

ATA 21

AIRE ACONDICIONADO

Y

PRESURIZACIÓN DE

CABINA

Acondicionamiento de aire: aviones con motor de turbina

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El mantenimiento de un habitáculo confortable y seguro para los pasajeros y tripulantes del avión requiere el control de variables que tienen influencias fisiológicas. La temperatura del aire, su contenido de humedad, la presión y la propia calidad del aire son factores que intervienen en la operación del sistema de acondicionamiento de aire del avión.

De una parte, la calefacción de la cabina del avión comercial, que vuela a velocidad subsónica, es un factor relevante si se tiene en cuenta la gran cantidad de calor que se pierde durante el vuelo a alta altitud, con temperatura exterior muy baja. El problema parece menos importante en el avión supersónico, debido a que el calentamiento aerodinámico eleva la temperatura del revestimiento del avión. Pero, aun así, el avión de transporte supersónico ("Concorde") opera en grandes tramos subsónicos de vuelo. Además, requiere calefacción, en todo caso, tras prolongados periodos en tierra con bajas temperaturas.

Igual, pero en sentido inverso, puede decirse de la refrigeración. En realidad, si se compara el avión con otros medios de transporte convenimos en destacar la variabilidad del ciclo de climatización de la cabina. Se inicia normalmente con refrigeración, en tierra y en vuelo a baja cota, prosigue más tarde con calefacción en crucero, y se termina de nuevo con refrigeración. El ciclo típico tan variable de climatización, el gran volumen de cabina, las limitaciones de extracción de aire a bordo (no se olvide que es aire sangrado de los motores) y la falta de humedad en la atmósfera a alta cota, constituyen un conjunto formidable de factores adversos y es difícil obtener una solución satisfactoria para el sistema de acondicionamiento de aire. Como veremos, las cabinas operan en el límite inferior de bienestar tal como lo siente el pasajero medio. No es extraño, pues, que en este campo se produzcan las quejas principales por parte del pasaje a bordo.

Finalmente, para añadir una nueva variable, la necesidad de mantener la presión de cabina dentro de límites fisiológicos exige la presurización del aire suministrado a cabina.

1.2 Acondicionamiento del aire de cabina es el conjunto de técnicas que controlan las siguientes funciones: calefacción, refrigeración, humidificación, deshumidificación, ventilación y presurización del aire de la cabina de vuelo y de pasajeros. Conviene distinguir entre una cabina y otra por el hecho de estar sometidas a un conjunto de variables diferenciadas.

La Fig. 38.1 introduce de forma gráfica y sencilla el esquema general de los conjuntos de sistemas que intervienen en la climatización de las cabinas del avión a motor de turbina.

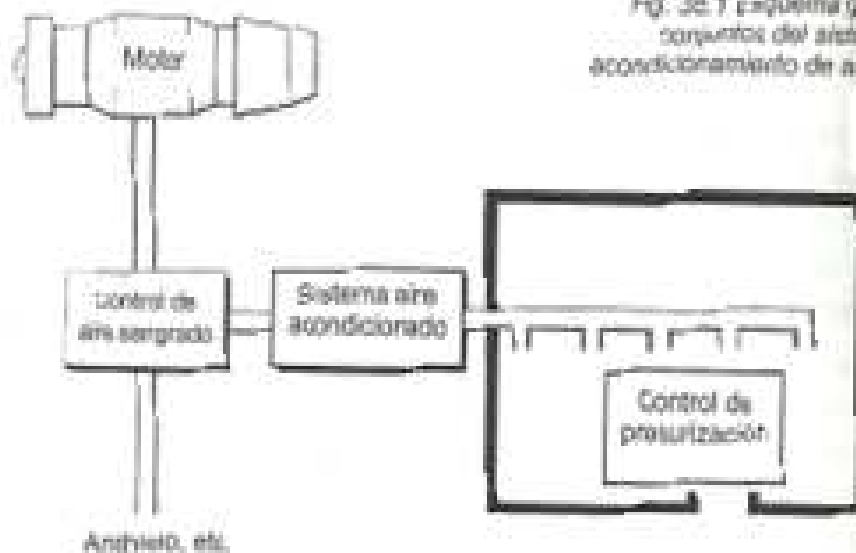


Fig. 38.1 Esquema general de los conjuntos del sistema de acondicionamiento de aire de cabina.

Aunque aquí, por motivos didácticos, realizamos un estudio individual de las regiones del sistema conviene señalar que en los aviones actuales es una entidad supleta y no una serie de funciones y actividades separadas. El diseño como entidad completa tiene la virtud, desde el lado práctico, de proporcionar un sistema al menor coste y peso posibles.

Breve historia del acondicionamiento de aire de cabina

En el terreno histórico, la primera función de acondicionamiento de cabina que apareció a bordo fue el mantenimiento de presión parcial de oxígeno suficiente para la respiración en vuelo de alta cota. Las primeras instalaciones de oxígeno se remontan a épocas tan lejanas como la I Guerra Mundial. Los aviadores que combatían en la Gran Guerra llegaron a usar mascarillas de oxígeno, pero muy rudimentarias. Se portaban sobre todo en misiones de reconocimiento a alta altitud. Durante las dos décadas siguientes, años veinte y treinta, aparecieron los primeros trajes de vuelo completamente presurizados, pero aún los métodos para simi-

nistrar oxígeno al piloto eran rudimentarios. En 1939, nada más iniciada la II Guerra Mundial, la Luftwaffe disponía del primer sistema de suministro de oxígeno del tipo de demanda. Inmediatamente los ingleses pusieron a punto su propio sistema. Era un sistema de flujo continuo a la mascarilla del piloto, con un equipo economizador de oxígeno que permitía un considerable tiempo de suministro.

De esta época provienen los primeros esfuerzos paralelos para presurizar la cabina de vuelo. Aquí los problemas eran de peso estructural, como era fácil prever. Los proyectistas ingleses y alemanes querían quitar hasta el último gramo de peso del avión de caza ante máximas exigencias de agilidad en el aire. Así, se redujo el espesor de la chapa de blindaje de cabina para permitir que el avión tuviera mínimo momento de inercia alrededor del eje longitudinal.

El problema de la presurización de la cabina se abordó, pues, desde criterios de la eficacia de la operación de vuelo y no por comodidad del piloto, de manera que la presión diferencial era mínima, cuando existía. Eran sistemas muy simples. La presión diferencial cambiaba de forma prefijada con la altitud. El piloto no tenía control sobre ella, aunque sí la podía quitar. Ello permitía mantener una atmósfera respirable hasta cierta altitud de vuelo, llamada altitud de conmutación. Como norma de procedimiento, el piloto portaba constantemente la mascarilla de oxígeno y lo único que tenía que hacer era abrir la llave del selector de flujo de oxígeno cuando alcanzaba la altitud de conmutación.

El mantenimiento de una pequeña presión diferencial en cabina de 5 psi (curiosamente esta presión diferencial es el valor estándar en la aviación militar de combate actual) tenía la virtud de aligerar en lo posible el peso estructural del avión. Además, el caza se defendía así de una despresurización explosiva en caso de ser alcanzado por proyectiles enemigos, aunque este problema era mucho mayor en los bombarderos por el gran volumen de cabina.

Cuando aparecieron los primeros aviones comerciales, de Douglas, Boeing y Curtiss, se ofreció a los pasajeros portar mascarillas de oxígeno. La práctica se abandonó pronto por la reacción negativa de muchos de ellos. Intervinieron factores de todo tipo, presuntamente higiénicos, técnicos, logísticos, e incluso, decían, se veían con "aspecto grotesco". En un giro hacia al otro extremo se optó por la solución de mantener la presión de nivel del mar hasta el techo del avión. De este modo, los cambios de altitud del avión no afectaban en nada a los pasajeros.

Las operaciones aéreas de transporte militar de gran escala realizadas durante la II Guerra Mundial permitieron establecer que los ocupantes se sometían sin riesgo alguno a prolongados viajes, a la altitud de presión de 8.000 pies. Estas prácticas venían a corroborar los estudios médicos de años precedentes en el campo de la fisiología del vuelo. Desde luego, fue un alivio para los constructores de aviones comerciales que, con un techo de 25.000 pies, podían reducir la presión diferencial de cabina por debajo de 5,5 psi.

En 1947, pues, la aviación comercial tenía en servicio aviones de larga distancia con un sistema de acondicionamiento de cabina sofisticado, presurizado y con calefacción. Un tipo clásico de esta época fue el *Avro Tudor*. Disponía de un sistema de calefacción muy elaborado, con calentadores de combustión situados en el piso de cabina, inclusive con capacidad de conexión a vehículo de tierra para calefacción en el suelo. La distribución de aire caliente por tuberías llegaba a todo el avión. Pero el *Tudor* ha pasado a la historia por motivos desafortunados (ver el comentario de texto "¿Qué sucedió con el *Tudor*?", más adelante).

La refrigeración de la cabina, por el contrario, era cuestión distinta. Aunque se auspiciaban ideas para instalar a bordo máquinas de aire acondicionado de ciclo por vapor, con gas frén, se argumentaba que la necesidad de refrigerar la cabina en largas distancias se limitaba, por lo general, a breves periodos en el aeropuerto y durante el vuelo a baja altitud. De este modo se ponía más énfasis en la calefacción que en la refrigeración. Resulta curioso leer lo siguiente en una revista especializada de gran circulación, en 1947, refiriéndose al tema de la refrigeración de la cabina en los aviones comerciales: "... siempre está disponible la opción de cargar hielo o gas carbónico a bordo en la última parada para refrescar durante un cierto tiempo la cabina, confiados en el rápido ascenso de los modernos aviones actuales".

Clasificación de los sistemas de refrigeración

1.3 El enfriamiento del aire que pasa a la cabina es una función básica de la climatización. Hay dos tipos principales de sistemas de refrigeración.

- Sistemas de refrigeración de ciclo por aire.
- Sistemas de refrigeración de ciclo por vapor.

a) Sistemas de ciclo por aire

Se basan en el principio de eliminación de calor por la transformación de la energía calorífica en trabajo mecánico. Se emplean en aviones reactores comerciales. Los sistemas de refrigeración de ciclo por aire funcionan con aire sangrado del compresor del turbo reactor. Como vimos en el Capítulo 37, el sangrado se efectúa en una etapa del compresor donde el aire tiene suficiente presión. Es aire, pues, caliente y a presión, que se emplea para calefacción, refrigeración y presurización, una vez acondicionado.

b) Sistemas de ciclo por vapor

En estos sistemas la refrigeración de la cabina se obtiene mediante la evaporación de un líquido refrigerante en una máquina especial.

Es un equipo de amplio empleo en la industria del automóvil. Los sistemas de ciclo por vapor son verdaderas bombas de calor, en el sentido de que transmiten el calor desde un medio ambiente a otro que está a mayor temperatura.

Al contrario del sistema de ciclo por aire, que funcionalmente es de tipo abierto, éste, de ciclo por vapor, es un sistema en circuito cerrado donde la evaporación del líquido refrigerante absorbe el calor de la cabina.

1.4 A grandes rasgos citamos el campo de aplicación de un sistema y otro.

Los aviones reactores emplean normalmente sistemas de ciclo por aire, a excepción de tipos de aviación general-regional que pueden emplear sistemas de ciclo por vapor.

En los aviones turbohélicos se pueden emplear ambos tipos.

He aquí algunas pautas de aplicación:

1. Los sistemas de ciclo por aire permiten todas las funciones del acondicionamiento del aire de cabina, incluida la presurización, que no está presente en las máquinas de ciclo por vapor.
2. Los sistemas de ciclo por aire tienden a ser más ligeros de peso.
3. El movimiento de grandes cantidades del aire en el sistema de cabina requiere sistemas de ciclo por aire. El sistema de ciclo por vapor se adapta mejor a la refrigeración de pequeños volúmenes de cabina.
4. No obstante, el sistema de ciclo por vapor tiene mejores rendimientos que el de ciclo abierto y posee, además, una capacidad de refrigeración en tierra no igualada.

Clasificación de los sistemas de calefacción

1.5 Hay tres tipos principales de sistemas de calefacción de cabina:

- Por aire caliente, como función adicional a la de refrigeración del sistema de ciclo por aire. El aire caliente procede del sistema de aire sangrado del compresor de los motores.
- Calefacción eléctrica.
- Calefacción mediante calentadores de combustión

Del primer sistema hemos hablado anteriormente y su funcionamiento se describe más adelante.

La calefacción eléctrica, citada también en el Capítulo 36, consiste en resistencias eléctricas alojadas en un calefactor, que calientan el aire que pasa por él. Es un equipo compacto, cualidad siempre muy apreciada en aviación, de poco peso y eficiencia notable.

La calefacción mediante calentadores de combustión es un tema estudiado en el Capítulo 36. Es un sistema propio de aviones con motor alternativo.

2. REQUISITOS DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

2.1 Los requisitos del sistema están muy relacionados con las condiciones de suministro de aire a la cabina, tanto en cantidad como en calidad del mismo. Distinguiamos cabina de vuelo y de pasajeros.

