

Diseño computadorizado de la carga térmica para el acondicionamiento de aire en Puerto Rico (AIRPAK 123™)

Alberto Tirado
Félix López
Candidatos a graduación

Sinopsis

Se diseñó un programa digital para computar la carga de aire acondicionado industrial. Luego de más de 3,000 horas de trabajo se obtuvo un programa de calidad que supera todos los estándares de programación en aire acondicionado conocidos hasta el momento. El programa lo denominamos AIRPAK 123™ y el grupo de examinadores a los que se presentó el producto por primera vez lo catalogó como excelente.

En este escrito desglosamos todas las fórmulas utilizadas en las subrutinas del programa AIRPAK 123™. Este programa está optimizado para Puerto Rico, con tablas interpoladas y valores localmente calculados para la latitud 18.5°.

Abstract

A digital program to compute the industrial air conditioned load was designed. It took us over 3,000 hours to obtain a reliable product which excels all air conditioned programming standards known to this moment. The program was given the name AIRPAK 123™ and was judged an excellent product by the group of people present when it was shown for the first time.

In this article we present all the equations that make up the subroutines of AIRPAK 123™. This program is optimized for Puerto Rico, with tables and values calculated for the latitude 18.5°.

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

Introducción

AIRPAK 123™ es un conjunto de subrutinas en lenguaje de programación aplicadas a la teoría de acondicionamiento de aire. El programa se basa en el código de LOTUS 123™, en su versión para el ambiente de Windows 3.1™, por su poderío en macros o lenguaje de programación, su amplia gama de colores y gráficas, así como su velocidad y compatibilidad con Windows 3.1™, que es sin lugar a dudas el ambiente dominante en la actualidad y seguramente en el futuro.

AIRPAK 123™ se basa en las normas y fórmulas de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) y las utilizadas por Willis H. Carrier. El programa AIRPAK 123™ es completo, desde el cálculo automático de la sicrometría (con alta precisión), pasando por el cómputo de carga solar especializado para Puerto Rico, hasta el cálculo del volumen de aire requerido (pies cúbicos por minuto, CFM por sus siglas en inglés) y las condiciones de entrada y salida del aparato.

AIRPAK 123™ produce informes tabulados y gráficas de barras en alta calidad usando los "drivers" del sistema Windows 3.1, ya sea en una impresora láser en blanco y negro o una "inkjet" a color. AIRPAK 123™ es un programa interactivo que deja obsoletos los programas de "llena blancos" en los cuales no se sabe cuáles son los datos despreciables y los indispensables.

La variación de la presión barométrica con la altura

La presión barométrica, al igual que la temperatura del aire atmosférico, varía considerablemente con la altura. La presión barométrica estándar al nivel del mar se define como 29.921 pulgadas de mercurio. Los valores de la presión barométrica se pueden definir usando la ecuación 1 (ASHRAE, 1977).

$$P_b = 29.921 (1 - 6.87535 (10^{-6}) * Z)^{5.2561} \quad (1)$$

donde P_b es la presión barométrica en pulgadas de mercurio y Z es la altura (ft).

Bulbo seco ('dry - bulb') y bulbo húmedo ('wet-bulb')

La temperatura de bulbo seco es la registrada en el aire con un termómetro ordinario y representa la intensidad de calor sensible del aire expresado en grados Fahrenheit o Celcius. La temperatura de bulbo húmedo indica el calor total contenido en el aire y se expresa en grados Fahrenheit o Celcius. La temperatura de bulbo húmedo se determina cubriendo el bulbo de un termómetro con franela o con un paño húmedo y haciendo pasar aire rápidamente. De esta manera la humedad comienza a evaporarse y a dispersarse en el ambiente hasta llegar a un equilibrio termodinámico. La temperatura del agua y el aire circundante baja en proporción a la evaporación que ocurra.

Si el aire que rodea al termómetro está seco, la humedad se evapora rápidamente y la baja en temperatura es relativamente alta. Por el contrario, si el aire está muy húmedo, la evaporación es lenta y, por lo tanto, la diferencia entre las temperaturas del bulbo húmedo y el bulbo seco es pequeña. Si el aire está saturado no hay evaporación ni baja la temperatura. A la diferencia entre el bulbo seco y el bulbo húmedo se le llama depresión del bulbo húmedo.

El calor necesario para evaporar la humedad se toma del calor sensible que contiene el agua depositada en el paño húmedo, lo que disminuye la temperatura. Durante el proceso de evaporación, el calor sensible se transforma en calor latente de vaporización, pero el calor total del sistema permanece igual y la temperatura de bulbo húmedo es constante. Al cambiar el calor sensible por calor latente no hay cambio en el calor total.

Presión de saturación de vapor de agua (P_{ws})

La presión de saturación de vapor de agua (a una temperatura) puede determinarse mediante las ecuaciones que se presentan a continuación.

Fórmula de "Goff-Gratch"

Para temperaturas entre -100°C (-148°F) y 0°C (32°F) se usa la siguiente ecuación:

$$\log P_{ws} = B1 - B2 + B3 - 2.2195983 \quad (2)$$

donde p_{ws} es la presión de vapor saturada ($T - T_0 / T$), T_0 es el punto triple del agua (273.16°K) y T es la temperatura absoluta en grados Kelvin. Las constantes $B1$, $B2$ y $B3$ representan los siguientes parámetros¹:

$$B1 = 9.096936 (T - 1)$$

$$B2 = 3.56654 \log (T)$$

$$B3 = 0.876817 [1 - (1 / T)]$$

Para temperaturas entre -50°C (-58°F) y 100°C (212°F) se utiliza la ecuación 3 (ASHRAE, 1977):

$$\log (P_{ws}) = C1 - C2 + C3 + C4 - 2.2195983 \quad (3)$$

En la ecuación 3 el parámetro p_{ws} es la presión de vapor saturado y se expresa como $[T - (T_0 / T)]$, T_0 es el punto triple del agua (273.16°K), T es la temperatura absoluta en grados Kelvin y las constantes $C1$, $C2$, $C3$ y $C4$ representan lo siguiente:

$$C1 = 10.79586 [1 - (T_0 / T)]$$

$$C2 = 5.0208 \log (T / T_0)$$

¹ Las ecuaciones 2 y 3 en su forma original son muy largas para el formato de la publicación. Usamos las constantes (B y C) para adaptar las ecuaciones al formato de la revista.

