo húmedo, es la que se encuentra del lado superior izquierdo, en la parte

curva de la carta psicrométrica, como se muestra en la figura 13.13. Las líneas de temperatura de bulbo húmedo constantes o líneas de bulbo húmedo, corren diagonalmente de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en un ángulo de aproximadamente  $30^\circ$  de la horizontal. También se les dice constantes, porque todos los puntos a lo largo de una de estas líneas, están a la misma temperatura de bulbo húmedo.

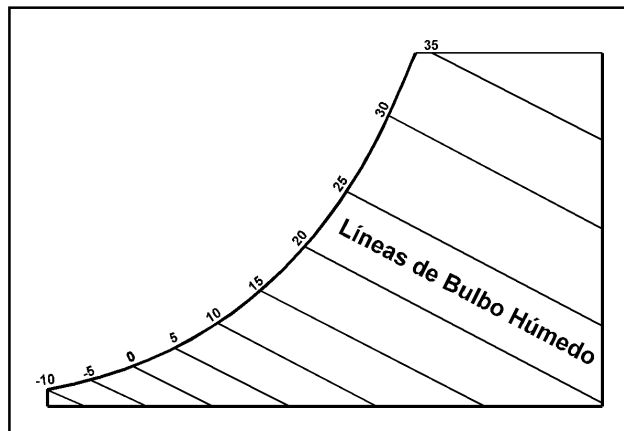


Figura 13.13 - Líneas de temperatura de bulbo húmedo  $^\circ\text{C}$ .

**3. Temperatura de Punto de Rocío.-** Es otra propiedad de aire incluida en una carta psicrométrica. Esta es la temperatura a la cual se condensará la humedad sobre una superficie. La escala para las temperaturas de punto de rocío es idéntica que la escala para las temperaturas de bulbo húmedo; es decir, es la misma escala para ambas propiedades. Sin embargo, las líneas de la temperatura de punto de rocío, corren horizontalmente de izquierda a derecha, como se ilustra en la figura 13.14, no en forma diagonal como las de bulbo húmedo (ver figura 13.13).

Cualquier punto sobre una línea de punto de rocío constante, corresponde a la temperatura de punto de rocío sobre la escala, en la línea curva de la carta.

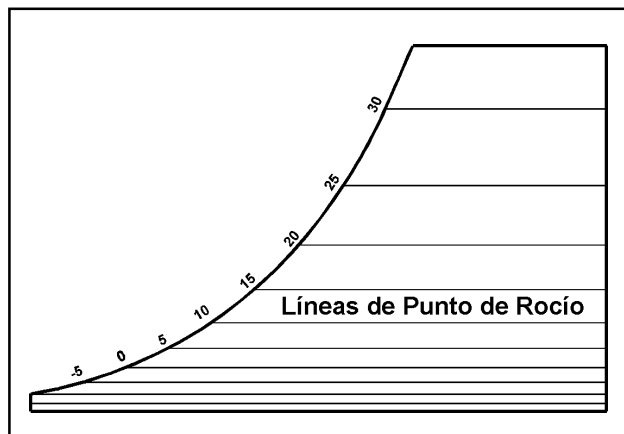


Figura 13.14 - Líneas de temperatura de punto de rocío  $^\circ\text{C}$ .

**4. Humedad Relativa.-** En una carta psicrométrica completa, las líneas de humedad relativa constante, son las líneas curvas que se extienden hacia arriba y hacia la derecha. Se expresan siempre en por ciento, y este valor se indica sobre cada línea.

Como ya hicimos notar previamente, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío, comparten la misma escala en la línea curva a la izquierda de la carta. Puesto que la única condición donde la temperatura de bulbo húmedo y el punto de rocío, son la misma, es en condiciones de saturación; esta línea curva exterior, representa una condición de saturación o del 100% de humedad relativa. Por lo tanto, la línea de 100% de *hr*, es la misma que la escala de temperaturas de bulbo húmedo y de punto de rocío.

Las líneas de *hr* constante, disminuyen en valor al alejarse de la línea de saturación hacia abajo y hacia la derecha, como se ilustra en la figura 13.15.

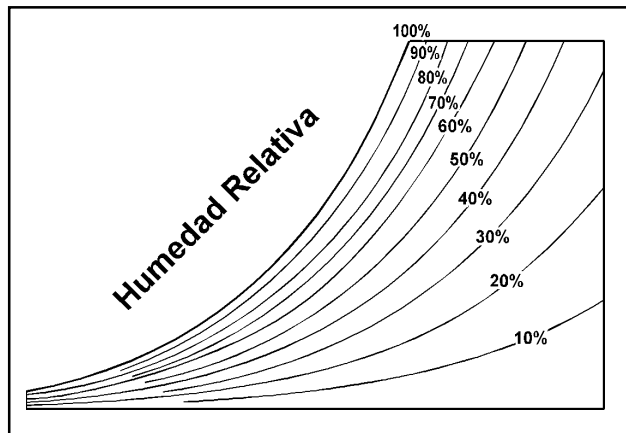


Figura 13.15 - Líneas de humedad relativa %.

**5. Humedad Absoluta.-** La humedad absoluta, es el peso real de vapor de agua en el aire. También se le conoce como humedad específica. La escala de la humedad absoluta, es la escala vertical (ordenada) que se encuentra al lado derecho de la carta psicrométrica, como se indica en la figura 13.16.

Los valores de esta propiedad se expresan, como ya sabemos, en gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg), en el sistema internacional, y en granos por libra (gr/lb), en el sistema inglés.

Las líneas de humedad absoluta, corren horizontalmente de derecha a izquierda, y son paralelas a las líneas de punto de rocío y coinciden con éstas. Así pues, podemos ver que la cantidad de humedad en el aire, depende del punto de rocío del aire.

A continuación, veremos algunos ejemplos sencillos del uso de la carta psicrométrica, con las cinco propiedades físicas descritas hasta este punto. Luego, veremos las demás propiedades que faltan por estudiar. Como se mencionó anteriormente, conociendo dos de estas propiedades del aire, se pueden determinar las demás con el uso de la carta psicrométrica.

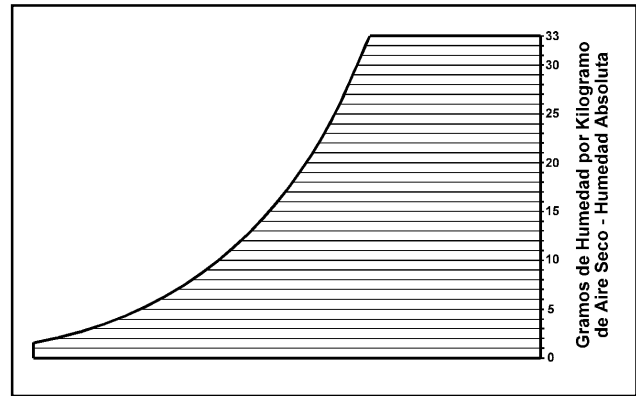


Figura 13.16 - Líneas de humedad absoluta en gramos/kg.

**Ejemplo:** Supongamos que con un psicrómetro se tomaron las lecturas de las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, siendo éstas de 24°C y de 17°C, respectivamente. ¿Cuál será la humedad relativa?

Refiriéndonos a la carta psicrométrica de la figura 13.17, encontramos la temperatura de bulbo seco (24°C) en la escala inferior, y la temperatura de bulbo húmedo (17°C) en la escala curva del lado izquierdo de la carta. Extendiendo estas dos líneas, se intersectan en el punto "A". A partir de este punto, se puede determinar toda la demás información. La humedad relativa es de 50%.

En esa misma muestra de aire, ¿cuál será el punto de rocío?

Partiendo del punto "A" y desplazándonos hacia la izquierda en forma horizontal, la línea corta a la escala de temperatura de punto de rocío en 12.6°C.

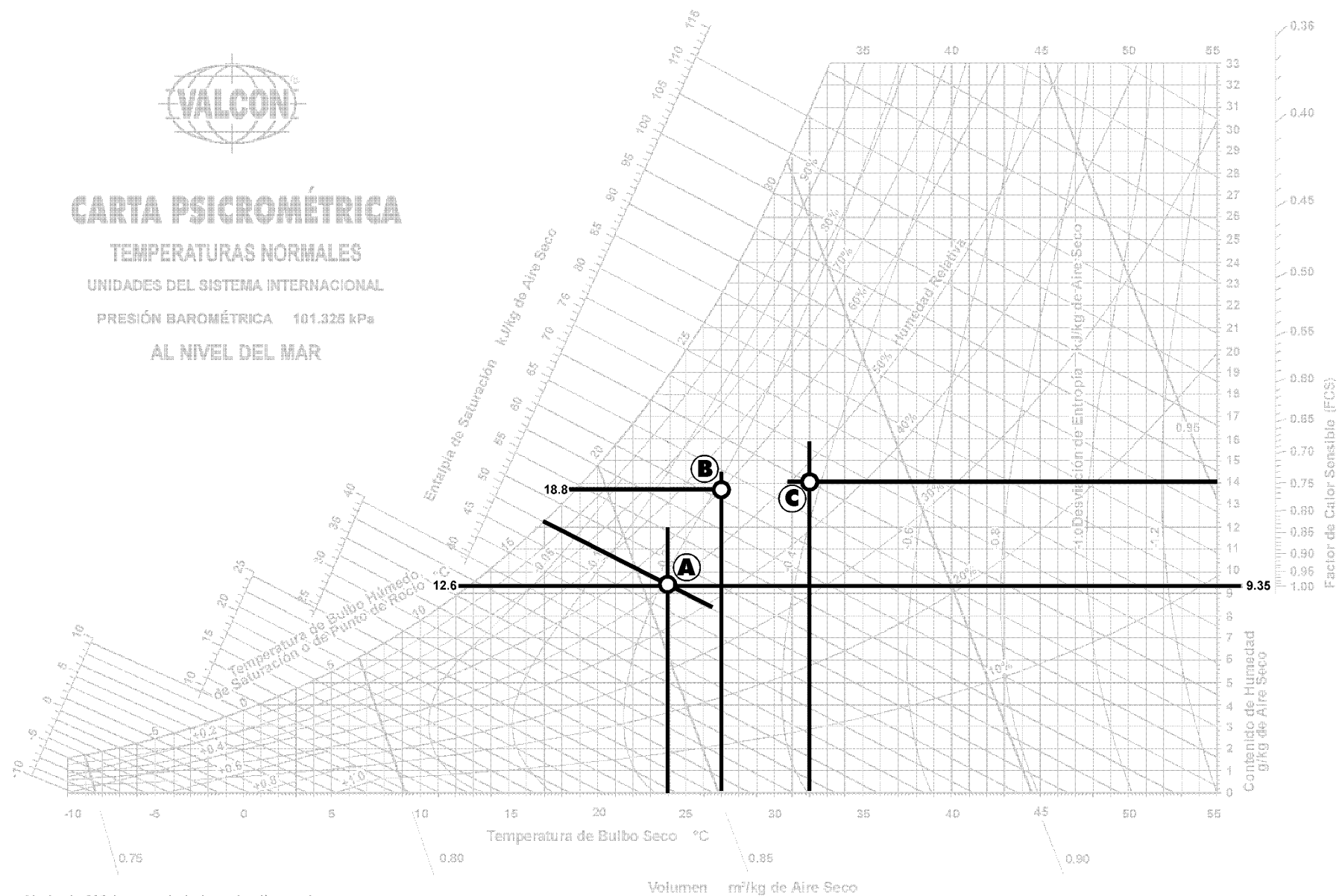
¿Cuál será la humedad absoluta? Partiendo nuevamente del punto "A", en forma horizontal, pero hacia la derecha de la carta, la línea intersecta en la escala de humedad absoluta en un valor de 9.35 g/kg de aire seco.

**Ejemplo:** A una muestra de aire se le midió la humedad relativa, utilizando un higrómetro y ésta es de 60%. Si la temperatura de bulbo seco es de 27°C, ¿cuál será el punto de rocío?

Encontramos el punto donde la temperatura de 27°C de bulbo seco, cruza con la línea de 60% de *hr*, en la fig. 13.17. A este punto lo llamamos "B". Si la muestra de aire en estas condiciones fuera enfriada, sin cambiar su contenido de humedad, lo cual está representado en la carta psicrométrica como una línea horizontal, la línea del punto de rocío sería intersectada aproximadamente en 18.8°C.

**Ejemplo:** Encontrar la *hr* cuando la temperatura de bulbo seco es de 32°C, y el contenido de humedad (presión del vapor de agua) es de 14 g/kg de aire seco.

Primero, se encuentra la línea vertical que representa la temperatura de bulbo seco constante de 32°C. Subiendo a lo largo de esta línea, hasta cruzar la línea horizontal que representa 14 g de humedad por kg de aire seco. A la intersección le llamamos punto "C", (ver fig. 13.17). Este punto cae entre las líneas de 40% y 50% de humedad relativa. La respuesta sería una humedad relativa de 47%.



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Figura 13.17 - Ejemplo del uso de la carta psicrométrica.

**6. Entalpía.-** Las líneas de entalpía constantes en una carta psicrométrica, son las que se muestran en la figura 13.18. Debe notarse que estas líneas, son meramente extensiones de las líneas de bulbo húmedo; puesto que el calor total del aire, depende de la temperatura de bulbo húmedo. La escala del lado izquierdo lejana a la línea curva, da el calor total del aire en kJ/kg (kilojoules por kilogramo) de aire seco, en el sistema internacional o en btu/lb de aire seco, en el sistema inglés. Esta escala aumenta de -6 kJ/kg a la temperatura de -10°C de bulbo húmedo, hasta aproximadamente 115 kJ/kg a 33°C de bulbo húmedo.

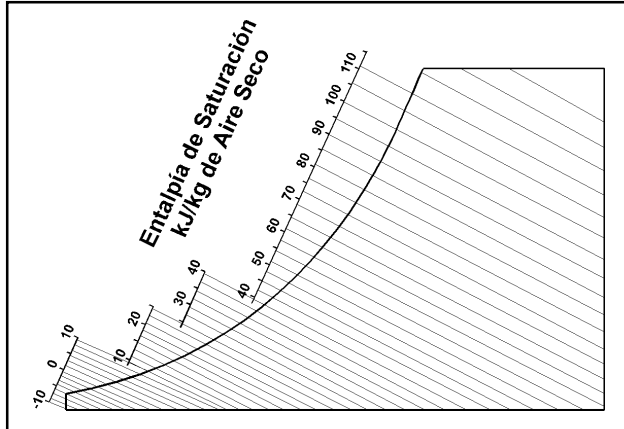


Figura 13.18 - Líneas de entalpía en kJ/kg de aire seco.

**7. Volumen Específico.-** En la figura 13.19, se muestran las líneas del volumen específico constante en una carta psicrométrica. Estas líneas están en un ángulo aproximado de 60° con la horizontal, y van aumentando de valor de izquierda a derecha. Por lo general, el espacio entre cada línea, representa un cambio de volumen específico de 0.05 m³/kg. Cualquier punto que caiga entre dos de estas líneas, naturalmente debe ser un valor estimado. Si se desea saber la densidad del aire a cualquier condición, como ya sabemos, se debe dividir uno entre el volumen específico, puesto que la densidad es la inversa del volumen específico y viceversa. Debido a que la mayoría de los cálculos en trabajos de aire acondicionado, se basan en el peso del aire en lugar del volumen de aire, se recomienda el uso del volumen específico (m³/kg de aire) en vez de la densidad (kg/m³ de aire).

