

Conceptos básicos de la desorientación espacial en el vuelo

*Francisco Ríos Tejada**
*Juan José Cantón Romero**
*César Alonso Rodríguez**
*José B. del Valle Garrido**
*Carlos Velasco Díaz***
*Vicente Velamazán Perdomo***

RESUMEN

Los autores presentan un estudio general de la desorientación como motivo de incapacidad de los pilotos para apreciar correctamente su posición y movimiento relativo con respecto al centro de la tierra.

Después de analizar las pérdidas de vida humanas y de aeronaves, a pesar de los esfuerzos realizados desde un punto de vista preventivo, pasan a describir la anatomía y fisiología de los órganos y sistemas que intervienen en la orientación así como las causas principales que provocan la desorientación. Finalmente exponen las medidas de prevención.

SUMMARY

The authors present a general study of disorientation as a reason for the inability of pilots to correctly interpret their position and relative movement with respect to the centre of the earth.

After analyzing losses of human life and aircraft in spite of efforts made from the preventive point of view, they describe the anatomy and physiology of the organs and systems that intervene in orientation, and also the principal causes of disorientation. Finally, they explain preventive measures.

DEFINICION

Desorientación espacial es un fenómeno que ocurre como consecuencia de una incorrecta apreciación de la posición, movimiento u orientación con respecto a los tres planos del espacio. Como consecuencia puede llevar al piloto a una incapacidad para apreciar

correctamente su posición y movimiento relativo con respecto al centro de la tierra.

Durante el vuelo las señales que se reciben del medio externo lo son a través del entorno con que el sujeto objeto de aquellas sensaciones se relaciona, en nuestro caso la propia aeronave y entorno inmediato. Estas afecciones, se van a ver alteradas por las aceleraciones lineales y angulares a que ésta se ve sometida y a la ausencia de otras señales que por razones meteorológicas o de otro tipo no se reciben

a través del principal órgano de la orientación, que es el aparato visual.

INCIDENCIA

El hombre está adaptado a una vida terrestre en la que es sometido a una fuerza gravitoinercial de 1 G. Cuando este es expuesto a un medio diferente y no habitual como es el aéreo, donde los estímulos al movimiento difieren en magnitud, dirección y frecuencia de los experimentados en la superficie terres-

* Comandante de Sanidad (Medicina).

** Capitán de Sanidad (Medicina).

Centro de Instrucción y Medicina Aeroespacial (C.I.M.A.).

tre, son frecuentes errores en la percepción, y es por ello que la práctica totalidad de los pilotos hayan experimentado en alguna ocasión fenómenos de este tipo.

A pesar de los esfuerzos puestos, desde un punto de vista preventivo, el costo sigue siendo muy alto, tanto por el número de aeronaves perdidas (40 millones de dólares por año en 1979) como por vidas humanas (véase tabla 1) (1,2).

Durante el período comprendido entre 1950 y 1969, 14 accidentes habían sido descritos durante operaciones aéreas en portaaviones, todas ellas debidas a ilusiones somatográvicas y visuales (3).

En aviación comercial, la desorientación espacial es la tercera causa en importancia, causante de accidentes fatales, un 15,6% de los mismos durante los años 1970-75, estuvieron relacionados con fenómenos de este tipo como causa principal o factor coadyuvante del mismo (4).

En un 9% de los accidentes en los que se describen fenómenos de desorientación espacial hubo pérdidas humanas (5).

ORGANOS DE LA ORIENTACION

Son tres los sistemas que intervienen como órganos de recepción y elaboración de las señales y estímulos externos, que nos sitúan espacialmente en la posición correcta respecto al exterior. El órgano de la visión, aparato vestibular y sistemas propioceptivo, actúan como receptores visuales, vestibulares y somáticos que envían sus impulsos a los núcleos vestibulares. La respuesta a estos estímulos modifica el control oculomotor y espinal y en definitiva la posición del sujeto respecto a su entorno.

1. Organismo de la visión

El aparato visual es de crucial importancia como órgano de orientación en el espacio. Desde un punto de vista funcional, hemos de considerar al ojo humano formado por dos sistemas distintos cuando se procesa la información procedente del exterior. Una es la llamada visión focal, relacionada con los mecanismos identificación detallada de un objeto y dependiente de la visión foveal y parafoveal de la retina. Su análisis requiere una cierta elaboración mental y depende en parte de la calidad y definición de la imagen objeto.

La fovea central de la retina está formada fundamentalmente por conos

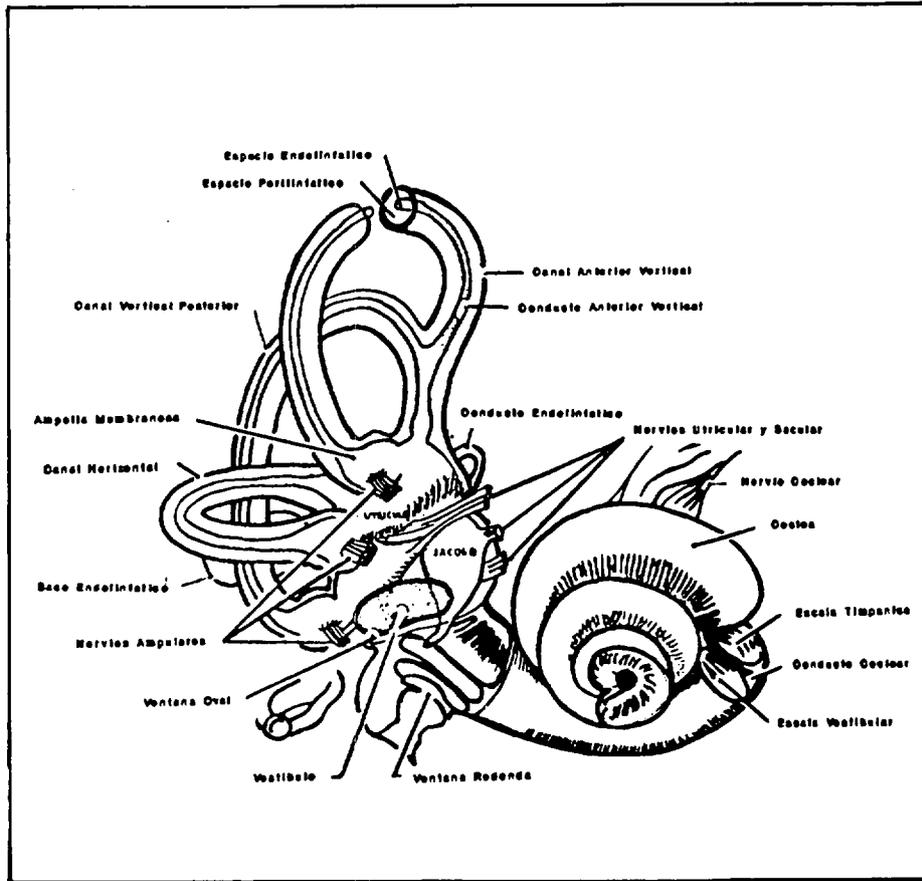


Figura 1.—Anatomía del oído interno.