$$C3 = 1.50474 (10^{-4}) [1 - 10^{-8.29692 ((T/T_0) - 1)}]$$

$$C4 = 0.42873 (10^{-3}) [10^{-4.76955 (1 - T_0/T)} - 1]$$

Razón de humedad (W, gr/lb)

A base de la escala de carbono-12, la razón de peso molecular del vapor de agua y el aire seco es la siguiente:

$$M_w/M_a = 18.01534 / 28.9645 = 0.62198 \quad (4)$$

La constante universal de los gases (R) se define en la ecuación 5.

$$R = 1545.32 \text{ (lbf/ft}^2\text{)(ft}^3\text{/lb}_{\text{mole}} \text{ F}_{\text{abs}}) \quad (5)$$

Para un gas en particular se utiliza la siguiente fórmula:

$$R_i = R / M_i \quad (6)$$

donde R_i es la constante para un gas en particular y M_i es el peso molecular de ese gas en particular.

Para el aire seco y el vapor de agua la constante R tiene el valor que se define en la ecuación 5. El peso molecular de estos gases es 28.9645 y 18.01534, respectivamente. Usando la ecuación 6 para calcular sus constantes específicas la constante del aire seco (R_a) es 53.352 ft-lbf / F_{abs} y la del vapor de agua (R_w) es 85.778 ft-lbf / F_{abs} .

La razón de humedad (W) de una muestra de una mezcla de aire se define como la razón entre la masa de vapor de agua y el aire seco contenido en esa muestra (ecuación 7).

$$W = m_w / m_a \quad (7)$$

donde m_w es la masa de vapor de agua y m_a es la masa de aire seco (ambos en libras o gramos). Por lo tanto,

$$n_a = m_a / M_a \quad ; \quad m_a = n_a M_a \quad (8)$$

$$n_w = m_w / M_w \quad ; \quad m_w = n_w M_w \quad (9)$$

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

Sustituyendo en la ecuación 7,

$$W = m_w / m_a = n_w M_w / n_a M_a \quad (10)$$

Dividiendo el numerador y denominador de la derecha obtenemos:

$$W = (n_w/n_a + n_w) M_w / (n_a/n_a + n_w) M_a = (x_w M_w / x_a M_a) \quad (11)$$

En conclusión (ASHRAE, 1977)

$$M_w / M_a = 0.62198 \quad (12)$$

$$W = 0.62198 x_w / x_a ; \quad 0.62198 p_w / p_a \quad (13)$$

$$p_a = p - p_w \quad (14)$$

$$W = 0.62198 [p_w / (p - p_w)] \quad (15)$$

donde p es la presión barométrica y p_w es la presión parcial de vapor de agua en pulgadas de mercurio.

La presión de saturación del vapor de agua a una temperatura t (bulbo seco) se representa como p_{ws} . La razón de humedad (W) saturada se determina por la ecuación 16 (ASHRAE, 1977),

$$W_s = 0.62198 [p_{ws} / (p - p_{ws})] \quad (16)$$

donde p es la presión barométrica y p_{ws} es la presión de saturación de vapor de agua, ambas en pulgadas de mercurio.

La ecuación 17 presenta otra forma de calcular la razón de humedad de una mezcla de aire (ASHRAE, 1977),

$$W = [(1093 - 0.556t)W_s - 0.24(t-t^*)] / (1093 - 0.0444t^* - t) \quad (17)$$

donde t es la temperatura de bulbo seco, t^* es la temperatura de bulbo húmedo y W_s es la razón de la humedad saturada respecto al bulbo húmedo.

Humedad relativa (RH)

La humedad relativa (RH) se define como la razón de la fracción de moles de vapor de agua (x_w) con respecto a la fracción de moles de vapor saturado (x_{ws}), a la misma temperatura y presión (ASHRAE, 1977).

$$RH = x_w / x_{ws} \quad (18)$$

$$RH = p_w / p_{ws} \quad (19)$$

donde p_w es la presión de vapor de agua y p_{ws} es la presión de vapor de agua saturado, ambas en pulgadas de mercurio.

Temperatura del punto de rocío ("dew-point")

Para temperaturas entre 32°F y 150°F, la ecuación requerida para determinar la temperatura del punto de rocío es la siguiente (ASHRAE, 1977).

$$T_{pd} = 79.047 + 30.5790 a + 1.8893 a^2 \quad (20)$$

donde $a = \log_e p_w$, y p_w es la presión de vapor del agua.