Ahora, echemos un vistazo a la carta psicrométrica de la figura 13.11. Su constitución consiste de la superposición de las siete propiedades descritas, ocupando la misma posición relativa sobre la carta.

En la descripción de cada una de las siete propiedades, se definió la línea constante como una línea que puede contener un número infinito de puntos, cada uno a la misma condición; esto es, si fuésemos a trazar una sola condición del aire, tal como la temperatura del bulbo seco sobre la carta psicrométrica, ésta podría caer en cualquier punto sobre la línea constante, correspondiente a esa temperatura de bulbo seco.

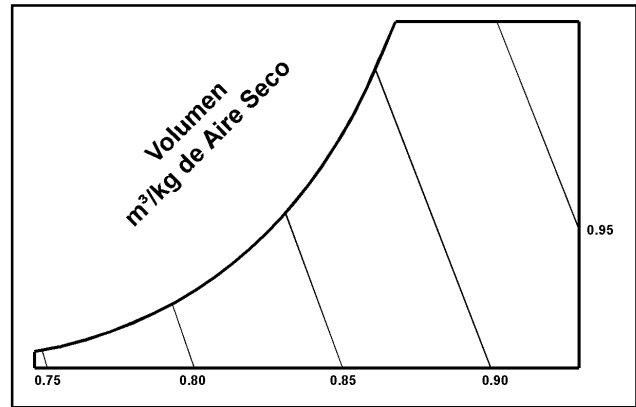


Figura 13.19 - Líneas de volumen específico en m³/kg de aire seco.

Pero ahora, en la carta psicrométrica compuesta, tenemos un número de líneas que se cruzan una con otra; así que si trazamos un punto sobre una línea de bulbo seco constante, este punto también corresponderá a diferentes valores sobre las líneas constantes para la temperatura de bulbo húmedo, punto de rocío, humedad relativa, volumen específico, humedad específica y entalpía. Suponiendo que dos de cualquiera de estas líneas constantes se cruzaran en un punto común sobre la carta, podremos trazar ese punto exactamente, si conocemos dos de cualquiera de esas propiedades del aire. A partir de este punto, podemos entonces movernos a lo largo de las respectivas líneas constantes para las otras propiedades del aire, y podemos leer el valor en sus escalas respectivas, sin tener que recurrir al problema de calcularlos, como vimos en la sección de las tablas psicrométricas. Aunque este método no es tan preciso como el método de las tablas, es mucho más rápido, y el grado de precisión es suficientemente cercano para fines prácticos.

**Ejemplo:** Si a una muestra de aire se le toman las temperaturas de bulbo seco (35°C) y bulbo húmedo (22°C), ¿cuáles serán las demás propiedades?

Primero, trazamos un punto donde estas dos líneas se cruzan, como se muestra en la figura 13.20, y lo marcamos como punto "A". Este es el único punto en la carta donde existen estas dos condiciones (35°C *bs* y 22°C *bh*).

Las demás condiciones pueden encontrarse fácilmente, simplemente nos desplazamos a lo largo de la línea constante correspondiente, leyendo el valor en esa escala.

El orden no es importante, y puede comenzarse por cualquier propiedad. Por ejemplo, la temperatura de punto de rocío. Para determinarla, partimos del punto "A", horizontalmente hacia la izquierda de la carta, y donde cruza la escala de temperatura de bulbo húmedo, esa es la temperatura de punto de rocío, ya que es la misma escala, puesto que en esa línea curva el aire está en su condición de saturación. La temperatura de punto de rocío para este ejemplo es de 15.8°C (punto "B").

El contenido de humedad se determina sobre la escala del lado derecho de la carta; por lo que, partiendo del



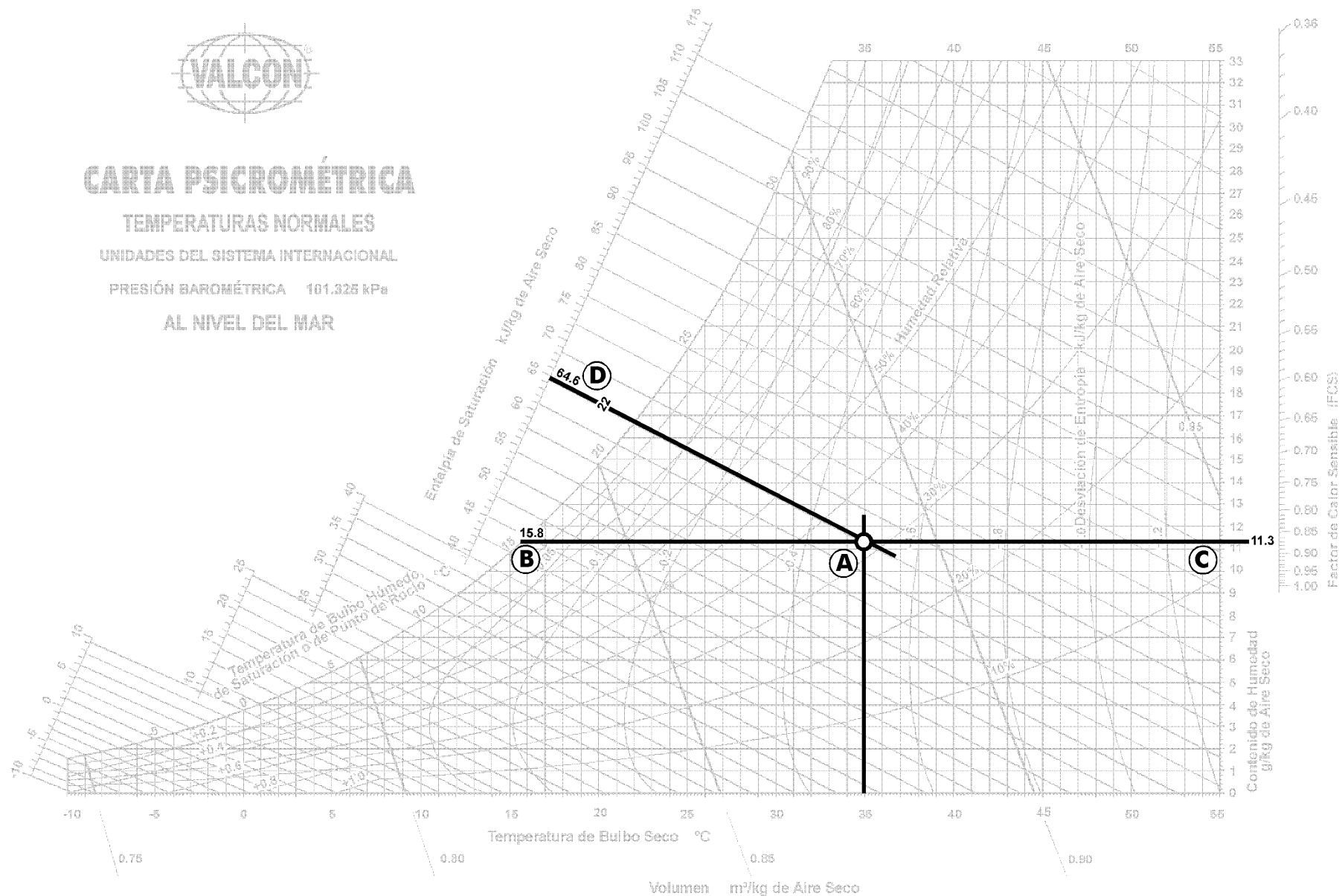
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpia son para el hielo

Figura 13.20 - Ejemplo del uso de la carta psicrométrica para encontrar las propiedades del aire.

punto "A", nos desplazamos horizontalmente hacia la derecha, y cruzamos la escala en aproximadamente 11.3 g/kg de aire seco (punto "C").

La humedad relativa se determina por la posición del punto "A", con respecto a las líneas de humedad relativa de la carta. Examinando de cerca este punto, vemos que está aproximadamente a una quinta parte de la distancia entre las líneas de 30% y 40% de *hr*. Por lo que podemos estimar que la *hr* es de 32%.

La ubicación del punto "A", con respecto a las líneas constantes del volumen específico, indica que cae aproximadamente a 4/5 partes de la distancia entre la línea de 0.85 y 0.90 m<sup>3</sup>/kg de aire seco, ( $4 \div 5 = 0.80$ ). Como hay una diferencia de 0.05 m<sup>3</sup>/kg entre una línea y otra, podemos estimar que el volumen específico es  $0.85 + 0.80 \text{ veces } 0.05$ , o sea 0.89 m<sup>3</sup>/kg de aire seco,  $0.85 + (0.80 \times 0.05) = 0.89$ . La densidad sería lo inverso del volumen específico, o sea  $1 \div 0.89 = 1.12 \text{ kg/m}^3$ .

Extendiendo la línea constante de bulbo húmedo, de 22°C directo hacia arriba y a la izquierda, hasta cortar la escala de calor total o entalpía (punto "D"), podemos leer que la entalpía del aire es de 64.6 kJ/kg de aire seco. Para convertir kilojoules por kilogramo a kilocalorías por kilogramo, dividimos los kJ/kg entre 4.184 ( $64.6 \text{ kJ/kg} \div 4.184 = 15.44 \text{ kcal/kg}$ ). Para convertir los kJ/kg a btu/lb, se dividen los kJ/kg entre 2.326 ( $64.6 \text{ kJ/kg} \div 2.326 = 27.77 \text{ btu/lb}$ ).

Mientras que los valores de las demás propiedades obtenidos en la carta psicrométrica, son muy parecidos a los calculados mediante el método de las tablas psicrométricas, parecería que el valor de la entalpía es considerablemente menos preciso; pero, debe recordarse que en el proceso de acondicionamiento de aire, nos interesa el cambio de calor, en lugar del valor absoluto del calor total. La diferencia entre las tablas y la carta, es consistente a través de todo el rango de temperaturas con las cuales se va a trabajar; así que, los cambios en los valores de entalpía en la carta, serán casi idénticos a los cambios en las tablas.

Como se puede observar, es relativamente simple determinar las propiedades del aire en una carta psicrométrica, conociendo dos (cualquiera) de ellas. Se requiere que a partir de un punto dado en la carta, las demás propiedades se obtengan siguiendo una serie de líneas, que pueden ser horizontales, verticales, diagonales o curvas. La precisión del resultado, depende grandemente de la versión individual, la habilidad para trazar líneas y el método de interpolación. La interpolación significa obtener matemáticamente, los valores de los puntos que caen entre dos líneas; lo cual, en ocasiones, puede consumir una gran cantidad de tiempo y esfuerzo.

Pero, el uso de la carta no se limita solamente a determinar las propiedades de una muestra de aire, también se pueden calcular las cargas térmicas al calentar o enfriar la muestra de aire, con o sin humidificación o deshumidificación, cambios en el volumen, mezclas de aire, etc.

## Enfriamiento de Aire

En el enfriamiento o calentamiento del aire, desde condiciones indeseables hasta condiciones que son adecuadas para el confort humano, se debe considerar la adición o remoción de dos tipos de calor: calor sensible y calor latente. A continuación, veremos algunos ejemplos de cambios de calor sensible y cambios de calor latente.

## Enfriamiento Sensible

El término «cambio de calor sensible», se refiere a un cambio en calor que provocará un cambio en la temperatura del aire. Con frecuencia, al enfriar el aire seco y caliente del desierto, o al calentar aire helado, se requerirá tan sólo un cambio en el calor sensible del aire. Puesto que un cambio en el calor sensible del aire no afectará la cantidad de humedad de éste; dicho cambio puede graficarse en la carta psicrométrica, paralelo a las líneas constantes de punto de rocío. Esto significa que el punto de rocío del aire, no cambiará mientras sea solamente calor sensible el que se agrega o se quita. Por otra parte, el peso total del aire en kg permanece constante, pero su volumen (m<sup>3</sup>/kg) sí cambia, puesto que el aire se contrae al ser enfriado.

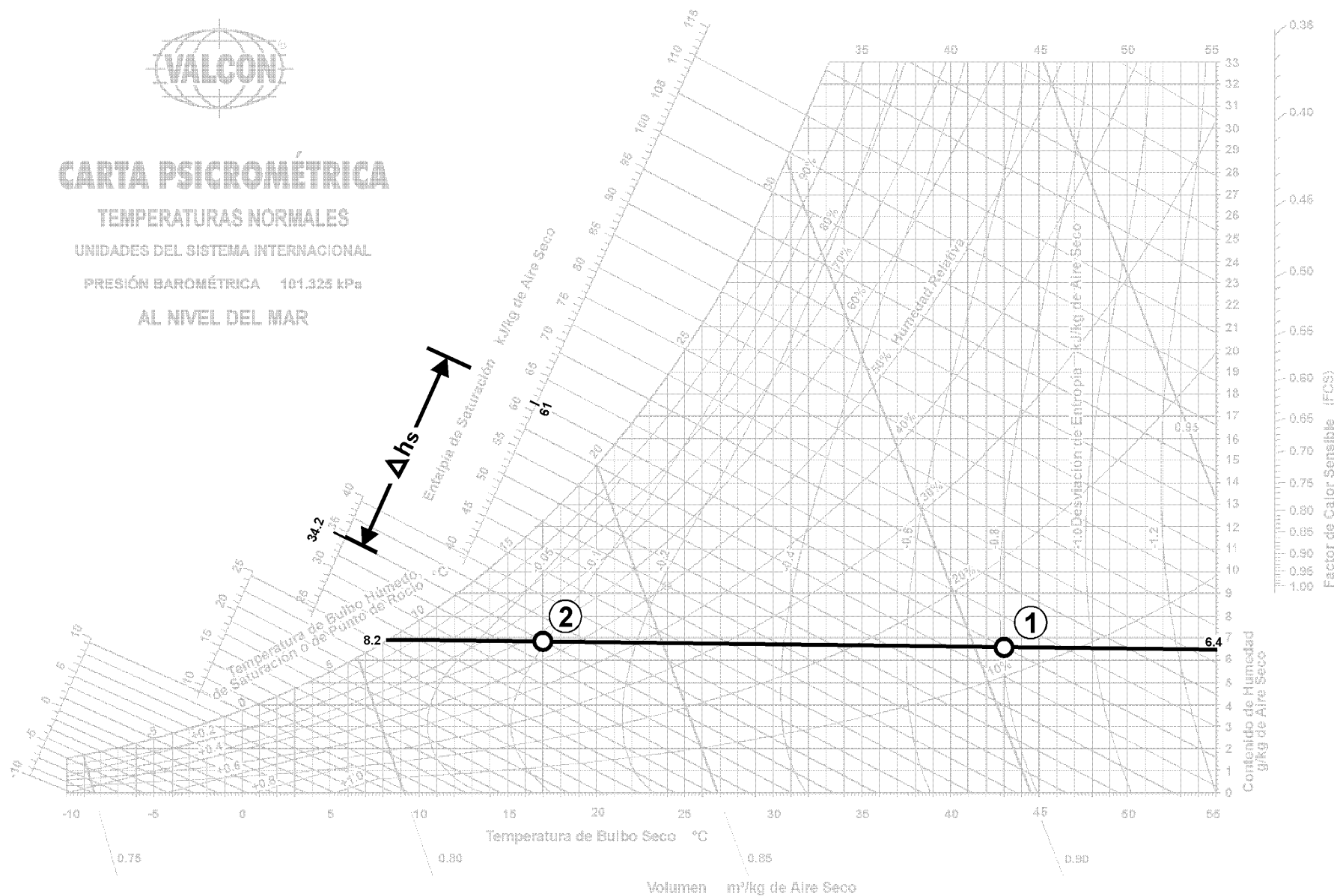
Veamos un ejemplo de enfriamiento sensible de aire. Si originalmente está a 43°C de *bs*, y 21°C de *bh*, y se quiere enfriarlo a 17°C de *bs* y 12°C de *bh*. Comparando las propiedades de la condición inicial (1), con las de la condición final (2), podemos ver que hemos aumentado la *hr* del aire de aproximadamente 13%, a aproximadamente 56%, como se muestra en la figura 13.21, aunque no se ha cambiado el contenido de humedad del aire. Esto es porque al enfriar el aire, se le reduce su capacidad de retención de humedad en saturación, y consecuentemente, se aumenta la relación de humedad en el aire, con la máxima que podría retener a esa temperatura de *bs*.