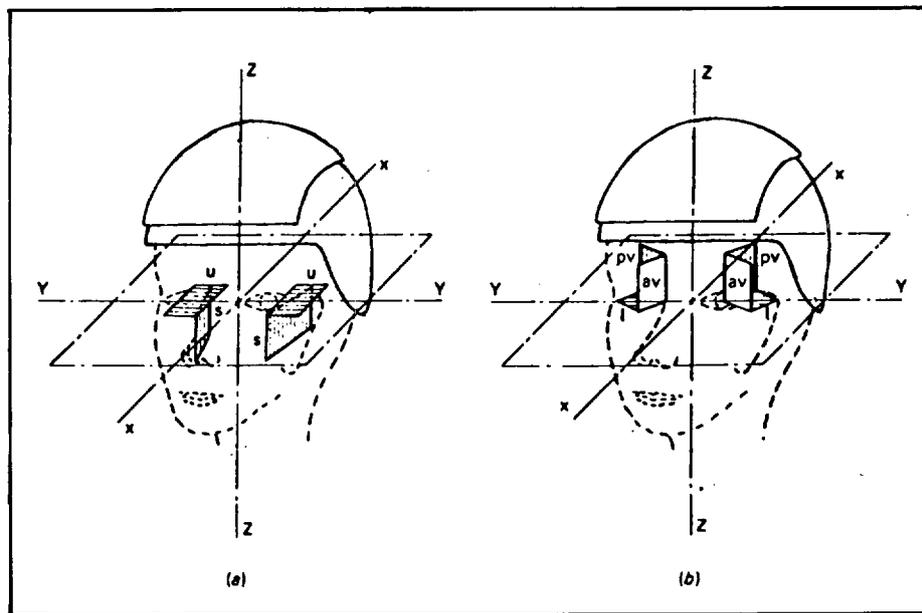


Figura 2.—Disposición espacial del órgano otolítico (a) y de los canales semicirculares (b) Modificado de Benson.

con una densidad de hasta 47.000 por mm², mide 1,5 mm. de diámetro y la agudeza visual en su centro es de hasta 20/10, cuando en la mácula puede llegar a ser de 20/50.

El otro sistema se refiere a la visión ambiental, el estímulo es recibido a través de las áreas más periféricas de la retina y no depende tanto de la calidad de la imagen. Es la estructura de

orientación del ojo y se relaciona con los otros dos sistemas fundamentales de orientación. El vuelo en condiciones visuales dependería en gran medida del proceso mediado por la visión periférica (6).

2. Sistema propioceptivo

Está constituido por una gran variedad de receptores sensoriales distri-

buidos en la dermis, articulaciones, haces musculares y ligamentos. Responden a una gran diversidad de estímulos como dolor, calor, presión y estiramiento. Todos ellos son elementos que a través de la vía de los lemniscos posteriores y tracto espinocervical procesan una información muy valiosa en relación a la situación relativa del sujeto respecto al medio inmediato que le rodea.

Los denominados mecanorreceptores son sensibles a cualquier deformación mecánica del propio receptor y de las células que lo rodean. Entre ellos tenemos terminaciones nerviosas libres a nivel dérmico y epidérmico, detectando sensaciones táctiles y de presión. Otros receptores táctiles son los corpúsculos de Meissner, éstos son terminaciones nerviosas encapsuladas abundantes en las yemas de los dedos y labios. Los discos de Meckel, de características similares a los corpúsculos de Meissner, envían una señal más continua, se encuentran a diferencia de los últimos también en el cuero cabelludo. Los órganos terminales de Rufini, son terminaciones múltiples e informan de cualquier deformación constante de la piel, también se encuentran en capsulas articulares e informan del grado de rotación articular. Los corpúsculos de Paccini son particularmente importantes en la detección de vibraciones de tejidos fundamentalmente entre los 60-500 ciclos/seg.

Los músculos y tendones tienen dos tipos de receptores, los husos musculares que detectan cambios en la longitud de las fibras musculares y los órganos tendinosos de Golgi, que lo hacen de la tensión aplicada a los tendones musculares durante la contracción o relajación muscular, tienen innervación sensitiva y motora.

Todos ellos son elementos que a través de la vía de los lemniscos posteriores y tracto espinocervical envía la información a la corteza cerebral (7).

3. Aparato vestibular

También llamado órgano del equilibrio del oído interno, está formado por dos áreas bien diferenciadas. Los canales semicirculares o receptores dinámicos que intervienen principalmente como respuesta a movimientos de rotación o aceleraciones angulares y los órganos otolíticos, utrículo y sáculo o receptores estáticos que son estimulados por la aceleración gravitoinercial y movimientos de traslación o aceleraciones lineales.

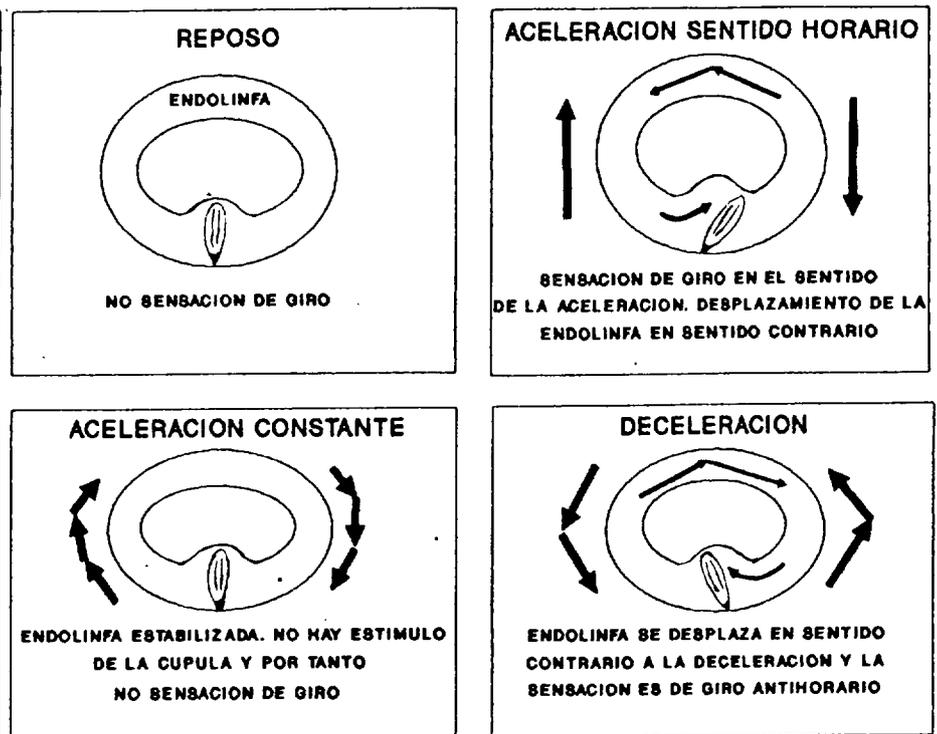


Figura 3.—Estímulo de cúpula ampular por desplazamiento de la endolinfa.