Entalpía (h ; Btu / lb)

La entalpía total del aire húmedo es igual a la suma de la entalpía del aire seco más la entalpía del vapor de agua contenido en la mezcla (ecuación 21)

$$h = h_a + W h_g \quad (21)$$

donde h_a es la entalpía del aire seco, h_g es la entalpía de vapor de agua saturada y W es la razón de humedad de la mezcla de aire

$$h_a = C_p (t_2 - t_1) \quad (22)$$

Usando como referencia a 0°F:

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

$$h_a = C_p t \quad (23)$$

donde C_p es el calor específico del aire (0.24 Btu / lb), entonces:

$$h_a = 0.24 t \quad (24)$$

y h_g es igual a 1061 Btu / lb como vapor saturado, o sea, que a cualquier temperatura

$$h_g = 1061 + 0.444 t \quad (25)$$

En conclusión (ASHRAE, 1977)

$$h = 0.24 t + W (1061 + 0.444 t) \quad (26)$$

Presión de vapor de agua (p_w)

Una vez se sepa la temperatura de bulbo húmedo hay fórmulas experimentales que nos permiten calcular la presión parcial del vapor de agua. Una de estas fórmulas es la de Carrier (creada en el 1911) a continuación (ASHRAE, 1977).

$$p_w = p_{wsb} - [(p - p_{wsb})(t - t_{wb})] / (2830 - 1.44 t_{wb}) \quad (27)$$

donde t es la temperatura con bulbo seco (°F), p_{wsb} es la presión de saturación con respecto a la temperatura de bulbo húmedo (pulgadas de mercurio), t_{wb} es la temperatura de bulbo húmedo (°F) y p es la presión barométrica (pulgadas de mercurio).

Volumen específico (ft^3 / lbda)

El volumen específico se determina con la ecuación 28.

$$V = R_a T / (p - p_w) = (R_a T / p) (1 + 1.6078 W) \quad (28)$$

donde R_a es la constante del gas (aire) (53.34 ft-lbf / lbm R), T es la temperatura (R), p es la presión barométrica (lbf / ft²), p_w es la presión de

vapor (lbf / ft²) y W es la razón de humedad de la mezcla (lbw / lbda)²

Fórmulas utilizadas para determinar la carga solar

Para paredes y techo se usa la ecuación 29 (ASHRAE, 1989)

$$q = U A (CLTD)_{corr} \tag{29}$$

donde q es la carga solar para el techo en Btu/hr, U es el valor del factor U, factor de transferencia de calor del techo (depende del material), A es el área neta del techo en ft² y CLTD_{corr} es el factor de la diferencia en temperatura de la carga de enfriamiento ("cooling load temperature difference") corregido para la latitud, hora y orientación magnética.

$$U = \frac{1}{R_{total}} \tag{30}$$

donde:

$R_{total} = R_{pelicula\ exterior} + R_{aislante\ térmico} + R_{material\ del\ techo} + R_{cámara\ interior} + R_{plafón\ acústico}$
(ASHRAE, 1989)

$$CLTD_{corr} = (CLTD + LM) K + (78 - t_{rdb}) + (t_o - 85) \tag{31}$$

CLTD es el valor obtenido de la tabla No.29 de ASHRAE Handbook Fundamentals. LM se define como el "Latitude-Month Correction Value" obtenido de la tabla No.32 de ASHRAE Handbook Fundamentals. K es el coeficiente de ajuste de color: K=1 color negro o areas industriales, K=0.83 color medio en area rural, K=0.65 color claro en area rural. Se recomienda el uso de K=1 en todo momento debido a que la estructura exterior y techo puede cambiarse de color y la tendencia es a color oscuro debido al deterioro de la pintura o el aislante térmico. El parámetro t_{rdb} representa la temperatura de diseño del cuarto ("room dry-bulb" en grados Fahrenheit) y t_o es la temperatura corregida para la ciudad de diseño y se define en la ecuación 32 (ASHRAE, 1989). En esta ecuación se introduce el concepto del cambio diario en temperatura ("daily range").

² T R = T°F + 459.67 y 1 in.Hg = 70.7262 lbf / ft²

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

$$t_o = t_{odb} - 0.5 \text{ (cambio diario en temperatura)} \quad (32)$$

En Puerto Rico el cambio diario en temperatura es de 11 grados, de acuerdo a la agencia federal del tiempo y clima. ASHRAE acepta el mismo valor para Puerto Rico. El parámetro t_{odb} representa la temperatura exterior o ambiente en la ciudad a diseño ("outside dry bulb" en °F). Sustituyendo el valor del cambio diario en temperatura (11 °F) en la ecuación 32 obtenemos la ecuación 33.

$$t_o = t_{odb} - 5.5 \quad (33)$$

Si usamos los valores para Puerto Rico y $K=1$ obtenemos:

$$CLTD_{corr} = (CLTD + LM) + (78 - t_{rdb}) + (t_{odb} - 5.5 - 85) \quad (34)$$

$$CLTD_{corr} = CLTD + LM + t_{odb} - t_{rdb} \quad (35)$$

Los cálculos para cristales son los siguientes (ASHRAE, 1989)

$$q_{conducción} = (U_{total\ medio}) (A_{total}) (CLTD_{corr}) \quad (36)$$

$$q_{solar} = A (SC) (SHGF) (CLF) \quad (37)$$

En las ecuaciones 36 y 37 los parámetros representan lo siguiente:

$U_{total\ medio}$	Factor U de transmisión térmica de todos los cristales en conjunto (Btu/hr-ft ² -°F).
A_{total}	Area neta total de todos los cristales en la estructura a acondicionarse.
A	Area neta del cristal a computarse la carga solar total (ft ²).
$CLTD_{corr}$	Factor de diferencia en temperatura de la carga de enfriamiento, corregido para la latitud y temperatura de la ciudad de diseño.
SC	Coefficiente de sombreo lumínico del cristal ("shading coefficient"). Porcentaje de luz que pasa por el cristal.
SHGF	Factor de ganancia de calor solar ("solar heat gain factor"). Depende de la latitud de diseño y orientación del cristal.