Esta línea de enfriamiento sensible (1-2), es casi paralela a las líneas constantes de contenido de humedad, que son las mismas de la temperatura de punto de rocío; por lo que estos dos valores son constantes y no cambian durante el enfriamiento sensible. En este ejemplo, el contenido de humedad es de aproximadamente 6.4 g/kg de aire seco, y la temperatura de punto de rocío es de 8.2°C.

También podemos ver que al enfriar el aire, se ha disminuido su volumen específico de aproximadamente 0.905 m<sup>3</sup>/kg, que tenía en el punto 1, a aproximadamente 0.835 m<sup>3</sup>/kg en el punto 2. Consecuentemente, al disminuir su volumen específico, aumenta su densidad. Como es lógico, el aire con un cierto contenido de humedad, mientras más frío está es más denso.

Al graficar el cambio de entalpía para este efecto de enfriamiento sensible, se puede ver que en la condición 1, contenía 61 kJ/kg (14.58 kcal/kg), mientras que en la condición 2 contiene 34.2 kJ/kg (8.17 kcal/kg). Si restamos la entalpía 2 de la entalpía 1, llegamos a un cambio total de entalpía de 6.41 kcal/kg. Por lo tanto, por cada kilogramo de aire que se enfríe de la condición





inicial a la final, se deben quitar 6.41 kcal/kg. Este cambio de calor sensible se muestra en la figura 13.21 como  $h_s$ .

En la figura 13.22, se indican los resultados del enfriamiento sensible para las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y de punto de rocío, y también para el volumen al pasar el aire a través del equipo enfriador, en este caso, el serpentín (evaporador).

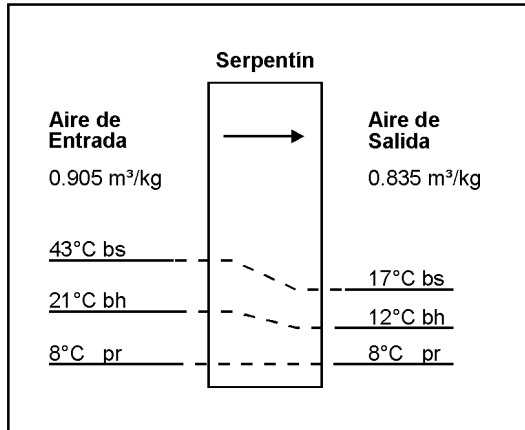


Figura 13.22 - Ejemplo de enfriamiento sensible a través del serpentín del equipo de refrigeración.

Aunque el ejemplo anterior muestra un proceso de enfriamiento sensible solamente, los cálculos para hacer exactamente lo opuesto, como los sistemas de calefacción en invierno, son los mismos. Esto es, cada kilogramo de aire calentado de 17°C de *bs* y 12°C de *bh*, hasta 43°C de *bs* y 21°C de *bh*, requerirá que se le agreguen 6.41 kilocalorías. Cualquier fuente de calor seco, ya sea un horno, un serpentín de agua caliente o un calentador eléctrico, producirá un cambio en el calor sensible solamente. Sin embargo, en el proceso de enfriamiento, la superficie exterior del serpentín de enfriamiento (evaporador), debe estar arriba de la temperatura de punto de rocío del aire, o se condensará la humedad, resultando en una transferencia de su calor latente también.

## Enfriamiento y Deshumidificación

La combinación de enfriamiento y deshumidificación, se encuentra en prácticamente todos los sistemas de aire acondicionado. La deshumidificación misma, no puede llevarse a cabo por la refrigeración mecánica, sin remover también el calor sensible. Si solamente se desea deshumidificar individualmente, entonces deben utilizarse desecantes químicos.

La deshumidificación es la remoción del vapor de agua presente en el aire. La cantidad del vapor de agua, presente dentro de una zona ocupada, variará dependiendo del número de personas presentes y de su actividad, la condición del aire exterior, la estructura del edificio y la cantidad de infiltración.

Al enfriamiento y deshumidificación del aire para confort humano, se le conoce comúnmente como aire acondicionado. Esto no es totalmente correcto, ya que el

término «aire acondicionado», se refiere a cualquiera o todas las fases de enfriar, calentar, ventilar, filtrar, distribuir, etc., el aire, para que cumpla los requerimientos del espacio acondicionado. El enfriamiento y deshumidificación del aire, es la fase del aire acondicionado que le concierne al técnico en refrigeración, ya que normalmente, requiere el uso de un equipo de refrigeración mecánica. Para poder producir el enfriamiento y la deshumidificación requeridos para el espacio acondicionado, el equipo de refrigeración debe estar funcionando adecuadamente, y debe tener la capacidad correcta para la aplicación.

Cuántas veces hemos oído al desesperanzado cliente decir: «Sí, el equipo trabaja bien, pero no enfría lo suficiente». Los cálculos para determinar la carga térmica en el espacio, y los requerimientos de la distribución del aire, no serán cubiertas en este texto; pero, sí podemos hacer una revisión rápida con la ayuda de la carta psicrométrica, para ver qué tanta capacidad tiene un equipo de refrigeración, bajo condiciones reales de trabajo.

Las herramientas necesarias para estos cálculos consisten de un psicrómetro, un instrumento para medir velocidades del aire (un anemómetro, un tubo de pitot, etc.), una calculadora y una carta psicrométrica.

Por ejemplo, revisaremos la capacidad de un sistema de aire acondicionado, el cual ha sido clasificado por el fabricante en 10 T.R o sea 30,240 kcal/h (120,000 btu/h). En nuestra prueba de capacidad, no usaremos las mismas condiciones de prueba que el fabricante, pero podemos aproximarnos, utilizando 100% de aire de retorno a la entrada del evaporador en un día caluroso de verano, ajustando la velocidad del ventilador para que dé una velocidad del aire de aproximadamente 150 m/min, sobre la superficie del serpentín.

Mientras que este ejemplo se refiere específicamente al acondicionamiento de aire de verano, las condiciones de humedad controlada se aplican igualmente al almacenamiento de carne, por ejemplo, en una cámara de conservación.

Lo primero que hay que hacer, es medir las temperaturas de *bs* y de *bh* del aire que entra y sale del serpentín del evaporador. En este ejemplo, las condiciones iniciales del aire son de 27°C de *bs* y de 20°C de *bh*; las condiciones a la salida o finales son de 10°C de *bs* y 9°C de *bh*. Las lecturas de la velocidad del aire sobre el serpentín, se sacan dividiendo mentalmente la superficie frontal del serpentín en cuadros de entre 5 y 8 cm (2 a 3 pulg.). Se toman lecturas en cada cuadro imaginario, se registran estas lecturas y se saca un promedio. Mientras más lecturas se tomen, mayor será la precisión. En nuestro ejemplo, usaremos una velocidad promedio del aire de 158 m/min, y un evaporador de 91 cm de largo por 46 cm de alto.

El primer paso para calcular la capacidad del sistema, es trazar las condiciones del aire a la entrada y a la salida del serpentín sobre la carta psicrométrica, tal como se

muestra en la figura 13.23. El punto 1 representa las condiciones de entrada del aire, y el punto 2 representa de salida. El punto 3, representa la temperatura aproximada real del serpentín. El punto 3 se encuentra extendiendo la línea recta que conecta los puntos 1 y 2, hasta la curva de saturación. Este punto, también llamado el «punto de rocío del aparato», es la temperatura promedio del agua que se condensa sobre la superficie del serpentín. Conforme sea la condición se mueve a la izquierda de la carta, removiendo calor del aire, pero también humedad.

Enseguida, encontramos el cambio de calor total en un kilogramo de aire, restando la entalpía en la condición de salida, de la entalpía en la condición de entrada:

$$ht = 57.5 - 27.0 = 30.5 \text{ kJ/kg} \quad (13.74 - 6.45 = 7.29 \text{ kcal/kg}).$$

Puesto que el volumen del aire sobre el serpentín, es controlado por el ventilador, y que éste mismo aire cambiará de densidad y volumen específico al cambiar la temperatura a través del sistema, el siguiente paso será determinar el peso total del aire que circula por el ventilador. El peso del aire no cambiará, puesto que la materia no puede ser creada ni destruida.

El área frontal del evaporador es de 91 x 46 cm o 0.4186 m<sup>2</sup> (0.91 m x 0.46 m). Si multiplicamos esto por la velocidad del aire sobre el serpentín, tendremos un valor de 66.138 m<sup>3</sup>/min (0.4186 m<sup>2</sup> x 158 m/min). Ahora, para poder convertir este volumen de aire a peso, dividimos los m<sup>3</sup>/min entre el volumen específico del aire a las condiciones de entrada, ya que siempre debemos hacer los cálculos para el punto al cual se tomó la medición de la velocidad del aire. Un vistazo a la carta, muestra que la condición de entrada cae un poco menos de la mitad, entre las líneas constantes de volumen de 0.85 y 0.90 m<sup>3</sup>/kg de aire seco. Podemos estimar por interpolación, que el valor de volumen específico es de 0.87 m<sup>3</sup>/kg; así pues, tenemos un peso total de aire circulado de 76.02 kg/min (66.138 ÷ 0.87).

Ahora, del cálculo anterior, tenemos un cambio de entalpía de 7.29 kcal/kg y tenemos 76.02 kg de aire circulando por minuto. Multiplicando estos dos valores, nos dará el cambio de entalpía en el aire por minuto, o sea, 7.29 x 76.02 = 554.2 kcal/min. La capacidad total del equipo, bajo condiciones reales, se obtiene multiplicando las kcal/min por 60, para obtener las kcal/h, 554.2 x 60 = 33,252 kcal/h, que son aproximadamente 11 T.R.

Para efecto de simplificar los cálculos, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$Qt = \frac{A \times V \times \Delta ht \times 60}{v} \quad (\text{kcal/h})$$

donde:

Qt = calor total (kcal/h).

A = área frontal del serpentín (m<sup>2</sup>).

V = velocidad del aire entrando al serpentín (m/min).

Δht = cambio de entalpía, de la carta psicrométrica (kcal/kg).

v = volumen específico del aire entrando al serpentín (m<sup>3</sup>/kg).

### Ejemplo:

$$Qt = \frac{0.4186 \text{ m}^2 \times 158 \text{ m/min} \times 7.29 \text{ kcal/kg} \times 60 \text{ min/h}}{0.87 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$Qt = 33,252 \text{ kcal/h}$$

## Cambios de Calor Latente y Sensible

Algunas veces, es deseable calcular los cambios de calor latente y de calor sensible, en las condiciones del aire según se muestra en la figura 13.23. Cuando se traza sobre la carta psicrométrica un cambio de calor sensible, el resultado es una línea horizontal, y el cambio de puro calor latente, es una línea vertical. La condición resultante en el ejemplo anterior, figura 13.23, no es una línea horizontal ni vertical, sino que cae en medio de estas dos. Si trazamos una línea vertical paralela a las líneas de bs del punto 1, y trazamos una línea horizontal paralela a las líneas de punto de rocío del punto 2, las tres líneas formarán un triángulo rectángulo. Las longitudes de las líneas vertical y horizontal, representarán los dos componentes del calor total: calor latente y calor sensible. Si ahora trazamos una línea paralela a las líneas constantes de bh, partiendo de la intersección de las líneas vertical y horizontal, hasta la escala de entalpía, veremos que el calor total se divide en dos componentes. El componente más bajo en la escala, es el cambio de calor sensible y la parte alta, es el cambio de calor latente. Encontramos, pues, que esta línea intersecta la escala de entalpía 45 kJ/kg. Entonces, el cambio de calor sensible se saca restando el contenido de calor en el punto 2, que es 27 kJ/kg de los 45 kJ/kg, lo que nos da 18 kJ/kg (Δhs). El cambio de calor latente se encuentra restando los 45 kJ/kg del calor total en el punto 1, lo que nos da (57.5 - 45) 12.5 kJ/kg (Δh).

## Remoción de Humedad

Con mucha frecuencia, los técnicos de servicio requieren información sobre la cantidad de humedad que remueve un equipo de aire acondicionado.

Para determinar esa cantidad de agua removida del aire, se debe calcular el peso total del aire circulado, de la misma manera que lo hicimos en el cálculo de capacidad anterior. Se trazan las líneas constantes de punto de rocío para las condiciones inicial y final, figura 13.23, hacia la derecha a la escala de humedad específica. El cambio de humedad específica es de 5 g/kg de aire seco (11.9 - 6.9). Multiplicando este valor por el peso total de aire circulado por hora, nos dará la cantidad de humedad removida en gramos por hora. En este caso, los 76.02 kg/min los multiplicamos por 60 para tener 4,561.2 kg aire/h y luego por 5 g/kg aire, lo que nos da un resultado de 22,806 g/h que es igual a 22.81 kg/h. Si se desea saber en volumen, un kilogramo de agua es igual a un litro de agua; por lo que, la cantidad de agua que removerá del aire este equipo de aire acondicionado es de 22.81 kg/h = 22.81 l/h.