Caudal de aire para cabinas de vuelo y de pasajeros

2.2 Cabina de vuelo

Dentro de las condiciones generales de acondicionamiento de aire para la cabina de vuelo destacamos:

- La cabina de vuelo debe estar ventilada a régimen de aire fresco no inferior a $0,283 \text{ m}^3/\text{minuto}$ ($10 \text{ pies}^3/\text{minuto}$) por cada miembro de la tripulación de vuelo. Es un valor aceptable para conseguir el grado de bienestar adecuado.
- Asimismo, la cabina de vuelo debe contar con mando selector de control de temperatura y cantidad de aire de ventilación independiente de la cabina de pasajeros.
- No obstante lo dicho en el párrafo anterior, el acondicionamiento de aire independiente de la cabina de vuelo no es necesario en el caso de que se cumplan tres condiciones:
 1. El volumen total de la cabina ("cockpit" + pasajeros) es menor o igual que $22,64 \text{ m}^3$ (800 pies cúbicos)
 2. La cabina en su conjunto está proyectada de forma que la diferencia de temperatura del aire entre la cabina de pasajeros y la de mando no sea mayor de $3 \text{ }^\circ\text{C}$
 3. Finalmente, todos los controles de temperatura y de ventilación son accesibles a la tripulación de vuelo.

2.3 Cabina de pasajeros

La renovación completa del aire de la cabina de pasajeros se realiza cada dos o tres minutos, en función del volumen de la misma.

Es práctica usual la recirculación del 50 por ciento del aire de cabina, haciéndolo pasar a través de filtros de gran capacidad de retención. El otro 50 por ciento es aire fresco procedente de las máquinas de aire acondicionado, vía el sistema de sangrado de aire.

La cabina de pasajeros recibe menos caudal de aire por unidad de volumen que la cabina de vuelo. Hay dos motivos fundamentales para ello:

1. El mayor caudal de aire que se destina a la cabina de vuelo permite obtener una pequeña presión diferencial entre ambas cabinas, de manera que impide la entrada de humos y olores en la cabina de vuelo procedentes de la de pasajeros.
2. La cabina de vuelo está expuesta a variación de carga térmica mucho más alta que la cabina de pasajeros, en un doble sentido, por ingreso y por pérdida de calor.
 - Ingreso de calor en la cabina de vuelo: es la acumulación de calor procedente de los paneles de instrumentos y de la propia radiación solar que llega a través de parabrisas, ventanillas y chapa del revestimiento de cabina.
 - Pérdida de calor: la cabina de vuelo pierde gran cantidad de calor en vuelo nocturno (radiación a través de parabrisas, ventanillas y chapa del revestimiento de cabina).

2.4 El caudal de aire que las máquinas introducen por unidad de longitud de cabina de pasajeros es prácticamente el mismo, de manera que no se puede mantener en términos técnicos que los compartimentos de clase preferente y gran clase reciban mayor caudal de aire que el de clase turista. Si es cierto, y parece obvio señalarlo aquí, que el caudal de aire por pasajero es menor en clase turista, pero esto se debe a la mayor densidad de asientos y no a la distribución lineal desigual de aire acondicionado.

Cada pasajero en avión de fuselaje convencional dispone, como media, de unos $0,18 \text{ m}^3/\text{minuto}$ de aire, en máxima ocupación. Esta cifra es mayor en los aviones de fuselaje ancho, y se sitúa en torno a $0,22 \text{ m}^3/\text{minuto}$.

Digamos que los valores citados están en la banda media-baja aceptable recomendada para los medios de transporte, si bien hay que considerar dos cosas: primero, que no siempre la ocupación del avión es máxima; en segundo lugar no debemos olvidar que el aire acondicionado para cabina es un fluido caro, en términos energéticos, en el que se ha invertido una parte pequeña, pero significativa, del combustible de a bordo.

Desgraciadamente, desde este punto de vista, cada diez años o así asistimos al incremento del índice de derivación de los motores de doble flujo. En consecuencia, cada vez hay menos aire "fresco" para cabina y servicios. Cada vez, pues, hay que recircular mayor proporción de aire de cabina.

Calidad del aire



2.5 La calidad del aire de cabina (de vuelo y de pasajeros) exige:

- Mantenimiento de la concentración de ciertos gases inferior al nivel estipulado, bien por normativa o por criterios establecidos por los fabricantes.
- Capacidad filtrante del sistema adecuada para retención de partículas, ácidos, bacterias, etc.

Nivel de concentración de gases

Tres puntos a destacar:

- La concentración de monóxido de carbono (CO) debe ser inferior a una parte por 20.000 de aire, equivalente al 0,005 por ciento en volumen.
- Sobre el anhídrido carbónico. La normativa aeronáutica, con anterioridad a 1997, limitaba la concentración de este gas (CO_2) para la cabina de vuelo, que debía ser inferior al 3 por ciento (volumen), equivalente a una parte de CO_2 por 30.000 de aire, salvo que la tripulación disponga de equipo de respiración autónomo, como es el caso normal.

El límite de 3% señalado representa la frontera donde se producen las primeras manifestaciones de dolor de cabeza y otras molestias. Después de 1997, la normativa aeronáutica ha seguido las recomendaciones de otros organismos oficiales y ha limitado la concentración máxima de CO_2 al 0,5 por 100 (1 parte de CO_2 por 5.000

partes de aire). Ya no se hace distinción entre cabina de vuelo y de pasajeros. Este valor coincide con el recomendado para una exposición de 8 horas, típico de un vuelo de larga distancia.

Recientemente, la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado recomienda bajar el límite a 1 parte de CO_2 por 1.000 partes de aire en edificaciones y lugares de larga permanencia. La recomendación se ha establecido más como norma de calidad (para evitar olores) que como criterio limitativo de concentración de bióxido de carbono. La reducción de CO_2 requiere siempre el incremento de la ventilación en cabina. Conseguir esta proporción de CO_2 en la cabina de los aviones impondría una penalización muy fuerte en el consumo específico de combustible de los motores, dada la gran cantidad de aire sangrado que sería necesario extraer.

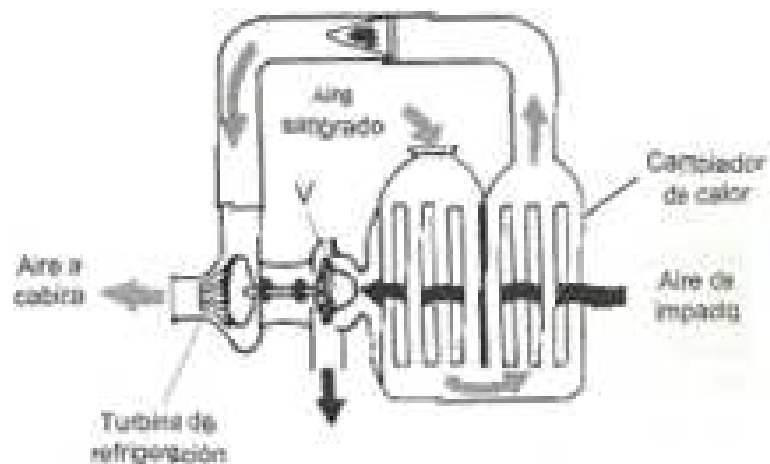
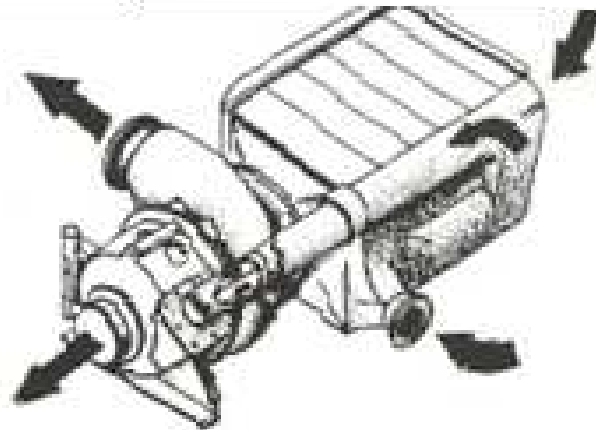
3. Tema ozono. La normativa vigente impone límites de concentración de ozono en cabina, hasta el punto de limitar la altitud operativa del avión en caso de superar los límites prescritos. Dos factores que aumentan la concentración media de ozono en cabina son: incremento de la latitud de la ruta y Primavera (hemisferio Norte, Otoño en el Sur). En los casos donde se rebasan los límites de concentración es necesario convertir el ozono por medio de catalizadores.

Concentración de partículas y microorganismos

2.6 También tres puntos a señalar:

- Los filtros instalados en el sistema de circulación del aire de cabina retienen partículas del tamaño de los virus. Por consiguiente hablamos de partículas de 0,01 micras.
- Tema humo de tabaco. No existe normativa oficial aeronáutica sobre concentraciones, salvo requisitos gubernamentales de prohibición de fumar en ciertos vuelos y otras reglas que pueden imponer las compañías aéreas. La presencia de humos de tabaco en la cabina se manifiesta en dos frentes: cantidad de monóxido de carbono presente en la atmósfera e índice de partículas en suspensión. La cantidad de CO en la sección de fumadores suele estar dentro de valores "normales", o aceptados, pero no así el índice de partículas en suspensión. Por ejemplo, la Sociedad americana creada anteriormente recomienda que este índice sea inferior a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cuando en realidad es posible medir índices de hasta $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la sección de fumadores. El índice normal en la sección de no fumadores es de 45 a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Mantener la ventilación del avión en funcionamiento mientras hay pasajeros a bordo es la forma más adecuada para luchar contra microbios, virus, hongos, bacterias, arácnidos, etcétera. De hecho las escasas y documentadas epidemias que se han originado a bordo se han producido en ocasiones donde la ventilación de cabina, por avería u otras causas, se ha mantenido en OFF. En todo caso, bueno es saber que las partículas presentes en el humo del tabaco, las bacterias y otras materias en suspensión presentan tamaños en torno a 10 micras, de modo que los filtros de a bordo poseen capacidad sobrada de retención.

Fig. 38.2 Máquina de acondicionamiento de aire. Una vista en perspectiva se muestra en la parte superior. En la parte inferior está dibujado el esquema de circulación de flujo de aire.



3. SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE CICLO POR AIRE

3.1 El sistema de acondicionamiento de ciclo por aire es el estándar para refrigeración y calefacción de cabina en los reactores comerciales. El sistema se organiza en torno a la máquina de acondicionamiento del aire. Un dibujo en perspectiva de ella se muestra en la Fig. 38.2. En la parte inferior está dibujado el esquema de circulación del flujo de aire, que estudiaremos detenidamente en este apartado. Conviene añadir que el dibujo representa uno de los tipos de máquinas existentes, como veremos en el apartado 3.13, aunque contiene la información que necesitamos en este momento. En general, el sistema está constituido o es interface con los siguientes elementos básicos:

- a) Sistema de sangrado de aire del compresor.
- b) Conducto de entrada de aire sangrado y junta de expansión.
- c) Cambiador de calor.
- d) Válvula de entrada de aire exterior (*Raw air*¹).

¹ *Raw* es el término inglés que se aplica a la captación de aire en el avión por efecto dinámico. En el lenguaje operacional es frecuente emplear la expresión "air ram" para referirse a los flujos de aire que captan una toma dinámica, bien del avión o del motor.

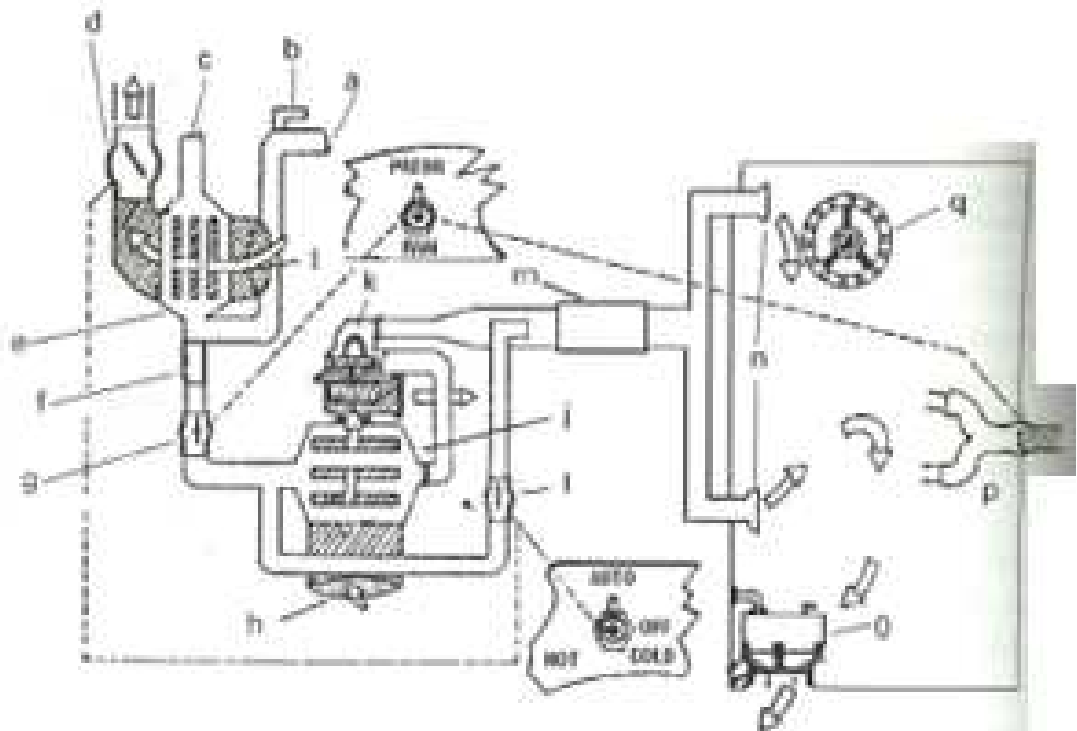


Fig. 38.3 Sistema básico de acondicionamiento de aire.