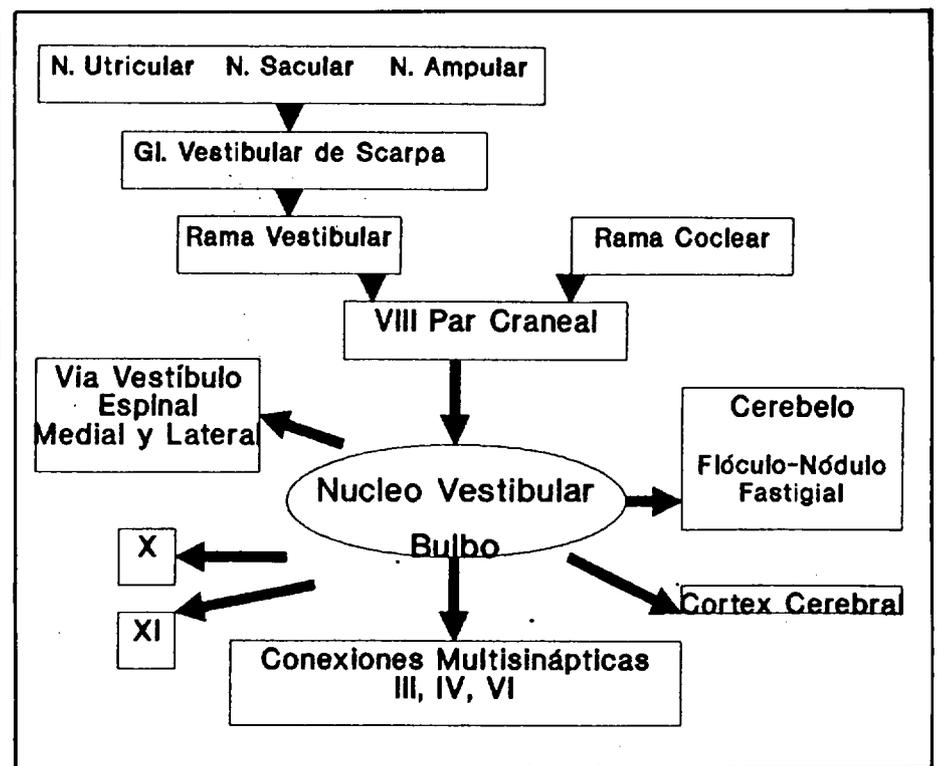


Figura 4.—Conexiones nerviosas del aparato vestibular.

3.1. Canales semicirculares

Consisten en tres conductos membranosos situados en el interior de un habitáculo parte del hueso temporal. Su interior está relleno por un líquido, similar al cefalorraquídeo y de una relativa alta concentración en potasio, la endolinfa. El espacio entre la parte membranosa y ósea está ocupado por

otro denominado perilinf (véase figura 1).

Cada canal termina en una zona más ancha o ampolla, donde a modo de protuberancia (cresta ampollar) se sitúan las células sensoriales u órgano receptor. Estas células epiteliales columnares especializadas disponen de unas proyecciones piliformes o células ciliadas, los denominados estereocilios

y cinocilios, todos cubiertos por una masa gelatinosa, la denominada cúpula.

La célula ciliada es la unidad funcional del sistema vestibular, es la que convierte la energía mecánica aplicada a la cabeza en información nerviosa. Cada célula dispone de unas 100 estereocilios y un sólo cinocilio, estas formaciones pilosas responden a un patrón de polarización determinado. La desviación de los estereocilios hacia el cinocilio, significa el estímulo para la despolarización de las células ciliadas, originándose el correspondiente potencial de acción. La desviación en sentido contrario significa la hiperpolarización de las mismas, disminuyendo la actividad nerviosa de las mismas.

La cúpula sobresale de la cresta hacia la pared opuesta de la ampolla y a modo de pared oscilante, puede deformarse por el movimiento de la endolinfa.

La estimulación de las células sensoriales viene determinada por el movimiento oscilante de las prolongaciones filiformes en el seno de la cúpula, y como consecuencia del desplazamiento de la misma y debido a la aceleración angular a que se ve sometida la propia endolinfa, en el plano del correspondiente canal.

Debido a la especial disposición de los canales en los tres planos del espacio, cualquier aceleración angular estimularía siempre alguno de ellos. Funcionan sincrónicamente por pares de forma que los horizontales responderían a aceleraciones angulares en el sentido de derrape. Los canales verticales responden a los movimientos de cabeceo y alabeo, en este caso la respuesta por pares incluye el anterior vertical de un lado y el posterior vertical del opuesto (véase figura 2).

Los receptores sensoriales son estimulados con el movimiento de la cabeza, pero sólo las que se sitúan en el canal correspondiente al plano de movimiento, en el resto la endolinfa tenderá a su estabilización debido a la fuerza de inercia.

Durante los movimientos habituales de la cabeza en los cuales aceleraciones angulares de corta duración son seguidas por deceleraciones, el movimiento de la cúpula en un sentido o en otro se asocia a una señal de las propias células sensoriales y que se corresponde con la velocidad angular de la cabeza.