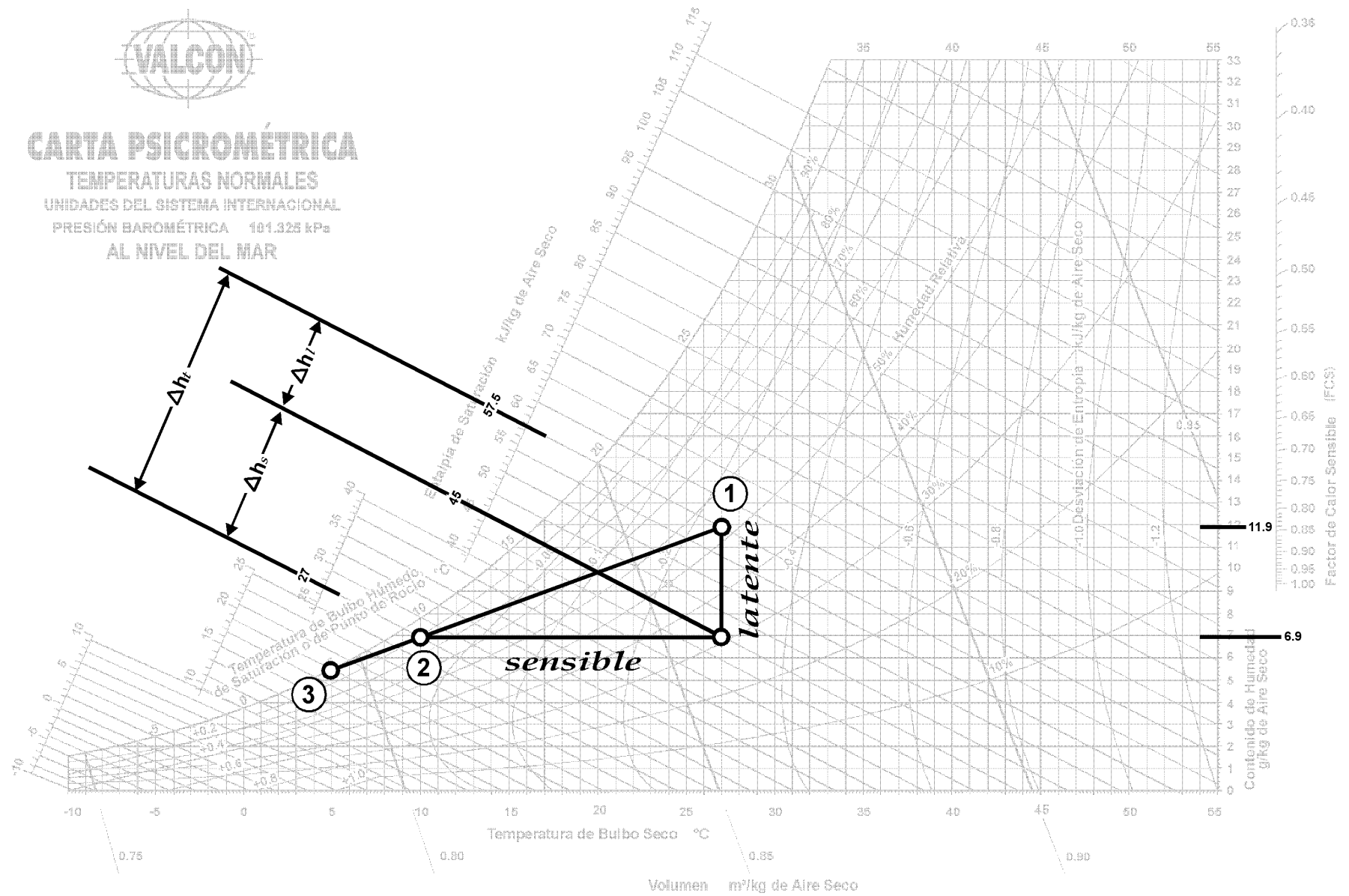
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpia son para el hielo

Figura 13.23 - Ejemplo de cambios de calor sensible y calor latente.

## Mezclando Aire a Diferentes Condiciones

En el acondicionamiento de aire, con mucha frecuencia se requiere mezclar aire a diferentes temperaturas de  $bh$  y de  $bs$ , para lograr una determinada condición final de aire. La mayoría de las aplicaciones de aire acondicionado comercial, requieren de un cierto volumen de aire exterior fresco que sea introducido al espacio ocupado. La mayoría de las leyes locales o estatales, requieren que se reemplace entre 0.21 y 0.42 m<sup>3</sup>/min de aire por persona, para evitar que se envíe o se contamine el aire interior. Puesto que la introducción del 100% de aire exterior no es práctico, desde el punto de vista de costo operacional, se debe mezclar el aire exterior requerido, con un porcentaje de aire de retorno, antes de calentarlo o enfriarlo.

Esto de mezclar dos cantidades de aire a diferentes temperaturas y contenidos de humedad, también se usa extensivamente en el acondicionamiento del aire, donde se requieren condiciones de abastecimiento de aire constantes, sin importar las condiciones del aire a la entrada. En este método, una porción del aire entrante es desviada del serpentín de enfriamiento (o del de calefacción), y luego mezclada con el aire tratado para proporcionar las condiciones deseadas, como se muestra en la figura 13.24-A. Otro método, es desviar una parte del aire de retorno y la otra mezclarla con el aire exterior, antes de entrar al aparato acondicionador, como se muestra en la figura 13.24-B.

Desde luego, cuando no sea necesario, se pueden mezclar cantidades de aire exterior con aire de retorno, sin hacer ningún desvío. La mezcla completa pasa a través del aparato acondicionador.

En cualquiera de estos procesos de mezclado, la condición resultante o final, dependerá del peso o de la temperatura de cada cantidad individual de aire. De nuevo, para una precisión absoluta, deberán emplearse los pesos de las mezclas, aunque para pequeñas diferencias en temperaturas y sacar los cálculos respectivos en el campo, se pueden emplear las relaciones de los m<sup>3</sup>/min individuales con los m<sup>3</sup>/min totales.

Por ejemplo, si se mezclan 0.71 m<sup>3</sup>/min de aire exterior, a 35°C de  $bs$  y 24°C de  $bh$ , con 2.12 m<sup>3</sup>/min de aire de retorno a 27°C de  $bs$  y 19°C de  $bh$ , el flujo total del aire será de 2.83 m<sup>3</sup>/min. Esto dará una relación de mezcla de 25% de aire exterior y 75% de aire recirculado (en base a volumen).

En una carta psicrométrica trazamos las condiciones del aire exterior (punto 1), y las del aire recirculado o de retorno (punto 2), como se muestra en la figura 13.25.

Calculando los pesos de estas cantidades de aire, tenemos que el peso del aire exterior se calcula con la densidad. Como ya sabemos, la densidad es lo inverso del volumen específico, por lo que determinamos a partir de la carta psicrométrica, que el volumen específico del aire exterior, es de aproximadamente 0.893 m<sup>3</sup>/kg de aire.

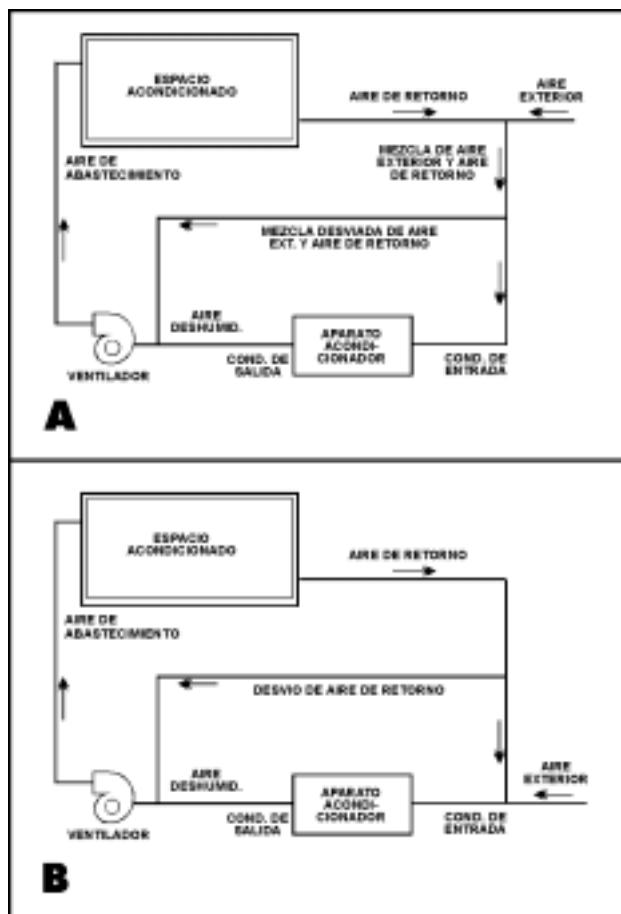


Figura 13.24 - Dibujos esquemáticos de los sistemas de desvío de aire. "A", desvío de una mezcla de aire exterior y aire de retorno; "B", desvío de aire de retorno solamente.

Este dato corresponde a las condiciones del aire en el punto 1 de la figura 13.25. El peso del aire exterior es:  $1/0.893 \times 0.71 = 0.795$  kg/min. El peso del aire recirculado se calcula procediendo de la misma manera y tenemos  $1/0.814 \times 2.12 = 2.604$  kg/min, y el peso total del aire es  $0.795 + 2.604 = 3.399$  kg/min. Los porcentajes (ahora en peso) son 24.45% de aire exterior y 75.54% de aire de retorno.

La diferencia en porcentajes es aproximadamente de 0.5%, lo que a una temperatura de -9°C da un error de solamente 0.04°C. Debido a que con un termómetro utilizado en el campo no se puede leer con esta precisión, se pueden usar los m<sup>3</sup>/min como una base para los cálculos de mezclas.

La línea recta que une los puntos 1 y 2, en la figura 13.25, representa el trayecto de la temperatura de la mezcla de estas dos condiciones del aire, en cualquier proporción. Los puntos extremos 1 y 2, representan el 100% de la mezcla a esas temperaturas; es decir, si la mezcla constituye 99% de aire a 35°C de  $bs$  y 24°C de  $bh$ , el restante 1% sería aire a 27°C de  $bs$  y 19°C de  $bh$ , y este punto estaría muy cercano al punto 1. Si la mezcla contiene 50% de cada una de las dos condiciones, la condición de la mezcla resultante caerá sobre la línea, en un punto a la mitad de la distancia entre 1 y 2.



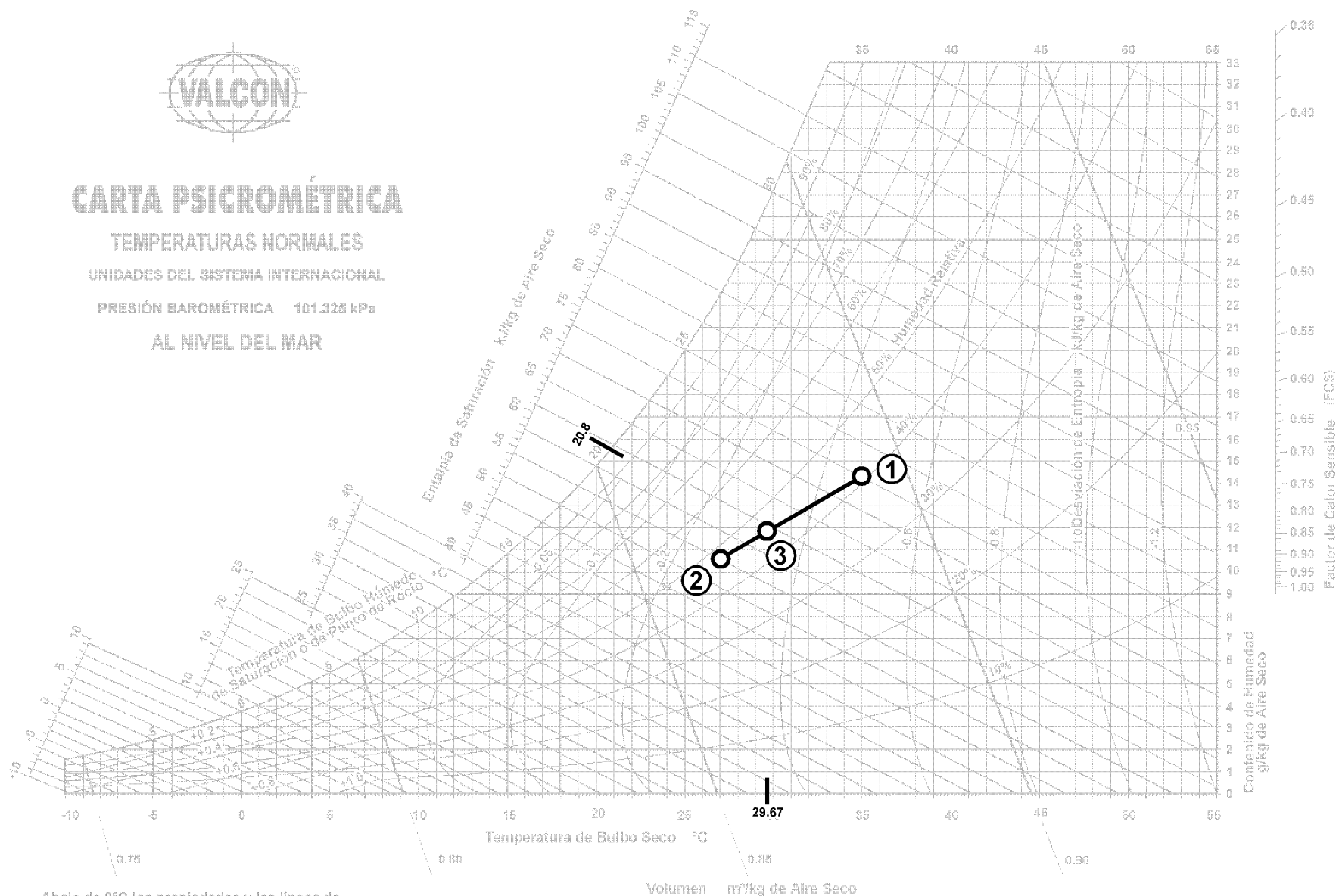
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpia son para el hielo

Figura 13.25 - Ejemplo de mezclado de aire a diferentes condiciones.

Por ejemplo, si se mezclan 3.68 m<sup>3</sup>/min de aire exterior a las condiciones 1, y 7.36 m<sup>3</sup>/min de aire recirculado a las condiciones 2, antes de enfriarlos, la condición resultante antes de entrar al equipo de enfriamiento, caerá sobre la línea 1-2 y a una tercera parte ( $3.68 \div 11.04 \times 100 = 33.33\%$ ) de la distancia total entre los dos puntos.

Puesto que la distancia entre los dos puntos es también la diferencia de las temperaturas de *bs*, la temperatura de *bs* final, será una tercera parte (33.33%) de 35-27 más la temperatura menor; esto es,  $t_{bs} = (35-27)(0.3333) + 27 = 29.67^\circ\text{C}$ , que es la temperatura de *bs* de la mezcla. Puesto que es más fácil sumar que restar, siempre usamos el porcentaje de la cantidad de aire a mayor temperatura que se va a mezclar, multiplicando por la diferencia total de temperatura, y sumando esto al valor más bajo de temperatura.

Para encontrar la temperatura de *bh* de la mezcla resultante, simplemente localizamos el punto donde la línea de la mezcla cruza la línea constante de temperatura de *bs* de 29.67°C. Este punto (3) es la condición de la mezcla, y de aquí podemos seguir la línea constante de temperatura de *bh* hacia la izquierda, hasta donde cruza la escala para encontrar la temperatura de 20.8°C. Las demás propiedades, pueden encontrarse siguiendo las líneas correspondientes, a partir del punto 3.

**Ejemplo:** En un proceso típico de acondicionamiento de aire, se requiere que dentro del espacio acondicionado, el aire llegue a las siguientes condiciones: 11°C de *bs* y 90% de *hr*. El ventilador del equipo tiene una capacidad para manejar 60 m<sup>3</sup>/min. El aire de retorno, sale del cuarto con una temperatura de *bs* de 27°C y una temperatura de *bh* de 18°C. Las condiciones de diseño de verano del aire exterior, son de 34°C de *bs* y 24°C de *bh*. Para obtener las condiciones deseadas en el cuarto, la mezcla de aire debe llegar al equipo con una temperatura de *bs* de 29°C y 20°C de *bh*. ¿Qué cantidad de aire de retorno se debe recircular? y ¿qué cantidad de aire exterior se debe mezclar con el aire recirculado?

