

Dr. Luis Amézcuca González

Ex Presidente de la Academia Internacional de Medicina Aeronáutica y Espacial

Ex Director del Centro Nacional de Medicina de Aviación. México

Fellow in Aerospace Medicine por la Aerospace Medical Association

2. AMBIENTE ATMOSFERICO Y DE CABINA

INTRODUCCION

El estudio y el conocimiento de las características físicas y biológicas de la atmósfera terrestre, dentro de la especialidad de la Medicina Aeroespacial, es absolutamente indispensable por varias razones importantes a saber:

1. Es la atmósfera terrestre el medio ambiente en el cual se realizan todas y cada una de las actividades aeronáuticas, tanto de la aviación civil como en la militar.
2. El conocimiento de sus características físicas y biológicas, y las Leyes que rigen su composición gaseosa explica las alteraciones orgánicas derivadas de la exposición a la altitud durante el vuelo, así como los efectos provocados por el desplazamiento de una aeronave a través de la atmósfera.
3. Tales conocimientos servirán al Médico Especialista para comprender con absoluta claridad, la razón y la imperiosa necesidad del empleo durante el vuelo en la atmósfera superior de los sistemas de apoyo para la vida hasta la fecha diseñados y construidos, gracias a los cuales el viaje por avión constituye actualmente el sistema de traslación más rápido, más eficiente, más confortable y relativamente más económico ideado por la mente humana.

1. ATMOSFERA TERRESTRE

1.1. DEFINICION

Se define la atmósfera, como la mezcla gaseosa que rodea a la superficie de la tierra y que desplaza con ella en todos sus movimientos.

La atmósfera rodea a la tierra en forma de una cubierta gaseosa, que se conserva en su lugar gracias al campo gravitacional. La altitud de la atmósfera es variable siendo mayor durante el verano que durante el invierno, y mayor en las bajas latitudes que en las grandes latitudes. El calor radiante del sol causa la expansión de los gases atmosféricos hacia el espacio, y es la interacción de esta fuerza y la gravitacional terrestre la que establece los límites superiores de la atmósfera.

1.2. COMPOSICION

La atmósfera es una mezcla de varios gases. Los tres más importantes son: el Nitrógeno (N₂) en un 78.09%, el Oxígeno (O₂) en un 20.95% y el Bióxido de Carbono o Anhídrido Carbónico (CO₂) en un 0.03%. El resto está compuesto de gases raros (Argón, Neón, Criptón, Xenón, Helio, etc.). Esta composición porcentual de los gases de la atmósfera se mantiene notablemente constante hasta una altitud de 100 Km, aunque en las grandes altitudes se aumenta progresivamente la distancia entre las moléculas del gas y las colisiones entre las partículas se tornan cada vez más raras. Hasta la altitud de 30,000 pies (30 M') existe una cantidad variable de vapor de agua, y en las bajas altitudes se encuentran contaminantes sólidos que proveen núcleos para su condensación.

1.3. ESTRUCTURA DE ATMOSFERA

Diversos parámetros se han empleado para determinar la estructura ó la división de la atmósfera, entre ellos cabe mencionar los siguientes:

En relación a la transmisión del sonido, la atmósfera se ha dividido en:

ZONA ACUSTICA
ZONA TRANSACUSTICA
ZONA ANACUSTICA

En relación a la capacidad para sustentar la vida de organismos, la atmósfera se ha dividido en:

ZONA FISIOLÓGICA: Se extiende desde el nivel del mar hasta la altitud de diez mil pies (10M') y representa el área de la atmósfera en la cual el ser humano, está más o menos adaptado.

ZONA FISIOLÓGICAMENTE DEFICIENTE: Se extiende desde aproximadamente los 12M' hasta los 50M' y representa junto con la anterior el área en la que actualmente se realiza la mayor actividad de vuelo. El Ser Humano expuesto a estas altitudes manifiesta ciertas alteraciones, derivadas de que las condiciones de la atmósfera rebasan las capacidades de adaptación de sus sistemas fisiológicos, debiendo por ello hacer uso de los sistemas de apoyo con los que cuenta a bordo, para poder sobrevivir.

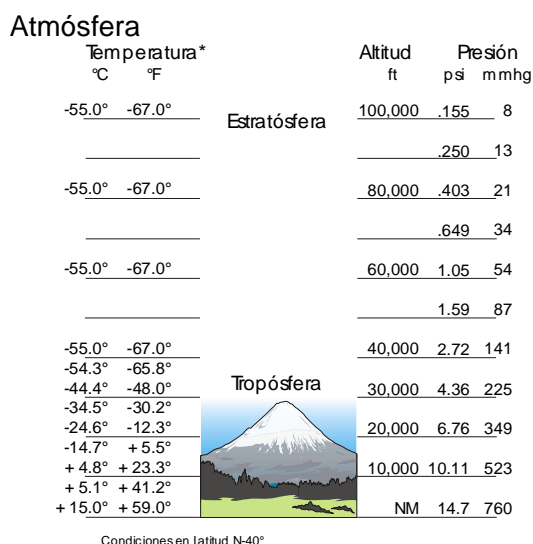
ZONA EQUIVALENTE AL ESPACIO PARCIAL: Desde el punto de vista de distancia, esta zona es notablemente extensa (de los 50M' hasta aproximadamente los 200 km), sin embargo, desde el punto de vista de presión, el cambio representado apenas alcanza una libra por pulgada cuadrada. La necesidad del uso de cabinas selladas, trajes de presión y los problemas de la sangre y los líquidos orgánicos por encima de los 63M', aunados a los cambios gravitacionales sobre el cuerpo, hacen a esta zona como equivalente al espacio exterior.

ZONA EQUIVALENTE AL ESPACIO TOTAL: Se extiende más allá de los 200 km y representa lo que pudiese ser llamado como el espacio verdadero.

Uno de los más valiosos y más ampliamente conocidos criterios para definir la estructura de la atmósfera, es la que está basada en las características térmicas de cada región. Con base en estos parámetros, las capas sucesivas de la atmósfera, desde la superficie de la tierra hacia arriba son las siguientes, separadas entre sí por una capa gaseosa externa llamada “pausa”, es decir, tropopausa, estratopausa, mesopausa, etc:

- Tropósfera
- Tropopausa
- Estratosfera
- Estratopausa
- Mesosfera
- Mesopausa
- Termósfera
- Termopausa
- Exósfera

Nosotros habitamos en la tropósfera, la capa atmosférica más próxima a la superficie terrestre, conocida en algunos países como “área de cambio” por la variación de sus características físicas de temperatura, humedad, presión y fenómenos meteorológicos. En la tropósfera la temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud en una relación aproximada de 1.98 °C ó 3 °F por cada 1,000 pies de ascenso. El límite superior de la tropósfera conocida como tropopausa se extiende hasta una altitud de 60 M’ a nivel del Ecuador y solo hasta los 24 M’ ó 30 M’ a nivel de las regiones polares. En estas altitudes la temperatura ha descendido hasta los - 56 °C ó - 67 °F.



Por encima de la tropopausa, aproximadamente entre los 34.5 M’ ó 35 M’, empieza la estratósfera, la cual se extiende hasta una altitud aproximada de 50 millas (80 Km). En la estratósfera y en general por encima de los 35 M’, límite superior de la tropopausa, no se encuentran los fenómenos meteorológicos típicos de la tropósfera (Frentes, lluvia, granizo, nieve, turbulencia, etc), por lo que a la estratósfera se le considera la zona ideal para el vuelo.