CLF Factor de carga de enfriamiento ("cooling load factor").
Semejante al "SC" pero depende de todo filtro solar que se
añada al cristal como cortinas o rejillas ("screens").

$$CLTD_{\text{corr}} = (t_{\text{outside dry bulb}} - 85) + CLTD \quad (38)$$

donde t_{odb} es la temperatura de bulbo seco en el exterior de la estructura en
grados Fahrenheit y CLTD son valores de la tabla No.33 de ASHRAE
Handbook Fundamentals. Debido a que los CLTD de la tabla No.33 se
expresan como función del tiempo, hay 24 valores de CLTD, uno para cada
hora del día y, por consiguiente, al final se obtienen 24 valores de $CLTD_{\text{corr}}$.

Aplicando sicrometría

Esta sección describe la práctica sicrométrica que nos ayuda a
seleccionar el equipo de acondicionamiento de aire. En adición, explicamos
todos los términos, procesos, factores, datos y características que nos
ayudan a entender la mejor manera de seleccionar este equipo.

Las propiedades del aire se pueden agrupar bajo calor sensible y calor
latente. El factor de calor sensible ("sensible heat factor", SHF) es la razón
entre el calor sensible y el calor total (la suma de sensible más latente) y
se expresa como:

$$SHF = SH / (SH + LH) = SH / TH \quad (39)$$

donde el factor SH es el calor sensible, LH el calor latente y TH es el calor
total.

El factor de calor sensible del cuarto ("room sensible heat factor",
RSHF) es la razón entre el calor sensible del cuarto y el calor total del
cuarto (latente más sensible). Esta razón se representa de la siguiente
manera:

$$RSHF = RSH / (RSH + RLH) = RSH / RTH \quad (40)$$

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

El factor general de calor sensible ("grand sensible heat factor", GSHF) es la razón entre el calor total sensible y la suma del calor total sensible y latente. Esta razón se determina de la siguiente forma:

$$\text{GSHF} = \text{TSH} / (\text{TSH} + \text{TLH}) = \text{TSH} / \text{GTH} \quad (41)$$

donde TSH es el calor sensible total, TLH es el calor latente total y GTH es el total general de calor ("grand total heat") (CARRIER, 1972).

$$\text{CFM}_{\text{sa}} = \text{RSH} / [1.09 (T_{\text{rm}} - T_{\text{sa}})] \quad (42)$$

donde RSH es el calor sensible del cuarto ("room sensible heat"), T_{rm} es la temperatura del cuarto y T_{sa} es la temperatura del aire que se supe (CARRIER, 1972).

$$\text{CFM}_{\text{da}} = \text{TSH} / [1.09 (T_{\text{edb}} - T_{\text{ldb}})] \quad (43)$$

donde TSH es el calor sensible total, T_{edb} es la temperatura de bulbo seco de entrada al aparato y T_{ldb} es la temperatura de bulbo seco de salida del aparato.

El factor de desvío ("bypass factor", BF) se puede calcular con la ecuación 44.

$$\text{BF} = \frac{T_{\text{ldb}} - T_{\text{adp}}}{T_{\text{edb}} - T_{\text{adp}}} = \frac{h_{\text{la}} - h_{\text{adp}}}{h_{\text{ea}} - h_{\text{adp}}} = \frac{W_{\text{la}} - W_{\text{adp}}}{W_{\text{ea}} - W_{\text{adp}}} \quad (44)$$

Para relacionar el factor de desvío y el punto de rocío del aparato ("apparatus dew-point", ADP) en un cómputo de carga se desarrolló el término factor de calor sensible efectivo ("effective sensible heat factor", ESHF). El ESHF se entrelaza con el BF y el ADP para simplificar el cálculo de la cantidad de aire, que luego nos ayuda en la selección del aparato. El ESHF es la razón del calor sensible efectivo del cuarto ("effective room sensible heat") y el calor total efectivo del cuarto ("effective room total heat"). La razón se expresa de la siguiente forma (CARRIER, 1972)

$$\text{ESHF} = (\text{ERSH}) / (\text{ERSH} + \text{ERLH}) = \text{ERSH} / \text{ERTH} \quad (45)$$

donde ERSH es el calor sensible efectivo del cuarto, ERLH es el calor latente efectivo del cuarto y ERTH es el calor total efectivo del cuarto.

Cantidad de aire requerido usando el ESHF, ADP y BF

Una manera sencilla para determinar la cantidad de aire requerida es usando la correlación del ESHF, ADP y BF. Ya sabemos que con las condiciones de diseño y el ESHF podemos seleccionar el ADP. Usando BF y T_{adp} podemos calcular la cantidad de aire requerida con la ecuación 46 (CARRIER, 1972)

$$\text{CFM}_{\text{da}} = \text{ERSH} / [1.09 (T_{\text{rm}} - T_{\text{adp}})(1 - \text{BF})] \quad (46)$$

Calor sensible y latente de los CFM_{oa}

Una vez sabemos nuestros CFM_{oa} , hay que considerar que este aire viene de afuera y contribuye a la carga sensible y latente del espacio a acondicionarse. Para determinar estas cargas se utilizan las siguientes ecuaciones (CARRIER, 1972):

$$\text{calor sensible } \text{CFM}_{\text{oa}} = (\text{CFM}_{\text{oa}}) \text{BF} (T_{\text{oa}} - T_{\text{rm}}) 1.09 \quad (47)$$

$$\text{calor latente } \text{CFM}_{\text{oa}} = (\text{CFM}_{\text{oa}}) \text{BF} (W_{\text{oa}} - W_{\text{rm}}) 0.68 \quad (48)$$

$$\text{ESHF} = \left[1 + 0.628 \frac{W_{\text{rm}} - W_{\text{adp}}}{T_{\text{rm}} - T_{\text{adp}}} \right]^{-1} \quad (49)$$

donde W_{rm} es la razón de la humedad del cuarto (gr/lb), W_{adp} es la razón de la humedad del aparato (gr/lb), T_{rm} es la temperatura de bulbo seco del cuarto (°F) y T_{adp} es la temperatura del punto de rocío del aparato (°F).