Detalles: a) Conducto para antihielo del parabrisas; b) Toma de aire auxiliar; c) Entrada de aire caliente del compresor; d) Válvula moduladora de entrada de aire de impacto; e) cambiador de calor primario; Venturi limitador de flujo; g) Válvula de cierre; h) Entrada de aire al cambiador de calor secundario; i) Válvula de derivación de la turbina de refrigeración; j) Cambiador de calor secundario; k) Turbina de expansión; l) Entrada de aire al cambiador de calor primario; m) Calefactor eléctrico; n) Conducto de aire de entrada a cabina; o) Regulador de presión del aire de cabina; p) Válvula de cierre de aire de impacto (RAM) a cabina; q) Válvula de seguridad de cabina.

- e) Máquina de acondicionamiento de aire ("Pack").
- f) Sistema de separación de agua.
- g) Unidad de control de la temperatura del aire.
- h) Sistema de presurización y ventilación de cabina.
- i) Sistemas de indicación y de alarma en cabina.

Como ya sabemos, Capítulo 37, las dos primeras unidades no forman parte, en sentido estricto, del sistema de acondicionamiento de aire. Los sistemas h) e i), presurización, ventilación e indicación de cabina, son interfaces del sistema con otros del avión. Es oportuno su estudio aquí por las funciones conexas entre ellos.

Conducto de entrada y junta de expansión

3.2 Es un conducto que lleva el aire caliente del compresor al circuito neumático del avión. La función de la junta de expansión es permitir los cambios dimensionales del conducto por efecto de la temperatura.

Limitador de flujo

3.3 Elemento f) en la Fig. 38.3.

Puede ser un tubo venturi o una válvula limitadora de flujo.

En el primer caso es un estrechamiento del conducto de aire de sangrado. Su función es limitar en su inicio la pérdida masiva de aire sangrado del compresor en el caso de que se produzca una rotura o fuga de aire en el sistema.

Más generalmente es una válvula de cierre, limitadora de flujo, que cumple dos funciones adicionales:

1. Regular la presión del aire a los valores iniciales previstos para el sistema.
2. Actuar como válvula de cierre rápido en el caso de producirse una condición de sobretemperatura del aire sangrado del compresor.

Cambiador de calor

3.4 Elemento j) en la Fig. 38.3.

Es la primera unidad propia del sistema de acondicionamiento de aire del avión.

El cambiador de calor (ver Capítulo 37) es un radiador gas a gas (aire-aire, para este caso concreto) que disminuye la temperatura del aire caliente sangrado del compresor.

El cambiador de calor está bañado por la corriente de aire de impacto captado por una toma exterior del avión (ver también Fig. 38.2).

Como sabemos, el cambiador (o cambiadores, como es el caso de la ilustración) está constituido por pequeños tubos de aluminio o de acero inoxidable dispuestos en una estructura metálica de soporte. Entre los tubos hay espacio suficiente para la circulación del aire frío de impacto captado por una toma dinámica del avión, a través de una válvula de entrada.

El aire sangrado del compresor, que pasa por el interior de los tubos, cede parte del calor que posee a la corriente de aire que circula alrededor de los tubos.

El aire de impacto que se ha usado para refrigerar el flujo sangrado del compresor es expulsado a la atmósfera. Por su parte, el aire sangrado pasa a la turbina de refrigeración de la máquina, donde experimenta un nuevo y energético enfriamiento. La expansión del gas, recordemos, implica una caída muy fuerte de su temperatura. El enfriamiento que surge en el aire sangrado del compresor depende de la temperatura y de la cantidad de aire de impacto que pasa entre los tubos del cambiador. La válvula de entrada de aire de impacto, que estudiamos a continuación, regula el flujo de aire en el cambiador y, por consiguiente, la refrigeración que experimenta el aire sangrado a su paso por el cambiador.

Válvula de entrada de aire de impacto

3.5 Elemento (d) en la Fig. 38.3.

Es una válvula de tipo mariposa, pilotada eléctricamente por el sistema automático de control de temperatura.

Se dice que la válvula de entrada de aire de impacto es moduladora de flujo porque su función es controlar el gasto de aire de impacto que pasa por el cambiador de calor.

En algunos aviones es normal la presencia de dos válvulas independientes, una en el conducto de la toma dinámica, llamada válvula de entrada de "aire *Ram*" y otra en la salida, llamada también válvula de salida de "aire *Ram*".

Es normal la presencia de una válvula de aire de impacto de emergencia. Esta válvula no tiene nada que ver con las anteriores, destinadas a regular el flujo de aire de refrigeración que pasa por el cambiador de calor. La válvula de aire de impacto de emergencia es una entrada de aire directa a cabina para el caso de fallo de todos las máquinas de aire acondicionado, o bien para ventilar la cabina rápidamente en caso de humo.

Máquina de acondicionamiento de aire ("Pack")

3.6 La función de la máquina de acondicionamiento de aire, llamada comúnmente "Pack", es enfriar todo o parte del aire sangrado del compresor del motor hasta el grado que precisa la temperatura del aire destinado a la cabina.

El grado de refrigeración que se obtiene depende de la posición de la válvula de derivación de la turbina de refrigeración. La válvula es el conjunto (j), en la Fig. 38.3. Para simplificar el texto identificaremos esta válvula con sus siglas iniciales VDT. Veremos que sobre VDT se apoya el funcionamiento de todo el sistema de acondicionamiento de aire.

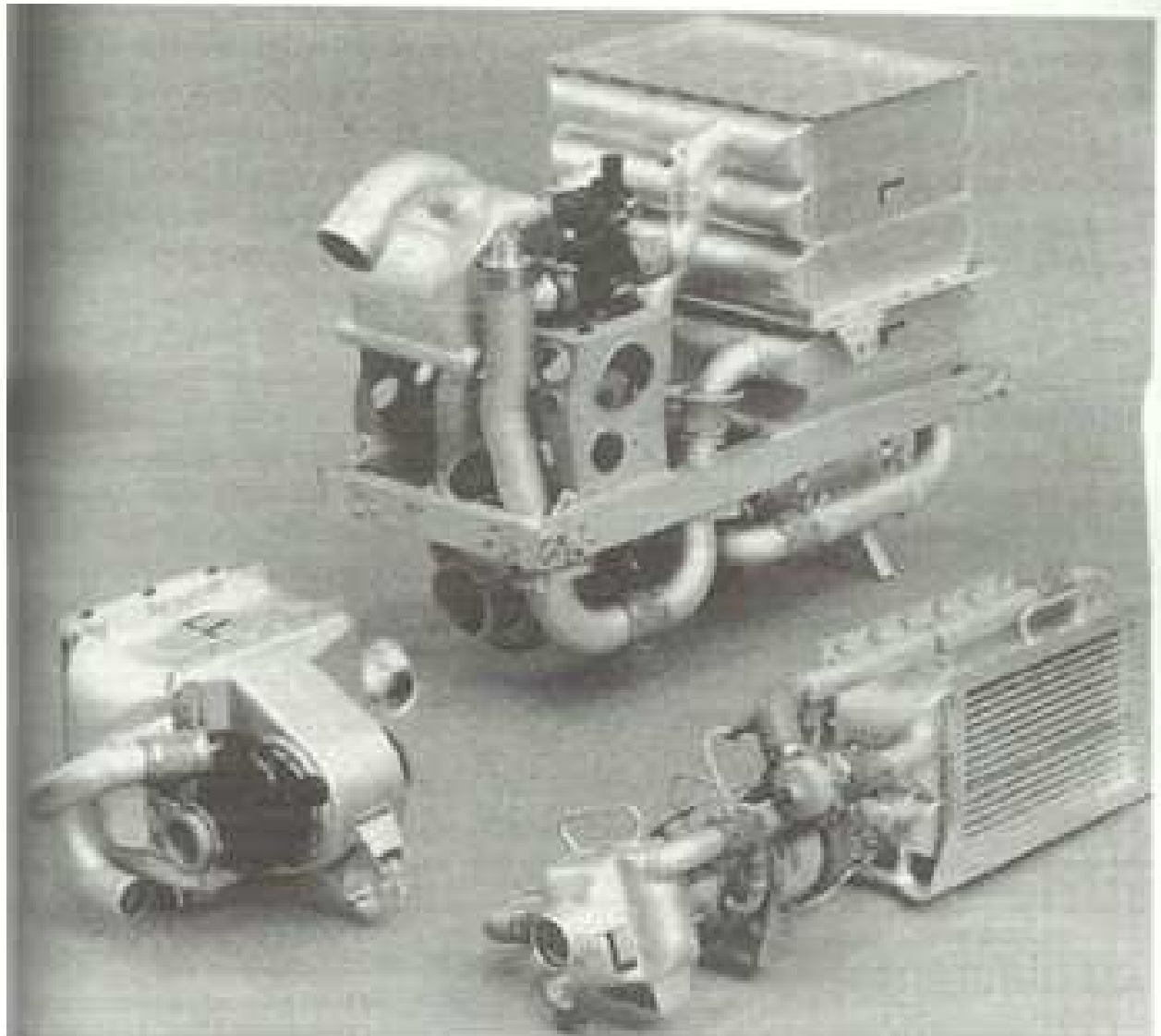
Así, si la VDT está abierta en el conducto de paso que procede del aire sangrado (caliente) del compresor, como es la posición dibujada en la Fig. 38.3, la cantidad total de aire sangrado que pasa por la turbina de refrigeración es pequeña. Eso es así porque el aire sangrado encuentra vía más fácil de paso por la válvula VDT. En estas condiciones, el aire sangrado se enfría poco. La posición dibujada, entonces, es típica de funcionamiento de la máquina en vuelo de crucero a alta altitud, donde el avión experimenta considerables pérdidas de calor y la cabina necesita calefacción.

Por el contrario, en vuelo subsónico y a baja altitud, normalmente es necesario introducir en la cabina gran cantidad de aire frío, de manera que la VDT tiene posiciones más cerradas que la dibujada en la Fig. 38.3. La máxima regulación de frío de la máquina se obtiene cuando la VDT está completamente cerrada, de modo que todo el aire de sangrado pasa por la turbina de refrigeración.

Descripción general de la máquina de acondicionamiento de aire

3.7 La Fig. 38.3, ya citada, muestra el esquema del "Pack" o máquina de acondicionamiento de aire típica. Veremos más adelante, en 3.13, los distintos tipos de "Packs". No obstante, el funcionamiento básico se puede explicar a partir de uno de ellos, como el de la Fig. 38.3. Consultar también en esta descripción la Fig.

38.2. La unidad consta de cambiador de calor y conjunto de turbina de refrigeración. La turbina de refrigeración, como tal conjunto, consta de ventilador de aspiración de aire de impacto y rueda de turbina. El rodete ventilador y la rueda (rotor) de turbina están unidas mecánicamente por un eje, de manera que giran a la misma velocidad. El ventilador es impulsado por el rotor de la turbina.



Máquinas de acondicionamiento de aire Normalair-Carnet para los aviones BAE 146, Dornier 328 y Jetstream 41

El aire sangrado del compresor del motor entra en el interior del cambiador de calor por el conducto (c). Por su parte, el ventilador aspira aire exterior, que circula entre los tubos del cambiador. Nótese que el aire de impacto rodea el circuito de aire sangrado. El flujo de aire sangrado del compresor es el destinado a entrar en cabina. El aire de impacto aspirado por el ventilador no pasa por la turbina de refrigeración, no es aire de cabina; simplemente es expulsado a la atmósfera tras pasar por el cambiador de calor y enfriar el aire sangrado del compresor.

Cuando el aire sangrado del compresor pasa por la turbina experimenta una expansión muy fuerte. Como consecuencia de la expansión, la temperatura del aire disminuye.

Válvula de derivación de la turbina de refrigeración (VDT)

3.8 Es el elemento (i), en la Fig. 38.3. Ya hemos hecho mención de esta válvula, clave en el funcionamiento del sistema, pues de su posición depende la producción de frío o calor en la cabina.

La turbina de refrigeración gira de forma continua. Por tanto, aunque la VDT encuentre en la posición de completamente abierta, y el aire sangrado del compresor pase directamente a los conductos de distribución de cabina, siempre hay una pequeña cantidad de aire sangrado que pasa por la turbina de refrigeración. Este pequeño flujo de aire es suficiente para mantener la turbina en rotación permanente. De este modo se evitan posibles daños en la turbina. En efecto, la entrada repentina de aire en una turbina en reposo puede someterla a aceleraciones angulares instantáneas extremas.

Así, pues, recordemos lo que sigue: la temperatura del aire de cabina es función de la posición que tiene la VDT en el sistema. Si la válvula VDT mezcla mucho aire sangrado del compresor (aire caliente) la temperatura del aire de cabina aumenta.

Si la VDT, por el contrario, mezcla poca cantidad la temperatura del aire de cabina disminuye.

Separador de agua

3.9 La fuerte caída de la temperatura del aire en la turbina de refrigeración provoca la condensación de la humedad presente en él. En estos casos hay formación de nieblas, a veces incluso partículas de hielo que son visibles en las toberas de salida del aire de cabina. La condensación se produce, sobre todo, en condiciones de alta humedad. Por ejemplo, es típica durante el funcionamiento en tierra en aeropuertos de zonas tropicales.

La deshumidificación del aire es necesaria, primero, para mantener libre de vapor los cristales de cabina; en segundo lugar para eliminar la condensación excesiva que puede producir puntos de corrosión en las zonas donde está presente. Finalmente, para prevenir el deterioro general de los equipos eléctricos y electrónicos con la humedad.

La prevención total de este fenómeno en zonas de gran humedad es muy difícil.

El sistema de prevención de la condensación del agua, por lo que se refiere a la máquina de aire, se basa en el separador de agua. En general, la prevención de la condensación de la humedad en cabina es un tema más amplio que se aborda en el apartado 3.21. El separador de agua consta de separador, propiamente dicho, válvula termostática antihielo y válvula de derivación del separador.