Primeramente, trazamos en la carta psicrométrica los puntos correspondientes a las cuatro condiciones del aire. Si unimos estos puntos, como se muestra en la figura 13.26, las líneas resultantes representan un proceso típico de aire acondicionado. El aire exterior (1) se mezcla con el aire que retorna del cuarto, (2) y entran luego éstos al equipo acondicionador (3). La mezcla de aire fluye a través del equipo, con lo que disminuye su contenido de humedad y su temperatura (línea 3-4). Cuando sale del equipo acondicionador (4), el aire queda a las condiciones requeridas para entrar al cuarto. Dentro del cuarto, el aire aumenta su contenido de humedad y su temperatura (línea 4-2), y sale del cuarto nuevamente a las condiciones del punto (2). Se inicia otro proceso repitiéndose el ciclo.

Podemos observar en la figura 13.26, que el punto (4) no llega a la temperatura de saturación, por lo que el enfriamiento es solamente sensible.

Simultáneamente a la resolución de este ejemplo, iremos definiendo y describiendo algunos términos, procesos y factores, que son usuales en cálculos de aire acondicionado.

La cantidad de aire de retorno que se debe recircular, se calcula de la siguiente manera: Como vimos en el ejemplo anterior, la distancia entre las condiciones de aire exterior y las condiciones de aire de retorno (línea 2-1), corresponde también a la diferencia de temperaturas de *bs*; por lo que, si la mezcla debe entrar al aparato con una temperatura de *bs* de 29°C, el porcentaje de aire de retorno en esta mezcla es:  $(29-27) \div (34-27) = 0.2857$  o sea, 28.57% de volumen total. Si el ventilador tiene capacidad para manejar 60 m<sup>3</sup>/min, entonces las cantidades de aire que se deben mezclar son:

$$\begin{aligned}\text{Aire de retorno} &= 60 \text{ m}^3/\text{min} \times 0.2857 = 17.14 \text{ m}^3/\text{min} \\ \text{Aire exterior} &= 60 \text{ m}^3/\text{min} \times (1-0.2857) = 42.86 \text{ m}^3/\text{min} \\ &60.00 \text{ m}^3/\text{min}\end{aligned}$$

**Factor de Calor Sensible (FCS).**- Es la relación de calor sensible con respecto al calor total, siendo este último la suma de los calores sensible y latente. Esta relación se expresa así:

$$\text{FCS} = \frac{h_s}{h_s + h_l} = \frac{h_s}{h_t}$$

En una carta psicrométrica, los valores del factor de calor sensible (FCS), corresponden a la escala vertical del lado derecho de la carta, paralela a la escala de humedad absoluta.

**Factor de Calor Sensible del Cuarto (FCSC).**- Es la relación del calor sensible del cuarto, con respecto a la suma de calor sensible y latente en dicha área, y se expresa con la siguiente fórmula:

$$\text{FCSC} = \frac{h_{sc}}{h_{sc} + h_{lc}} + \frac{h_{sc}}{h_{tc}} = \frac{(\text{Calor Sensible del Cuarto})}{(\text{Calor Total del Cuarto})}$$

La línea que une los puntos 4 y 2, en nuestro ejemplo de la figura 13.26, representa el proceso psicrométrico del aire abastecido al cuarto, y se le llama línea de "Factor de Calor Sensible del Cuarto". El aire que entra al cuarto acondicionado, debe ser capaz de compensar las cargas dentro del mismo, tanto del calor latente como de calor sensible.

Esta línea se puede dividir en sus componentes de calor sensible y calor latente, igual que como lo hicimos en el ejemplo de la figura 13.23. Si trazamos las líneas correspondientes, obtenemos los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\Delta h_t &= 51 - 29.4 = 21.6 \text{ kJ/kg} (= 12.19 - 7.03 = 5.16 \text{ kcal/kg}). \\ \Delta h_s &= 46 - 29.4 = 16.6 \text{ kJ/kg} (= 11.00 - 7.03 = 3.97 \text{ kcal/kg}). \\ \Delta h_l &= 51 - 46 = 5.0 \text{ kJ/kg} (= 12.19 - 11.00 = 1.19 \text{ kcal/kg}).\end{aligned}$$

$$\text{FCSC} = \frac{3.97}{5.16} = 0.769$$

Lo anterior significa que el calor total que se debe abatir en el cuarto, son 5.16 kilocalorías por cada kilogramo de aire, de las cuales 3.97 (77%) son de calor sensible y 1.19 (23%) son de calor latente. De esta manera, si se



# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR

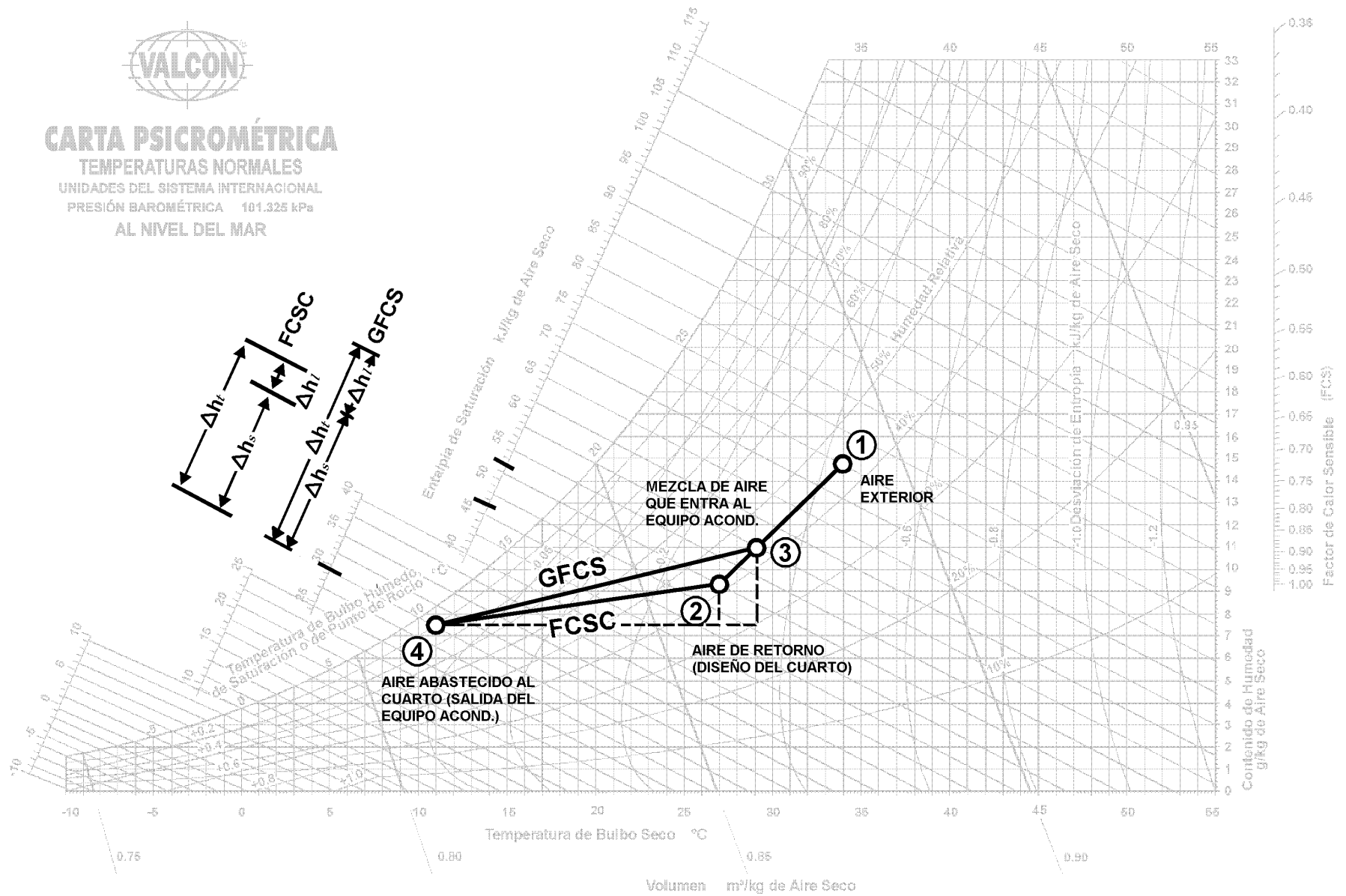


Figura 13.26 - Proceso de aire acondicionado típico, mostrando las líneas de FCSC y GFCS.



abastece aire en las condiciones y cantidad adecuadas, los requerimientos del cuarto estarán satisfechos, siempre y cuando las temperaturas de *bs* y *bh* del aire abastecido, caigan sobre esta línea.

Existe otra forma de trazar la línea 2-4 (FCSC) sobre la carta psicrométrica, aún sin conocer las condiciones del aire de abastecimiento (punto 4). Esta consiste en utilizar el círculo de alineación y el valor del factor de calor sensible del cuarto (FCSC) calculado. El círculo de alineación, es un punto de referencia que se incluye en todas las cartas psicrométricas, y corresponde a la intersección de 24°C de *bs* y una *hr* de 50% (en algunos textos se usa la temperatura de *bs* de 27°C). El procedimiento es como sigue:

- a) Se traza una línea base desde el círculo de alineación, hasta el valor del FCSC calculado (0.769), en la escala vertical que se encuentra en la parte superior derecha de la carta.
- b) La línea del factor de calor sensible del cuarto, se traza dibujando una línea paralela a la línea base dibujada en el inciso (a), partiendo de las condiciones del aire de retorno (punto 2), hasta cruzar la línea de saturación.

**Gran Factor de Calor Sensible (GFCS).** - Es la relación entre el calor sensible total, con respecto a la carga total de calor que debe manejar el equipo acondicionador. Esta incluye los calores sensible y latente, tanto del aire de retorno como del aire exterior. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$GFCS = \frac{h_{st}}{h_{st} + h_{lt}} = \frac{h_{st}}{GCT} = \frac{(\text{Calor Sensible Total})}{(\text{Gran Calor Total})}$$

A la línea que resulta al unir los puntos (3) y (4), se le llama línea de "Gran Factor de Calor Sensible", y representa el proceso psicrométrico del aire al fluir a través del equipo acondicionador. En nuestro ejemplo, cuando el aire fluye a través del equipo acondicionador, disminuyen su contenido de humedad y su temperatura.

Nuevamente, esta línea se puede dividir en sus componentes de calor latente y sensible. Trazando las líneas correspondientes obtenemos:

$$\begin{aligned}\Delta h_t &= 57.5 - 29.4 = 28.1 \text{ kJ/kg} \quad (13.74 - 7.03 = 6.71 \text{ kcal/kg}) \\ \Delta h_s &= 48.0 - 29.4 = 18.6 \text{ kJ/kg} \quad (11.47 - 7.03 = 4.44 \text{ kcal/kg}) \\ \Delta h_l &= 57.5 - 48.0 = 9.5 \text{ kJ/kg} \quad (13.74 - 11.47 = 2.27 \text{ kcal/kg})\end{aligned}$$

$$GFCS = \frac{4.44}{6.71} = 0.662$$

La línea GFCS, al igual que la línea FCSC, pueden trazarse en la carta psicrométrica, sin conocer la condición del aire de abastecimiento, utilizando el GFCS calculado, la condición de la mezcla de aire que entra al aparato, la escala del FCS y el círculo de alineación de la carta psicrométrica.

**Cantidad de Aire Requerido.** En un párrafo anterior mencionamos que el punto (4), corresponde a las condiciones del aire que entra al cuarto y que son las mismas del aire que sale del equipo acondicionador. Esto no es

totalmente cierto, ya que en la práctica real, el aire que sale del equipo acondicionador antes de entrar al cuarto, tiene una ganancia de calor. Este aumento de calor se debe a que es manejado por un ventilador y forzado a circular por un ducto. Esta ganancia debe de considerarse al estimar la carga de enfriamiento, lo cual no es el objetivo de este texto; pero, para facilitar la explicación, aquí las consideraremos como la misma temperatura. En un sistema normal bien diseñado y bien aislado, la diferencia de temperaturas entre el aire que sale del aparato y el aire que entra al cuarto, es de tan sólo unos pocos grados.

La cantidad de aire requerida para satisfacer la carga del cuarto, puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$m^3/\text{min} = \frac{CSC}{16.75 (t_c - t_{aa})}$$

donde:

CSC = Calor Sensible del Cuarto kcal/h).

16.75 = Valor constante

$$\left( 0.244 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \times \frac{60 \text{ min/h}}{0.874 \text{ m}^3/\text{kg}} \right) = 17.37 \frac{\text{kcal min}}{^\circ\text{C h m}^3}$$

$t_c$  = Temp. del cuarto, *bs* (°C)

$t_{aa}$  = Temp. del aire de abastecimiento, *bs* (°C)

$m^3/\text{min}$  = Flujo de aire de abastecimiento.

La cantidad de aire requerida a través del aparato acondicionador, para satisfacer la carga total del aire acondicionado (incluyendo las cargas suplementarias), se calcula con la siguiente ecuación:

$$m^3/\text{min} = \frac{CST}{16.75 (t_m - t_{as})}$$

donde:

$m^3/\text{min}$  = Flujo de aire deshumidificado.

CST = Calor sensible total (kcal/h).

16.75 = Valor constante.

$t_m$  = Temp. de la mezcla que entra al aparato, *bs* (°C)

$t_{as}$  = Temp. del aire que sale del aparato, *bs* (°C)

La temperatura  $t_m$  se determina a base de prueba y error, excepto cuando el aire que entra al aparato es solamente aire del exterior.

El procedimiento es laborioso y tedioso, aun cuando no se tomen en cuenta las cargas suplementarias, y se consideren iguales las temperaturas del aire que entra al equipo y del aire que sale del mismo ( $t_m = t_{aa}$ ), el cálculo de la cantidad de aire requerido sigue siendo un procedimiento de prueba y error, igualmente tedioso y laborioso.

Bajo un conjunto específico de condiciones, la relación FCSC (4-2) permanece constante (a plena carga). Sin embargo, la relación GFCS (3-4) puede aumentar o disminuir, al variar la cantidad de aire exterior y las condiciones de la mezcla, y cuando esto sucede, la condición del aire suministrado al cuarto, varía a lo largo de la línea GFCS (4-2).

La cantidad de aire requerido para compensar las cargas de calor sensible y de calor latente del cuarto, es determinada por la diferencia de temperaturas entre la del cuarto ( $t_c$ ) y la del aire suministrado ( $t_{aa}$ ). Si esta diferencia de temperaturas aumenta, disminuye la cantidad de aire que se requiere abastecer al cuarto, lo cual sucede sólo si se abastece aire más frío, ya que las condiciones del cuarto son fijas. Tal diferencia de temperaturas sólo puede aumentar hasta un límite, donde la línea FCSC cruza la línea de saturación, suponiendo que el equipo acondicionador sea capaz de llevar todo el aire a un 100% de saturación. Como esto no es posible, la condición del aire cae normalmente sobre la línea FCSC, cerca de la línea de saturación.

El proceso para determinar la cantidad de aire requerido puede simplificarse, relacionando todas las cargas del acondicionamiento con el desempeño físico del equipo, e incluyendo luego este desempeño del equipo en el cálculo real de la carga. A esta relación, se le reconoce generalmente como una correlación psicrométrica de las cargas con el desempeño del equipo, y se realiza calculando la “temperatura de superficie efectiva”, el “factor de desvío” y el “factor de calor sensible efectivo”. Esto simplifica el cálculo de la cantidad del aire a suministrar.