Cantidad de aire deshumecedor (CFM_{da})

Para determinar la cantidad de aire deshumecedor (CFM_{da}) hay que saber el aumento de temperatura del volumen de aire deshumidificado ("dehum. rise"). El factor "dehum. rise" representa la diferencia entre la temperatura de bulbo seco del cuarto y la temperatura del punto de rocío del aparato. Para fines prácticos se utiliza la siguiente ecuación (CARRIER, 1972):

$$\text{dehum. rise} = (1 - BF)(T_{rm} - T_{adp}) \quad (50)$$

donde T_{adp} es el punto de rocío del aparato indicado ("indicated ADP") y "dehum. rise" es el "indicated dehum. rise". Una vez se obtiene el "dehum. rise", para determinar los CFM_{da} se utiliza la siguiente ecuación:

$$CFM_{da} = ERSR / [1.08 (\text{dehum. rise})] \quad (51)$$

Cantidad de aire a suplirse ("supply air quantity")

Para buscar la cantidad de aire a suplirse (CFM_{sa}), hay que saber cuál es la diferencia entre la temperatura de bulbo seco del cuarto y la temperatura bulbo seco del aire que se le sule al cuarto. Esta diferencia es el "OTD" ("outlet temperature difference") y se obtiene con la siguiente ecuación (CARRIER, 1972)

$$OTD = \frac{RSH}{1.08 CFM_{da}} \quad (52)$$

Una vez se obtiene este valor, se determina la cantidad de aire que se le sule al espacio usando la ecuación 53.

$$CFM_{sa} = \frac{RSH}{1.08 OTD_{ajustado}} \quad (53)$$

Condiciones de entrada y salida en el aparato

Para determinar las condiciones de entrada y salida en el aparato hay que utilizar las ecuaciones de mezcla. Estas ecuaciones nos pueden ayudar

a determinar la temperatura bulbo seco, la entalpía y la razón de humedad en la entrada del aparato. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$T_m = \frac{(CFM_{oa}) (T_{oa}) + (CFM_{ra}) (T_{rdb})}{CFM_{sa}} \quad (54)$$

$$h_m = \frac{(CFM_{oa}) (h_{oa}) + (CFM_{ra}) (h_{rm})}{CFM_{sa}} \quad (55)$$

$$W_m = \frac{(CFM_{oa}) (W_{oa}) + (CFM_{ra}) (W_{rm})}{CFM_{sa}} \quad (56)$$

donde CFM_{ra} es el aire de retorno ($CFM_{sa} - CFM_{oa}$).

Para determinar las condiciones de entrada y salida del aparato hay que tener presente la ganancia en calor que tiene el aire cuando pasa por los conductos de retorno. Por esta razón hay que determinar cuál es la temperatura del cuarto considerando esta ganancia de calor. Para saber cuál es la temperatura de retorno, se utiliza la siguiente ecuación (CARRIER, 1972):

$$T_{ra} = T_{rm} + \frac{\% \text{ RSH}}{1.09(CFM_{sa} - CFM_{oa})} \quad (57)$$

donde T_{ra} es la temperatura del aire de retorno, T_{rm} es la temperatura de bulbo seco del cuarto y la expresión ($CFM_{sa} - CFM_{oa}$) es el aire de retorno (CFM_{sa}) (CARRIER, 1972).

Teniendo en cuenta la temperatura de retorno, podemos determinar cuáles son las condiciones de entrada y salida del aparato. Para esto vamos a usar unas ecuaciones que se derivan de las ecuaciones de mezcla.

$$T_{edb} = \frac{(CFM_{oa}) (T_{oa}) + (CFM_{ra}) (T_{rm})}{CFM_{sa}} \quad (58)$$

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

$$T_{ldb} = T_{adp} + BF (T_{edb} - T_{adp}) \quad (59)$$

donde T_{edb} es la temperatura de bulbo seco de entrada ("entering dry-bulb"), T_{ldb} es la temperatura de bulbo seco de salida ("leaving dry-bulb") y T_{adp} es el punto de rocío del aparato seleccionado ("selected ADP") (CARRIER, 1972).

$$h_{ea} = \frac{(CFM_{oa}) (h_{oa}) + (CFM_{ra})(H_{rn})}{CFM_{sa}} \quad (60)$$

$$h_{la} = h_{adp} + BF (H_{ea} - h_{adp}) \quad (61)$$

donde h_{ea} es la entalpía de entrada al aparato, h_{la} es la entalpía de salida del aparato y h_{adp} es la entalpía basada en T_{adp} .

Ecuaciones de carga

Una vez se obtienen las condiciones de entrada y salida del aparato, podemos determinar cuál es nuestra carga usando las siguientes ecuaciones (CARRIER, 1972):

$$TSH = 1.09 CFM_{da} (T_{edb} - T_{ldb}) \quad (62)$$

$$TLH = 0.68 CFM_{da} (W_{ea} - W_{la}) \quad (63)$$

$$GTH = 4.45 CFM_{da} (h_{ea} - h_{la}) \quad (64)$$

donde TSH es el calor sensible total, TLH es el calor latente total y GTH es el total general de calor ("grand total heat"). Si dividimos el total general de calor entre 12,000 Btu/hr podemos saber cuáles son las toneladas de nuestro cómputo de carga.