Separador centrifugo

3.10 El aire procedente de la turbina de refrigeración entra en el separador a través de una rejilla. La rejilla (a), Fig. 38.4a, aglomera las finas partículas de agua en gotas de mayor tamaño. La mezcla de aire y de agua resultante pasa a la paletas que tienen forma de hélice. Esta gira movida por un motor eléctrico. La fuerza centrífuga de las paletas de la hélice separa el agua hacia la periferia, donde es recogida en un colector y conducida hasta el purgador.

El agua dreña en la parte inferior del purgador, mientras que el aire que se ha separado del agua retorna, por succión, a la entrada del separador centrifugo.

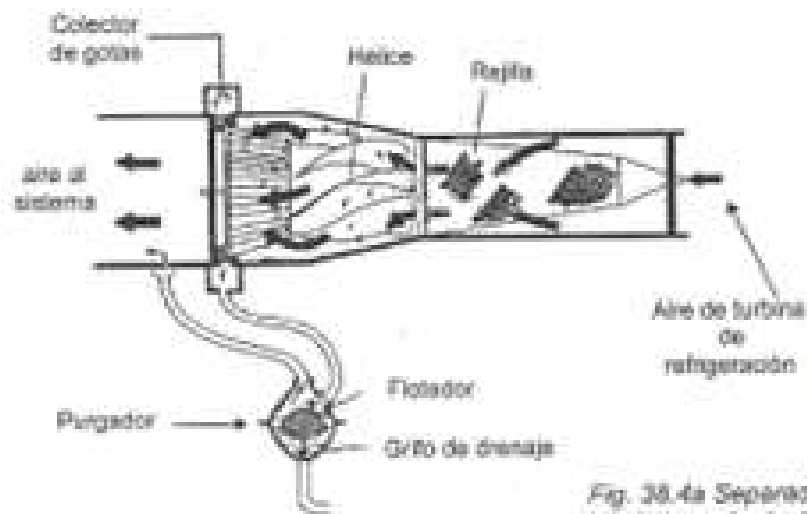


Fig. 38.4a Separador de agua del sistema de deshumectación

Quando la acumulación de agua en el purgador alcanza una determinada altura, el propio líquido levanta el flotador, se abre la tubería de drenaje y se produce la expulsión del agua al exterior.

Válvula termostática de antihielo

3.11 La válvula termostática de antihielo, Fig. 38.4b, tiene la función de limitar la temperatura del aire que pasa por el separador. La operación consiste en mantener un valor de temperatura del aire superior al de la formación de hielo.

En realidad, la eliminación del hielo no entra dentro de las funciones del separador centrifugo de agua. Por tanto es fundamental que la temperatura del aire en el separador centrifugo se mantenga por arriba del punto de congelación del agua. Por ello, si es necesario, se sangra cierta cantidad de aire caliente del cambiador de calor y se mezcla con el aire que, procedente de la turbina de refrigeración, pasa al separador de agua.

El funcionamiento de la válvula termostática antihielo es el siguiente: el termostato para aire sangrado es una cámara llena de líquido que se contrae, o dilata, con los cambios de la temperatura del aire que sale de la turbina de refrigeración.

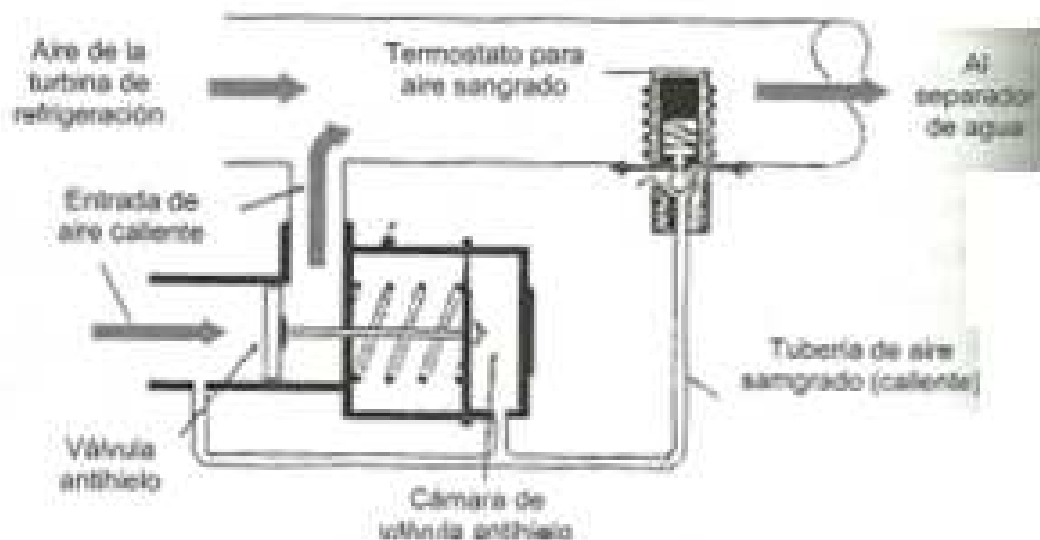


Fig. 38-4b Válvula termostática antihielo

Cuando la temperatura del líquido alcanza 1 °C, aproximadamente, el termostato se ha contraído lo suficiente para que la tensión del resorte que lo impulsa cierre la válvula de bola. En este momento la tubería de aire caliente está cerrada y la presión neumática aumenta en la cámara de la válvula antihielo. En este proceso se alcanza un punto de funcionamiento donde la fuerza de presión desliza el pistón de la válvula hacia la derecha. Una cantidad controlada de aire caliente se mezcla con el flujo de aire frío procedente de la turbina de refrigeración.

Cuando la temperatura del aire aumenta se abre la válvula de bola y se alivia la presión de la cámara neumática de la válvula. Se cierra entonces el paso de aire caliente a la tubería de salida de la turbina. Es la posición que refleja el gráfico.

Válvula de derivación del separador de agua

3.12 Cuando la altitud de vuelo es, digamos, de 25.000 pies y superior, el contenido de humedad en el aire es insignificante, para todos los efectos prácticos del sistema de acondicionamiento de aire.

El separador centrífugo de agua en estas condiciones no tiene cometido alguno. Todo el aire que sale de la turbina de refrigeración pueda eludir el paso por el separador.

La válvula de derivación del separador de agua (Fig. 38,4c) tiene la función de "quitar" el separador del circuito de aire de cabina, ofreciendo una vía de paso más fácil para el aire de distribución.

La válvula de derivación, como su nombre indica, está colocada en paralelo con el ramal que conduce al separador de agua. Obsérvese que la válvula tiene una línea neumática para el pistón de la válvula. Esta línea se comunica con la válvula de solenoide.

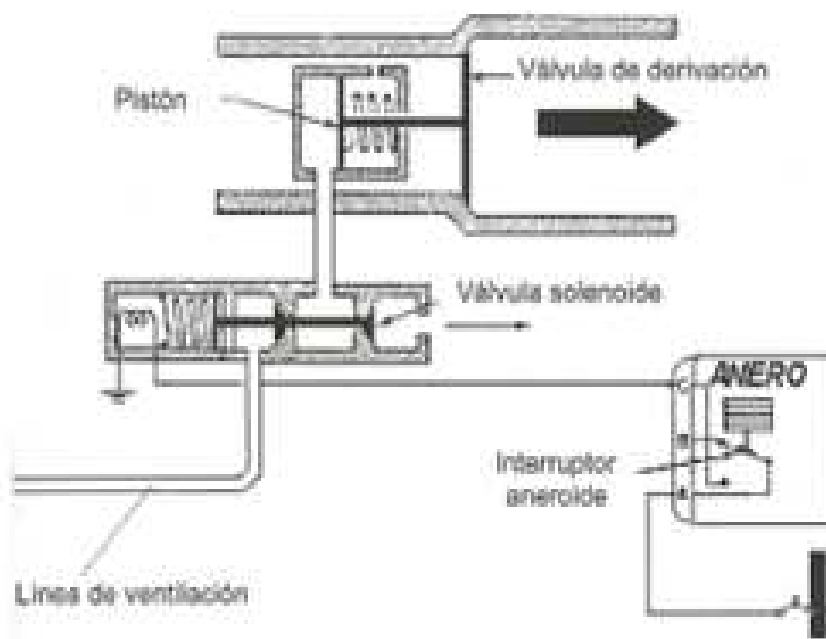


Fig. 38.4c Válvula de derivación del separador de agua

La válvula de derivación está alojada en el conducto de salida de aire de la turbina de refrigeración. Dispone también de una válvula de solenoide, que actúa de controladora de la anterior. Nótese la presencia de una línea de ventilación que se conecta en un determinado punto con el circuito de aire sangrado, aguas arriba de la turbina de refrigeración.

La operación de la unidad es controlada por el interruptor eléctrico de la cápsula aneróide. Cuando se alcanza la altitud de vuelo prevista (digamos, 25.000 pies), la cápsula aneróide cierra el circuito eléctrico de la válvula de solenoide. En este momento, la línea de ventilación de aire se pone en contacto con la cámara del pistón. La presión que llega por la línea de ventilación empuja el pistón, y éste abre la válvula de derivación del separador de agua.

Con la válvula de derivación abierta el aire que sale de la turbina de refrigeración encuentra una vía de paso más fácil por ella que por el tortuoso camino del separador de agua.

La válvula de solenoide no recibe corriente si el avión desciende por debajo de la altitud de presión de ajuste del aneróide. El resorte empuja el vástago de la válvula hacia la derecha del dibujo, aliviando presión de la cámara del pistón. La válvula de derivación se cierra, de manera que el aire es forzado a pasar de nuevo por el separador de agua.

Tipos de máquinas de acondicionamiento de aire

3.13 Hay tres tipos básicos de máquinas o "Packs" de acondicionamiento de aire utilizadas a bordo, que son: a) Tipo "turbofán"; b) Tipo simple de presión autore-

Máquina tipo "turbofán"

3.14 El tipo "turbofán" constituye la máquina más simple de aire acondicionado. En esencia es similar a la unidad representada en la Fig. 38.3, ya estudiada. Ver ahora en la Fig. 38.5 un esquema de esta máquina.

El aire a presión, sangrado del compresor, entra en la máquina y pasa por el cambiador de calor. El cambiador de calor está bañado por la corriente de aire de impacto procedente de una toma exterior del avión. La presión del aire de impacto es reforzada por el ventilador. Este circuito forma la corriente de aire que pasa por el cambiador de calor.

La teoría de funcionamiento es conocida. El aire sangrado del compresor del motor sale del cambiador de calor a temperatura similar, pero superior, a la que posee la corriente de aire exterior de impacto. Pasa más tarde a la turbina de refrigeración, donde experimenta una fuerte caída de temperatura. La presión del aire sangrado disminuye en la turbina (expansión) y su valor se aproxima al que se necesita en cabina.

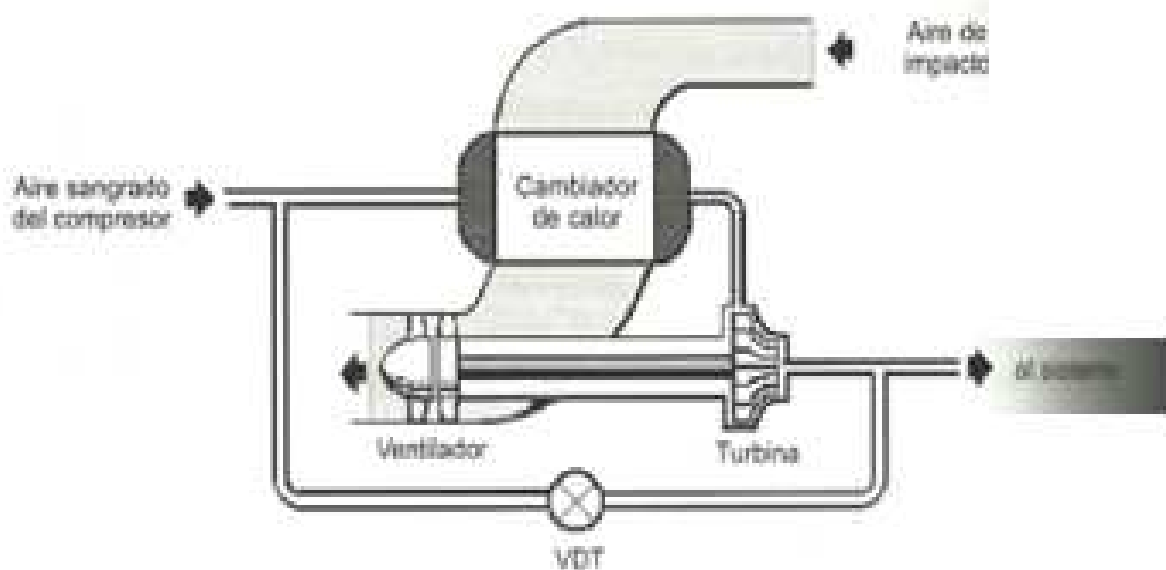


Fig. 38.5 Máquina de aire acondicionado tipo turbofán. VDT es la válvula de derivación de la turbina de refrigeración.

La turbina de la máquina absorbe el trabajo que ha desarrollado la expansión del aire, en forma de movimiento de rotación, y lo entrega al ventilador, proporcionando a éste un par de giro para su movimiento. Obsérvese que el ventilador está unido a la turbina mediante un eje. Cuanto mayor es la caída de presión del aire en la

turbina mayor es el trabajo que la turbina entrega al ventilador y mayor es el enfriamiento del aire.