**Temperatura de Superficie Efectiva ( $t_{se}$ ).** En la práctica real, cuando el equipo acondicionador está en operación, la temperatura de la superficie no es uniforme cuando el aire está en contacto con el mismo. La temperatura de superficie efectiva, puede considerarse como una temperatura de superficie uniforme, la cual le produce al aire que sale, las mismas condiciones que cuando la temperatura de superficie no es uniforme.

Cuando se acondiciona aire a través de un equipo, se aplica el principio básico de transferencia de calor, entre el medio de enfriamiento del equipo y el aire que pasa a través del mismo; por lo que debe de existir un punto de referencia común. Este punto es la temperatura de superficie efectiva del equipo.

La temperatura de superficie efectiva se utiliza para calcular la cantidad de aire requerido, y por lo tanto, para seleccionar el equipo más económico.

Para aplicaciones de enfriamiento y deshumidificación, la temperatura de superficie efectiva está en el punto donde la línea GFCS cruza la curva de saturación, por lo cual, se le considera como el punto de rocío del aparato, de allí que este término, “punto de rocío del aparato” ( $p_{ra}$ ) se usa comúnmente para procesos de enfriamiento y deshumidificación. La psicrometría del aire puede aplicarse igualmente, a otros tipos de aplicaciones de transferencia de calor, tales como calentamiento sensible, enfriamiento evaporativo, enfriamiento sensible, etc., pero para estas aplicaciones, la temperatura de superficie efectiva no caerá necesariamente sobre la curva de saturación.

**Factor de Desvío (FD).** Este factor depende de las características del equipo acondicionador, y representa la porción de aire que se considera que pasa totalmente

inalterada, a través del equipo acondicionador. Las características que afectan este factor son físicas y operacionales, y son las siguientes:

1. El FD disminuye cuando aumenta la superficie de transferencia de calor disponible, como por ejemplo, mas área de serpentín, menos espacio entre los tubos del serpentín, más hileras en el serpentín.
2. El FD disminuye al disminuir la velocidad del aire a través del equipo, por ejemplo, cuando se permite que el aire esté más tiempo en contacto con la superficie de transferencia de calor.

De los dos puntos anteriores, el primero tiene mayor efecto sobre el FD; es decir, la variación de la superficie de transferencia de calor, afecta más al FD, que aumentar o disminuir la velocidad del aire que pasa por el equipo.

La variación del FD afecta la posición relativa de GFCS, con respecto a FCSC, y cuando la posición de GFCS cambia, también cambian el punto de rocío del aparato ( $p_{ra}$ ), la cantidad de aire requerido, el FD y las condiciones del aire a la entrada y a la salida del equipo. Para mantener las condiciones de diseño del cuarto adecuadas, el aire deberá abastecerse en algún punto a lo largo de la línea FCSC. Los efectos de variar el FD en el equipo acondicionador, son como sigue:

1. Factor de Desvío más pequeño -
  - a) Punto de rocío del aparato ( $p_{ra}$ ) más alto.
  - b) Menos aire - motor y ventilador más chicos.
  - c) Más superficie de transferencia de calor - disponibles más hileras del serpentín o más superficie del serpentín.
  - d) Tubería más chica si se usa menos agua fría.
2. Factor de Desvío más grande -
  - e)  $p_{ra}$  más chico.
  - f) Más aire - ventilador y motor más grandes.
  - g) Menos superficie de transferencia de calor - menos hileras de serpentín o menos superficie de serpentín disponibles.
  - h) Tubería más grande si se usa más agua fría.

Así pues, cuando se haga el cálculo de las cargas para una aplicación en particular, si se utiliza el FD apropiado, el equipo seleccionado ofrecerá los costos más bajos inicial y de operación.

El FD no es función de una verdadera línea recta, pero puede calcularse con las siguientes ecuaciones, en las que intervienen el  $p_{ra}$ , y las condiciones del aire al entrar y salir del equipo, puesto que el FD está relacionado psicrométricamente con estos valores.

$$FD = \frac{t_{as} - t_{pra}}{t_{ae} - t_{pra}} = \frac{h_{as} - h_{pra}}{h_{ae} - h_{pra}} = \frac{H_{as} - H_{pra}}{H_{ae} - H_{pra}} \quad y$$

$$1 - FD = \frac{t_{ae} - t_{as}}{t_{ae} - t_{pra}} = \frac{h_{ae} - h_{as}}{h_{ae} - h_{pra}} = \frac{H_{ae} - H_{as}}{H_{ae} - H_{pra}}$$

donde:

t = temperaturas (bulbo seco).

h = entalpía.

H = contenido de humedad.

as = aire de salida.

ae = aire de entrada.

pra = punto de rocío del aparato.

El valor **1-FD**, es la porción del aire que sale del equipo a la temperatura del punto de rocío del aparato (*pra*), y comúnmente se le conoce como *Factor de Contacto*.

**Factor de Calor Sensible Efectivo (FCSE).** Este factor, es la relación del calor sensible efectivo del cuarto, con los calores latente y sensible efectivos dentro del mismo. Fue desarrollado para relacionar el FD y el *pra* con los cálculos de la carga, lo cual simplifica los cálculos de la cantidad de aire y de selección del equipo. El calor sensible efectivo del cuarto, es la suma del calor sensible del mismo (CSC), más el calor sensible del aire exterior, la cual se considera que es desviada inalterada a través del equipo acondicionador. A su vez, el calor latente efectivo del cuarto, se compone del calor latente del cuarto (CLT) más la porción del calor latente del aire exterior, la cual se considera que es desviada inalterada a través del equipo acondicionador. Esta relación se expresa con la siguiente fórmula:

$$FCSE = \frac{CSCE}{CSCE + CLCE}$$

Al igual que la carga procedente de infiltraciones a través de puertas y ventanas, el calor desviado del aire exterior es considerado como una infiltración a través del sistema de distribución de aire.

Si trazamos en una carta psicrométrica los puntos de *pra* (A), y las condiciones del cuarto (1), como se muestra en la figura 13.27, y luego unimos esos puntos, la línea resultante (A-1) es el *factor de calor sensible efectivo* (FCSE). La relación de los demás valores como el FCSC, el FD, el *pra* y el GFCS, también se muestran gráficamente en la figura 13.27.

**Cantidad de Aire Usando el FCSE, el *pra* y el FD.** Puesto que hay una relación psicrométrica entre el FCSE, el *pra* y el FD, se puede determinar la cantidad de aire requerido de una manera simple, empleando la siguiente fórmula:

$$m^3/\text{min} = \frac{CSCE}{16.75 (t_c - t_{pra}) (1-FD)}$$

La cantidad de aire calculada con esta fórmula, es aire deshumidificado, y compensa las cargas latente y sensible del cuarto. También maneja las cargas totales latente y sensible, para las cuales está diseñado el equipo, incluyendo las cargas suplementarias y las del aire exterior.

### Función del Serpentin

En el acondicionamiento de aire, el equipo requerido para la transferencia de calor, debe seleccionarse de acuerdo a los requerimientos de cada aplicación particular. Existen tres tipos básicos de estos equipos: serpentines, rociadores

y deshumidificadores, los cuales pueden utilizarse en forma independiente o combinados. Estos componentes deben ser capaces de controlar las propiedades psicrométricas del aire que pasa a través de ellos.

El más común de los componentes para transferencia de calor es el serpentín, el cual está formado por una serie de tubos, a través de los cuales circula un refrigerante, agua fría, salmuera, agua caliente o vapor. El aire es inducido o forzado a pasar por entre los tubos, y al estar en contacto con la superficie del serpentín, dependiendo de la temperatura del fluido dentro de los tubos, se calienta, se enfría o se enfria y se deshumidifica. A su vez, el fluido dentro de los tubos se enfría o se calienta.

La cantidad de calor transferido y el factor de desvío (FD) del serpentín, van en función de la superficie del serpentín, así como de la velocidad del aire; es decir, del tiempo que el aire esté en contacto con la superficie del serpentín al pasar a través de él.

En la figura 13.28, se muestra una tabla con los factores de desvío aproximados para serpentines aletados, a diferentes velocidades y diferentes superficies. Estos factores se aplican a serpentines con tubos de 5/8" de D.E. y espaciados aproximadamente 1-1/4". En la figura 13.29, se ilustran algunas de las aplicaciones más comunes de los serpentines, con sus FD representativos. Estas tablas se sugieren como una guía para los ingenieros de diseño. Para otros tipos de serpentines, o combinaciones que no se muestran en estas tablas, deberá consultarse al fabricante.

PROFUNDIDA DE LOS SERPENTINES  (HILERAS)	SIN ROCIADORES		CON ROCIADORES	
	8 aletas/pulg	14 aletas/pulg	8 aletas/pulg	14 aletas/pulg
	velocidad m/min			
	90 - 200	90 - 200	90 - 185	90 - 185
2	0.42 - 0.55	0.22 - 0.38	---	---
3	0.27 - 0.40	0.10 - 0.23	---	---
4	0.15 - 0.28	0.05 - 0.14	0.12 - 0.22	0.04 - 0.10
5	0.10 - 0.22	0.03 - 0.09	0.08 - 0.16	0.02 - 0.06
6	0.06 - 0.15	0.01 - 0.05	0.05 - 0.11	0.01 - 0.03
8	0.02 - 0.08	0.00 - 0.02	0.02 - 0.06	0.00 - 0.02

Tabla 13.28 - Factores de desvío típicos para serpentines aletados.

### Procesos del Serpentin

En el serpentín de un equipo de aire acondicionado, se le pueden efectuar varios procesos al aire que pasa a través del mismo. Se puede enfriar permaneciendo constante el contenido de humedad (enfriamiento sensible), se puede enfriar y deshumidificar al mismo tiempo y se puede calentar (calentamiento sensible). Con el serpentín, se puede controlar la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire, pero no se puede aumentar el contenido de humedad; para esto se



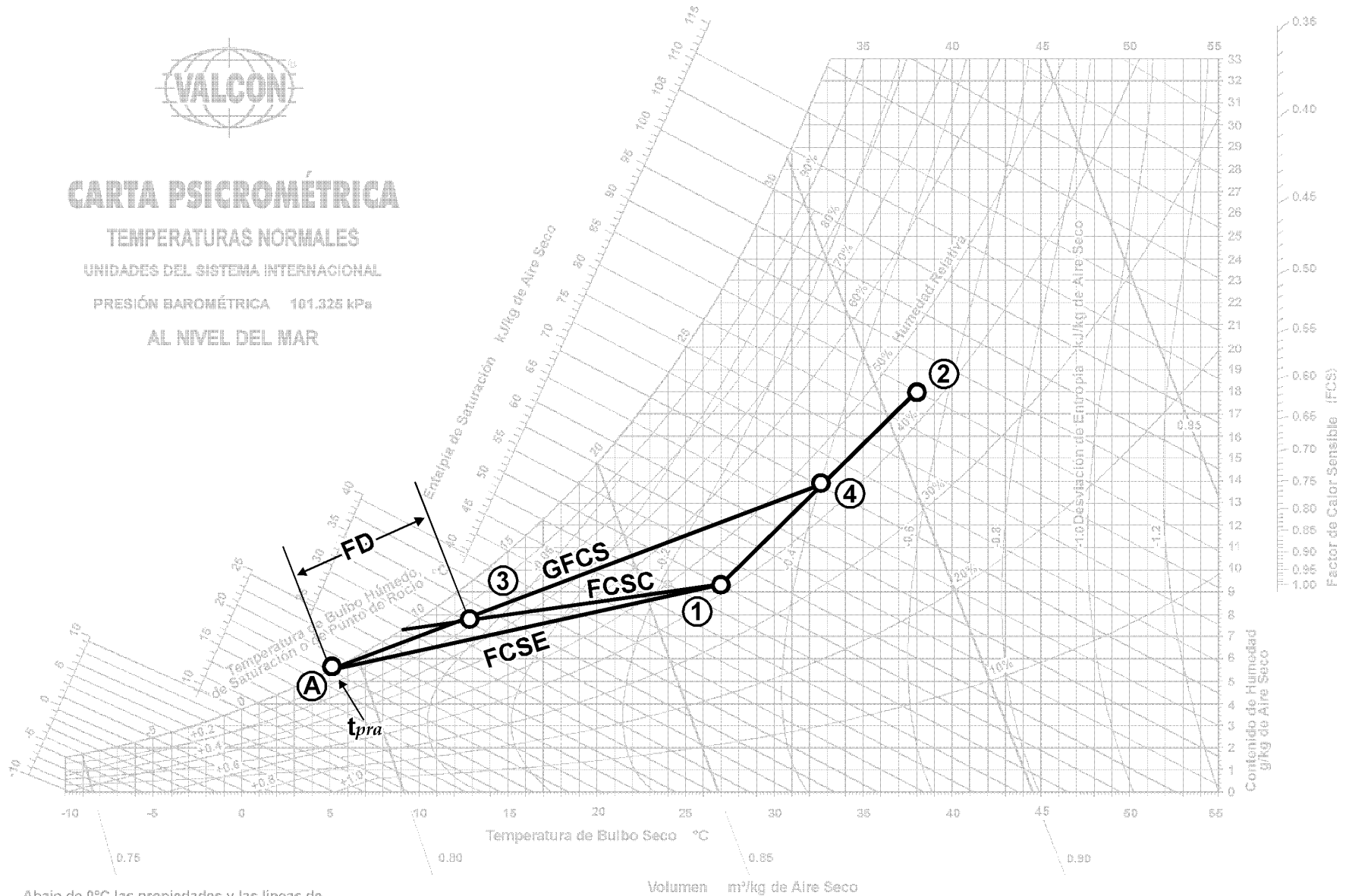
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Figura 13.27 - Líneas de FCSC, GFCS y FCSE.

FACTOR DE DESVIO DEL SERPENTIN	TIPO DE APLICACION	EJEMPLO
0.03 a 0.50	Una carga total pequeña o una carga que es algo más grande con un factor de calor sensible bajo (alta carga latente).	Residencial.
0.20 a 0.30	Típica aplicación de confort con una carga total relativamente pequeña o un bajo factor de calor sensible con una carga algo más grande.	Residencial, tiendas pequeñas y fábricas.
0.10 a 0.20	Típica aplicación de confort.	Tiendas departamentales, bancos y fábricas.
0.05 a 0.10	Aplicaciones con altas cargas internas sensibles o que requieren una gran cantidad de aire exterior para ventilación.	Tiendas departamentales, restaurantes y fábricas.
0.00 a 0.10	Todas las aplicaciones de aire exterior.	Sala de operaciones de un hospital y fábricas.

Tabla 13.29 - Factores de desvío (FD) típicos para diferentes aplicaciones.

requiere un rociador de agua (humidificador) sobre la superficie del serpentín.

Para entender mejor estos procesos, a continuación se verán algunos ejemplos de cada uno de ellos:

### Enfriamiento y Deshumidificación

Es la eliminación simultánea de calor y humedad del aire. El enfriamiento y la deshumidificación ocurren cuando el FCSE (factor de calor sensible efectivo) y el GFCS (gran factor de calor sensible), son menores de 1.0. El FCSE para estas aplicaciones puede variar desde 0.95, cuando la carga es predominantemente sensible, hasta 0.45 cuando la carga es predominantemente latente.