Qué necesitamos para seleccionar nuestro equipo

Ya hemos visto cuáles son todos los pasos a seguir para realizar un cómputo de carga. Una vez se obtienen todos los resultados, hay que escoger los parámetros que nos ayudan a seleccionar el equipo de aire acondicionado. Estos parámetros constituyen las especificaciones de diseño, que son las siguientes:

- T.MBH Total general de calor (GTH) (Btu/hr x 1,000)
- S.MBH Calor sensible total (TSH) (Btu/hr x 1,000)
- CFM_{ra} Cantidad de aire requerida (CFM).
- CFM_{oa} Cantidad aire fresco (ventilación) (CFM).
- (E_{db}/E_{wb} , L_{db}/L_{wb}) Entrada y salida en el aparato.

Instrucciones para correr el programa AIRPAK 123

Una vez se carga el programa AIRPAK 123 se despliega una pantalla con la siguiente información:

Información del proyecto³

Al programa AIRPAK 123 se le puede entrar la siguiente información: el nombre del usuario, el nombre del trabajo o proyecto, la localización del trabajo o proyecto, el nombre del cliente o firma, el número de la unidad a instalarse y la elevación (ft).

Condiciones de diseño

El programa considera dos condiciones de diseño: condiciones externas ("outdoor conditions") y condiciones internas ("room conditions"). En el caso de las condiciones externas se entran las temperaturas de bulbo seco

³ Toda esta información es opcional, excepto la elevación, que hay que especificarla aunque se encuentre a nivel del mar (0 ft.).

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

y de bulbo húmedo en °F. Para las condiciones internas hay dos opciones: entrar la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa o entrar las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo.

Método de correr el programa

Se puede correr el programa de dos formas: "PEAK IN" y "RSH". La forma "PEAK IN" es la que llamamos la forma larga. Esta opción exige información más detallada y completa para determinar el pico de carga. Los pasos a seguir para entrar los datos son los siguientes:

Información de los cristales

El programa AIRPAK 123 permite entrar los datos de cuatro áreas diferentes de cristales⁴. El orden para entrar los datos es el siguiente:

- Area del cristal indicado por el programa ; ft².
- "U-value" del cristal indicado.
- Puede determinar si el cristal se considera tipo ordinario o tipo especial ("ordinary glass or heat absorbing glass") con sombra interna ("internally shaded glass") o sombra externa ("externally shaded glass").
- Puede determinar si el cristal no tiene sombreo interno ("without interior shading") o tiene sombreo interno ("with interior shading").
- Si se escoge sin sombreo interno el programa le da la opción a determinar el tipo de construcción: liviana (L)", mediana (M) o pesada (H).
- La orientación a la que se encuentra el cristal: N - NE - E - SE - S - SW - W - NW.

⁴ Entre la información de los cristales que usted considera en su diseño (máximo 4). Marque cero en los que no va a usar y el programa automáticamente lo lleva a la siguiente área o pregunta.

Información de tragaluces ("skylight")

El programa permite entrar datos para solamente un tragaluz. Por lo tanto, si el diseño tiene más de un tragaluz con diferentes factores U y coeficientes de sombreo, aconsejamos que use el valor medio de todos los factores. El orden de entrar los datos de los tragaluces es el siguiente:

- Área del tragaluz ("glass block") (ft^2)
- "U-value"
- Puede determinar si el tragaluz se considera "sunlit glass block" o "externally shaded glass block".
- Puede determinar si el tragaluz tiene sombreo interior o no.
- Si el tragaluz no tiene sombreo interior el programa le permite determinar el tipo de construcción: liviana, mediana o pesada.

Información de las paredes

El programa permite entrar datos para cuatro áreas diferentes de paredes⁵. El orden para entrar los datos es el siguiente:

- Área de la pared indicada por el programa (ft^2)
- Puede considerar la clase de material de que está hecha la pared: bloques, concreto o metal. Para cada material aparece en pantalla una tabla en la cual hay cierta información, la cual puede considerarse en las siguientes preguntas.
- "U-value"
- Grupo de pared:
 - Si es de bloques puede decidir entre los grupos D, E o F.
 - Si es de concreto puede decidir entre los grupos A, B, C, D o E.

⁵ Entre la información de las paredes que usted considera en su diseño (máximo 4). Aquellas que no utilice, marque cero en el área y el programa pasa automáticamente a la siguiente área o pregunta.

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

- Si es de metal solo ofrece el grupo G.
- La orientación a la que se encuentra la pared puede ser una de las siguientes: N - NE - E - SE - S - SW - W - NW.

Información del techo

El orden de entrar los datos del techo⁶ es el siguiente:

- Area del techo (ft²)
- Puede determinar si el techo es con cielo raso ("with suspended ceiling") o sin cielo raso ("without suspended ceiling").
- Puede determinar el tipo de techo (escoger número del 1 al 13). Esto depende de la selección que hizo en la pregunta anterior, ya que el programa ofrece tablas diferentes para cada uno. Las tablas ofrecen cierta información, la cual se puede usar en la siguiente pregunta.
- "U-factor"

Toda la información anterior nos ayuda a determinar nuestro pico de carga. Una vez se entra la última información, que es la del techo, aparece en pantalla el mes y la hora del pico de carga y un despliegue de gráficas con cada uno de los meses del año, la cual muestra cómo se comporta la carga durante el mes las 24 horas. El orden de los meses es el siguiente enero-febrero, marzo-abril, mayo-junio, julio-agosto, septiembre-octubre y noviembre-diciembre.