El "Pack" tipo turbofán se suele emplear con el tipo de sangrado de aire de alta presión (ver Capítulo 37). El sangrado de alta presión, recordemos, asegura que la presión del aire a la entrada de la turbina de refrigeración es alta, de manera que se puede conseguir una expansión fuerte del aire al paso por ella. Esto es así porque el enfriamiento del aire depende de la relación de presión disponible en la turbina, por tanto aumenta con la presión del aire a la entrada de ella.

Máquina de presión autoreforzada ("bootstrap")

3.15 La máquina de presión autoreforzada (*bootstrap*) es una variante de la anterior (ver Fig. 38.6).

La diferencia fundamental es que la turbina de refrigeración acciona un rodete compresor en el circuito de aire destinado a la cabina. La salida de aire a cabina es por D. La letra A es la entrada de aire sangrado y el conducto B-C es el circuito de aire de impacto.

El rodete compresor de la máquina está instalado en el conducto de salida del cambiador de calor primario. La función del compresor es aumentar la presión del aire en la línea de sangrado. Por esta razón este tipo de "Pack" es apropiado cuando el sangrado de aire se efectúa en zonas de baja presión del compresor. De no emplear el compresor de refuerzo, la presión del aire a la entrada de la turbina de refrigeración podría ser muy pequeña y, en consecuencia, la capacidad de expansión y enfriamiento del aire limitadas.

La corriente se enfría en un cambiador primario antes de entrar en el compresor de la máquina. Una vez que pasa por el compresor, donde aumenta la temperatura del aire debido a la compresión, el aire se vuelve a enfriar en otro cambiador de calor (cambiador secundario), y de ahí pasa a la turbina de refrigeración.

Nota: El ventilador de la máquina se mueve mediante un motor eléctrico independiente, ya que en este tipo de máquina la turbina se acopla sólo al eje del compresor del "Pack".

Máquina de tres ruedas ("Three-wheel bootstrap")

3.16 Esta máquina, tan popular en el avión comercial actual, tiene tres rodetes montados en un mismo eje: el rodete ventilador, el compresor y la turbina (ver Fig. 38.7). Por tanto, la turbina de refrigeración acciona tanto el compresor de aire de la máquina como el ventilador situado en el circuito de aire de impacto B-C. No necesita el motor eléctrico auxiliar para hacer girar el ventilador.

En funcionamiento en tierra, el rodete ventilador consume entre un 15 y 25 por ciento de la potencia de la turbina. En vuelo, la presión de impacto es suficiente para el funcionamiento del ventilador. De esta forma se descarga la turbina de refrigeración de la necesidad de aportar este trabajo.

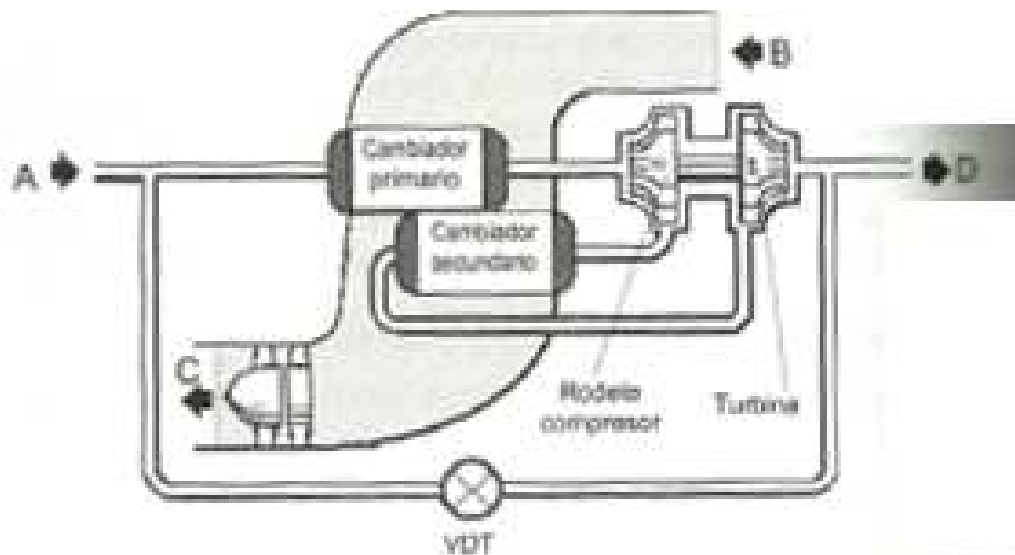


Fig. 38.6 Máquina de aire acondicionado tipo presión autoreforzada, "bootstrap".

Máquina "turbofán" con inyección de agua

3.17 La Fig. 38.8 muestra una variante de la máquina tipo "turbofán", estudiada en el párrafo 3.14 anterior.

El "Pack" tiene la novedad de incluir un sistema de inyección de agua en el circuito de aire del cambiador de calor. Note la presencia del separador de agua a la salida de la turbina de refrigeración. En el apartado 3.9 ya estudiamos la conveniencia de eliminar, o disminuir al menos, la formación de agua en el sistema de aire acondicionado.

El vapor de agua presente en la unidad, concretamente en la zona de la turbina de refrigeración, es la fuente de un problema adicional a los generales vistos anteriormente. En efecto, la condensación del agua durante el proceso de expansión de aire neutraliza parte del enfriamiento que puede alcanzarse, lo que supone en la práctica un incremento de la temperatura del aire a la salida de la turbina de refrigeración. Esto es así porque la condensación del vapor de agua es un proceso exotérmico, que se desarrolla por tanto con cesión de calor. El calor desarrollado (calor latente de condensación) es cedido al ambiente circundante, en este caso al aire frío que se dirige al circuito de cabina.

La máquina "Turbofán" con inyección de agua recupera parte de la pérdida de frigorías que supone la condensación del agua. Con este fin está dotada de un conjunto de surtidores que permite la inyección del agua drenada en el separador, e introducir la en el circuito de aire de impacto (circuito B-C de la ilustración).

La inyección se efectúa en la proximidad del cambiador de calor. El agua, una vez inyectada, se vaporiza rápidamente en el ambiente cálido próximo al cambiador. La vaporización del agua enfría la corriente de aire. El enfriamiento obtenido

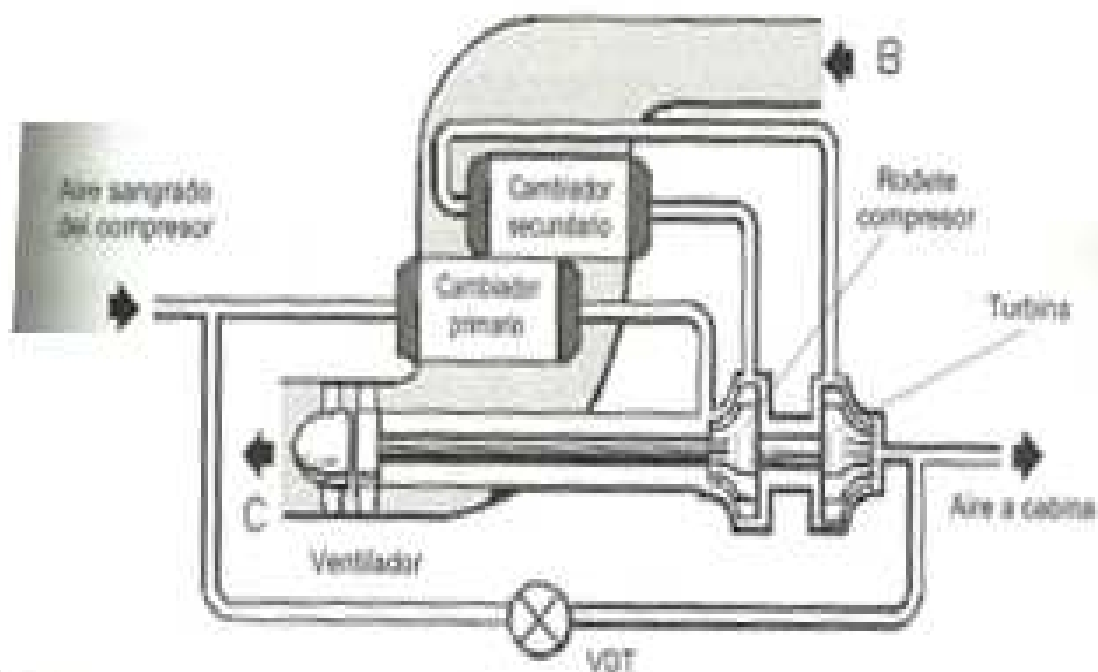


Fig. 38.7 Máquina de aire acondicionado de tres ruedas y presión reforzada, "Three-wheel bootstrap". El circuito de aire B-C es de aire de impacto. VDT es la válvula de derivación de la turbina de refrigeración.

supone, en cierta medida, la recuperación de una parte del "frío" perdido en la máquina por la condensación del vapor de agua. En una palabra, el resultado es un proceso de mayor rendimiento termodinámico.

Máquina de tres ruedas con separador de agua de alta presión

3.18 Es una variante de la máquina estudiada en el apartado 3.16, con un dispositivo de inyección de agua (ver Fig. 38.9). Es la máquina más sofisticada en la actualidad y la empleada normalmente a bordo en los aviones comerciales avanzados. Cuenta, pues, con la ventaja de las tres ruedas (funcionamiento autónomo en tierra) y la de inyección de agua en el circuito de aire de impacto para mejorar el rendimiento del ciclo termodinámico.

Sin embargo, la variante más importante que incorpora esta máquina es la presencia de un separador de agua de alta presión y el condensador.

El separador de agua funciona en una línea de alta presión pues el aire, antes de llegar al separador, ha pasado por el compresor. Por tanto, se aplica aquí el principio físico bien conocido de que la cantidad de vapor de agua contenida en el aire

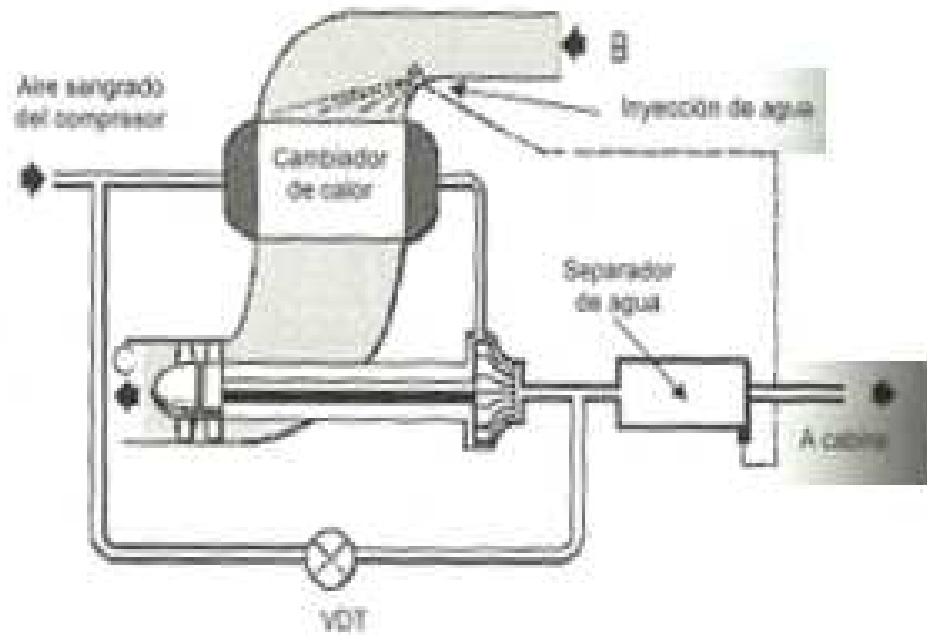


Fig. 38.8 Variante de la máquina tipo Turbofán, con sistema de inyección de agua

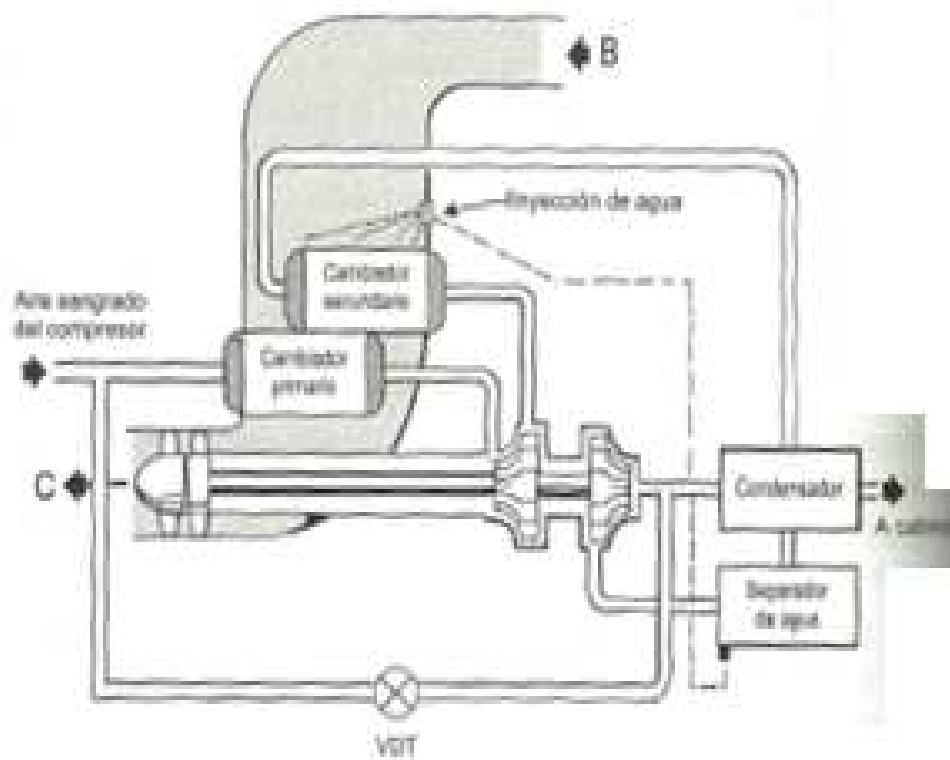


Fig. 38.9 Variante de la máquina tipo presión reforzada, con tres ruedas, y con sistema de inyección de agua. VDT es la válvula de derivación de la turbina de refrigeración y B-C el circuito de aire de impacto que pasa por los cambiadores de calor.