Vemos como la aceleración angular determinada por cualquier movimiento de la cabeza, hace que una fuerza igual y de sentido contrario (inercia) desplace la endolinfa, y la cúpula ampollar sea desviada en ese sentido, lo que significa la estimulación de las células sensoria-

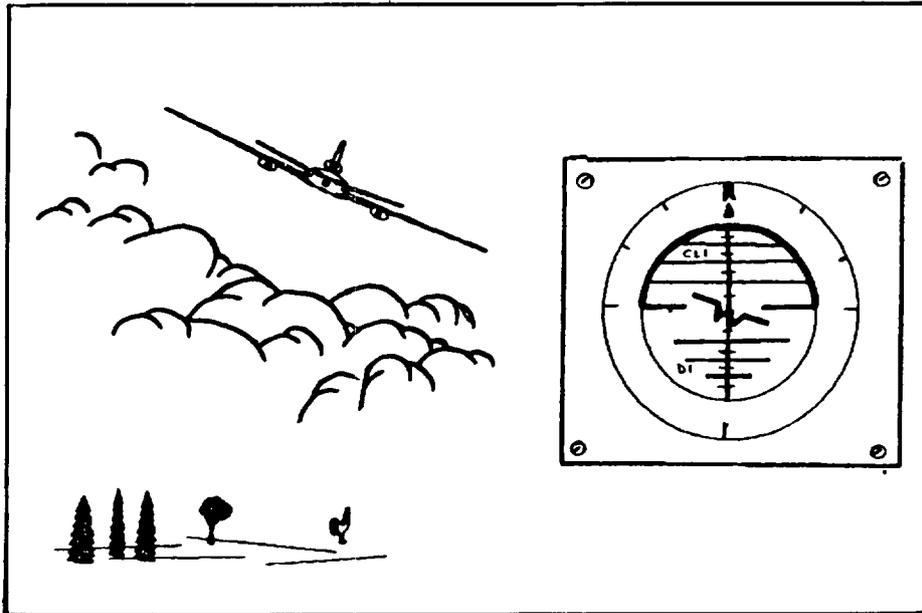


Figura 5. — Falso horizonte.

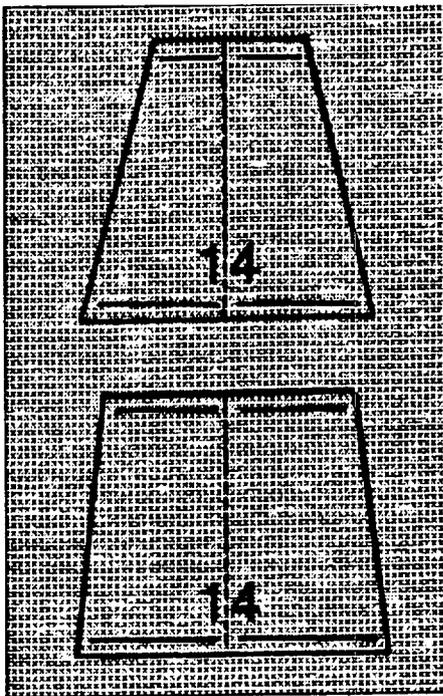


Figura 6. — Distinta anchura de pista con igual longitud. Ilusión de pista más corta.

les que transmiten dicha señal a la corteza. Frecuencias tan pequeñas como 10 Hz y aceleraciones de 0.05 grados/seg², son suficientes para desencadenar el estímulo. Durante las maniobras derivadas del vuelo, el problema surge cuando la velocidad de giro se hace constante, la cúpula deja de ser estimulada y la sensación es de ausencia de giro. Si por el contrario se produce una aceleración en sentido contrario, la fuerza de inercia originada nos indicará de forma errónea la presencia de giro en sentido contrario (véase figura

3). Podemos decir que convierten los impulsos rotativos o fuerza de torsión en información sobre el movimiento angular de la cabeza (8).

3.2. Órgano otolítico

Es el otro órgano especializado del aparato vestibular, pero éste, al contrario que los canales semicirculares, responden a aceleraciones de tipo lineal, traduciendo la exposición a una fuerza gravitoinercial, en información acerca de la posición de la cabeza (9).

Se encuentran localizados en dos estructuras saculares denominadas utrículo y sáculo, éstos localizados delante de los conductos semicirculares y comunicados entre sí por medio de los conductos endolinfáticos (véase figura 1). Se disponen perpendicularmente en el espacio, ocupando el plano horizontal y vertical, este último abierto unos 30 grados hacia la parte posterior de la cabeza (véase figura 2).

Las células sensoriales disponen igual que las correspondientes de los canales, de prolongaciones filiformes, que desplazadas desencadenan la activación de las células sensoriales. Estas se agrupan en una estructura aplanada, también rodeada por endolinfa y denominada mácula, pero a diferencia de las crestas ampollares de los canales, las máculas están cubiertas por una capa de apariencia gelatinosa que a su vez se cubre por otra más fina, constituida principalmente por pequeñas concreciones calcáreas denominadas otocónias u otolitos. Los otolitos representan una masa inercial que tiende a permanecer estacionaria mientras que la cabeza se mueve.

De forma distinta a como ocurre en la cúpula ampollar en la mácula del

utrículo los cinocilios están orientados hacia una línea de deflexión que se distribuye desde la parte más anterior de la mácula hacia la más posteromedial de la misma con un ángulo de casi 90° en su porción más lateral. En la mácula sacular los cinocilios están orientados hacia fuera desde la línea de deflexión que recorre la mácula desde la parte más superior y anterior hasta la más posterior e inferior.

El umbral de estimulación para éstos, necesariamente incluirá un ángulo y una magnitud, al ser dependientes de aceleraciones lineales y fuerzas gravitoinerciales. Valores de 0,01 g. para el plano —az— y de 0,006 g. para el —ax— y —ay— serían suficientes (8).

CONEXIONES NERVIOSAS

La neuroanatomía del sentido de la orientación es enormemente compleja, debido al número de sistemas, órganos y aparatos que se ven implicados, a partir de un sistema principal que es el aparato vestibular (véase figura 4).

El nervio utricular, dos nervios saculares y los tres nervios ampulares convergen para formar el nervio vestibular o rama vestibular del VIII par craneal. En el ganglio vestibular o de Scarpa se sinapsan con dendritas de neuronas bipolares que van a conectarse directamente en el núcleo vestibular del bulbo en sus cuatro porciones superior, inferior, media y lateral.

Desde el núcleo vestibular existen proyecciones a los núcleos motores del cerebelo (núcleo fastigial) y al flóculo-nódulo del vermis así como a la corteza cerebral.

Además existen conexiones multisinápticas, provenientes de los pares craneales III, IV y VI.

El reflejo postural se mantiene por las dos vías vestibulo espinales medial y lateral.

Reflejos provenientes de las conexiones del núcleo vestibular con el nervio accesorio espinal (par XI) permite el mantenimiento y estabilización de la cabeza.

Las conexiones con el X par, mediante fibras vegetativas, van a ser las responsables de los reflejos vestibulovegetativos como palidez, náusea y vómito (1,8).