1.4. OZONO

Dentro de la estratósfera se encuentra una sub - capa conocida como Ozonósfera, localizada aproximadamente entre las 18 a 30 millas (30 a 50 Km) encima de la superficie terrestre. La temperatura en esta capa es más caliente (Aproximadamente - 35 °C) debido al calor liberado cuando el Ozono (O₃) es convertido a Oxígeno (O₂) por la radiación solar. Solamente en la última década se le ha conferido la gran importancia que la capa de Ozono tiene para todos nosotros. En la estratósfera el Oxígeno (O₂) absorbe la radiación ultravioleta (UV) de una longitud de onda de 2000 Angstroms (A) dando lugar a la disociación de la molécula de Oxígeno (O₂) en 2 átomos de este gas (O) que al unirse, mediante una reacción química, con

otra molécula de O₂ da lugar a la formación de un Oxígeno triatómico (O₃) u Ozono, el cual a su vez absorbe la luz ultravioleta de 2,100 a 2,900 Å, para reconvertirse nuevamente en Oxígeno.

Esta reacción balanceada da por resultado la casi total absorción de la radiación ultravioleta nociva. Recientemente se ha sabido que la capa de Ozono está siendo destruida particularmente a nivel de las regiones polares como consecuencia de los contaminantes terrestres. Esto pudiera dar origen a una mayor penetración de radiación UV hacia la superficie terrestre, ocasionando una mayor incidencia de cáncer de la piel, cataratas, y otros efectos nocivos en los organismos vivos de la tierra.

El Ozono es un gas tóxico, inestable de color azul; la concentración de Ozono a nivel del suelo es generalmente no mayor de 0.03 partes por millón (ppm) por volumen, pero su concentración aumenta rápidamente por encima de los 40 M', para alcanzar hasta 10 ppm por volumen a la altitud de 100 M'. Los aviones supersónicos modernos vuelan actualmente a altitudes donde esto pudiese ser un problema, por la posibilidad de contaminación del ambiente de cabina con altas concentraciones de Ozono, que pudieran ocasionar graves riesgos a la salud para tripulantes y pasajeros expuestos a estas altitudes. El ser humano expuesto durante 2 horas a concentraciones de Ozono entre 0.6 y 0.8 ppm, sufre una reducción en la capacidad de difusión de sus pulmones, así como de su volumen expiratorio de reserva (VER) y consiguientemente de su capacidad vital (CV).

Estos efectos no son permanentes, a menos que el tiempo de exposición fuese muy prolongado. El Ozono afecta igualmente la visión nocturna en el ser humano, y en cultivos de células humanas puede inducir rompimientos cromáticos idénticos a los provocados con la exposición a los Rayos X. Afortunadamente el O₃ es térmicamente inestable y se transforma rápidamente en O₂ a temperaturas de 400 °C o más. La temperatura alcanzada por los compresores de aire acondicionado del Concorde y otros aviones supersónicos de idénticas características de vuelo, es equivalente aproximadamente a los 515 °C durante el ascenso y el vuelo de crucero, eliminando de esta manera lo que pudiera ser un riesgo significativo.

1.5. PRESION ATMOSFERICA

La presión atmosférica es el peso de los gases que rodean la tierra, ésta es una función de altitud, densidad y fuerza de gravedad. A nivel del mar los meteorólogos la registran como equivalente a 101.32 Kilopascales, pero la mayor parte de las personas suelen representarla en cifra o valores más antiguos ó más conocidos como son:

milímetros de Mercurio (mmHg).....	760
libras por pulgada cuadrada (lb/plg ²).....	14,59
pulgadas de Mercurio (plgHg).....	29,92
milibarios (mb).....	1.013,2

La presión atmosférica disminuye con la altitud, como consecuencia de que con el ascenso la expansión de los gases va siendo mayor y por el contrario la fuerza gravitacional se va reduciendo, lo cual conduce a un enrarecimiento progresivo de los gases atmosféricos, es decir a una reducción de la densidad de la atmósfera, siendo equivalente a la mitad (379 mmHg) a la altitud de 18 M', y a la cuarta parte (187 mmHg) a los 34 M'. Cabe hacer notar que éstos cambios son pequeños y graduales comparados con los cambios observados en la profundidad de las aguas, ya que en éstas la presión se duplica a los 33 pies (Aproximadamente 10 m). Como veremos mas adelante, este es un punto importante cuando se aplica a pilotos que acostumbran bucear en aguas profundas,

1.6. RADIACION COSMICA

La atmósfera contiene tanto radiaciones galácticas, como radiaciones solares ionizantes. Las primeras son predecibles desde el punto de vista meteorológico, son partículas de baja densidad de flujo y de alta energía provenientes de fuera del sistema solar. La mayor parte de éstas radiaciones sufren deflexión por el campo magnético de la tierra, siendo ésta protección mayor en las regiones ecuatoriales que a nivel de las regiones polares. Otro sistema de protección contra éstas partículas es el provisto por el campo magnético interplanetario y por la absorción, a nivel de la estratósfera, de las partículas de baja energía. En múltiples ocasiones, y por diversas instituciones y organizaciones, se han realizado mediciones de éste tipo de radiaciones en vuelos a grandes altitudes de aviones turborreactores, las cuales han reportado, afortunadamente, que la dosis anual recibida es relativamente baja, en tripulantes expuestos a éstas altitudes de vuelo.

Las radiaciones solares son de baja energía, pero su producción pudiese ser intensa; su intensidad es generalmente impredecible, aunque parecen alcanzar su máxima cada 11 años, correspondiendo a los ciclos de mayor actividad solar. La tierra está bien protegida de éste tipo de radiaciones gracias a su atmósfera, pero la dosis de radiación pudiese ser significativa en vuelos prolongados a grandes altitudes o durante los vuelos espaciales; sus efectos se observan mas comúnmente en las interferencias con el radio y otros sistemas de comunicación durante la etapa de mayores explosiones solares. Indudablemente los vuelos espaciales habrán de conducir a mediciones mas precisas, y a un mejor conocimiento de sus efectos a largo plazo.

2. LEYES FISICAS DE LOS GASES

El comportamiento de los gases y su correlación con las alteraciones orgánicas que se presentan con la exposición a la altitud, se explican mediante el conocimiento de las leyes físicas, conocidas como “las leyes de los gases”.

LEY DE DALTON: (de las presiones parciales) “La presión ejercida por una mezcla gaseosa es equivalente a la suma de las presiones parciales de cada uno de los componentes de dicha mezcla”. Esta ley, aplicada a la mezcla gaseosa que constituye la atmósfera terrestre, se representa en la siguiente forma:

$$P_a = pN_2 + pO_2 + pCO_2 + pX$$

En donde P_a representa la presión atmosférica y pN_2 , pO_2 y pCO_2 , etc., representan las presiones parciales del nitrógeno, del oxígeno, del bióxido de carbono y pX de los demás componentes gaseosos de la atmósfera terrestre.

En lo que respecta a su correlación con las alteraciones orgánicas en la altitud, esta ley nos explica los fenómenos de Hipoxia resultante de respirar un aire con una reducida presión parcial de oxígeno (O_2), que como veremos más adelante, se produce como consecuencia de la reducción de la densidad con el ascenso a la altitud.