Unidad de control de temperatura de aire de cabina

3.19 Es el último componente del sistema de acondicionamiento con máquina de ciclo por aire. La función de la unidad es amortiguar los efectos que los cambios de las condiciones de vuelo tienen sobre la temperatura del aire de cabina. Aunque es un tema sobre el que volveremos en los próximos apartados, señalamos aquí la teoría general de la unidad.

El selector de temperatura de cabina cuenta, normalmente, con cuatro posiciones: AUTO, HOT, COLD y OFF. Cuando el selector de cabina se coloca en la posición AUTO, o modo automático, la unidad de control regula la posición de la VDT (válvula de derivación de la turbina de refrigeración).

La temperatura del aire de cabina también se puede controlar manualmente con el selector en las posiciones COLD (frío), HOT (caliente), o intermedias, a criterio de la tripulación.

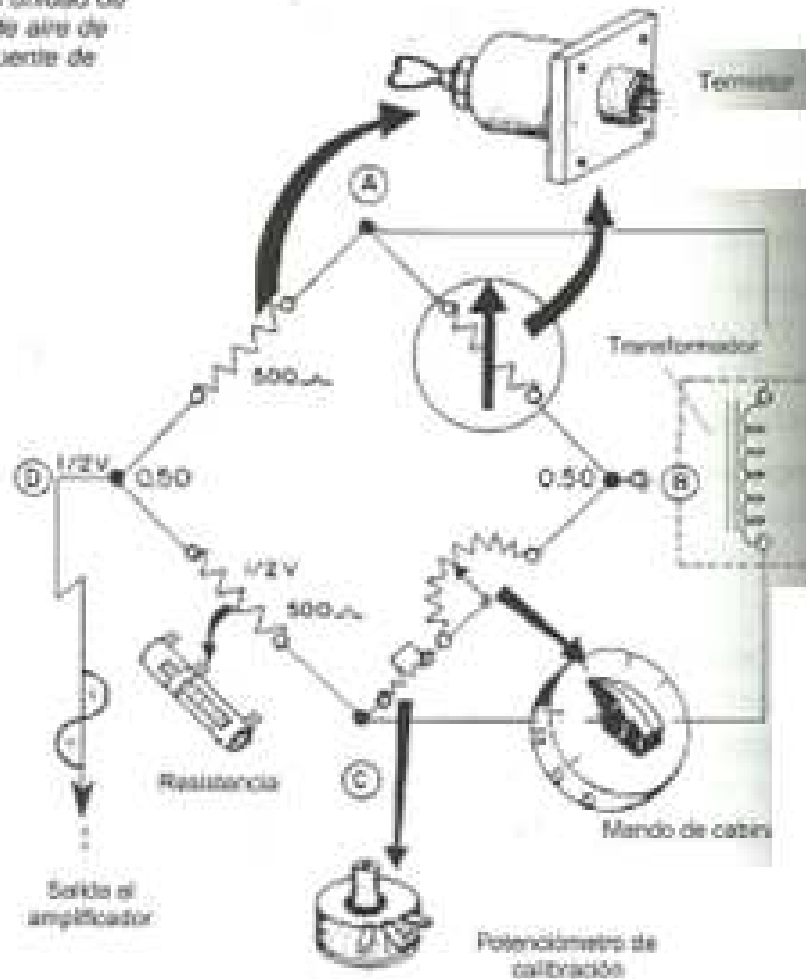
3.20 La unidad básica de control de temperatura de aire consta de cinco elementos: a) transformador de corriente; b) amplificador; c) circuito discriminador; d) relé; e) circuito puente. Todos los elementos, a excepción del circuito puente, están alojados en una misma caja, denominada regulador electrónico de temperatura.

El circuito puente (ver Fig. 38.10) se basa en el puente de *Wheatstone* que estudiamos en Física. El mando selector de temperatura, que actúa el piloto, y un termistor forman parte de dos tramos del puente. El termistor es sencillamente una resistencia eléctrica variable, y muy sensible a los cambios de la temperatura. El termistor está alojado en el conducto de aire de cabina. Los dos tramos restantes del puente de *Wheatstone* tienen resistencias eléctricas de valor constante, en este caso de 500 ohmios. (Nota. Está presente en el circuito un potenciómetro de ajuste para calibración del puente que no tiene función didáctica adicional.)

En síntesis, el circuito puente recibe las señales del termistor, medidas normalmente en varios puntos de los conductos de aire de la cabina. También recibe de forma permanente la señal de posición del mando selector de temperatura (que es en realidad un potenciómetro). Siempre que el circuito puente está en equilibrio eléctrico no hay señal de salida para cambiar la válvula de derivación de la turbina de refrigeración VDT. En tanto que exista relación de proporcionalidad entre la resistencia del termistor y la que representa el mando selector de cabina, y las correspondientes a las otras dos resistencias fijas del puente, éste se encuentra en situación de equilibrio.

Ahora bien, si varía la señal de la temperatura del aire de cabina, o la posición del selector de temperatura, o ambas a la vez de forma no proporcional, la relación eléctrica de estas señales con las fijas del circuito puente están desequilibradas. El puente origina una señal correctiva (señal error) que es proporcional a la diferencia entre la temperatura del aire y la correspondiente al ajuste del selector.

Fig. 38-10 El circuito de la unidad de control de temperatura de aire de cabina se basa en el puente de Wheatstone.



La señal de error es amplificada y pasa al circuito discriminador. El discriminador reconoce cuál es la fase de la señal recibida, y en función de ésta actúa sobre la VDT en el sentido de abrirla o cerrarla, es decir, en el sentido de introducir calor en la cabina, o cerrar la VDT para que la máquina suministre frío.

La condensación en la cabina



3.21 Lo que sigue es materia de información sobre el problema de la condensación del agua en la estructura y cabina del avión comercial. Su interés operacional es relativo, pero ciertas ideas sobre el "ciclo" de la condensación del agua a bordo forma parte, sin duda, del conocimiento general de la aeronave.

La mayor parte de la condensación del agua en el interior de la cabina se produce cuando la temperatura exterior es baja y la chapa del fuselaje está muy fría.

De hecho, estas condiciones concurren en la mayor parte del vuelo, cuando la temperatura de la estructura está por debajo del punto de rocío del aire de cabina. En estas condiciones la condensación está servida.

Si, además, la temperatura de la estructura es muy baja, el agua de condensación se helará y forma escarcha.

La condensación del agua en cabina tiene su propio "ciclo", que está señalado en la Fig. 38.10a. Inicialmente (1) el aire relativamente húmedo de cabina pasa por los poros y bolsones presentes en las mantas de aislamiento que cubren los áticos y paredes laterales superiores del fuselaje. Es un flujo pequeño pero continuo de aire que aporta humedad hacia la zona de la estructura exterior del fuselaje.

La condensación que se produce, representada por círculos de color blanco en la ilustración, depende de dos factores: del grado de humedad del aire y de la cantidad de aire húmedo que llega a la zona. La temperatura de la estructura en vuelo de crucero es tan fría que se forma escarcha, de manera que la fusión de este hielo empieza cuando el avión desciende a niveles donde la temperatura de la estructura aumenta (puntos 3-4 del ciclo de la Fig. 38.10a). Las mantas de aislamiento tienen la función principal de amortiguar ruidos externos (principalmente, el ruido que produce la capa límite turbulenta del fuselaje) y sirven también de aislante térmico de la cabina. Están hechas de material impermeable que facilita el escurrimiento del agua por la pared lateral de la estructura (punto 5 del ciclo) hasta la "belly" del avión. Desde aquí el agua se drena al exterior. Cierta cantidad de agua es inevitable que se filtre por las mantas y es la que, ocasionalmente, puede llegar al interior de la cabina.

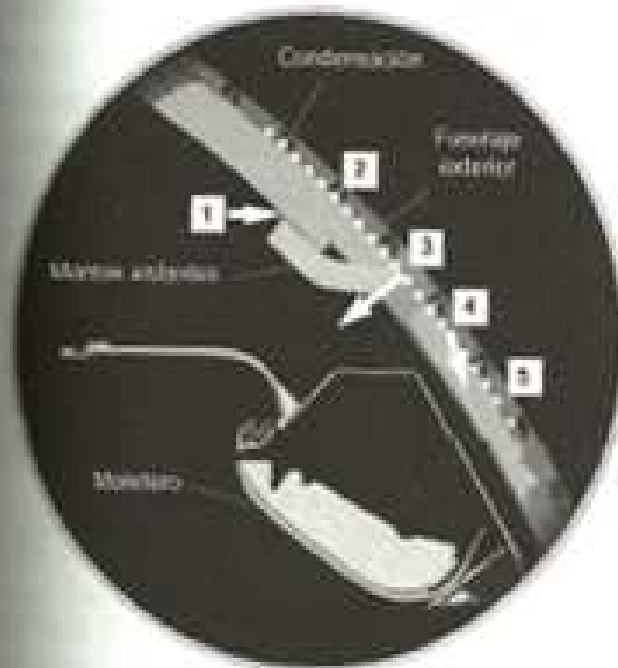


Fig. 38.10a Ciclo de condensación del agua en la cabina

Como hemos dicho, la condensación del agua en cabina es un problema de relativa importancia en términos operacionales, aunque plantea algunos problemas de mantenimiento (posible corrosión de la estructura, y riesgo de cortocircuitos eléctricos (no es frecuente porque los circuitos que están en las trayectorias de drenaje del agua están convenientemente sellados).

Señalar, en fin, que la condensación en cabina es máxima en el avión de gran utilización, por capacidad y alta ocupación. Estos factores expresan la constatación de que más pasajeros producen más humedad en el ambiente de cabina, y más utilización quiere decir que la estructura del avión está más tiempo expuesta a temperaturas inferiores al punto de rocío del aire de cabina.

Otra cosa son las "nubes" de condensación que se pueden formar en ciertas ocasiones en la proximidad de las salidas de aire acondicionado, tanto en las toberas orientadas de pasajero como en las generales (ver el dibujo de la Fig. 38.10b).

3.22 Otra cosa son las "nubes" de condensación que se pueden formar en ciertas ocasiones en la proximidad de las salidas de aire acondicionado, tanto en las toberas orientadas de pasajero como en las generales (ver el dibujo de la Fig. 38.10b).

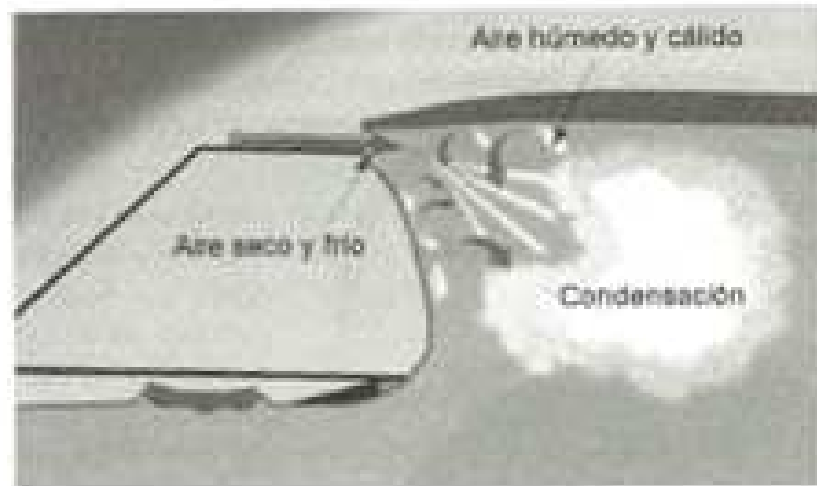


Fig. 38.10b Nube de condensación típica en salida de techo de aire acondicionado de cabina

El efecto es debido a que el aire frío y seco que sale por las toberas de aire acondicionado arrastra y mezcla cierta cantidad de aire de cabina, que se encuentra a temperatura más alta. El arrastre y mezcla se produce por el efecto de succión que produce la corriente de aire frío, que sale a velocidad relativamente alta. Puesto que la temperatura del aire frío está bien por debajo del punto de rocío correspondiente al aire de cabina se produce la condensación tan pronto como las dos masas de aire se mezclan.

Físicamente el fenómeno se manifiesta en forma de "humo" o "nubes" en el interior de la cabina.

Las nubes de condensación se forman cuando coexisten humedad suficiente en el aire de cabina y baja temperatura del aire acondicionado que entra en ella. Tales condiciones ocurren a menudo con el avión en tierra, con las puertas abiertas, no digamos en un aeropuerto tropical. También es frecuente tras el despegue, cuando permanece humedad en el aire de cabina y se demanda normalmente mayor cantidad de frío del sistema.

Por supuesto, el fenómeno es completamente normal. Es más, podríamos decir que es una medida del buen funcionamiento de las máquinas de aire acondicionado.

4. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL AIRE ACONDICIONADO

4.1 La función del sistema de distribución del aire es crear una combinación adecuada de temperatura, humedad y movimiento del aire en el interior de la cabina.