REFLEJO VESTIBULAR

La función principal del aparato vestibular es el mantenimiento del equilibrio, algo que se consigue de forma completamente involuntaria (10).

Hemos visto cómo las conexiones

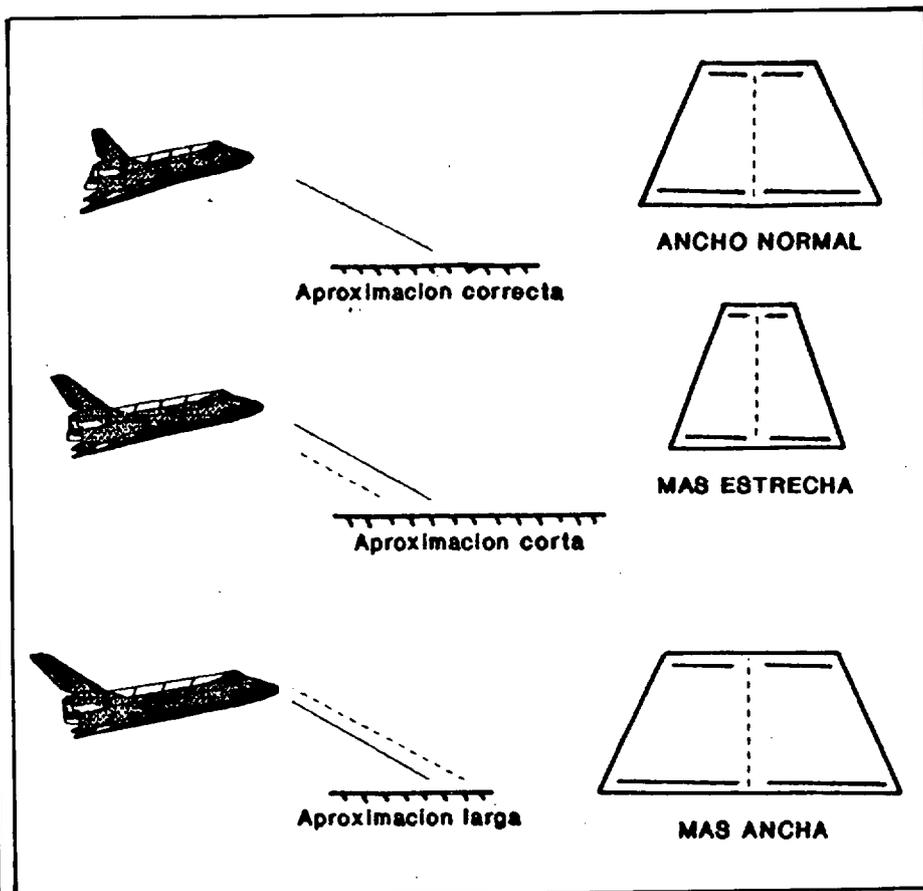


Figura 7.—Aproximación corta para una pista más estrecha de lo habitual y larga en el caso contrario.

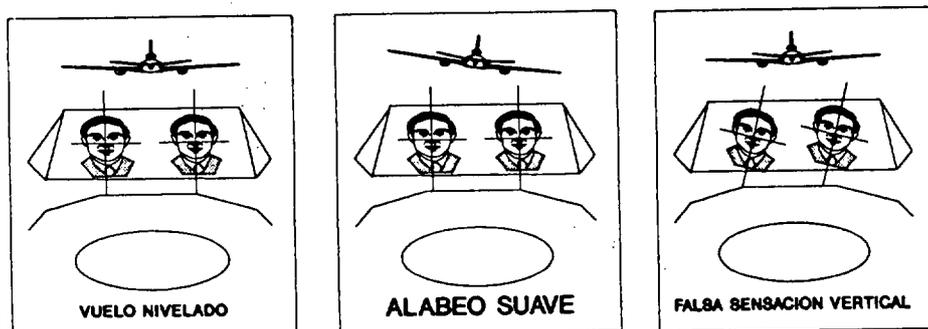


Figura 8.—Ladcos o "leans".

nerfiosas incluyen un gran número de órganos, desde el globo ocular hasta el sistema esquelético. Podemos considerar al sistema del equilibrio como distribuido anatómicamente en tres niveles. 1) Nivel craneo-ocular, dirigido fundamentalmente por la musculatura motora ocular, en relación con los reflejos vestibulo oculares que van a permitir la integración del sistema visual y vestibular. 2) Nivel craneo-esquelético, dirigido por la musculatura cervical. 3) Nivel musculoesquelético, dirigido por los mecanismos neuromusculares que controlan la postura del organismo respecto al exterior.

La función del reflejo vestibular es la de mantener la posición del ojo en

relación a un objeto cuando la cabeza se está moviendo. Al mover ésta en una dirección determinada el ojo de una forma refleja se mueve en la dirección opuesta. Además durante los movimientos normales de la cabeza, los canales semicirculares automáticamente convierten la velocidad angular en el correspondiente movimiento ocular.

Esto ocurre a aceleraciones angulares habituales a nivel de la superficie terrestre, para aceleraciones superiores sostenidas, la fase compensatoria y anticompensatoria del reflejo veticulo-ocular se repite y como resultado se produce un nistagmo ocular. Un fenómeno similar puede ocurrir con la estimulación del órgano otolítico. Las

aceleraciones lineales y laterales originan movimientos oculares reflejos por estímulo utricular y las aceleraciones lineales verticales originan movimientos verticales oculares por estimulación sacular.

El reflejo vesticulo espinal asegura la estabilidad del cuerpo, provocando la contracción de grupos musculares para evitar o minimizar los efectos de cualquier inestabilidad corporal.

ETIOLOGIA

Podemos dividir las causas de desorientación espacial en dos grandes apartados (1, 8, 10, 11).

1. Errores de percepción

Cuando existe una errónea información transmitida al cerebro.

1.1. Insuficientes señales externas

Se presenta cuando fenómenos meteorológicos o vuelo nocturno hacen que las aferencias visuales externas estén disminuidas o degradadas.

También puede darse en circunstancias de buena visibilidad pero cuando las características del terreno carecen de rasgos distintivos como arena, nieve o sobre el mar o aguas en calma.

Se pueden distinguir dos tipos de estímulos visuales, estáticos o dinámicos, ejemplo del primero sería un banco de nubes en disposición oblicua en relación al horizonte real de la tierra y que el piloto lo toma como horizonte verdadero. Estímulos visuales dinámicos estarían en relación con fenómenos meteorológicos o en el caso del vuelo en helicóptero, los estímulos que suponen la rotación de las palas produciendo una sombra discontinua o el vuelo en medio de nieve o lluvia que puede originar ilusiones de falso movimiento, ascenso o descenso, a pesar de que la aeronave permanezca en estacionario.