LEY DE BOYLE - MARIOTTE: (de los volúmenes gaseosos) “A temperatura constante, el volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión que se ejerce sobre dicho gas”.

Como ya se describió anteriormente, la presión total de la atmósfera y la presión parcial de los gases que la componen se reducen con la altitud como consecuencia de la disminución de su densidad. Esto da lugar, según la ley de Boyle a que el volumen de los gases se expanda con la altitud, sobre todo los gases encerrados en cavidades orgánicas, como el aparato digestivo, el oído medio y los senos paranasales, por lo que esta ley se correlaciona con los fenómenos de Disbarismo que se presentan con los cambios de la presión atmosférica y que se describen detalladamente en capítulos posteriores.

LEY DE HENRY: (de los gases en solución) “La cantidad de un gas en solución, es directamente proporcional a la presión ejercida por dicho gas sobre el solvente”.

Nuestro cuerpo mantiene permanentemente disuelto en los líquidos y tejidos del mismo, nitrógeno y otros gases del aire atmosférico que respiramos. La cantidad de gases disueltos está siempre en equilibrio con la presión de dichos gases en la atmósfera a cualquier altitud, por lo que, si ascendemos rápidamente en una aeronave no presurizada, respiramos un aire con menor presión, lo cual da lugar a que los gases disueltos en nuestro cuerpo abandonen su estado de solución para mantener su equilibrio con el gas del aire exterior. Esta liberación brusca de nitrógeno y otros gases en esas condiciones, constituye el Aeroenbolismo correlacionado con esta ley física.

LEY DE CHARLES: (de la temperatura de los gases) “El volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura”.

Esta ley nos explica por una parte el porqué los límites de la mezcla gaseosa que constituye la atmósfera son más altos a nivel del Ecuador en donde por razón de la mayor verticalidad de los rayos solares la temperatura es más elevada provocando la expansión de los gases de la atmósfera, y por otra parte, la mayor lectura de los manómetros de los cilindros de oxígeno, cuando están expuestos al calor de la atmósfera.

3. ASPECTOS MEDICOS DE LAS CABINAS A PRESION

3.1. RESPIRACION Y CIRCULACION HUMANA

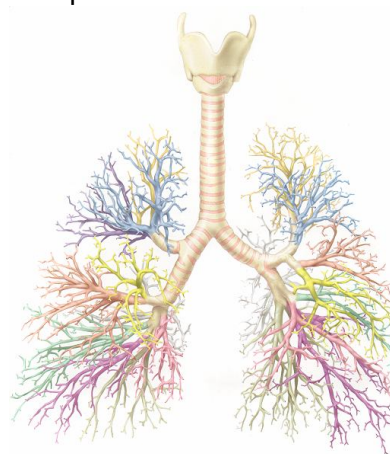
Se define como Respiración, el intercambio gaseoso que tiene lugar entre un organismo y el medio que lo rodea; en el ser humano este intercambio consiste en tomar el oxígeno (O_2) del aire atmosférico para ser utilizado en los procesos de metabolismo aeróbico realizados a nivel celular, y el desprendimiento del bióxido de carbono (CO_2), como producto de descomposición de dichos procesos.

En el ser humano el intercambio gaseoso se realiza en dos diferentes niveles: uno a nivel de los alvéolos y los capilares de los pulmones, llamada por eso respiración externa o pulmonar, y la otra a nivel de los vasos capilares y las células de los tejidos, conocida como respiración interna ó celular.

El órgano central del aparato respiratorio en el ser humano son los pulmones, los cuales se encuentran localizados en el tórax; ésta es una cavidad hueca, a manera de una caja o celda, constituida por las costillas que en número de 12 y en forma de arcos se articulan por atrás en las vértebras de la porción dorsal de la columna vertebral y por delante, por intermedio de unos cartílagos, con el hueso esternón. Está separado del abdomen por un músculo estriado llamado diafragma. El aparato respiratorio está además formado por la nariz, la boca, la faringe, la laringe y la tráquea, la cual ya en el interior de los pulmones, se divide progresivamente en ramas cada vez más pequeñas, más delgadas y más numerosas llamadas progresivamente bronquios, bronquiolos, conductos alveolares hasta desembocar en los alvéolos pulmonares. Estos son pequeños sacos a manera de bolsas, sumamente delgados de los cuales tenemos millones y a los cuales llega el aire atmosférico conducido por las vías antes citadas; como veremos mas adelante, cada uno de estos minúsculos alvéolos está rodeado de uno o más vasos capilares pulmonares por los cuales circula la sangre, y es a través de estas estructuras contiguas en donde se realiza el primer intercambio gaseoso.



Sistema Respiratorio



Arbol Bronquial

El mecanismo de la respiración está controlado por un centro nervioso localizado en el 3er. ventrículo a nivel del bulbo raquídeo del sistema nervioso central. Son principalmente fenómenos químicos los que actúan sobre este centro nervioso enviando estímulos diversos por vía sanguínea, para que a su vez se generen reacciones nerviosas que regulan la mecánica respiratoria.

El ciclo respiratorio consta de dos fases: la inhalación ó fase activa del ciclo mediante la cual el aire entra desde el exterior a los pulmones gracias a la contracción de los músculos intercostales insertados entre cada una de las doce costillas, realizando la elevación de las mismas y la expansión del tórax, y el descenso del músculo diafragma que conjuntamente con la elevación costal antes mencionada expande la cavidad torácica, crea una presión negativa o de vacío en su interior, permitiendo así la llegada del aire exterior. La segunda fase, o exhalación es una fase pasiva (como veremos mas adelante las fases activa y pasiva del acto respiratorio suelen invertirse cuando se utiliza un equipo de respiración a presión durante un vuelo) durante la cual la relajación de los músculos intercostales y le elevación del músculo diafragma crean una presión positiva intratorácica, que facilita la salida del aire en sentido contrario, es decir, del alveolo hacia el exterior. El ciclo respiratorio se repite en el adulto sano en reposo un promedio de 12 a 20 veces por minuto, presentando variaciones en su frecuencia derivadas de la edad, temperatura corporal, actividad física, altitud sobre el nivel del mar, y otras condiciones de salud.

El proceso respiratorio se realiza mediante tres fases o etapas: la ventilación pulmonar que consiste en el paso del aire desde el exterior, a través de todas las partes que forman el aparato respiratorio, hasta el alveolo pulmonar y viceversa; la difusión pulmonar mediante la cual se realiza el intercambio gaseoso entre el alveolo pulmonar y el capilar que lo rodea, y la perfusión pulmonar que define el proceso de irrigación sanguínea del pulmón, mediante la cual el oxígeno habrá de distribuirse a todas las células del organismo.

Mediante la ventilación pulmonar cuando estamos en reposo y respirando normalmente se inhalan aproximadamente 500 cc de aire y se exhala una cantidad igual; a esta cantidad se le denomina volumen circulante. Si realizamos una inhalación profunda llega al alveolo una cantidad adicional de aire, que se conoce como volumen inspiratorio de reserva, igualmente si realizamos una exhalación forzada se expulsa también una cantidad adicional de aire que se denomina volumen expiratorio de reserva; la suma de éstos volúmenes constituye lo que se llama capacidad vital, un parámetro de gran importancia cuando se trata de evaluar nuestra capacidad respiratoria mediante pruebas espirométricas. Además de los volúmenes antes citados nuestro aparato respiratorio contiene aún otro adicional que se conoce como volumen de reserva el cual, como su nombre lo indica, permanece estable y no se moviliza durante un acto respiratorio normal, pero como veremos más adelante, tiene una relativa importancia en lo referente al tiempo útil de conciencia (TUC) en el caso de una descompresión de cabina, durante un vuelo en avión dotado con una cabina presurizada. La suma de este volumen más la capacidad vital antes mencionada, constituyen lo que se llama Capacidad pulmonar funcional.

La Ley de Dalton de los gases menciona que “la presión ejercida por una mezcla gaseosa, es equivalente a la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases componentes de la mezcla”, lo que aplicado a la presión de la mezcla gaseosa que constituye la atmósfera significa que cada gas de sus componentes ejerce una presión proporcional a su concentración. El oxígeno (O₂) presente en un 20.95% ejerce una presión parcial de 159 mmHg en el aire seco a nivel del mar; sin embargo al ser inspirado a través de la nariz y boca y llegar a la traquea, este aire se satura con vapor de agua presente a la temperatura corporal de 37 °C, por lo que su presión a este nivel del tracto respiratorio se reduce aproximadamente a 149 mmHg resultante de restar a la presión atmosférica 47 mmHg que es la presión constante que el vapor de agua ejerce en todos los niveles, mientras la temperatura corporal se mantenga constante a 37 °C. $(760 - 47 \times 20.9 / 100 = 149)$.

Durante el paso del O₂ de la traquea hasta el alveolo, éste se combina con CO₂ y además se difunde hacia los tejidos del aparato respiratorio por los que circula, de tal forma que la presión parcial del O₂ al llegar al alveolo (paO₂) es aproximadamente de 103 mmHg a nivel del mar, considerando en este valor, lo relativo al cociente respiratorio. La presión parcial de CO₂ en el alveolo a este mismo nivel, es de 40 mmHg. Las presiones alveolares de los otros gases de la atmósfera a nivel del mar equivalen a: paN₂ = 573 mmHg y paH₂O = 47 mmHg.

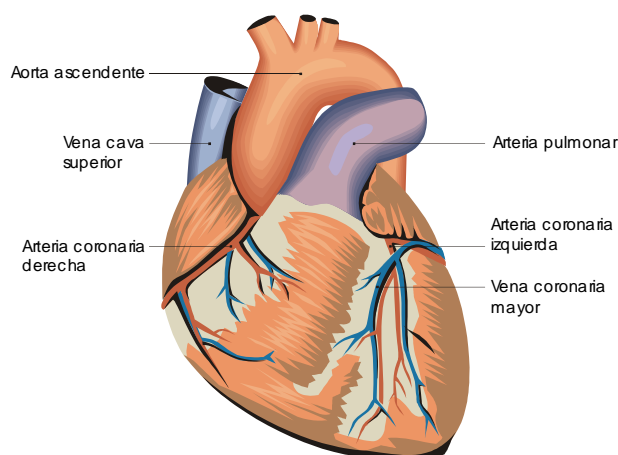
3.2. CIRCULACION SANGUINEA

Para describir el proceso de difusión pulmonar es preciso antes mencionar brevemente lo relativo a la circulación sanguínea.

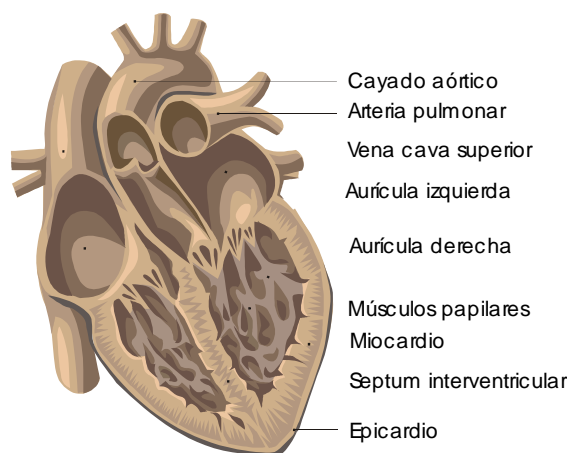
Se define como el proceso mediante el cual la sangre es transportada a todos los tejidos del cuerpo. La sangre es asimismo un tejido formado por tres elementos sólidos: los glóbulos rojos (GR) ó eritrocitos, los glóbulos blancos (GB) ó leucocitos y las plaquetas (PL) flotando todos ellos en un medio líquido llamado plasma.

Para el tema que nos ocupa diremos solamente que los GR, de los cuales normalmente un adulto sano tiene entre 5.0 y 5.5 millones por mililitro de sangre, son células microscópicas que contienen en su interior una sustancia constituida por una proteína y un núcleo de hierro llamada Hemoglobina (Hb) la cual se combina con el O₂ mediante una reacción reversible, para formar oxihemoglobina y transportar este gas a todos los tejidos del cuerpo.

El corazón es el órgano central del aparato circulatorio: es un órgano constituido por tres capas de las cuales mencionaremos en éste capítulo solamente la capa muscular o miocardio, rodeado por una capa externa fibrosa llamada pericardio y con una capa interna conocida como endocardio. El corazón es una víscera hueca constituida por cuatro cavidades, dos derechas y dos izquierdas separadas por un tabique intermedio; en cada lado se encuentran dos cavidades superiores llamadas aurículas y 2 cavidades inferiores llamados ventrículos, los cuales están a su vez comunicados por unas válvulas auriculo-ventriculares, que en el lado derecho se llama válvula tricúspide y en el lado izquierdo válvula mitral.



El corazón está dotado de un sistema nervioso autónomo que regula su contracción o sístole cardiaca, y su relajación o diástole cardiaca; los cambios de potencial eléctrico que genera en el miocardio la transmisión del impulso nervioso que regula el funcionamiento cardiaco, son los que se registran durante la práctica de un electrocardiograma, que forma parte del examen médico de rutina del personal aeronáutico.

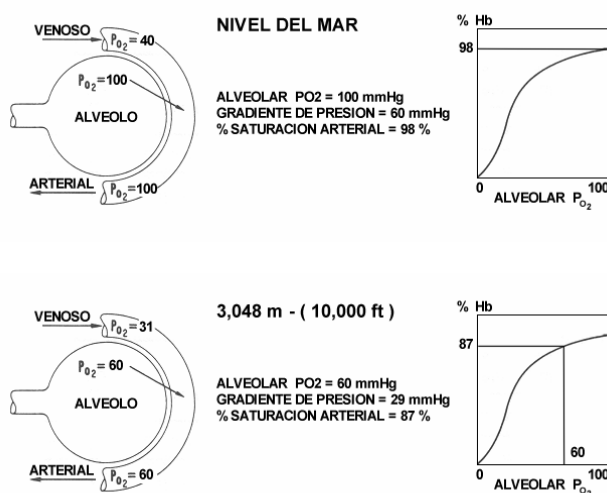


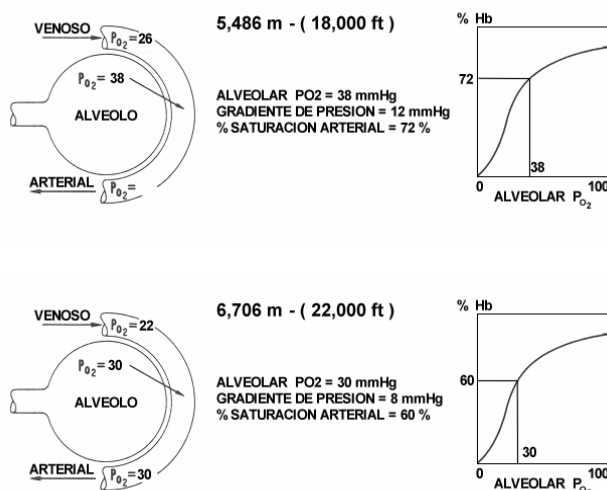
A la aurícula derecha llega la sangre “venosa” por medio de las venas (cava superior e inferior) que desembocan en dicha cavidad; ésta sangre proviene de los diversos tejidos del cuerpo a los que ya ha cedido el O₂ circulante, mediante el proceso de respiración interna ó celular; por lo tanto ésta sangre tiene una presión parcial de O₂ baja ($p_{vO_2} = 40$ mmHg) y una presión de CO₂ relativamente elevada ($p_{vCO_2} = 46$ mmHg) a nivel del mar; la $p_{vN_2} = 573$ se mantiene constante mientras no varíe la altitud del nivel del mar, y la $p_{vH_2O} = 47$ mmHg mientras la temperatura del cuerpo se mantenga constante a 37 °C. Esta sangre venosa pasa a través de la válvula tricúspide al ventrículo derecho y de ésta cavidad es transportada por medio de la arteria pulmonar (la única arteria que transporta sangre venosa) a los pulmones, en donde se divide en ramas progresivamente mas numerosas y finas, hasta convertirse en vasos capilares pulmonares, que rodean en su casi totalidad a los millones de alvéolos existentes. Se menciona que ésta red capilar pulmonar es tan extensa, que si se extendiera en una superficie cubriría en su totalidad el área equivalente a dos canchas de tenis profesional.

Al llegar el O₂ inhalado al alveolo, en donde ejerce una presión de 103 mmHg a nivel del mar, y la sangre venosa del capilar pulmonar que rodea al alveolo y en la cual el O₂ ejerce solo una presión de 40 mmHg, se realiza el intercambio gaseoso que constituye la respiración externa mediante la difusión del O₂ alveolar a mayor presión hacia su sitio de menor presión, atravesando para ello la pared del alveolo, el espacio intersticial que separa a éste del capilar pulmonar, la pared del vaso capilar, el plasma, la pared del glóbulo rojo hasta combinarse con la Hb contenida en su interior para formar la oxihemoglobina convirtiéndose así en sangre arterial ya oxigenada. El CO₂ transportado en la sangre venosa en combinación con los carbonatos del plasma, abandona ésta combinación, y por el mismo proceso de difusión mediante el cual un gas pasa de un sitio de su mayor presión (46 mmHg) a otro de menor presión (40 mmHg) en el alveolo, pasa a esta cavidad en sentido contrario del O₂ para ser expulsado al exterior durante la fase espiratoria de la respiración. Esta sangre arterial, con una presión parcial de O₂ aproximadamente de 100 mmHg, es transportada por las venas pulmonares (las únicas venas que transportan sangre arterial) hacia la aurícula izquierda; de ahí a través de la válvula mitral pasa al ventrículo izquierdo, de donde sale la arteria aorta que dividiéndose en millones de ramas progresivamente más numerosas, finas y delicadas llegan a convertirse en vasos capilares arteriales, los cuales, en contacto con los tejidos que ya han consumido el O₂ empleado en los procesos metabólicos aerobios, ceden el O₂ que llevan en combinación con la Hb para realizar el proceso de respiración interna ó celular ya mencionado.

El CO₂ formado como producto de desecho de tales procesos metabólicos pasa también a la sangre, se combina con los carbonatos del plasma y es transportado en la sangre venosa hacia el corazón para realizar el proceso de intercambio a nivel alveolo capilar, y así "cerrar" el circuito de la circulación y respiración.

Como se mencionó anteriormente, con la altitud disminuye la densidad de la atmósfera y consiguientemente la presión atmosférica. De conformidad con la Ley de Dalton disminuirá también la presión parcial del O₂ en el aire atmosférico, y como consecuencia de ello, durante el acto respiratorio, la presión del O₂ en el alveolo se reducirá en la misma proporción, ocasionando con ello que durante el intercambio gaseoso haya una deficiencia del O₂ que se combine con la Hb y que se distribuya en los tejidos.

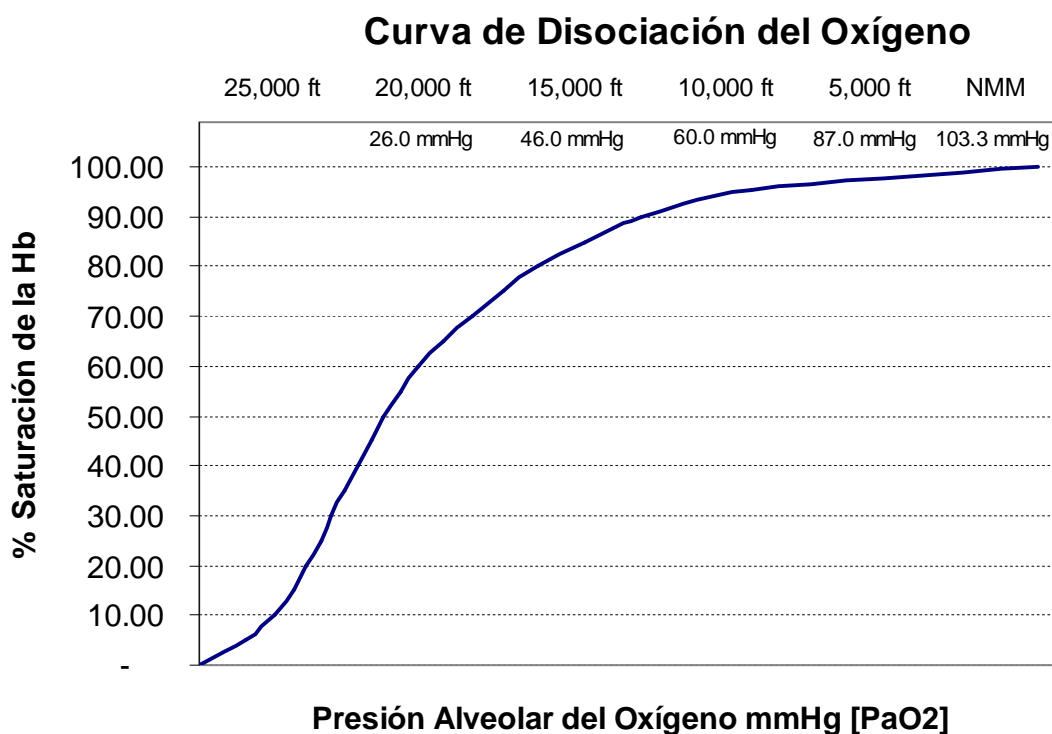




Esta deficiencia de oxígeno, ocasionada al respirar un aire con una presión parcial reducida de éste gas, se conoce como hipoxia de la cual trataremos mas extensamente en el Capítulo siguiente.

3.3. DISOCIACION DE LA OXIHEMOGLOBINA

La gráfica de la disociación de la oxihemoglobina describe una forma de “S” cuando la saturación es comparada contra las presiones parciales de oxígeno. Las características de esta curva son importantes. Por debajo de una presión parcial de 60 mm, la saturación se mantiene arriba del 90%; por debajo de este punto, la saturación disminuye rápidamente siendo menor del 80% para cuando la presión parcial ha alcanzado los 45 mm. La caída brusca de la curva permite a la hemoglobina descargar rápidamente en los tejidos relativamente hipóxicos, e igualmente permite a la hemoglobina reducida tomar rápidamente el oxígeno en gradientes de difusión normales. Bajo condiciones de hipoxia se forma ácido láctico en los tejidos provocando una acidosis relativa lo cual desplaza la curva hacia la derecha aumentando la toma y la liberación del oxígeno. En la alcalosis, que se presenta durante la hiperventilación, la curva se mueve a la izquierda, disminuyendo la disponibilidad del oxígeno a los tejidos.



A los 10 M' la presión alveolar de oxígeno (paO_2) ha alcanzado los 60 mmHg, lo cual representa el inicio de la caída rápida de la saturación de la Hb por encima de ésta altitud de desarrolla una hipoxia tisular significativa, siendo ésta la razón por la cual se requiere el uso del oxígeno suplementario por encima de los 10 M', durante un vuelo en equipo no presurizado. Si el piloto respira 100% de oxígeno, la presión alveolar de este gas será significativamente mucho mayor a cualquier altitud, alcanzándose el nivel crítico de 60 mmHg de presión alveolar, cuando la altitud de vuelo se encuentre a los 40 M'. A ésta altitud se le denomina como "fisiológicamente equivalente"

3.4. CABINAS A PRESION

La limitación más importante para realizar los vuelos a grandes altitudes se deriva de la disminución de la presión atmosférica y por consiguiente de la presión parcial del oxígeno, dando lugar a la hipoxia.

El conocimiento de la composición de la atmósfera, de que dicha composición se mantiene constante hasta una altitud de 100 Km, y de que la presión parcial del oxígeno se reduce en la altitud como consecuencia de la reducción de la densidad atmosférica, despertó la imaginación y el ingenio humano para crear, a bordo de una aeronave en vuelo, una densidad del aire en la cabina inferior a la altitud real de vuelo mediante la inyección de aire exterior, al interior de la cabina; esto dio origen a la cabina presurizada o cabina a presión.

CABINAS PRESURIZADAS Y CABINAS SELLADAS

La cabina presurizada debe su nombre al hecho de que ésta es producto de la inyección dentro de la cabina de una aeronave, del aire atmosférico por conducto de los turbocompresores del motor de la propia aeronave.

La presión atmosférica se reduce prácticamente a cero por encima de los 100 M', y la capacidad de los turbocompresores de los aviones tiene limitaciones para la inyección del aire enrarecido a la cabina en estas altitudes, por lo que la única forma de mantener una altitud de cabina inferior a la altitud de vuelo en estos niveles, se obtiene solo al contar con una fuente de aire y de oxígeno a bordo de la propia aeronave; a esto se le llama cabina sellada.

CONTROL DE LA PRESURIZACION

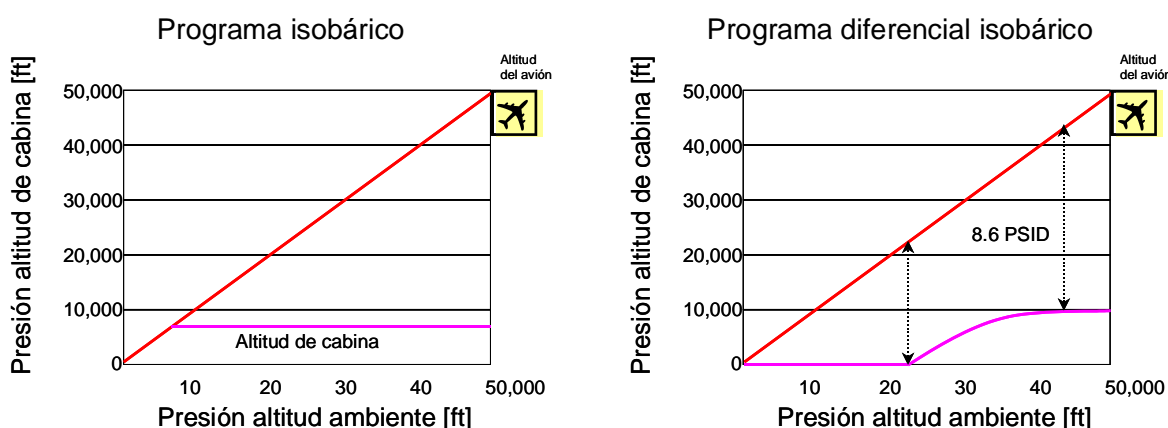
Existen tres sistemas de control de la presurización a bordo de una aeronave:

CONTROL ISOBARICO: Consiste en mantener una altitud de cabina constante a cualquier altitud de vuelo. Este sistema tiene sus limitaciones debido al hecho de que con la altitud la presión diferencial, representada por la diferencia entre la altitud de cabina y la presión ambiental ($P_d = P_c - P_a$) puede exceder la resistencia de la estructura de la aeronave, sobre todo en sus superficies más débiles (ventanas, sellos y salidas de emergencia, etc.) dando lugar con ello a una ruptura de la estructura que origine una pérdida de la presurización.

CONTROL DIFERENCIAL: Este sistema consiste en una válvula que permite la salida del aire de la cabina hacia el exterior cuando se excede la presión diferencial previamente establecida (normalmente nunca mayor a 8.6 lb/plg²), evitando así la creación de una presión diferencial excesiva que comprometa o afecte a la resistencia máxima de la estructura de la aeronave.

CONTROL MIXTO: Existen a la fecha aeronaves modernas para transporte de pasajeros (Boeing 747-400, MD's de la serie 80, Airbus de la serie 300), que cuentan con un sistema de control mixto operando con sistema isobárico hasta determinada altitud para posteriormente en forma automática continuar su control mediante el sistema diferencial.

Comparativo entre programas de presurización



VENTAJAS DE LA CABINA PRESURIZADA

Previene la hipoxia.
Control de presión y temperatura agradables.
Evita el uso de oxígeno suplementario a bordo.
Evita las formas de disbarismo.
Provee mayor confort y seguridad.
Reduce la fatiga del vuelo.
El aire inyectado y reciclado es altamente puro.

DESVENTAJAS DE LA CABINA PRESURIZADA

Existe el riesgo de una descompresión o falla del sistema de presurización. El aire de la cabina mantiene muy reducida humedad relativa no mayor al 15 ó 20%.

3.5. DESCOMPRESION DE CABINAS

Mientras que la presurización de las cabinas ha servido para eliminar la mayoría de los trastornos fisiológicos inducidos por la exposición a una baja presión ambiental, la descompresión de las cabinas durante un vuelo a gran altitud está asociada con los trastornos y riesgos propios de esta condición.

Las causas por las cuales se puede provocar una descompresión de cabina pueden ser:

1. Una falla en el sistema de inyección o flujo de aire hacia la cabina.
2. Una excesiva descarga de dicho aire al exterior.
3. Una falla de la estructura de la cabina por ruptura de sus partes débiles, por impactos con aves, por ruptura de la estructura por partes metálicas del motor desprendidas durante fallas de estos, o por atentados dinamiteros.
4. Reducción en el flujo de aire en la cabina; esta causa es más frecuente en aviones monomotores ya que los aviones multimotores de transporte de pasajeros por lo general están equipados con sistemas que proveen dicho aire de otro de los motores o turbinas.
5. Otras causas incluyen fallas de componentes en el sistema de aire acondicionado y cierre intencional del sistema por parte de la tripulación de vuelo para evitar la contaminación de cabinas con humo o gases tóxicos que pudiesen detectarse durante un vuelo.

INCIDENCIA DE DESCOMPRESION DE CABINAS

Los avances en la tecnología utilizada para el diseño y construcción de las modernas aeronaves, han conducido a una importante reducción de las causas de descompresión de las cabinas; se calcula que a la fecha se producirán como máximo a nivel mundial entre 30 ó 40 casos anualmente, de los cuales una gran mayoría son realizadas intencionalmente para evitar la contaminación de las cabinas por humo u otros materiales tóxicos, como precaución después del estrellamiento de una ventana u otra parte débil de la cabina, como preparación planeada después de recibir un aviso de amenaza de bomba, etc.

Con muy pocas excepciones por lo general tanto tripulantes como pasajeros sobreviven a una descompresión de cabina tanto en operaciones comerciales como militares; la mayoría de las muertes han acaecido con daños masivos a la estructura por fatiga de materiales y ocasionalmente algunos pasajeros han sido expulsados al vacío al perderse una salida de emergencia, una ventana o una puerta.

COMPONENTES DE LA DESCOMPRESION

Para un mejor estudio de la descompresión de cabinas, y con ello lograr un mejor entendimiento de sus efectos, se describen dos componentes de este fenómeno. El componente físico y el componente biológico.

EL COMPONENTE FISICO: Se refiere al tiempo de descompresión de la cabina de la aeronave presurizada, el cual incluye los siguientes factores:

- **El volumen (v) de la cabina:** a mayor volúmen de la cabina, corresponde un mayor tiempo de descompresión.
- **La presión diferencial (d):** a mayor presión diferencial corresponde también un tiempo de descompresión más prolongado.
- **El área (a) de ruptura a través de la cual escapa el aire presurizado:** a una mayor área de ruptura, corresponde un menor tiempo de descompresión.

Representado gráficamente en la siguiente ecuación:

$$T_d = \frac{Vd}{a}$$

En donde:

Td - Tiempo de descompresión

V - Presión diferencial al momento de la descompresión

a - Area de ruptura.

EL COMPONENTE BIOLOGICO: Se refiere al tiempo de descompresión del pulmón, el cual igualmente incluye los siguientes factores:

VOLUMEN PULMONAR: A mayor volumen de aire en el pulmón (inhalación) corresponde un mayor tiempo de descompresión del pulmón.

PRESION DIFERENCIAL: A mayor presión diferencial entre el aire del alveolo pulmonar y el aire de la cabina de la aeronave, corresponde un mayor tiempo de descompresión pulmonar.

PERMEABILIDAD DE LAS VIAS AEREAS: Cualquier obstáculo en las vías respiratorias que impida o bloquee parcialmente el libre flujo de aire del alvéolo hacia el exterior, contribuirá a aumentar el tiempo de descompresión del pulmón.

CLASIFICACION DE LA DESCOMPRESION DE CABINA

En base al tiempo de descompresión, se clasifican en:

DESCOMPRESION EXPLOSIVA: Es aquella cuya duración es de un segundo o menos. En este tipo de descompresión la cabina del avión se descomprime antes que el pulmón, por lo que sus efectos son siempre más graves.

DESCOMPRESION RAPIDA: Es aquella cuya duración es de 0.5 a 2.0 segundos, en la que el pulmón se descomprime antes que la cabina del avión.

DESCOMPRESION LENTA: Es aquella mayor de 2 segundos.

EFFECTOS DE LA DESCOMPRESION DE CABINA

EFFECTOS FISICOS: Dependiendo del área de ruptura a través de la cual se escapa el aire, se producirá primeramente desde un silbido agudo algunas veces imperceptible, hasta un ruido explosivo, seguido de la formación de neblina en el interior de la cabina debido a la condensación de vapor de agua con el descenso brusco de la temperatura, y la generación de una intensa corriente de aire al exterior que habrá de continuar hasta que la presión dentro de la cabina y la del aire exterior se hayan equilibrado. Dependiendo también del diámetro de la ruptura de la estructura, esta corriente de aire arrastrará al exterior materiales y objetos no debidamente protegidos; se han reportado casos en los que algunos pasajeros han sido proyectados al exterior, en casos de gran destrucción de la estructura de la aeronave, durante atentados dinamiteros.

EFFECTOS FISIOLÓGICOS: Al momento de la descompresión se produce una expansión brusca y momentánea de la caja torácica, seguida de un momentáneo periodo de apnea (falta de respiración) atribuido a la hiperestimulación de las terminaciones nerviosas de Hering-Breuer, seguida de inmediato por una expulsión brusca del aire del alveolo hacia el exterior que llega a producir, por su fuerza, la vibración de los labios a su salida por la boca; con esta exhalación brusca el pulmón queda prácticamente sin ningún residuo de oxígeno, provocando una hipoxia severa por la cual, en estos casos, como antes se mencionó, el TUC se reduce a la mitad o a la tercera parte en relación con otro tipo de carencia de oxígeno.

Durante estos fenómenos, los quimiorreceptores carotídeos y aórticos detectan la hipoxia provocada y generan estímulos nerviosos compensatorios, que dan lugar a taquicardia, taquipnea y elevación súbita de la presión arterial. El efecto fisiológico más grave en caso de una descompresión es la hipoxia, la cual requiere ser corregida de inmediato mediante la provisión de oxígeno suplementario del cual están dotados las aeronaves presurizadas, y un descenso rápido de emergencia hasta una altitud en donde la presión parcial de oxígeno en el aire sea compatible con la vida.

Al momento de la descompresión rápida es posible que se produzca una expansión momentánea de los gases encerrados en el aparato digestivo, en el oído medio y en los senos paranasales provocando solo molestias discretas y momentáneas (distensión abdominal otalgia o dolor en áreas de los senos paranasales) el cual desaparece rápidamente al provocarse la salida del aire y equilibrar la presión de este con el aire exterior.

En el caso de que algún pasajero o tripulante en el momento de la descompresión aqueje algún trastorno digestivo o de las vías respiratorias altas que impida o dificulte la salida del aire de estas cavidades hacia el exterior, la persona afectada puede manifestar síntomas severos por excesiva distensión abdominal (dolor) y síntomas de barotitis y baro sinusitis cuya intensidad disminuirá al lograrse el descenso de emergencia.

No se han reportado casos de aeroembolismo durante una descompresión, dado que este trastorno raramente se manifiesta por debajo de los 25M' o 30M' y el descenso de emergencia realizado, previene esta complicación.

Efectos psicológicos: una descompresión rápida de la cabina crea en los pasajeros y en los miembros de la tripulación no entrenados en este tipo de emergencias, situaciones de pánico que pueden agravar las consecuencias de un incidente de este tipo.