Por lo común, el pasajero "se siente" confortable en posición sentada si la temperatura del aire oscila entre 19 °C y 22 °C; cuando la velocidad de movimiento del aire en cabina no es inferior a 4,5 metros/minuto (límite inferior que crea puede crear una sensación de "abogo") ni tampoco superior a 20 metros/minuto que entra dentro de la sensación de la corriente de aire. De esta forma, las velocidades normales de circulación del aire en las cabinas de los aviones comerciales oscila entre 6 y 12 metros/minuto (ver el comentario de texto "Diagrama del bienestar").

El mejor diseño del sistema de distribución de aire en cabina es el que consigue máxima uniformidad de la temperatura, sin grandes diferencias entre la temperatura del aire de entrada, el aire ambiente de la cabina y las propias de las superficies y volúmenes que componen los elementos de la cabina.

Puesto que las condiciones de habitabilidad del pasajero de ventanilla son distintas de los que ocupan posiciones interiores, es una práctica común actual calentar las paredes laterales y/o el piso de cabina, con el fin de mantener dichas superficies a temperatura similar a la del aire de cabina. Con este fin el aire caliente se distribuye por conductos situados debajo del piso y laterales intermedios (ver Fig. 38.11). También es posible la calefacción eléctrica de estas superficies. El sistema de distribución propiamente dicho está constituido por los elementos siguientes: a) conductos de suministro de aire; b) rejillas y toberas orientables para el aire de salida. En realidad, en los grandes aviones comerciales, la cabina está dividida en zonas, cada una con su propia unidad de acondicionamiento de aire ("Pack"). Por tanto es propio hablar en estos casos de acondicionamiento de Zona 1, Zona 2, etcétera, ver Fig. 38.12.

El aire acondicionado, o en su caso el de ventilación, entra en la cabina a través de rejillas y toberas orientables. A ellas llega procedente de conductos que se extienden a lo largo de la cabina. La velocidad del aire en estos conductos es muy alta, a veces hasta 10 veces superior a la que debe tener a la salida de la rejilla. Por consiguiente, se debe controlar la cantidad y la velocidad del aire que sale por la rejilla.

La cantidad de aire destinada para la rejilla se controla en el mismo conducto, a través de unas placas de pequeños orificios que regulan el flujo de aire.

Los chorros de aire que salen de los orificios pasan por una cámara de compensación cuyo fin es eliminar gran parte de la velocidad que posee el aire,

Finalmente, la rejilla de salida produce la orientación necesaria del chorro.

4.2 Por lo general hay tres posiciones para salida del aire: techo, laterales (aunque la elevación es superior a la del pasajero en posición sentada), y en el piso.

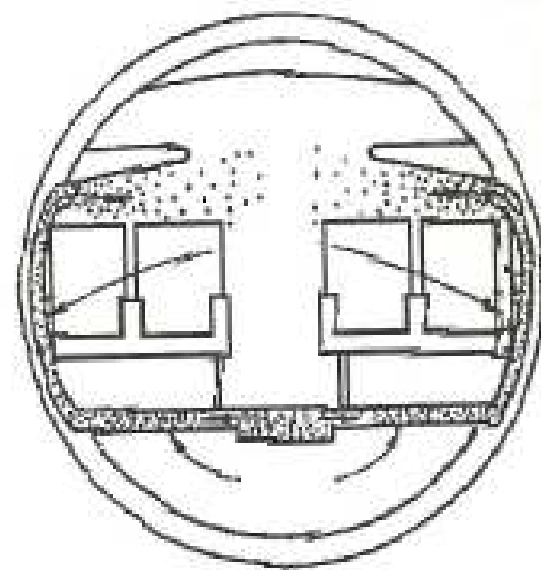


Fig. 38.11 Distribución de aire en la cabina con calefacción del piso y paredes laterales inferiores del fuselaje

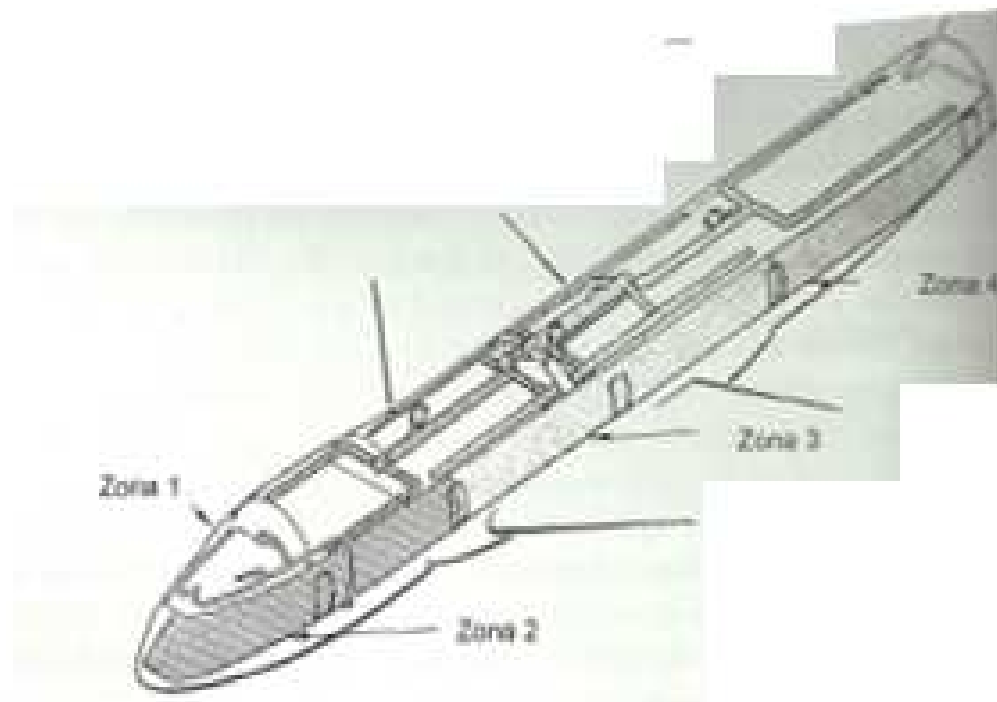


Fig. 38.12 La cabina de los grandes aviones comerciales se divide en zonas, cada una con su propia unidad de acondicionamiento de aire ("Pack").

a) Salidas de techo

Las posiciones en el techo requieren chorros de aire con una cantidad de movimiento importante.

En ocasiones, los pasajeros de pasillos e interior pueden estar sometidos a condiciones de velocidad de movimiento del aire molestas (que entran dentro de las llamadas "corrientes de aire"). En estos casos es esencial la calefacción lateral para minimizar los efectos de estas corrientes de aire.

b) Salidas laterales

Requieren chorros de aire de menor impulso que las salidas de techo. Las salidas laterales de aire ofrecen por lo común buenas condiciones para distribuir el aire a los pasajeros sentados, pero tienden a estratificar el aire en los vuelos de larga duración. Ello es debido a que las paredes y el piso del avión pierden grandes cantidades de calor. En estos casos suele ser imprescindible la calefacción del piso y de las paredes laterales de la cabina para mantener un movimiento adecuado de aire en la cabina.

c) Salidas en el piso de la cabina

Son insatisfactorias, por regla general. El aire caliente que sale de la zona de los pies produce corrientes de aire hacia arriba, convectivas, que producen sensaciones desagradables en el pasajero medio.

4.3 Las toberas orientables de salida de aire tienen la misión de crear una atmósfera particular en una posición de pasajero determinada, o miembro de la tripulación. La función se efectúa (1) por el aumento de la velocidad del aire en dicha posición, (2) captando el aire de una tubería con temperatura algo más baja que la general de cabina. Se origina así una corriente de aire relativamente más fresco que el de ambiente de cabina, para crear una sensación más confortable.

Diagrama del bienestar

El funcionamiento correcto del sistema de acondicionamiento de aire de cabina puede examinarse si se establece el balance térmico entre la cantidad de energía calorífica contenida en el aire introducido, más las producidas por los manantiales caloríficos de a bordo, y la presente en el aire expulsado de la cabina.

En la cabina de vuelo, y sobre todo en la de pasajeros, una fuente de calor importante es el hombre. Reaccionamos al medio ambiente de cabina según las estaciones, con diferente vestidos, y la compañía aérea introduce por su parte distinta alimentación, bebidas, etcétera. Todas estas acciones están limitadas entre determinados parámetros para proporcionar la sensación fisiológica de satisfacción que se define como bienestar.

Los resultados de numerosas experiencias sintetizan en un tipo de representación gráfica que se conoce como "Diagrama del bienestar" (Fig. 38.13). El diagrama permite la concreción del concepto de bienestar. En estos diagramas, trazados a distintas velocidades de movimiento del aire, se puede determinar el porcentaje de individuos que reconocen encontrarse en un estado de bienestar, para cada par de valores de temperatura y grado higrométrico del aire.

La temperatura de bulbo húmedo se obtiene cuando el bulbo del termómetro se mantiene húmedo con una delgada mecha humedecida. La refrigeración debida a la evaporación del agua de la mecha da lugar a un registro de temperatura inferior a la del termómetro normal de bulbo seco. Si las dos lecturas se toman simultáneamente es posible determinar con tablas psicométricas la humedad relativa y el punto de rocío del aire.

Así, la resultante de los efectos de la temperatura del aire, de su humedad y, adicionalmente, de su velocidad en movimiento, en el interior de cabina, es una "temperatura efectiva", ficticia, sobre la que es posible medir la sensación fisiológica de bienestar. La temperatura efectiva es, pues, el valor numérico que representa la temperatura para la cual, en aire en reposo y saturado, se tendría igual sensación que la percibida a temperatura diferente con una velocidad dada del aire y grado de humedad.

Sobre el diagrama de la Fig. 38.13 están señalados los límites de las zonas de bienestar en verano y en invierno. La franja de máximo bienestar se corresponden con temperaturas efectivas que oscilan entre 17 °C para invierno y 24 °C para el verano. Con estos valores, la mayor parte de los sujetos (97 o 98 por cien) han reconocido sentir completo bienestar térmico.

Se ha comprobado que en la estación invernal los valores representativos de las máximas condiciones de bienestar vienen dados por la temperatura de 20 °C y humedad relativa del 50%. Los aumentos de temperatura implican una disminución del grado higrométrico, pero no es conveniente descender por debajo del 30 o 40 por

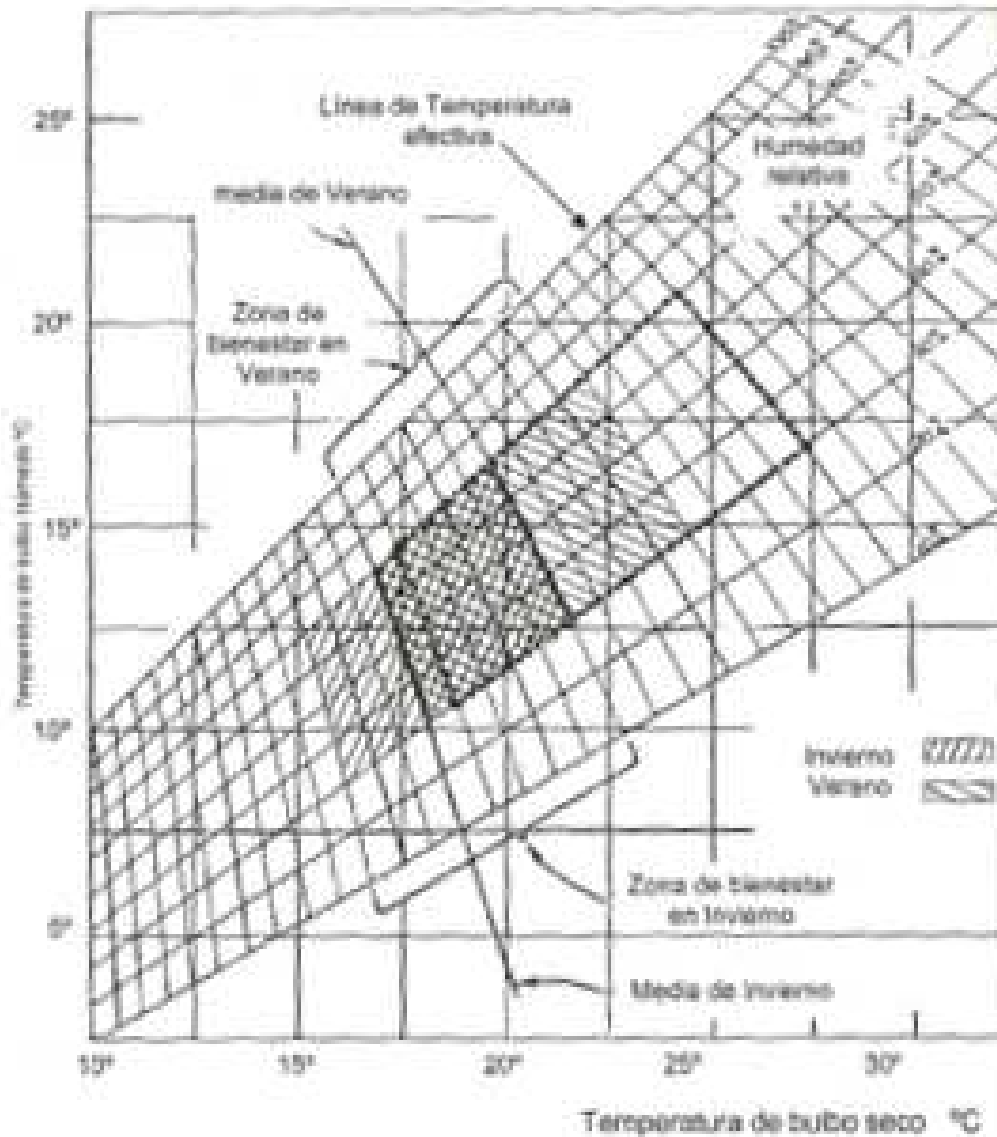


Fig. 38.13 El diagrama de bienestar se traza a distintas velocidades de movimiento del aire. Se puede determinar para cada par de valores de temperatura (de bulbo seco y húmedo) y el grado higrométrico del aire, el porcentaje de individuos que reconocerán encontrarse en un estado de bienestar.

den para no provocar la sequedad de las vías respiratorias, ni tampoco rebasar el 70% para no provocar una desagradable sensación de humedad.