1.2. Fallo de los instrumentos

Condición que puede conducir a daños irreparables si las condiciones de vuelo visual no son las adecuadas o cuando no existe por fallo mecánico, aviso del mal funcionamiento de determinado instrumento de vuelo.

1.3. Alteraciones de la visión

Son debidas principalmente a la capacidad para mantener la imagen en la retina, debido a las vibraciones del aparato o a la aparición de nistagmus. La exposición del piloto a aceleraciones

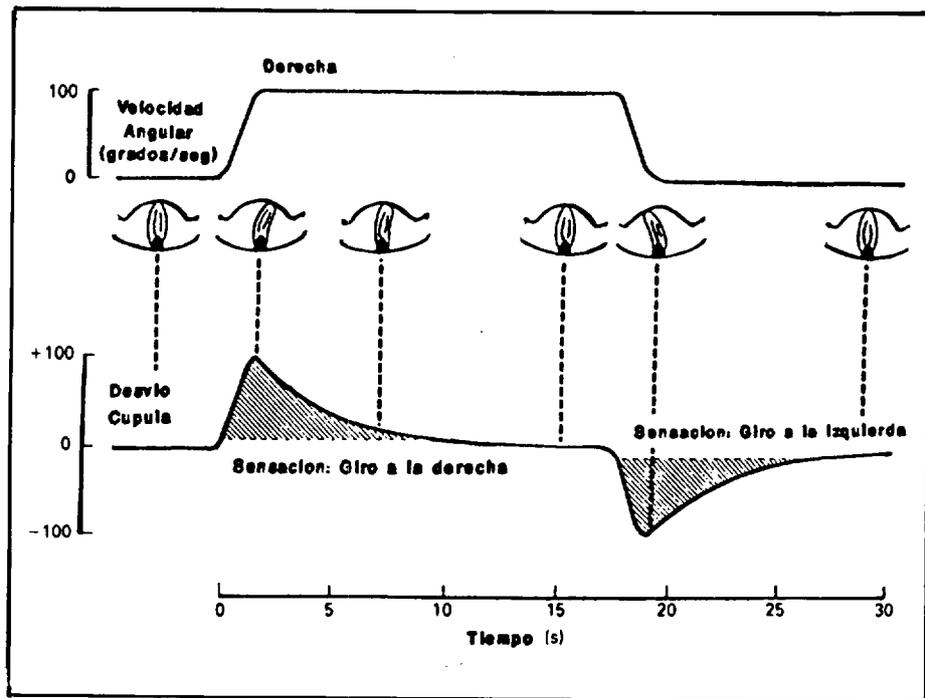


Figura 9.—Respuesta de los canales semicirculares al giro prolongado. Modificado de Benson.

+Gz también puede incluirse en este apartado.

1.4. Errores de causa vestibular

En el caso de los canales semicirculares va a estar determinado por la respuesta de los mismos a aceleraciones angulares por encima del umbral de estimulación, aproximadamente 0,05 grados/seg². Cuando la aceleración es sostenida la mácula generalmente deja de ser estimulada por encima de 10 segundos.

2. Errores de causa central

Son secundarios a la natural limitación del proceso analítico de la orientación, cuando ésta se realiza bajo una sobrecarga física y/o mental, durante operaciones aéreas.

2.1. Atención focalizada

Proceso frecuente que se asocia a estados de ansiedad, sobrecarga de trabajo y realización de múltiples tareas durante el vuelo. Todo ello conduce a una disminución de la atención que puede afectar a tareas críticas para el vuelo, ello agravado si las condiciones de orientación visuales son mínimas o no existen.

2.2. Errores por acostumbramiento

Debidos a la innata familiarización del piloto con diversos fenómenos tales como altura de los árboles en determinado campo, disposición de un lado más brillante en un banco de nubes por la reflexión del sol o presencia de estrellas durante una noche cerrada.

La malinterpretación por asociación de estos fenómenos, sin ayuda de los instrumentos, puede dar lugar a confusión de la altura o nivel de vuelo en una aproximación. Ejemplos típicos serían, volar la noche buscando una referencia "lógica" del sol o confundir las luces de estrellas con las de posición de barcos de pesca.

ILUSIONES VISUALES

Podemos distinguir tanto en la aviación militar como en la aviación comercial o deportiva dos tipos de vuelo, en condiciones visuales o en condiciones instrumentales. Es evidente que para poder atender las indicaciones instrumentales de la aeronave es indispensable el aparato visual, es por ello que fisiológicamente hablando tanto en uno como en otro existe un "vuelo visual".

Las aferencias visuales externas no siempre van a ser exactas para una correcta valoración de la posición en la que el piloto se encuentra con respecto al espacio exterior. Fenómenos meteorológicos, características del terreno, falta de señalización o atención a una perspectiva aérea son algunas de las situaciones que sin una adecuada confirmación instrumental pueden ser malinterpretadas y conducir a situaciones de serio conflicto sensorial y peligro en el manejo y control de la aeronave.

Entre los principales tipos de ilusiones visuales señalamos los siguientes (1, 9, 12, 13, 14):

1. Movimiento relativo de una aeronave con respecto a otra, donde un terreno uniforme y sin características especiales hace que si el piloto focaliza

su atención en la referencia visual más próxima, tenga una falsa sensación de movimiento. Ocorre durante vuelos en formación o en aeronaves de ala rotatoria durante estacionarios sobre terrenos en los que se produce un movimiento sincrónico y uniforme por el impacto del aire desplazado por el rotor de la aeronave. Sería el caso de vuelo estacionario sobre agua o campos de trigo o hierba. Asimismo la falta de características específicas del terreno (arena, nieve, agua) puede originar una falta de percepción de profundidad.

2. Falsa interpretación de señales externas, principalmente localizadas en el campo del horizonte de la aeronave. Es el caso de un banco de nubes inclinado que puede ser asumido como horizontal, ya que la imagen habitual aprendida es el de nubes de configuración o techo horizontal (véase figura 5).

3. Las imágenes de objetos pueden verse deformados por la refracción producida al interponerse una estructura esférica como el cristal de un helicóptero o fenómenos meteorológicos (agua, nieve), son las ilusiones denominadas estructurales.

4. La rotación de las palas de helicóptero puede reflejar a una determinada frecuencia las luces anticolisión de éste o simplemente la luz solar que incide sobre ellas. Esto puede originar un cuadro que cursa con náuseas y vómitos cuando la frecuencia de estimulación oscila entre los 4 y 20 ciclos. Es el denominado "Flicker vértigo".

5. Durante las maniobras de aproximación y aterrizaje es de vital importancia tener una idea exacta de la altura y distancias a recorrer, ello puede erróneamente ser interpretado dependiendo de la anchura y longitud de la pista así como de las características del terreno alrededor de la misma. El intento de realizar un correcto aterrizaje si la altura y distancia se sobreestiman puede conducir a un aterrizaje corto o largo y en esta fase del vuelo las posibilidades de recuperación de la aeronave siempre son limitadas.

La figura 6 muestra cómo la distinta anchura de la pista puede crear la ilusión de que la segunda es más corta.

La figura 7 muestra distintas morfologías y configuración de pistas que pueden ocasionar errores de perspectiva aérea.

6. Entre las ilusiones puramente visuales hay que destacar el denominado efecto autocinético, es decir, el aparente movimiento de un punto aislado luminoso en la oscuridad. Esta en relación con el número, tamaño e intensidad de las luces, y es por ello que la señalización de aeronaves o torres se realiza con puntos de luz de encendido

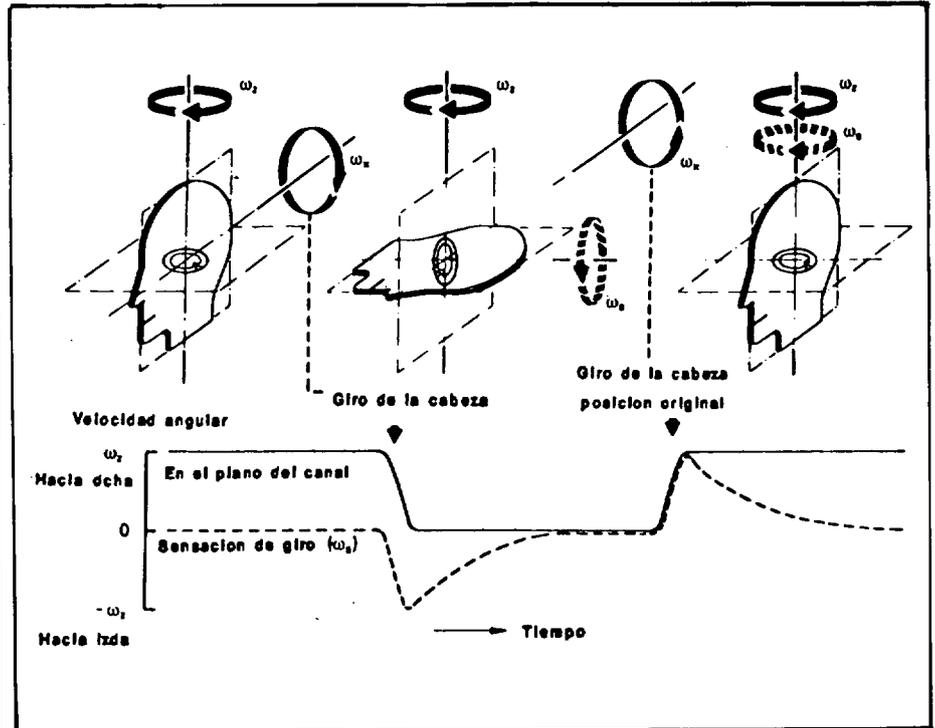


Figura 10.—Efecto Coriolis. Modificado de Benson.

intermitente, varias y preferentemente de destello.

Durante el vuelo nocturno pueden originarse ilusiones visuales por confusión de referencias, debido a la especial disposición de las mismas (carreteras, líneas de ferrocarril, etc.) o a su similitud con referencias visuales normales durante la noche (cielo estrellado y señalización de barcos en área cercana a la costa); ello puede conducir a errores de percepción de consecuencias desastrosas sino se realiza la debida comprobación instrumental. Situación parecida es la que se produce si el piloto confía en una aproximación visual a un aeropuerto cercano al mar y donde las luces de la ciudad cercana son el punto de referencia; es lo que se denomina efecto "agujero negro".

ILUSIONES VESTIBULARES

Dependiendo del tipo de estímulo y la aceleración que este genere, lineal o angular, será un receptor específico, otolitos del utrículo y sáculo o canales semicirculares los que responderán respectivamente.

Así podemos distinguir dos tipos fundamentales de ilusiones vestibulares (1, 9, 14, 16, 17, 18):

1. Ilusiones dependientes de los canales semicirculares o ilusiones somatogiras

Los denominados "ladeos o leans" son las ilusiones vestibulares más frecuentes y se producen como conse-

cuencia del movimiento del avión por debajo del umbral de estimulación de los canales semicirculares. Por debajo de 2,5 grados/segundo, éstos no son estimulados y por tanto cualquier maniobra o giro realizado por el avión "subumbral" no son recogidos por los receptores maculares de las crestas ampulares. El ejemplo más común es el del avión que de forma paulatina y por debajo del umbral de estimulación inicia un alabeo derecho o izquierdo. Una vez el piloto se da cuenta de su posición por el horizonte de la aeronave, generalmente corrige mediante una maniobra súbita, es entonces cuando los canales semicirculares son estimulados de forma que aunque el piloto está volando en perfecta línea de vuelo y se da cuenta de ello por los instrumentos, la sensación que tiene es la de estar inclinado hacia el lado contrario de la corrección, como se observa en la figura 8.

Además los canales semicirculares pueden ser origen de una información totalmente errónea cuando existe una estimulación a velocidad constante debido, por ejemplo, a una barrera prolongada. El sistema canal-endolinfa alcanza su punto de equilibrio y las crestas ampulares dejan de ser estimuladas. Si el piloto al comprobar los instrumentos inicia la recuperación del avión, será entonces cuando estimulará el sistema canal-endolinfa y la sensación será interpretada como de reentrada en una barrera de dirección opuesta aunque en realidad no está en barrera y los instrumentos así lo acreditan. Si éste no confía en ellos y sigue las erróneas indicaciones de sus senti-

dos, intentando recuperarla de nuevo, caerá sin duda en la situación original.

Un fenómeno parecido ocurre cuando el sistema canal-endolinfa se equilibra una vez establecida una velocidad angular constante como consecuencia de la realización de un amplio giro, el sistema canal-endolinfa se estabiliza y cuando se intenta corregir la sensación de giro es en sentido contrario.