**Ejemplo:** Se va a acondicionar aire a un tienda. Las condiciones de diseño de verano son 35°C de *bs* y 24°C de *bh*, y las condiciones requeridas dentro de la tienda son 24°C de *bs* y 50% de *hr*. El calor sensible del cuarto es de 50,400 kcal/h, y el calor latente dentro del mismo es de 12,600 kcal/h. La ventilación proporcionada por el ventilador (manejadora) es de 56.63 m³/min de aire exterior.

Encontrar:

1. La carga del aire exterior (CTAE).
2. Gran calor total (GCT).
3. Factor de calor sensible efectivo (FCSE).
4. Temperatura de punto de rocío del aparato (*t<sub>pra</sub>*).
5. Flujo de aire deshumidificado.
6. Condiciones de entrada y salida del aparato.

**Solución:** En una carta psicrométrica tracemos las condiciones del aire exterior (35°C de *bs* y 24°C de *bh*), llamémosle punto 1. Luego tracemos las condiciones dentro del espacio (24°C de *bs* y 50% *hr*), llamémosle punto 2, como se muestra en la figura 13.30. Unamos estos dos puntos con una línea recta.

1. Carga del aire exterior.- Esta carga es la suma del calor sensible más el calor latente del aire exterior, por lo que hay que calcular cada uno por separado.

El calor sensible es igual al peso del aire, multiplicado por su calor específico, por la diferencia de temperaturas, o sea:

CSAE (calor sensible del aire exterior) =  $w \times c_e \times t_1 - t_2$

Como no conocemos el peso, sólo el flujo de m³/min, hay que convertirlos a kg/min. Para esto, dividi-

mos los 56.63 m³/min por el volumen específico del aire exterior, que en la fig 13.30, a las condiciones del punto 1 es: 0.893 m³/kg

Peso del aire exterior =  $56.63 \text{ m}^3/\text{min} \div 0.893 \text{ m}^3/\text{kg} = 63.42 \text{ kg}/\text{min}$ , lo multiplicamos por 60 para obtener kg/h

$63.42 \text{ kg}/\text{min} \times 60 \text{ min}/\text{h} = 3,805 \text{ kg}/\text{h}$

El calor específico del aire es un dato conocido, y es igual a 0.244 kcal/(°C)(kg aire)

CSAE =  $3,805 \text{ kg}/\text{h} \times 0.244 \text{ kcal}/\text{kg}^\circ\text{C} \times (35-24)^\circ\text{C} = 10,213 \text{ kcal}/\text{h}$

Este cálculo puede simplificarse empleando la siguiente fórmula:

CSAE =  $16.75 \times (\text{m}^3/\text{min})_{ae} \times (t_1 - t_2)$

CSAE =  $16.75 \times 56.63 \times (35-24) = 10,434 \text{ kcal}/\text{h}$

La diferencia en los resultados se debe a que en la fórmula, la constante 16.75 considera el volumen específico del aire como 0.874 m³/kg, y en el cálculo que hicimos, el volumen considerado es de 0.893 m³/kg. Sin embargo, para fines prácticos, el valor obtenido con la fórmula es satisfactorio.

Para calcular el calor latente del aire exterior (CLAE), también se utiliza una ecuación y es la siguiente:

CLAE =  $41.05 \times (\text{m}^3/\text{min})_{ae} \times (H_1 - H_2)$

Como podemos observar, en esta fórmula se utiliza la diferencia de contenido de humedad ( $H_1 - H_2$ ), en lugar de la diferencia de temperaturas de *bs*, como en la fórmula de calor sensible. La razón, obviamente, es que en el enfriamiento sensible sólo hay cambio de temperatura, y la humedad permanece constante. En cambio, en la remoción de calor latente, la temperatura de *bs* permanece constante y el contenido de humedad cambia.



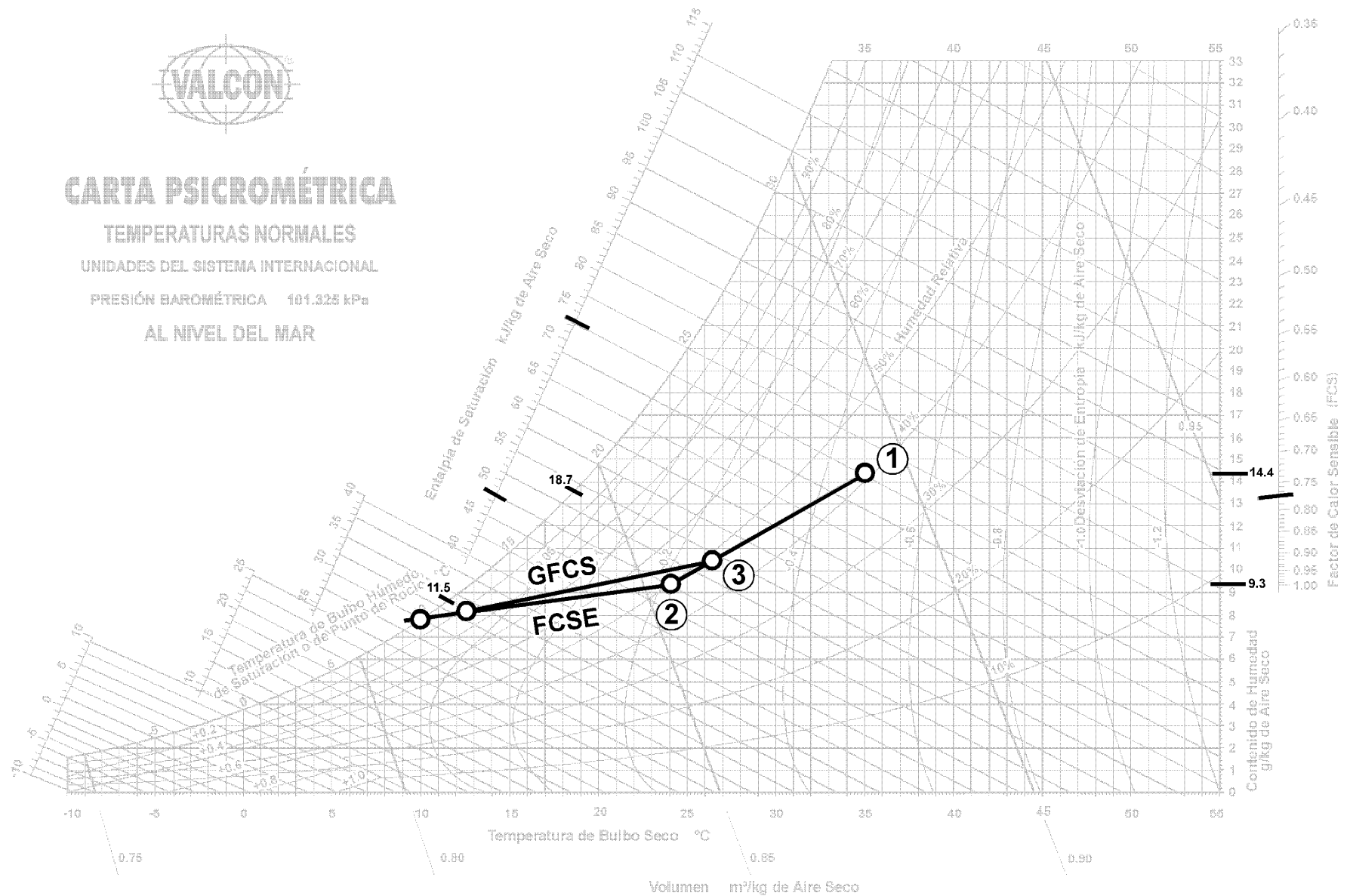
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Figura 13.30 - Ejemplo de acondicionamiento de aire con enfriamiento y deshumidificación.

Así pues, de la figura 13.30, los contenidos de humedad en los puntos 1 y 2 son 14.4 y 9.3 g/kg de aire, respectivamente. Aplicando la fórmula tenemos:

$$CLAE = 41.05 \times 56.63 \times (14.4 - 9.3) = 11,856 \text{ kcal/h}$$

El calor total del aire exterior es:

$$CTAE = CSAE + CLAE = 10,434 + 11,856 = 22,290 \text{ kcal/h}$$

El calor total del aire exterior también se puede calcular con la fórmula siguiente:

$$CTAE = 68.65 \times (m^3/\text{min})_{ae} \times (h_1 - h_2)$$

donde:

$$h_1 = \text{entalpía del aire exterior} = 72.3 \text{ kJ/kg (17.28 kcal/kg)}$$

$$h_2 = \text{entalpía del aire del cuarto} = 48.0 \text{ kJ/kg (11.47 kcal/kg)}$$

$$CTAE = 68.65 \times 56.63 \times 5.81 = 22,587 \text{ kcal/h}$$

2. El gran calor total (GCT) es igual a la suma del calor sensible total más el calor latente total (CST + CLT).

$$CST = 50,400 + 10,434 = 60,834 \text{ kcal/h}$$

$$CLT = 12,600 + 11,856 = 24,456 \text{ kcal/h}$$

$$GCT = 60,834 + 24,456 = 85,290 \text{ kcal/h}$$

3. El factor de calor sensible efectivo (FCSE), se encuentra empleando la fórmula:

$$FCSE = \frac{CSCE}{CSCE + CLCE} = \frac{CSCE}{CTCE}$$

A su vez, el CSCE y el CLCE se calculan con las fórmulas:

$$CSCE = CSC + (FD)(CSAE)$$

$$CLCE = CLC + (FD)(CLAE)$$

El factor de desvío típico, para aplicaciones de confort, está entre 0.10 y 0.20; por lo que, asumiendo un FD de 0.15 tenemos:

$$FCSE = \frac{50,400 + (0.15 \times 10,434)}{50,400 + (0.15 \times 10,434) + 12,600 + (0.15 \times 11,856)} = 0.783$$

4. La temperatura de punto de rocío, se determina de las condiciones dentro del espacio y el FCSE. En la escala que está a la extrema derecha de la carta psicrométrica, localizamos el FCSE de 0.783, y unimos este punto con el punto 2. Continuamos esta línea hasta donde intersecta con la curva de saturación, y esa es la temperatura de punto de rocío del aparato:  $t_{pra} = 10^\circ\text{C}$

5. El flujo de aire deshumidificado, se calcula con la ecuación vista anteriormente:

$$m^3/\text{min} = \frac{CSCE}{16.75 (t_c - t_{pra})(1 - FD)}$$

$$m^3/\text{min} = \frac{50,400 + (0.15 \times 10,434)}{16.75 (24 - 10)(1 - 0.15)} = 260.70 \text{ m}^3/\text{min}$$

6. Supongamos para este ejemplo, que el aparato seleccionado para 260.7 m<sup>3</sup>/min, 10°C de  $t_{pra}$  GCT=85,290 kcal/h, tiene un factor de desvío igual o muy cercano al FD supuesto de 0.15. También, supongamos que no es necesario desviar físicamente el aire alrededor del aparato.

La temperatura de  $bs$  de entrada ( $t_{ae}$ ), se calcula con la fórmula:

$$t_{ae} = \frac{(m^3/\text{min} \times t_1)_{\text{ext.}} + (m^3/\text{min} \times t_c)_{\text{retorno}}}{(m^3/\text{min})_{\text{abast.}}}$$

$$t_{ae} = \frac{(56.63 \times 35) + (204.07 \times 24)}{260.7} = 26.39^\circ\text{C de } bs$$

Esta temperatura se traza en la carta psicrométrica, subiendo verticalmente hasta que intersecta la línea 1-2, como se muestra en la figura 13.30, a este punto le llamamos 3. De aquí trazamos una línea paralela a las líneas de temperatura de bulbo húmedo, y leemos esta temperatura que corresponde a la temperatura de  $bh$ , que entra al aparato. Esta temperatura es de 18.7°C.

La temperatura de bulbo seco del aire de salida del aparato ( $t_{as}$ ), se calcula con la ecuación:

$$t_{as} = t_{pra} + FD(t_{ae} - t_{pra}) = 10 + 0.15(26.39 - 10) = 12.46^\circ\text{C}$$

La temperatura de  $bh$  del aire que sale del aparato, se determina trazando una línea recta entre la temperatura de punto de rocío del aparato, y la condición de entrada al aparato (punto 3), ésta es la línea GFCS. Donde la  $t_{as}$  intersecta esa línea, se lee la temperatura de  $bh$  a la salida del aparato: 11.5°C

## Enfriamiento Sensible

Es aquél en el que se remueve calor del aire a un contenido de humedad constante. El enfriamiento sensible ocurre, cuando existe cualquiera de las siguientes condiciones:

1. El GFCS como se calculó o se trazó en la carta psicrométrica es 1.0.
2. El FCSE calculado al estimar la carga de aire acondicionado es 1.0.

En una aplicación de calor sensible, el GFCS es igual a 1.0. El FCSE y el FCSC pueden ser igual a 1.0. Sin embargo, esto no necesariamente indica un proceso de enfriamiento sensible, porque la carga latente introducida por el aire exterior, puede dar un GFCS menor de 1.0.

El punto de rocío del aparato ( $t_{pra}$ ), es referido como la temperatura de superficie efectiva ( $t_{se}$ ) en aplicaciones de enfriamiento sensible. La  $t_{se}$  debe ser igual, o mayor, que la temperatura de punto de rocío del aire que entra. En la mayoría de los casos, la  $t_{se}$  no cae en la línea de saturación, por lo tanto, no será el punto de rocío del aparato.

El uso del término m<sup>3</sup>/min de aire deshumidificado, en una aplicación de enfriamiento sensible, no deberá interpretarse para indicar que está ocurriendo una deshumidificación. Se usa en la estimación de cargas de aire acondicionado y en el ejemplo siguiente, para determinar la cantidad de aire que se requiere a través del aparato, para compensar las cargas de acondicionamiento.

**Ejemplo.** Se va a acondicionar aire frío a un espacio donde se requiere a 24°C de  $bs$  y una  $hr$  máxima de 50%. Las condiciones de diseño en verano son de 41°C de  $bs$  y 21°C de  $bh$ . Se obtuvieron los siguientes datos:

CSC (calor sensible del cuarto)= 50,400 kcal/h.

CLC (calor latente del cuarto)= 12,600 kcal/h.

ventilación= 368.12 m<sup>3</sup>/min de aire exterior.

Encontrar:

1. Carga de aire exterior (CTAE).
2. Gran calor total (GCT).
3. Gran factor de calor sensible (GFCS).
4. Factor de calor sensible efectivo (FCSE).
5. Punto de rocío del aparato ( $t_{pra}$ ), o la temperatura de superficie efectiva ( $t_{se}$ ).
6. Cantidad de aire deshumidificado (m<sup>3</sup>/min) ad
7. Condiciones de entrada y salida del aparato ( $t_{ae}$ ,  $t_{aeh}$ ,  $t_{as}$  y  $t_{ash}$ ).