Una vez se ven todas las gráficas, aparece un menú con las siguientes opciones: imprimir un reporte completo ("PRINT FULL REPORT") y continuar ("CONTINUE"). Si se escoge "PRINT FULL REPORT" el programa automáticamente imprime los datos solares ("solar data"), los

⁶ El área del techo que se usa aquí es la que se considera en la carga solar, y no como "partition". El área de techo que se considera como "partition" se utiliza más adelante.

cuales son un desglose de toda la información que se introdujo anteriormente. También permite imprimir la gráfica del mes que desea (casi siempre la del mes del "peak"), imprimir todas las gráficas y tiene la opción de no imprimir las gráficas y continuar con el programa. Si se escoge "CONTINUE", el programa continúa sin dar las opciones de imprimir el reporte del pico de carga ("solar data" y gráficas).

Particiones

El programa ofrece la oportunidad de considerar cinco áreas de particiones, de las cuales tres las define el usuario y las otras dos son el techo, cuando no es de carga solar, y el piso. El orden para entrar los datos de las particiones es el siguiente: área de la partición indicada (ft²), diferencia de temperatura y "U-factor".

Entrar el área que se desea acondicionar

Para especificar el área que se desea acondicionar hay que estar pendiente; primero porque se pide luego de las particiones y segundo porque en algunos casos no necesariamente el área del techo es el área que se desea acondicionar.

Personas

El número de personas que se consideran en el diseño, que contribuyen a la carga interna del área a ser acondicionada, se entra directamente y luego se despliega en la pantalla una tabla que muestra una información que nos ayuda a entrar las ganancias de calor sensible y latente (SHG y LHG, respectivamente, por sus siglas en inglés).

Carga de luces

El programa ofrece tres opciones para entrar la carga de luces: luces en váticos, luces en váticos/ft² y no luces. Después de escoger cualquier

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

opción, el programa ofrece la oportunidad de determinar el tipo de luz, fluorescente o incandescente. En la pantalla aparece una tabla que explica estos dos tipos de luces. Una vez se determina el tipo de luz, el usuario entra la carga de luces en la forma que escogió como opción.

Carga sensible y latente de enseres ("appliances")

El programa ofrece cuatro opciones para entrar la carga de los enseres. Estas opciones se utilizan para la carga sensible solamente, ya que la carga latente de "appliances" se introduce solamente en Btu/hr. Las opciones son las siguientes: "Appliances" (vatios), "Appliances" (vatios/ft²), "Appliances" (Btu/hr) y "No appliances"

Ganancia adicional de calor (sensible y latente)

La ganancia adicional de calor ("additional heat gain") se entra en Btu/hr directamente. Aquí se puede considerar toda la carga que no se utiliza con mucha frecuencia en un cómputo de carga usual (infiltración, vapor y otros). El programa pide primero el sensible y luego el latente.

Los siguientes parámetros se entran en porcentaje: la ganancia de calor del conducto de entrada ("supply duct heat gain") (supply DHG ; %), la pérdida de calor por fugas en el conducto de entrada ("supply duct leakage loss") (supply DLL ; %) y el porcentaje de calor del motor del abanico (% FAN H.P.) Para el abanico el programa ofrece tres opciones para determinar el porcentaje del calor del motor del abanico: entrar directamente el calor del motor en Btu/hr, entrar el B.H.P. del motor o entrar directamente el porcentaje (%). De igual forma la pérdida de calor latente por fugas en el conducto de entrada ("latent duct leakage loss") (supply DLL ; % RLH), la ganancia de calor en el conducto de retorno ("return duct heat gain") (return DHG; %RSH), la pérdida de calor por fugas en el conducto de retorno ("return duct leakage loss") (return DLL ; %RSH) se entran en porcentaje.

Factor de desvío

Se entra el factor de desvío especificado para el diseño, según el equipo que se desea utilizar.

Factor de seguridad ("safety factor")

Se entra el factor de seguridad en porcentaje.

CFM de ventilación (CFM_{oa})

Para entrar el CFM_{oa} el programa le ofrece al usuario tres opciones. Para ayudar a determinar la opción a usar, el programa presenta en la pantalla una tabla con información de diferentes alternativas. Estas opciones son las siguientes: $CFM/persona$, CFM/ft^2 y CFM_{oa} , que es la cantidad de CFM de ventilación que se desea.

Abanico de descarga ("exhaust fan")

Se entran los CFM del abanico de descarga que se consideran en el diseño. Hay que aclarar que el programa escoge el valor mayor entre los CFM de ventilación y el abanico de descarga como los CFM_{oa} del diseño y no la suma de los dos. Una vez se entran los datos del abanico de descarga, el programa comienza a correr y luego despliega en la pantalla una tabla con las condiciones preliminares que denominamos "Preliminary Conditions". En este momento hay que entrar los CFM_{da} de su preferencia⁷ a base de las condiciones preliminares que obtuvo.

Cuando el usuario entra los nuevos CFM_{da} , el programa comienza a calcular nuevamente llevándonos a otra pantalla donde nos muestra las

⁷ El usuario debe saber de aire acondicionado para saber como le afecta seleccionar unos CFM_{da} más altos o más bajos que los que aparecen en la tabla de condiciones preliminares.

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

condiciones de diseño finales. Una vez llega a esta pantalla, el programa nos ofrece tres opciones que el usuario puede utilizar. Estas opciones son las siguientes: correr el programa otra vez ("RUN PROGRAM AGAIN"), imprimir un reporte ("PRINT REPORT") y guardar un reporte ("SAVE REPORT").

Si escoge correr el programa otra vez, el usuario tendrá cuatro opciones que le ayudarán a cambiar aquellas condiciones que son variables en un cómputo de carga. Estas opciones son las siguientes: el factor de desvío, CFM_{ca} , CFM_{da} y "Re-heat".