Desgraciadamente es difícil alcanzar a bordo el límite inferior de bienestar. Las cabinas de los aviones se mantienen en una banda muy baja de humedad relativa en torno al 10%. Datos adicionales a considerar es la permanencia media a bordo puesto que el sistema auto-regulador del hombre requiere un tiempo de 2 a 3 horas para adaptarse a las nuevas condiciones del ambiente. En efecto, el acondicionamiento del aire en un avión de distancia corta, con permanencia media individual de 1 a 2 horas, es diferente del adoptado para uno de larga distancia con permanencias medias de 8 a 10 horas. La temperatura interna, por tanto, deberá armonizarse con la exterior y la diferencia entre ambas deberá oscilar en una banda de 3 °C a 8 °C, la cifra menor para distancias cortas y la mayor como límite para largas distancias de vuelo.

5. SISTEMA ANALÓGICO DE CONTROL DE TEMPERATURA DE CABINA POR ZONAS

5.1 Como ya hemos dicho, la cabina de los aviones comerciales actuales, de mediana y gran capacidad, está dividida en zonas a efectos de utilización del aire acondicionado.

Así, por ejemplo, la cabina del *Boeing 747* está dividida en 4 zonas, una es la cabina de vuelo y tres son las zonas de pasajeros (ver Fig. 38.12). La cabina del *Boeing 737-400* está dividida en tres zonas.

La división por zonas tiene la finalidad de distribuir el enorme trabajo de acondicionamiento de aire de una cabina de gran capacidad entre varias unidades de refrigeración.

Cada zona, o pareja de zonas en su caso, tiene una máquina de acondicionamiento de aire independiente.

La Fig. 38.14 muestra el sistema de flujo de aire acondicionado en la cabina de un gran avión comercial.

El sistema cuenta con tres máquinas de acondicionamiento de aire ("Packs") que descargan en un colector común de aire acondicionado.

Del colector general se derivan cuatro tuberías dirigidas a otras tantas zonas de la cabina.

Las máquinas están reguladas para descargar el aire a temperatura común. Se establece por temperatura común la que corresponde a la zona que precisa el suministro de aire de menor temperatura. Las tres máquinas descargan en el colector general de aire acondicionado. Puesto que las otras zonas pueden tener ajustes de selección de temperatura más alta, existe un sistema de compensación de temperatura del aire.

El sistema de compensación se basa en mezclar aire caliente sangrado del compresor en las tuberías de las zonas. Se realiza por los conductos de compensación, a través de la válvula de compensación (ver la posición de esta válvula en la ilustración). El procedimiento de compensación térmica consiste, pues, en distribuir aire caliente, sangrado del compresor del motor. Este aire caliente se envía a las zonas que requieran mayor temperatura de aire de cabina. La tubería de aire sangrado mezcla con este fin parte de aire caliente con el procedente del colector general de aire acondicionado. El resultado es un flujo de aire ajustado a los requisitos de cada zona.

Cada regulador térmico de zona del avión, por tanto, ajusta su válvula moduladora de flujo de aire caliente a las condiciones individuales seleccionadas.

Obsérvese que en los sistemas de control de temperatura por zonas hay una doble regulación: de una parte está la correspondiente al propio "Pack", y en segundo lugar el control térmico de la zona. El sistema incluye detectores de sobretemperatura que actúan como medios de aviso y alerta a la tripulación.

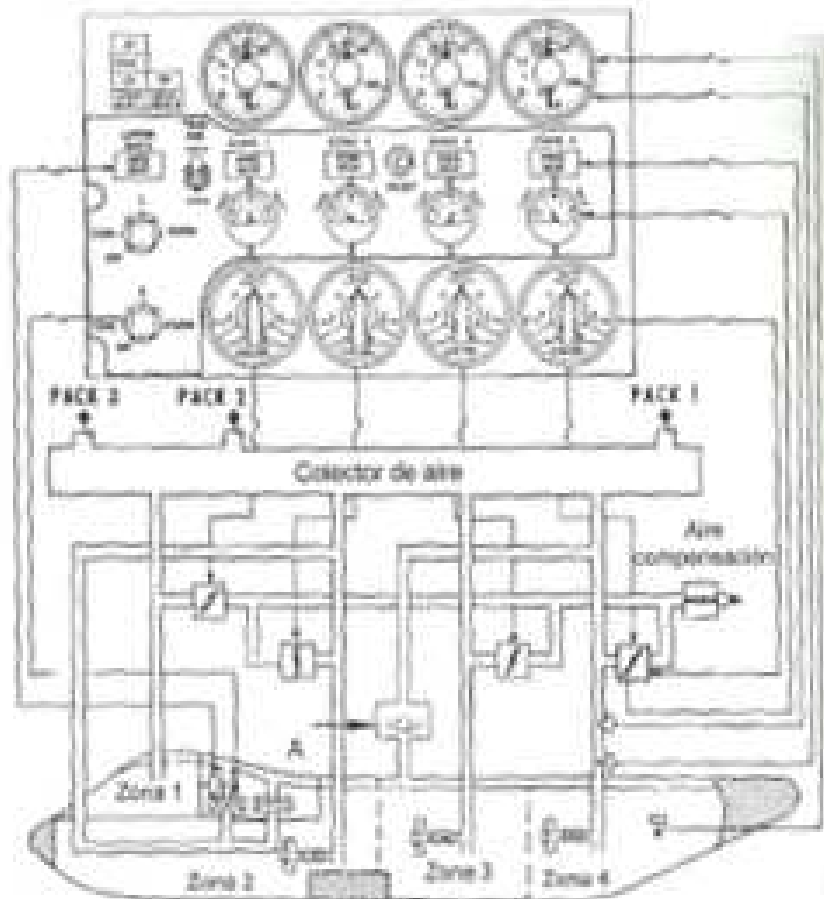


Fig. 38.14 Sistema de flujo de aire acondicionado en la cabina de un gran avión comercial. El sistema cuenta con tres máquinas ("Packs") que descargan en un colector general de aire acondicionado. Del colector general se derivan cuatro tuberías, directas a otras tantas zonas de la cabina. El aire es aspirado por ventiladores de recirculación, dibujados en cada una de las zonas. "A" es el ventilador de la tubería de aire para las toberas individuales orientables en asientos de pasajeros.

Control del "Pack" en modo AUTO

5.2 La función del regulador de temperatura del "Pack" es conocida por la teoría general: consiste en el ajuste de la válvula de derivación de la turbina de refrigeración VDT (ver, *pr.* Fig. 38.5).

En los sistemas para cabinas de media o gran capacidad volumétrica de aire se regulan también las válvulas de entrada y de salida de aire de impacto.

Recordemos que es aire proveniente de una toma dinámica exterior que circula por los cambiadores de calor de las máquinas, para refrigerar el flujo de aire caliente sangrado del compresor.

En modo AUTO, la posición de las válvulas de aire de impacto está programada de antemano, en sus recorridos de apertura y de cierre, con el fin de proporcionar el mayor campo posible de operación del sistema.



Panel de sistema de aire acondicionado del Boeing 747-400

Arriba, selectores de temperatura del aire en la cabina de pasajeros y de vuelo. ZONE RST reajusta el regulador de temperatura si la avería del sistema no persiste. TRIM AIR en ON abre válvula del colector de compensación de aire caliente. En OFF se producen estos acontecimientos: cierre de la válvula del colector de compensación, la temperatura máxima del aire a la salida del "Pack" se regula para conseguir 24 °C en la cabina, y se inhibe el control de temperatura para la tripulación de cabina. El interruptor HUMID arma el humidificador de la cabina de vuelo para operación automática. El interruptor GASPER conecta/desconecta el ventilador (A, Fig. 38.14) de la tubería de distribución de aire acondicionado para las toberas orientables de pasajeros. Nótese que esta toma está situada aguas arriba del punto de entrada de aire caliente procedente del colector de compensación.

Así, por ejemplo, antes de que la válvula de entrada de aire de impacto inicie su movimiento de cierre (calor en el sistema), la VDT está en posición de máximo calor (abierta) con el fin de mezclar máxima cantidad de aire caliente sangrado del compresor. Esta secuencia de congruencia en el movimiento de válvulas permite un campo de regulación térmico del aire muy amplio.

Control del "Pack" en modo MANUAL

5.3 La temperatura de salida del aire del "Pack" en modo MANUAL depende de la posición del selector de cabina.

La posición del mando selector actúa directamente sobre la VDT y sobre la válvula de entrada de aire de impacto.

La secuencia de operación de las válvulas en modo MANUAL es la siguiente:

- La VDT no se cierra (frío en el sistema) hasta que la válvula de aire de entrada de impacto esté completamente abierta (frío en el sistema).
- La válvula de entrada de aire de impacto no se cierra (calor en el sistema) hasta que la VDT no está completamente abierta (calor en el sistema).

Control de temperatura de Zona en modo AUTO

5.4 En la teoría general del sistema de acondicionamiento de aire ya hemos hablado de este modo de operación y su forma de actuación.

Convendrá señalar ahora que cuando el selector de temperatura de zona se pone en posición AUTO, cada regulador térmico de Zona envía la señal de temperatura deseada a cada una de las máquinas de acondicionamiento de aire.

De las cuatro señales de zona que llegan a los "Packs" se selecciona la que presenta menor demanda de temperatura de aire. Esta señal, en exclusiva, es la que regula la temperatura del aire de salida de los "Packs".

Control de temperatura de Zona en modo MANUAL

5.5 En posición MANUAL, la temperatura del aire de zona es impuesta por la posición de la válvula de compensación de aire caliente (ver Fig. 38.14).

Cuando una zona se ajusta con el regulador de temperatura en MANUAL, se anula de forma automática la señal de realimentación de esta zona a los "Packs". Por tanto no interviene en el cómputo de señales que determinan la temperatura de salida del aire en los "Packs".

6. SISTEMA DIGITAL DE CONTROL DE TEMPERATURA DE CABINA POR ZONAS

6.1. Los sistemas digitales de control de temperatura de cabina funcionan de forma similar a los analógicos, ya comentados.

En el sistema digital típico, cada "Pack" y cada zona cuentan con regulador propio. El regulador es un ordenador que tiene dos canales disponibles, uno de ellos es activo y otro de respaldo, por si se produce avería del que actúa como principal.

El proceso de operación es el siguiente: el regulador de zona genera una señal que representa la demanda de temperatura requerida para dicha zona. La señal es enviada al "Pack" que sirve la zona para regular la temperatura del aire de salida de la máquina, según los requisitos de la demanda.

Es normal la existencia de dos modos de regulación de la temperatura, llamados modos básico y directo.

En el modo básico el regulador compara dos señales: una es la petición de demanda de temperatura del aire realizada con el selector, y la otra es la temperatura real del aire en distintas posiciones de cabina. La señal de demanda final se co-

responde con el valor más bajo de temperatura de zona que se obtiene en este proceso de computación.

En el modo directo la temperatura de referencia se obtiene según la posición del modo selector.

Una de las ventajas de los sistemas de control digital de temperatura de cabina, para disminuir la carga de trabajo de la tripulación, es su capacidad de auto- comprobación (BITE), de acuerdo con un programa lógico estructurado.

6.2 Ya hemos dicho que los aviones comerciales actuales, tanto con regulador analógico como digital, suelen estar provistos de válvulas de entrada y salida en el circuito de aire de impacto del cambiador de calor.

El control sobre la posición de las aletas de las válvulas y el empleo de la máquina de tres ruedas, con separador de agua de alta presión, representan la opción más avanzada de acondicionamiento de aire.

Las válvulas permanecen cerradas durante el despegue y el aterrizaje con el fin de evitar la ingestión de cuerpos extraños en el circuito de aire. También es el caso si se produce la inmersión del avión. En realidad, todas las entradas o salidas de aire exterior que se encuentran por debajo de la línea de flotación del avión se cierran manual o automáticamente en caso de amerizaje.

7. OPERACIÓN E INDICACIÓN

7.1 Nos referimos al caso de operación normal del sistema, que es el que aporta principios didácticos a la teoría general del mismo.

Los procedimientos para situaciones anormales deben estudiarse en buena lógica en los manuales de operación de cada avión.

Ya hemos hecho referencia a los controles convencionales disponibles. Como materia complementaria de estudio vemos ahora la consola de mando e indicación típica en un avión con sistema digital de control (Fig. 38.15). La propia consola de mando refleja la plena integración que existe en los sistemas de sangrado y de acondicionamiento de aire.

Cada "Pack" puede seleccionarse para tres configuraciones de caudal de aire (NORMAL, L (bajo) y H (alto)). La selección se efectúa con el interruptor PACK FLOW de la ilustración. La posición seleccionada tiene su indicación en la pantalla de presentación de estado del sistema (ver Fig. 38.16).

La señal de mando del selector se envía al regulador de zona, que proporciona el caudal de aire correspondiente.

No siempre es posible atender la petición de caudal de aire que hace el operador de manera que el regulador de zona incorpora lógica de actuación alternativa. Es la siguiente: