



3. FISIOLÓGÍA BÁSICA: EFECTOS DE LA PRESIÓN PARCIAL

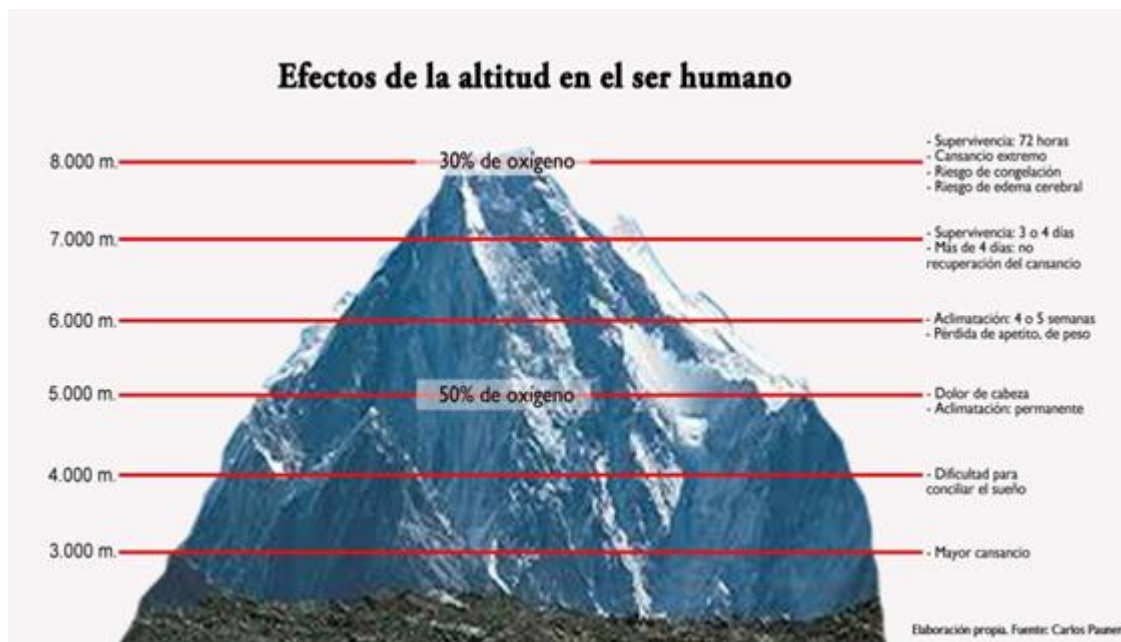
Según se indicó anteriormente, la Ley de Dalton establecía que, para una mezcla de gases, como el aire, la presión total es igual a la suma de las presiones individuales de los gases que componen esa mezcla. La presión individual de cada gas recibe el nombre de presión parcial.



Efecto del aumento de altitud

La presión parcial de oxígeno en los alvéolos determina la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos y a la corriente sanguínea.

Recordemos que la presión parcial de un gas es igual al producto de la presión total de la mezcla por el porcentaje de ese gas en la mezcla gaseosa. Como la atmósfera puede ser considerada, prácticamente, como una mezcla gaseosa de dos gases N_2 y O_2 sucede que $PN_2 = Pt * 79$ y $PO_2 = Pt * 21$. Además, debido a que la presión total Pt disminuye con la altitud, la presión parcial de oxígeno PO_2 sufrirá una disminución equivalente. Motivo que, básicamente, explica el problema de la hipoxia al recibir las células del cuerpo humano, que obtienen su energía del oxígeno, menor cantidad de este gas.



Con objeto de que sea más sencillo el tratamiento posterior de la hipoxia, se van a considerar a continuación las presiones parciales de oxígeno a nivel traqueal y alveolar. La presión parcial de oxígeno traqueal es proporcional al porcentaje de oxígeno aspirado y a la presión atmosférica según la igualdad: Presión traqueal = (Presión atmosférica - 47) * cantidad porcentual de oxígeno aspirado (21% de oxígeno). La constante 47 corresponde a la presión del vapor de agua a la temperatura del cuerpo humano (37° C).

Considerando la relación entre el volumen de CO₂ liberado y el oxígeno tomado igual a

1, a nivel alveolar, la presión de oxígeno varía de acuerdo con la del dióxido de carbono, es decir: Presión alveolar de oxígeno = Presión traqueal de oxígeno - Presión alveolar de CO₂.