Una vez el usuario cambia alguna de estas condiciones, el programa corre nuevamente desplegando en la pantalla la tabla de condiciones preliminares. Una vez más se pueden seleccionar los CFM_{da} y luego el programa corre nuevamente desplegando una vez más en la pantalla las condiciones finales del cómputo de carga. Otra vez el usuario tiene la oportunidad de las tres opciones; correr el programa otra vez ("RUN PROGRAM AGAIN"), imprimir un reporte ("PRINT REPORT") o guardar un archivo ("SAVE REPORT").

La forma "RSH" para correr el programa AIRPAK 123™

La forma "RSH" para correr el programa AIRPAK 123™ es la que nosotros llamamos la forma corta de ejecutar el programa. Esta forma se utiliza cuando ya sabemos la información completa de nuestro pico de carga o cuando queremos verificar rápidamente algún cómputo de carga. El orden de entrar los datos con esta forma es el siguiente:

- Calor sensible del cuarto (RSH) (Btu/hr)
- Ganancia de calor en el conducto de entrada (supply DHG) (%).
- Pérdida de calor por fugas en el conducto de entrada (supply DLL) (%).
- Calor del abanico del motor ("FAN H.P") (%).
- CFM_{ca} - una sola opción, directamente en CFM.

- Factor de desvío
- Calor latente del cuarto (RLH), (Btu/hr)
- Pérdida de calor latente por fugas en el conducto de entrada (RLH) (%)
- Ganancia de calor en el conducto de retorno (return DHG) (%)
- Pérdida de calor por fugas en el conducto de retorno (return DLL) (%)
- AREA que se desea acondicionar (ft²).

Una vez entra el área, el programa comienza a correr llevando a la pantalla la tabla de condiciones preliminares con las mismas opciones que explicamos anteriormente cuando describimos la forma "Peak in".

Conclusión

Un cómputo de carga es la base para un diseño de aire acondicionado. Así que cualquier imprecisión en el cómputo puede reflejarse en el diseño y traer malas consecuencias. Un cómputo de carga es algo que es muy variado. Para el programa AIRPAK 123TM, se utilizó el concepto que desarrolló Carrier para realizar un cómputo de carga que consiste en establecer una serie de factores utilizando la carga sensible y latente del espacio a acondicionarse. Estos factores nos llevan a determinar el ESHF, BF y ADP, que son los parámetros principales de las ecuaciones utilizadas en el concepto desarrollado por Carrier para determinar un cómputo de carga. En el programa AIRPAK 123TM utilizamos este concepto ya que entendemos que es más razonable.

La forma de desarrollar el pico de carga en el programa AIRPAK 123TM, se basa en conceptos establecidos por ASHRAE, reflejándose principalmente en la parte del programa donde nos pregunta toda la información sobre la construcción y ubicación del area a acondicionarse. Al hablar de ésto nos referimos a los datos sobre los cristales, paredes, techos y sus respectivas ubicaciones (N,S,E,W) que hay que suministrar.

López y Tirado/Carga térmica para acondicionamiento de aire

Podemos decir que el programa AIRPAK 123™ es una inspiración del programa "COOLOAD" para una calculadora Hewlett Packard 42-S, el cual fue creado por el Ing. Luis González, Jr., quien es consultor de Ingeniería Mecánica y Profesor de Aire Acondicionado de la Universidad Politécnica de Puerto Rico. Resumiendo, podemos decir que el programa AIRPAK 123™ es una combinación de Carrier, ASHRAE y el programa "COOLOAD".

En estos momentos nosotros tuvimos la oportunidad de crear un programa de cómputo de carga el cual consideramos que es sencillo y se puede manejar con facilidad, dado que la persona que lo use sepa de aire acondicionado y del concepto de Carrier. Aquí entraría porque se mencionó anteriormente que un cómputo de carga es variado. Nosotros los creadores de AIRPAK 123™ tuvimos como base para crear el programa a Carrier y ASHRAE. Con Carrier determinamos cómo crear el programa y de ASHRAE obtuvimos toda la teoría que se utiliza para determinar el pico de carga y parte de la carga interna. Entendemos que es lo mejor y estamos realmente convencidos.

Creemos que cada ingeniero tendría maneras diferentes de crear un programa de cómputo de carga, pero no todos tienen los conocimientos teóricos y técnicos para hacerlo. Debido a esto, le hemos pedido opiniones a varios ingenieros mecánicos que se dedican al diseño de aire acondicionado para tener ideas en el programa. El programa AIRPAK 123™ se comparó con el de Carrier y el de Trane. Para comparar los usamos el mismo ejemplo para los tres programas. Con el programa de Carrier los CFM_s resultaron iguales pero la carga total fue menor, alrededor de unos 36,000 Btu/hr menos. De acuerdo al concepto desarrollado por Carrier, estudiando su programa y comparándolo con AIRPAK 123™, no entendemos por qué Carrier no desarrolló su programa según su concepto.

Entendemos que el programa AIRPAK 123™ es uno práctico y fácil de utilizar. El programa fue verificado cuidadosamente y es cierto que solo cumple para Puerto Rico, pero sabemos que se puede mejorar y usarse en

diferentes partes del mundo. AIRPAK 123™ cumple con todos los requisitos expuestos en nuestra propuesta de tesis y cumple con las ideas que teníamos de desarrollar el programa, que consistían en realizar un programa de cómputo de carga para Puerto Rico, con los datos requeridos para Puerto Rico, lo más preciso posible y fácil de usar.

Referencias

ASHRAE, 1989, *ASHRAE Handbook Fundamentals I-P Edition*, Atlanta, ASHRAE, págs. 1.1 - 27.38.

ASHRAE Technical Committee on Psychometrics, 1977, *ASHRAE Brochure on Psychrometry*, Atlanta.

CARRIER, 1972, *Carrier System Design Manual*, New York, "Part 1 (Load estimating)",