**Solución:**

1. CSAE= 16.75 x (m<sup>3</sup>/min)ae x ( $t_a - t_c$ )= 16.75 x 368.12 x (41-24)= 104,822 kcal/h

CLAE= 41.05 x (m<sup>3</sup>/min)ae x ( $H_a - H_c$ )

De la figura 13.31, después de haber trazado los puntos 2 y 1, correspondientes a las condiciones del cuarto y del aire exterior, respectivamente, determinamos el contenido de humedad o humedad absoluta para cada uno de ellos y tenemos:

Contenido de humedad del aire del cuarto ( $H_c$ )= 9.3 g/kg

Contenido de humedad del aire exterior ( $H_a$ )= 7.5 g/kg

CLAE= 41.05 x 368.12 x (7.5-9.3)= -27,200 kcal/h

La carga latente es negativa y de un valor absoluto mucho mayor que el CLC; por lo tanto, las condiciones de diseño interiores deberán ajustarse, a menos que haya un medio para humidificar el aire. Para hacer este ajuste, despejaremos  $H_c$  de la fórmula y la calculamos.

$$H_c = \frac{12,600}{41.05 \times 368.12} + 7.5 = 8.334 \text{ g/kg}$$

Las condiciones ajustadas del cuarto son ahora 24°C de  $t_{bs}$  y 8.34 g/kg. Tracemos este punto en la fig. 13.31, y llamémosle punto 3.

CLAE= 41.05 x 368.12 x (7.5-8.334)= -12,600 kcal/h

CTAE= (104,822)+(-12,600)= 92,222 kcal/h

2. GCT= CST + CLT

CST= CSC + CSAE= 50,400 + 104,822= 155,222 kcal/h

CLT= CLC + CLAE= 12,600 + (-12,600)= 0 kcal/h

GCT= 155,222 + 0= 155,222 kcal/h

$$3. \text{GFCS} = \frac{\text{CST}}{\text{GCT}} = \frac{155,222}{155,222} = 1.0$$

Puesto que GFCS = 1.0, ésta es una aplicación de enfriamiento sensible.

4. De las tablas 13.28 y 13.29, suponemos un factor de desvío de 0.05

$$\text{FCSE} = \frac{\text{CSCE}}{\text{CSCE} + \text{CLCE}} \text{ de donde}$$

CSCE= CSC + (FD)(CSAE)= 50,400 + (0.05)(104,822)= 55,641 kcal/h

CLCE= CLC + (FD)(CLAE)= 12,600 + (0.05)(-12,600)= 11,970 kcal/h

$$\text{FCSE} = \frac{55,641}{55,641 + 11,970} = 0.823$$

5. Para encontrar la  $t_{pra}$ , se traza una línea desde el valor de 0.823 en la escala del factor de calor sensible, hasta la curva de saturación, pasando por las condiciones ajustadas del aire del cuarto (punto 3) en la figura 13.31.

La  $t_{pra}$  = 7 °C

$$6. (\text{m}^3/\text{min})_{ad} = \frac{\text{CSCE}}{16.75 (1-\text{FD})(t_c - t_{pra})} =$$

$$(\text{m}^3/\text{min})_{ad} = \frac{55,641}{16.75 \times (1-0.05)(24.8)} = 502.687$$

Puesto que la cantidad de aire deshumidificado, es menor que los requerimientos de ventilación exterior, se sustituyen los m<sup>3</sup>/min de aire exterior por los m<sup>3</sup>/min de aire deshumidificado. Esto da como resultado una nueva temperatura de superficie efectiva, la cual no cae sobre la línea de saturación.

$$t_{se} = 24 - \frac{55,641}{16.75 (1-0.05) \times 368.12} = 14.5^\circ\text{C}$$

Esta temperatura cae sobre la línea GFCS.

7. Esta es una aplicación de aire exterior solamente, ya que, los m<sup>3</sup>/min son menores que los requerimientos de ventilación, por lo tanto:

$t_{ae}$  = 41°C

$t_{aeh}$  = 21°C

La temperatura del suministro de aire, que es igual a la temperatura a la salida del aparato, se calcula sustituyendo la temperatura de superficie efectiva, por la temperatura del  $pra$  en la ecuación:

$$(1-\text{FD}) = \frac{t_{ae} - t_{as}}{t_{ae} - t_{pra}} \text{ por lo tanto } t_{as} = t_{ae} - (1-\text{FD})(t_{ae} - t_{se})$$

$$t_{as} = 41 - (1-0.05)(41 - 14.5) = 15.83^\circ\text{C}$$

La temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del aparato, se determina trazando una línea recta entre la  $t_{se}$  y las condiciones de entrada del aparato, punto 1. (Esta es la línea GFCS).

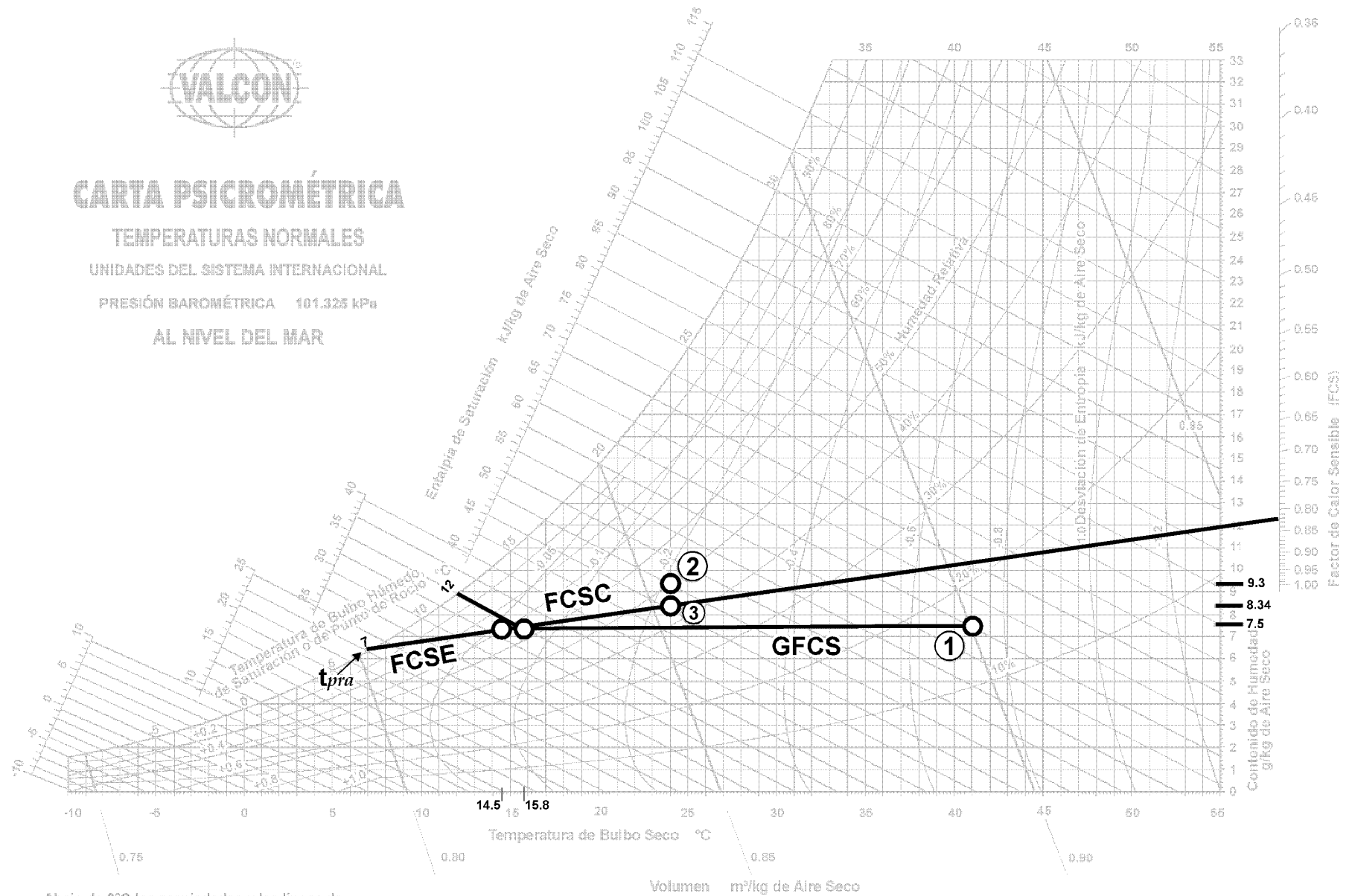
Donde la temperatura de salida  $t_{as}$  intersecta esta línea, se lee la temperatura de bulbo húmedo de salida, la cual es igual a 12°C.



## TEMPERATURAS NORMALES

Pressure: 101.028 kPa

# ANNE DELMAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Figura 13.31 - Ejemplo de un enfriamiento sensible.



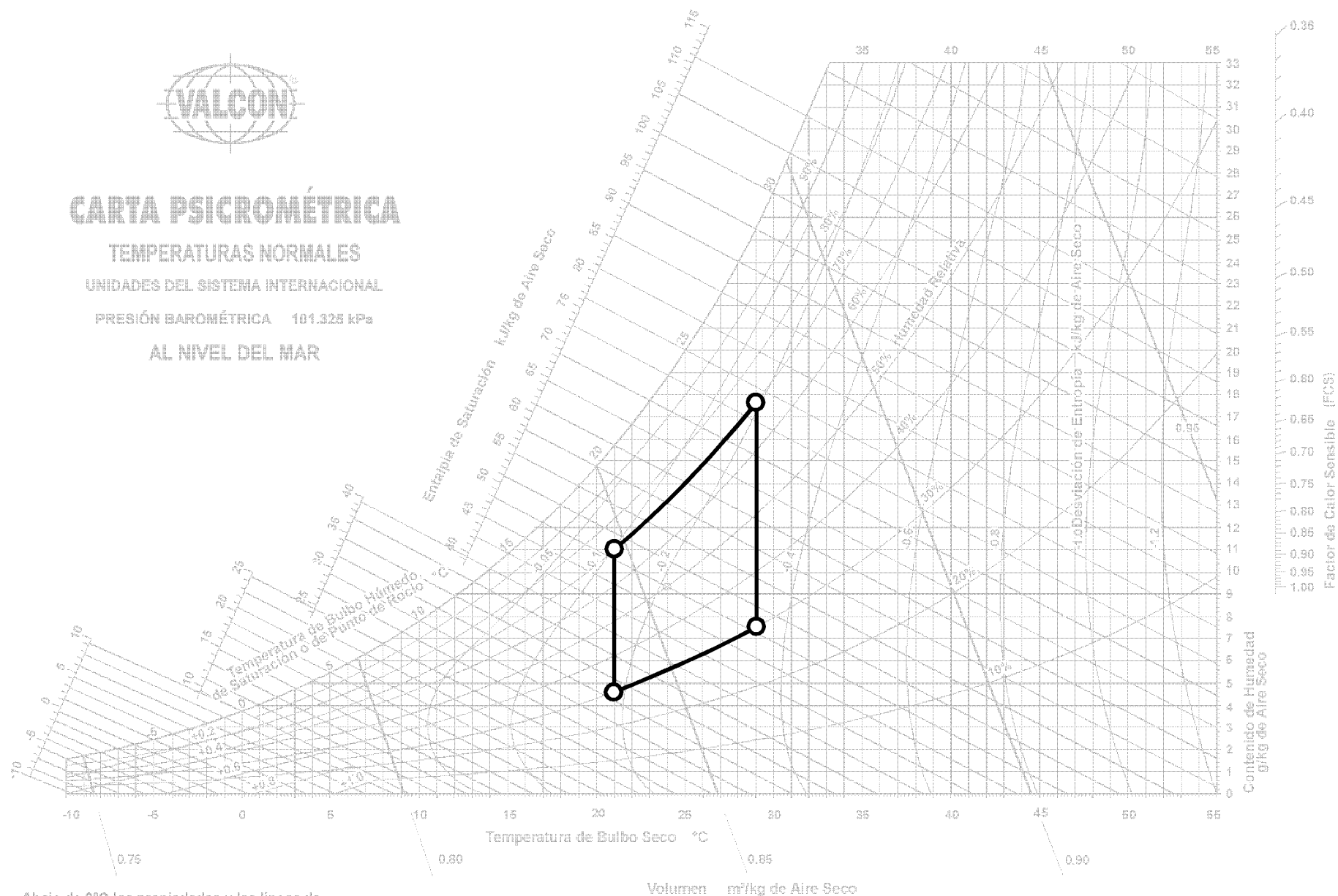
# CARTA PSICROMÉTRICA

TEMPERATURAS NORMALES

UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa

AL NIVEL DEL MAR



Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpía son para el hielo

Figura 13.32 - Carta Psicrométrica mostrando la zona de confort.

## Zona de Confort

El ser humano estará confortable bajo una variedad de combinaciones de temperatura y humedad. La mayoría de la gente está confortable en una atmósfera con una humedad relativa de entre 30% y 70%, y una temperatura entre 21°C y 29°C. Estos puntos están representados por el área resaltada en la carta psicrométrica de la figura 13.32. Dicha área se conoce como zona de confort.

La razón por la cual existe la industria del acondicionamiento de aire (refrigeración, ventilación y calefacción), es porque la naturaleza no siempre proporciona las condiciones ideales anteriores. Un sistema de aire acondicionado, debe modificar las condiciones existentes, utilizando diferentes procesos para lograr las condiciones deseadas.

Estos procesos pueden modelarse sobre la carta psicrométrica.

En el interior, es posible controlar completamente los factores que determinan el confort en un espacio encerrado. Hay una relación definida entre confort y las condiciones de temperatura, humedad y movimiento del aire. En la figura 13.33, se ilustra la condición de confort constante, con temperaturas y humedades variantes.

Nótese la zona de confort. El área delineada, indica el rango usual de temperaturas y humedades, en el cual la mayoría de la gente se siente confortable. Nótese también, que con una alta humedad relativa, uno está confortable a menor temperatura, que a una temperatura deseada a condiciones de baja humedad relativa.

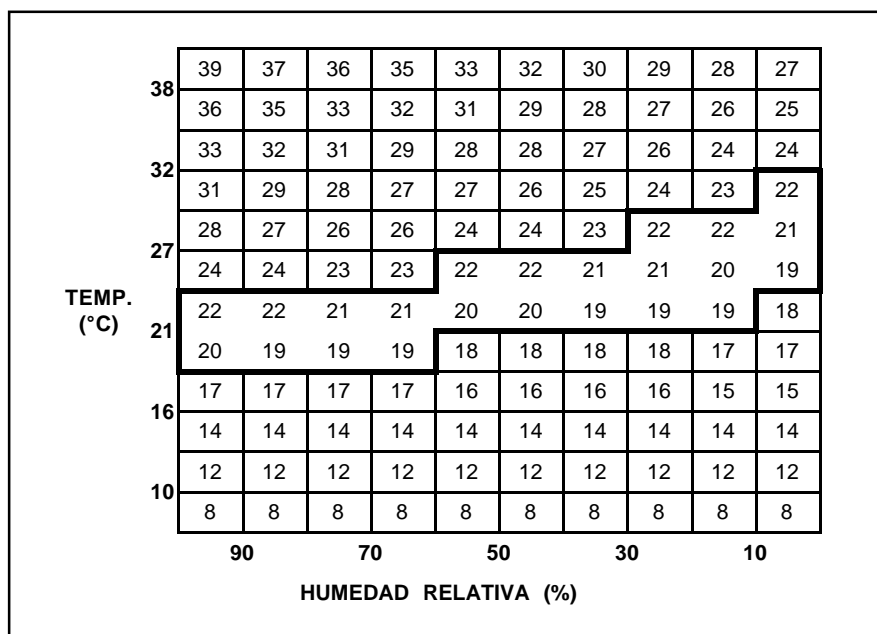


Figura 13.33 - Temperaturas equivalentes (o efectivas).