MEDIDAS PREVENTIVAS

Entre las medidas preventivas recomendadas deben mencionarse las siguientes:

Impartir a los pasajeros las instrucciones (briefing) prevuelo con respecto al uso de los sistemas de oxígeno suplementario con los que cuenta la aeronave, procediendo con ello a difundir plena confianza de que en el caso insólito de una descompresión de cabina la aeronave está dotada con los sistemas para su máxima seguridad, y la tripulación debidamente entrenada en el manejo de este tipo de emergencias. Este es un factor de primer orden para evitar las situaciones de pánico generadas durante una descompresión.

Impartir entrenamiento teórico y práctico en cámaras hipobáricas en las cuales se demuestren los efectos físicos y fisiológicos de la descompresión, el manejo y operación de los sistemas de oxígeno a bordo para con ello obtener una adecuada familiarización de los tripulantes en la identificación y la correcta actitud durante este tipo de emergencias en vuelo.

Realizar una minuciosa inspección prevuelo para asegurarse de que los sistemas de oxígeno a bordo estén perfectamente operables y con las dotaciones correctas para el suministro de este gas.

4. CONDICIONES AMBIENTALES DE CABINA EN LA AVIACION MODERNA

Las publicaciones recientes de diversos artículos en la prensa mencionan notables pronunciamientos relativos al medio ambiente en vuelos comerciales. La percepción es que la calidad del aire en la cabina es pobre en los nuevos modelos de aviones, debido a un más reducido flujo de aire del exterior, y a la incorporación de sistemas de recirculación del aire.

Algunas de las percepciones específicas referidas son, que los sistemas de ventilación de los aviones modernos pueden causar: (1) una acumulación de contaminantes; (2) la propagación de enfermedades; (3) una reducción en la cantidad de oxígeno respirable y (4) mayores niveles de bióxido de carbono en la cabina.

Se ha pensado que estos factores en las cabinas de los aviones comerciales modernos pudiesen provocar enfermedades, fatiga, náuseas, mareos, cefalea, irritación de nariz y ojos y problemas respiratorios entre pasajeros y tripulantes de cabina a bordo.

4.1. SISTEMAS DE VENTILACION DE LAS CABINAS

El sistema de ventilación de aire en la cabina provee 50% de aire filtrado en recirculación y 50% de aire inyectado del exterior.

Estos dos tipos de aire proporcionan un flujo aproximadamente 20 pie³ de aire por pasajero, lo cual da lugar a que ambos tipos de aire se renueven de 20 a 30 veces cada hora, es decir, como promedio, cada 2.5 minutos.

Este elevado índice de renovación del aire es necesario para control de gradientes de temperatura, prevenir el estancamiento de áreas frías, mantener la optima calidad del aire y disparar el humo y los olores del ambiente de la cabina.

El alto flujo del aire inyectado del exterior es necesario para mantener un control adecuado de la temperatura en la cabina, para proveer la presurización de la propia cabina y mantener una baja concentración de gases contaminantes como el CO₂ y otros.

El aire recirculado mantiene su pureza y su alta calidad, además de por su alto índice de renovación, mediante el empleo de filtros de alta eficiencia tipo HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) del tipo de los empleados en los quirófanos, las salas de expulsión y las áreas de trasplantes de los centros hospitalarios y en las áreas estériles de ciertas industrias.

Tales filtros retienen partículas hasta de 0.3 μ de diámetro y su eficiencia aumenta con el tiempo.

4.2. INVESTIGACION

Las instituciones y Organizaciones que han realizado estudios sobre la calidad del aire en la cabina son entre otros: la Academia Nacional de Ciencias de los E.U.A. (1986), Laboratorios de Biociencia del Suroeste (SBL - 1987), Departamento del Transporte (DOT - 1989), Boeing Aircraft Corp. (1989), Gobierno del Canadá (1991), Instituto Nacional para la Salud y la Seguridad Ocupacional (NIOSH - 1993), Asociación de Transporte Aéreo (ATA - 1994) y el Centro para Control de Enfermedades (CDC - 1995).

La sociedad de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) de los E.U.A. en coordinación con otras Organizaciones Norteamericanas y Europeas realizan nuevas investigaciones para establecer estándares específicos sobre calidad del aire en cabinas de aviones.

4.3. RESULTADOS

Resumiendo los totales de los estudios de investigación realizados por los Organismos y las Instituciones antes citados, se reportan los siguientes resultados:

Numero de vuelos en que se realizaron estudios = 240; CO₂ (ppm) = 1500; CO (ppm) = 3.5; Aerosoles microbianos: Bacterias/hongos (UFC/m³) = 360/110 (rango); Ozono (ppm) = 0.02; Partículas: Areas de No Fumar/Fumar (mcgs/m³) = 50/180 (PRS < 10 μ de diámetro); CVO (ppm) = 2.6; Humedad (%) = 11 - 20; NO₂ (ppm) = ND.

COMPARACION DE RESULTADOS CON ESTANDARES EXISTENTES

PARAMETROS:	CO ₂	CO	Bacterias Hongos	O ₃	Partículas	COV	Humedad	NO ₂
	(ppm)	(ppm)	(ufc/m ³)	(ppm)	mcgs/m ³)	(ppm)	%	(ppm)
Estudios sobre calidad del aire. Resultados mayores totales	1,500	35	360/110 (rango)	0.02	50/180 psr	2.6	11 - 20	ND
Estándares de salud ACGIH, OSHA, NIOSH	5,000	50	1,000/1,000	0.1	5,000 psr	1000	< 60	3
Estándares de salud y confort ASHRAE	1,000 *(cont)	9 (8hr)		0.05 (cont)	150 psr (24hr)		30-60	0.055 (1año)
Regulaciones gubernamentales (FAR'S)	30,000	50		0.1, 0.25 max				

*ASHRAE ha señalado que este valor subrogado no es aplicable en aeroplanos.
 cont = los valores son tiempo promedio, 8 horas de labor, 40 horas semanales.

Los síntomas atribuidos a la calidad del aire en la cabina, son posiblemente debidos a una interacción de ciertos factores, como son: duración del vuelo, la altitud de cabina, el jet - lag, turbulencia del aire, el ruido, los niveles de trabajo (FA), inactividad, deshidratación, temor, estrés, salud individual, consumo de alcohol y hábitos personales.

Los estudios gubernamentales, académicos y de la industria aeronáutica, han concluido lo siguiente: se satisfacen todos los estándares aplicables a la salud industrial. El ambiente de cabina de las aeronaves modernas de la aviación comercial, no representa ninguna amenaza para la salud.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- De Hart , Roy L.,M.D.,M.P.H., Fundamentals of Aerospace Medicine.-2nd. Edition ,pp.59 – 130 .-Williams & Wilkins , 1996.- (para Capítul o No.3)
- 2.- Ernsting , J.,Nicholson , A.M.,Rainford , D.J.,Aviation Medicine , Third Edition . pp. 3 – 127 , Butterwort – Heinemann,1999.(Para Capítulo No 3)
- 3.-De Hart,Roy L.M.D.,M.P.H. ,Fundamentals of Aerospace Medicine , 2nd.Edition , pp.131 – 260 ,Williams & Wilkins , 1996.(Para Capítulo No.3)
- 4.- Ernsting , J.,Nicholson , A.M.,Rainford , D.J.,Aviation Medicine , Third Edition . pp. 3 – 127 , Butterwort – Heinemann,1999.(Para Capítulo No 3)