La caída de la presión de oxígeno con la altura o un aumento en la concentración de CO₂ produce un aumento de la ventilación respiratoria.

Por ejemplo, al nivel del mar (presión de 760 mm de mercurio) la presión parcial de oxígeno traqueal es la siguiente:

Presión parcial de oxígeno traqueal (Ppt): $(760 - 47) * 0,21 = 149$ mm Hg.

Por su parte, la presión parcial de oxígeno alveolar corresponde, con una presión parcial alveolar de CO₂ de 40 mm de Hg, a:

$P_{pa} = 149$ mm Hg - 40 mm Hg (CO₂) = 109 mm Hg.

Del mismo modo se obtiene:

- A 10.000 pies:
 - Traqueal: 100 mm Hg.
 - Alveolar: O₂ = 61 mm Hg, CO₂ = 36 mm Hg.
- A 20.000 pies:
 - Traqueal: 63 mm Hg.
 - Alveolar: O₂ = 33 mm Hg, CO₂ = 30 mm Hg.

Para un ser humano, no aclimatado, las presiones alveolares de oxígeno inferiores, aproximadamente, a 50 mm Hg se consideran como cercanas a la hipoxia y a niveles inferiores a 30 mm Hg se incrementa la aproximación al estado de inconsciencia e incluso a la muerte.

Como se puede observar, el cuerpo humano es afectado por los cambios de presión que se producen en su entorno al afectar, estas variaciones de presión, a los gases que éste contiene, cuyo comportamiento se rige por las leyes de los gases citadas anteriormente.

Transferencia de gases

La transferencia de gases se efectúa en el cuerpo humano por diferencias de presión. Para facilitar la comprensión, es preciso recalcar que el mecanismo de transporte de O₂ por la sangre se efectúa de la siguiente forma:

- Directamente disuelto en la sangre, de acuerdo con la Ley de Henry (aproximadamente 0,3 %).
- Combinado con la hemoglobina (aproximadamente 21%).

Por su parte, el transporte de CO₂ por la sangre se efectúa de tres maneras:

- Directamente disuelto en la sangre, de acuerdo con la Ley de Henry.
- A través de ciertas proteínas de la sangre (carbamino hemoglobina).
- Por medio del anión carbonato de hidrógeno (bicarbonato) (70 % -90%).

Como ya se ha indicado anteriormente en el apartado correspondiente a la respiración, a nivel pulmonar, el aire que se aspira atraviesa la boca o la nariz, la laringe, la tráquea, los bronquios y saturado con vapor de agua llega a los alvéolos pulmonares, donde se mezcla con el aire alveolar.

El aire procedente del exterior proporciona oxígeno y recibe dióxido de carbono. Por su parte, el aire presente en los alvéolos recibe oxígeno y cede dióxido de carbono.

En condiciones normales, en la sangre arterial la presión parcial de O_2 es del orden de 95 mm Hg y la de CO_2 de 40 mm Hg, por su parte en los tejidos la presión de CO_2 asciende a 50 mm Hg y la del O_2 aproximadamente a 30 mm Hg. Básicamente se puede decir que, como la presión diferencial de O_2 a nivel arterial es superior a la de los tejidos se producirá una transferencia de este gas desde a la sangre a los tejidos; por similar motivo, el CO_2 de los tejidos se transferirá a la sangre arterial.

Si se somete el cuerpo a esfuerzo, los tejidos necesitan mayor cantidad de O_2 . Entonces, tanto la respiración como el músculo cardíaco aceleran su ritmo, disminuye la presión parcial de oxígeno en los tejidos y se produce una mayor transferencia de O_2 desde a la sangre a los tejidos. Del mismo modo, al aumentar con el ejercicio el CO_2 en los tejidos aumenta la diferencia de presión y se produce una mayor transferencia de CO_2 desde los tejidos a la sangre.

Hipoxia

La palabra hipoxia corresponde a la contracción de hipo - oxia, tiene el significado de nivel de oxígeno (oxia) inferior a lo normal (hipo). Este síndrome es el resultado de la necesidad de oxígeno que tienen las células o los tejidos para su funcionamiento. La escasez de este gas, a consecuencia de una disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire aspirado, inadecuado transporte de O_2 o incapacidad de los tejidos para utilizar oxígeno, produce una inadecuada oxigenación de estas células y consecuentemente un estado de hipoxia.



Desde el punto de vista del piloto, la hipoxia que interesa es la correspondiente a la disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire aspirado a causa de su disminución con la altura (hipoxia hipobárica). Existen muchas células en el cuerpo humano que pueden respirar aneoróticamente. No obstante, las células cerebrales no pueden hacerlo y necesitan un volumen prácticamente constante de oxígeno para desarrollar sus funciones.

La escasez de este elemento (hipoxia cerebral) puede producir, dependiendo del grado de carencia, alteraciones de la conducta, (euforia, agresividad, etc..) inconsciencia e incluso la muerte cuando las células cerebrales son desprovistas de oxígeno. Recuérdese, que la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos es función de la saturación de oxígeno arterial, de la tasa de distribución y de la capacidad de transporte de oxígeno.

Aunque pueden existir diferentes maneras en las que se puede producir la hipoxia, básicamente, se consideran las siguientes:

Hipoxia hipóxica

Este síndrome es el más normal en vuelo, se produce por una inadecuada oxigenación de la sangre arterial, a causa de una baja presión parcial de oxígeno en el aire aspirado.

Hipoxia anémica

Es producida por una reducción en la capacidad de la sangre para transportar una suficiente cantidad de oxígeno a causa de un descenso en la concentración de hemoglobina. La denominación de anémica puede ser debida, entre otros factores a la deficiencia de hierro, vitamina B12, excesiva pérdida de glóbulos rojos, etc.

No obstante, la intoxicación por monóxido de carbono, que al combinarse con la hemoglobina dificulta la capacidad de transporte de oxígeno, es una de las causas que puede producir este tipo de anemia. Motivo por el cual, en la aviación ligera, suele ser conveniente verificar el correcto funcionamiento de la calefacción de la cabina. Resumiendo, en este tipo de hipoxia al disponer la sangre de menor cantidad de hemoglobina, precisamente por la anemia, paralelamente, disminuye la capacidad de oxígeno a nivel sanguíneo, es decir reduce la cantidad de hemoglobina para formar oxihemoglobina.

Hipoxia isquémica, por estancamiento o inactividad

Es causada por insuficiencia en el sistema de circulación sanguínea, circulación, que al tener disminuido el flujo sanguíneo produce la disminución del suministro de oxígeno a nivel de los tejidos o tisular. Este tipo de hipoxia se puede presentar, por ejemplo, a causa de oclusiones en los vasos sanguíneos, de retención o encharcamiento venoso por maniobras con aceleraciones positivas, etc. Es la hipoxia típica de personas con problemas circulatorios o coronarios.

Hipoxia histo-tóxica o cito-tóxica

Es producida por el impedimento o incapacidad de las células (cito) o de los tejidos (histo) para utilizar el oxígeno. El alcohol, los narcóticos, algunos venenos como el cianuro, la falta de vitamina B, etc., son a menudo la causa de que los tejidos no sean capaces de metabolizar el oxígeno recibido.

Síntomas

Antes de proceder al estudio de la sintomatología de la hipoxia, se considera necesario, desde el punto de vista del piloto, enunciar los factores que tienen influencia en este síndrome.

Fundamentalmente:

- Altitud.
- Tasa de ascenso.
- Temperatura.
- Tiempo de mantenimiento de una determinada altitud.
- Actividad física.
- Maniobras con G,s positivos.
- Fallos en la aeronave: presurización, gases nocivos por malfuncionamiento, por ejemplo, del sistema de calefacción (CO), sistema de oxígeno, etc.
- Factores como: estado físico y emocional, aclimatación, etc.
- Los síntomas de la hipoxia se dividen en varias fases, generalmente referentes, a la altitud de vuelo o presión de altitud, saturación arterial de oxígeno y a la aspiración de aire atmosférico o de oxígeno.

Las fases son las siguientes:

a. Fase indiferente

En esta fase, desde 0 hasta 10.000 pies respirando aire atmosférico (aproximadamente 33.000 - 39.000 pies respirando 100% de oxígeno), llamada así porque no se observan síntomas a la suboxigenación, aunque puede ocurrir algún caso de disminución de la agudeza visual nocturna, incremento de la ventilación alveolar, aumento del pulso, concentración en el desarrollo del trabajo no habitual en cabina, etc.

b. Fase compensadora

En esta fase, desde 10.000 hasta 15.000 pies respirando aire atmosférico (aproximadamente 39.000 - 42.500 pies respirando 100% de oxígeno), la capacidad fisiológica puede suplir, en cierto modo, las disfunciones en la respiración y en el sistema circulatorio, siempre que la exposición no sea prolongada, no exista desgaste físico, estrés, etc. Puede producirse un aumento, en profundidad o en frecuencia, de la respiración, fatiga, irritabilidad, dolor de cabeza, incremento del pulso, disminución de la coordinación muscular, capacidad de discernimiento, etc.

c. Fase de perturbación

En esta fase, desde 15.000 hasta 20.000 pies respirando aire atmosférico (aproximadamente 42.500 - 45.000 pies respirando 100% de oxígeno), la capacidad fisiológica queda mermada e inadecuada para compensar la deficiencia de oxígeno. Pueden producirse síntomas subjetivos de fatiga, somnolencia, dolor de cabeza, mareo, euforia, necesidad de aire, etc.

Sus efectos más destacables son los siguientes:

- **Sentidos corporales:** La visión periférica y central disminuyen, se reducen la agudeza visual y la distancia de acomodación, temblor, sensibilidad al dolor, pérdida de oído, etc.
- **Rasgos de la personalidad:** Se produce una liberación de las inhibiciones y se puede entrar en fase de euforia, agresividad, malhumor, etc.
- **Proceso mental:** Existen dificultades para reconocer la propia incapacidad, son afectados la capacidad de juicio y de razonamiento, se producen pérdidas en la memoria reciente, la capacidad de respuesta se enlentece, etc.
- **Actividad psicomotriz:** Aparece la descoordinación muscular, tartamudeo, disminuye la capacidad de escribir, de realizar maniobras coordinadas de vuelo, etc. Pueden aparecer síntomas de hiperventilación y la pigmentación azul de la piel típica de la cianosis, debida a la reducción en la tasa de hemoglobina, puede significarse en labios y uñas.

d. Fase crítica

En esta fase, desde 20.000 hasta 23.000 pies respirando aire atmosférico (aproximadamente 45.000 - 46.000 pies respirando 100% de oxígeno), todos los síntomas anteriormente citados alcanzan su grado máximo y la incapacidad física y mental es patente. Fundamental en esta fase es la posibilidad de rápida pérdida de conocimiento. Posteriormente, en caso de seguir en condiciones de hipoxia, convulsiones, fallo del sistema respiratorio, estado de coma y la muerte.

Toda la sintomatología expuesta puede verse agravada y aparecer en niveles de vuelo inferiores, dependiendo del estado físico, la edad, la adicción al tabaquismo, estrés, etc.

Prevención

Según indica la FAA, todos los pilotos que vuelen al nivel de 12.500 pies por un tiempo superior a 30 minutos o a partir del nivel de 14.000 pies o superior deberían hacerlo con aporte suplementario de oxígeno. Recomienda, también, la utilización de oxígeno suplementario, por la noche, en altitudes superiores a 5.000 pies.

A continuación, se citan los tiempos aproximados, a distintas altitudes, durante los cuales un piloto, privado de oxígeno suplementario, puede ser capaz de volar o de tomar decisiones de manera adecuada, por ejemplo: reconocer un estado de emergencia o de falta de oxígeno, iniciar el descenso a altitudes inferiores, etc. Dependiendo de la fuente que se consulte, a esta tabla de tiempos y altitudes, se la denomina TUC (Time of Useful Consciousness) o EPT (Effective Performance Time). El tiempo útil de consciencia o de efectividad, TUC o EPT, establece el tiempo de que se dispone para actuar efectiva o conscientemente (no el tiempo de consciencia).

El estado físico del individuo, la actividad física, etc., son susceptibles de disminuir considerablemente los tiempos indicados de TUC o EPT. En el caso de descompresión rápida estos valores pueden quedar reducidos hasta un 50% a causa de la rapidez de la pérdida de presión pulmonar de oxígeno, al alcanzarse la presión de altitud atmosférica en un breve periodo de tiempo.

A una altitud de 15.000 -18.000 pies: 30 minutos.

A una altitud de 22.000 pies: 5 - 10 minutos.

A una altitud de 25.000 pies: 3 - 5 minutos.

A una altitud de 28.000 pies: 2,5 - 3 minutos.

A una altitud de 30.000 pies: 1 - 2 minutos. A una altitud de 35.000 pies: 0,5 - 1 minutos.

A una altitud de 40.000 pies: 15 - 20 segundos.

A una altitud de 45.000 pies: 9 - 15 segundos.

Como resumen, para la prevención de la hipoxia hipobárica:

- No se debería ascender por encima de los niveles recomendados para el vuelo sin oxígeno.
- Con anterioridad a que puedan aparecer los síntomas de la hipoxia y en función de la altitud de vuelo, sería esencial la inhalación continua de oxígeno al 100%.
- Se debería presurizar, en su caso, la cabina a niveles adecuados.
- Sería aconsejable, si se reconocen los síntomas de la hipoxia, descender de nivel.
- Según el caso, podría ser oportuno para el aprendizaje del reconocimiento de los síntomas de la hipoxia, realizar ensayos o pruebas controladas en un simulador de altitud.
- Presurización de la cabina

Uno de los métodos más efectivos para la prevención de problemas fisiológicos relacionados con la hipoxia, problemas en el oído medio o en los senos nasales, es la utilización de cabinas presurizadas en las que los ocupantes, normalmente, no se encontrarán expuestos a presiones inferiores a las correspondientes a 10.000 pies.

La presurización de la cabina se efectúa incrementando, en el interior de ésta, la presión sobre la presión exterior o ambiental. De esta manera, los ocupantes, pueden volar en el entorno correspondiente a altitudes de seguridad. El método convencional para la presurización de aeronaves consiste en la introducción del aire exterior, en el interior de la cabina, por medio de un compresor.

La intensidad de la presurización y la ventilación de la cabina se efectúa ajustando la cantidad de aire exterior introducido en la cabina y el que se deja escapar, a través de las válvulas de flujo correspondientes.

Los métodos de presurización son de dos tipos:

1. Presurización de control isobárico

La altitud de presión en el interior de la cabina se mantiene constante, con independencia de la presión que exista en el exterior. Evidentemente, la presión diferencial o «diferencia de presiones dentro - fuera» aumentará con la altura. Es el método comúnmente utilizado por la aviación civil.

2. Presurización de control diferencial

En este tipo de presurización, lo que se mantiene constante es la presión diferencial en lugar de la altitud de presión. Para ello, el sistema de presurización detecta las presiones exteriores (P_x) e interior (P_i) y mantiene siempre la misma diferencia de presión exterior - interior ($P_i - P_x = \text{Constante}$).

En efecto, para una determinada presión diferencial (Z), la aeronave se mantendrá despresurizada desde el suelo hasta que la presión diferencial interior - exterior comience a ser positiva ($P_i - P_x > 0$). Si se continúa ascendiendo, el sistema comenzará a presurizar y mantendrá la misma presión en cabina, es decir, la misma altitud de cabina hasta que se alcance la presión diferencial establecida ($P_i - P_x = Z$). Si se sigue el ascenso, para mantener la presión diferencial establecida (Z), la presión interior (P_i) debe continuar descendiendo, en consonancia con la presión exterior, para que Z pueda permanecer constante.

Como a partir de un determinado nivel la presión en cabina se encontrará por debajo de los límites hipóxicos, es evidente que la utilización de oxígeno llegará a ser necesaria. En este sistema, al ser fija la presión diferencial, disminuyen los peligros que representa una eventual despresurización rápida. Es el método comúnmente utilizado por la aviación de caza.

Las ventajas de la presurización de la cabina son evidentes, entre ellas, destacan:

- la menor probabilidad de problemas con la hipoxia
- la reducción de la necesidad de uso de oxígeno
- la disminución de la enfermedad descompresiva (formación de burbujas gaseosas producidas en los tejidos por el nitrógeno)
- la reducción de barotraumatismos (gases atrapados en cavidades del organismo) tales como otitis, dolor de muelas, etc.
- los niveles superiores de bienestar en la cabina, en cuanto a ventilación, temperatura, humedad, no utilización de máscaras de oxígeno, etc.

Las desventajas de los sistemas de presurización se cifran, básicamente, en el aumento de la fortaleza estructural de la cabina de la aeronave, mayor peso estructural y de sistemas de presurización, necesidad de aumentar la potencia, mayor necesidad de mantenimiento, posibilidad de contaminación del aire de la cabina por humos, monóxido de carbono, etc.

No obstante, la mayor desventaja corresponde a la posibilidad de una descompresión rápida, tal como se indica en el siguiente párrafo.

Efectos de la descompresión rápida

Recibe el nombre de descompresión rápida a la situación de peligro que se produce por pérdida súbita e importante de la estanqueidad de la cabina, generalmente a causa, por ejemplo, de rotura de parabrisas o ventanillas, perforación o apertura de puertas, rotura de la célula, pérdida de la cúpula, error humano, etc., que en breves instantes produce un explosivo movimiento del aire interior de la cabina, para igualar presiones, hacia el exterior. Chorro a presión de aire que es susceptible de arrastrar con él y extraer de la aeronave no ya objetos, sino incluso a los tripulantes o pasajeros. La tasa de pérdida de presión, por unidad de tiempo, es proporcional al tamaño de la abertura y a la presión relativa interior - exterior. Por su parte, los factores críticos que afectan directamente a la gravedad de la descompresión, se encuentran relacionados con la altitud de vuelo y con la presión diferencial.

Cuando se produce una descompresión de esta envergadura, el primer síntoma, producido por el contacto de las dos masas de aire, se escucha en forma de silbido, fuerte taponazo o explosión. Por el súbito decrecimiento de la presión y temperatura, el aire disminuye su capacidad de retención de vapor de agua. Este exceso de vapor de agua que se produce suele aparecer como neblina.

Los efectos fisiológicos de la descompresión rápida son los siguientes:

- Hipoxia

Es el efecto más importante. Aunque inmediatamente la tripulación no quede incapacitada, dependiendo de la altitud de vuelo, la brusca caída de la presión parcial de oxígeno induce a la hipoxia en función del cambio de dirección del flujo de oxígeno en los pulmones y la disminución de la actividad cardiaco-respiratoria.

- Pulmones

A causa de la descompresión rápida el tejido pulmonar puede verse afectado.

- Senos paranasales y oídos

La descompresión, en sí misma, no afecta a estos órganos. El descenso de emergencia subsiguiente a la descompresión suele ser el causante de dolor en estos órganos.

- Tracto gastrointestinal

Los gases existentes en el tracto gastrointestinal se expanden empujando el diafragma y pudiendo enlentecer los movimientos respiratorios. En casos severos, al producirse una importante bajada de tensión se puede llegar a perder el conocimiento.

- Enfermedad descompresiva

Se produce esta enfermedad a causa de la formación de burbujas de nitrógeno en los tejidos del cuerpo al disminuir la presión ambiental (Ley de Henry). Esta enfermedad, a menos que la exposición a la baja presión sea prolongada o la altitud de cabina no resulte superior, aproximadamente, a cerca de 30.000 pies no suele representar serios problemas.

- Hipotermia

La caída de la temperatura, a causa de la descompresión, a valores muy por debajo del cero es susceptible de producir hipotermia.

Tiempo de consciencia

El tiempo de consciencia después de una despresurización rápida se encuentra directamente relacionado con los problemas inherentes a la hipoxia. Recuérdese que el tiempo útil de consciencia o de efectividad (TUC o EPT) establece, no el tiempo de consciencia, sino el tiempo de que se dispone para actuar efectiva o conscientemente. En efecto, el tiempo útil de consciencia abarca el período que transcurre entre la brusca supresión de oxígeno y el momento en el que el deterioro mental o físico no impide el reconocimiento de la situación, la iniciación de las acciones oportunas (descenso de emergencia) o cualquier otra actuación necesaria para mantener la aeronave y sus ocupantes dentro de márgenes razonables de seguridad. El tiempo de consciencia se encuentra directamente relacionado con la actividad física realizada, la resistencia física del individuo, la altitud de vuelo, etc.

En altitudes críticas, una descompresión rápida puede ser de gravedad extrema ya que el tiempo disponible entre la descompresión y la pérdida de conocimiento suele ser de escasos segundos. En el caso de descompresión, la presión parcial de oxígeno en los pulmones desciende instantáneamente a la presión de la altitud de vuelo de la aeronave. No es el caso en el que, por ejemplo, ascendiendo sin aporte adicional de oxígeno los pulmones se «adaptan» al estado hipóxico, poco a poco.

Resumiendo, como el tiempo de reacción es muy escaso podría ocurrir que el cómputo total de tiempo, desde el sobresalto producido por la violencia de la despresurización, pasando por la determinación de la emergencia y por otras circunstancias, fuera superior al tiempo útil de consciencia, lo cual ocasionaría el desvanecimiento de los pilotos, quedando la aeronave sin gobierno. Por ejemplo, a una altitud de 25.000 pies el TUC es de 2- 3 minutos, a 40.000 pies el TUC es de sólo 15 - 30 segundos.

Uso de las máscaras de oxígeno y descenso rápido

Como se conoce, para poder volar sin problemas en determinadas altitudes es necesaria la utilización de oxígeno respirable, ya sea diluido o al 100%. El oxígeno se encuentra almacenado en la aeronave y dispuesto para ser utilizado, por medio de máscaras, por el personal de a bordo. Ahora bien, en las aeronaves presurizadas de transporte con objeto de prevenir la eventualidad de una descompresión rápida se deben encontrar en lugar accesible, al lado de los pilotos, máscaras de oxígeno de alta presión de colocación rápida que sean capaces de proporcionar 100% de oxígeno a una presión superior a la ambiental.

Hiperventilación

La hiperventilación se produce por el incremento anormal de la ventilación pulmonar a causa de la caída de la presión parcial de oxígeno alveolar, que origina una pérdida de la concentración pulmonar de CO₂ y una caída de la presión por debajo del valor normal (40 mmHg).



En otras palabras, en la hiperventilación aumenta el ritmo y la profundidad de la respiración, el equilibrio entre el CO₂ producido y el eliminado se deteriora, siendo superior el eliminado (hipocapnia). A nivel sanguíneo, la tasa de bicarbonato cae y el PH se incrementa produciendo alcalosis.

Aunque la principal causa de la hiperventilación es la hipoxia, no habría que descartar que a niveles inferiores a 10.000 pies las causas puedan ser debidas a:

- **Factores psicológicos**

Las alteraciones psicológicas pueden distorsionar el normal equilibrio respiratorio y predisponer a la hiperventilación. El estrés, la ansiedad, la tensión emocional, el miedo, etc., son las causas psicológicas más comunes.

- **Factores ambientales**

Además de la hipoxia, pueden ser causa de la hiperventilación las vibraciones, alta temperatura, G,s elevados, etc.

- **Factores farmacológicos**

La utilización de fármacos tales como los salicilatos, hormonas femeninas, etc., puede contribuir a la hiperventilación.

- **Factores patológicos**

Ciertas enfermedades tales como la hipoglucemia, anemia o la fiebre, pueden contribuir a la hiperventilación.

Síntomas

Los síntomas de la hiperventilación no son fácilmente identificables y frecuentemente pueden ser confundidos con los de la hipoxia hipóxica. No obstante, mientras que los síntomas de la hipoxia se suelen producir de manera rápida (dependiendo de la altura), con flaccidez muscular y cianosis; en la hiperventilación la aparición de los síntomas, debidos a la hipocapnia, suele ser gradual.

La elevación que se produce en el PH sanguíneo y la reducción de la presión parcial de CO₂, son las principales causas de la hiperventilación, que se manifiesta con diferente sintomatología. Los síntomas más destacados son los siguientes:

Sensación de hormigueo, adormecimiento de extremidades, mareo, vértigo, dolor de cabeza, palidez, disminución del control y coordinación muscular, espasmos musculares, rigidez, aumento de la frecuencia respiratoria, etc.

Evitación

Tal como se ha indicado, existe una gran similitud entre los síntomas de la hipoxia y de la hiperventilación, motivo por el cual resulta muy difícil su identificación.

Para que la hiperventilación pueda ser evitada, la terapia más lógica indica que habría que mantenerse por debajo de 10.000 pies. Si a pesar de ello aparecen signos y puesto que sería prácticamente descartable la hipoxia, sería conveniente que redujera el ritmo e intensidad de la respiración, la administración de oxígeno al 100%, volver a respirar el aire espirado en una bolsa de plástico (rico en CO₂). Sería oportuno descender de nivel e intentar eliminar las causas, en su caso, de estrés, ansiedad, temor, etc. Si no desaparecen los síntomas, el aterrizaje suele ser una sabia medida

Efecto de las aceleraciones

Recordemos que la aceleración lineal se define como la variación del vector velocidad con respecto al tiempo o la tasa de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. La expresión que liga estos tres parámetros es la siguiente:

$$a (V_f - V_i) / T_t$$

Donde «a» es la aceleración en metros por segundo cada segundo, V_f es la velocidad final, V_i la inicial y T_t el tiempo transcurrido en segundos.

La unidad de aceleración utilizada en aviación es el «G». El valor de «G» es el siguiente: $G = a/g$, donde «a» es la aceleración y «g» la aceleración de la gravedad de la Tierra que tiene como valor 9,81 m/s² o 32,2 pies/s². Por tanto, las aceleraciones a que se encuentra sometido en aeronáutica el cuerpo humano se expresan en múltiplos o fracciones de G,s.

Si durante el vuelo de una aeronave se varía además de la velocidad, la dirección, la aceleración correspondiente recibe el nombre de angular. Si la variación sólo afecta a la dirección, la aceleración correspondiente recibe el nombre de centrípeta.

Para conocer los efectos de la aceleración en el cuerpo humano, la aceleración como vector (magnitud y dirección) suele ser expresada por medio de tres ejes coordenados (ejes anatómicos). Los efectos fisiológicos de estas aceleraciones en el cuerpo humano se encuentran en relación con la duración, intensidad y dirección de las mismas, siempre que la duración de la aceleración se mantenga por un tiempo superior a 1 segundo, ya que los efectos del resto de las aceleraciones (inferiores a 1 segundo) son prácticamente de tipo mecánico. Básicamente, los efectos fisiológicos de las aceleraciones más representativas son los siguientes:

- **Aceleraciones positivas**

Las aceleraciones positivas (+Gz) o aceleraciones centrípetas son las más comunes en el mundo de la aviación y las que suelen tener mayores consecuencias. El impacto de los G,s positivos tiene diferentes efectos: cardiorrelajantes, visuales, respiratorios, neurológicos, etc. Los citados G,s producen una disminución de la presión sanguínea por encima del corazón y un aumento por debajo.

Por ejemplo, con la aplicación de 1 G, la presión sanguínea que llega al cerebro queda reducida aproximadamente en un 20 %. Con la aplicación de 5 G,s la reducción de la presión sanguínea ascendería, entonces, al 100%. Esto quiere decir que el cerebro se quedaría sin riego sanguíneo y por tanto se produciría una pérdida de conocimiento. Por motivos similares, a nivel ocular, el ojo llegaría a perder flujo sanguíneo y entraría primero en la visión gris o borrosa y posteriormente, con el cese del flujo sanguíneo, en la pérdida de visión o visión negra. La visión negra es el paso inmediato anterior a la pérdida de consciencia.

Con la aplicación de G,s positivos, no son infrecuentes las arritmias y las taquicardias, a nivel respiratorio pueden producirse aumento de la frecuencia respiratoria, hipoxemia, disminución de la capacidad pulmonar, colapso alveolar (atelectasia) cuando se respira oxígeno al 100%, etc.

Los G,s positivos provocan, asimismo, el aumento de peso corporal, la distorsión facial, dificultan el movimiento de los miembros, etc.

- **Aceleraciones negativas**

Las aceleraciones negativas (- G) provocan el efecto contrario que las positivas y son las peor toleradas por el cuerpo humano. En las aceleraciones negativas, la presión sanguínea aumenta por encima del corazón pudiendo producirse, en función del aumento de la presión arterial, bradicardia (pulso lento).

El incremento de la presión venosa puede ocasionar dolor de cabeza, edema facial, etc. Puede producirse también la visión roja debido a que el párpado inferior tiende a cubrir la pupila o a la rotura de algunos vasos que producen hemorragias conjuntivales. Asimismo, se pierde capacidad en el manejo de los controles y mandos de la aeronave.

El límite de tolerancia a esta aceleración, que habitualmente se produce durante maniobras tales como: vuelo invertido, barrenas, looping (rizo) exterior, imperiales, etc., se cifra en 3 G,s negativos durante 30 segundos.