La figura 9 muestra cómo durante un giro prolongado a velocidad constante los receptores de los canales semicirculares sólo dan una información correcta durante los primeros segundos de la maniobra, no más de 10-20, factores como la velocidad de rotación, eje de rotación, características de los otros receptores implicados y grado de habituación al estímulo del piloto van a influir en el posible umbral de estimulación. Un giro típico a una velocidad de 120-150 grados/seg. en 2-3 segundos como media, en 15-30 segundos el piloto sería incapaz de identificar cualquier estímulo de origen puramente vestibular, algo que se demuestra en los entrenadores de desorientación espacial. Además, la velocidad en que la cúpula vuelve a su posición de reposo después de un estímulo a aceleración angular constante y pura como picado o tonel es mayor en los canales verticales que el procedente de la estimulación de los horizontales, de ahí que las ilusiones somatogiras son más intensas puntualmente cuando afectan a los canales verticales, sin embargo el estímulo de los horizontales (derrape) es más prolongado.

La ilusión de efectos más dramáticos es el denominado efecto Coriolis, debido a la estimulación cruzada de dos canales semicirculares en planos diferentes, ello tiene como consecuencia la ilusión de giro en el plano ortogonal correspondiente (véase figura 10).

El efecto principal del movimiento de la cabeza sobre un eje determinado durante la rotación, sobre otro eje ortogonal a éste, es la producción de una ilusión, consistente en la rotación sobre el tercer eje ortogonal a los anteriores. Ello es atribuible al cambio de orientación de los canales con respecto al eje donde se mantiene una rotación constante. Por tanto la cúpula del canal sometido a dicho estímulo ha tenido tiempo de situarse en su posición de reposo. Si el giro o movimiento de la cabeza se realiza durante el proceso de deceleración la sensación ilusoria es si cabe más intensa.

Las ilusiones de tipo somatogiro se acompañan del correspondiente reflejo vestibulo-ocular que origina un nistagmus postrotacional con el consiguiente

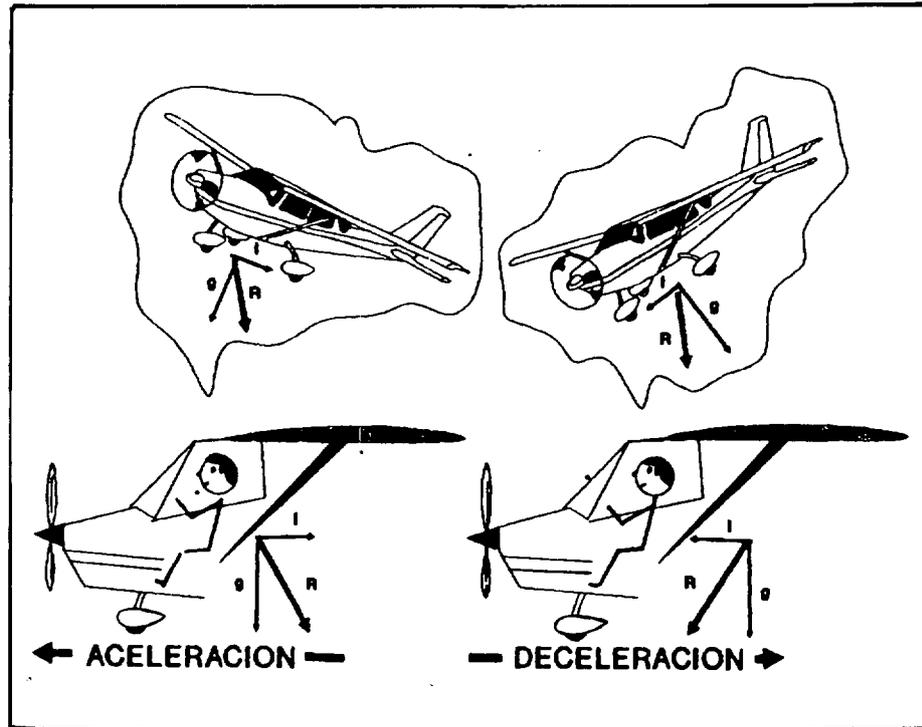


Figura 11.—Ilusión somatográfica.

deterioro visual, son las denominadas "ilusiones oculogiras".

Es frecuente la aparición de ilusiones oculogiras en conjunción con el efecto Coriolis. Consiste en la sensación de desplazamiento de una imagen luminosa en el mismo sentido que la sensación de giro del sujeto, lo cual puede ser origen de erróneas percepciones de movimiento angular, que si ocurren en fases críticas del vuelo pueden tener graves consecuencias.

Después de un giro prolongado y cuando éste finalizada, los movimientos oculares originan un cierto movimiento del campo visual de forma cíclica y movimientos en la misma dirección que el giro aparecen durante la fase lenta del nistagmus, después de unos segundos, el nistagmus va desapareciendo y es más fácil fijar la imagen en un objeto, no obstante, la ilusión va a estar relacionada con el número y características de las referencias visuales que existan en su campo visual. Ilusiones de tipo oculogiro y somatogiras no tienen por qué seguir una evolución paralela en el tiempo, el piloto puede haber fijado la imagen y continuar con la sensación de giro.

2. Ilusiones dependientes del órgano otolítico o ilusiones somatográficas

Se pueden definir como aquellas ilusiones en las que existe una percepción errónea de la posición del sujeto cuando se somete a una fuerza que define en magnitud y dirección a la

gravitoinercial presente en la superficie terrestre.

Los receptores del órgano otolítico del utrículo y sáculo responden a los estímulos procedentes de la fuerza de la gravedad y a la fuerza correspondiente a aceleraciones de tipo lineal. La disposición de éstos en el plano vertical (sáculo) y horizontal (utrículo), permite la estimulación y respuesta a aceleraciones lineales en prácticamente cualquier dirección.

Errores de percepción en relación a la posición son frecuentes cuando el sujeto filogenéticamente adaptado a la fuerza de gravedad, es decir, a un ambiente de 1G, es sometido a una aceleración lineal, no puntual. Entonces la percepción "vertical" no vendrá impuesta por la fuerza de gravedad sino por la resultante de la fuerza de aceleración y la de gravedad propiamente dicha, esta resultante se convierte en la nueva referencia que el piloto tiene de "vertical" o fuerza que atrae al mismo hacia el teórico centro de la tierra.

Ejemplos prácticos de ello serían la incapacidad del piloto para distinguir su correcta posición con respecto al ángulo de alabeo durante un giro a aceleración constante. La información suministrada por los canales semicirculares finaliza en el tiempo, una vez las máculas han dejado de ser estimuladas, entonces la fuerza de gravedad y fuerza de inercia (igual a aceleración, pero de sentido contrario), son los estímulos principales que van a actuar sobre el sistema de orientación, esta vez sobre el órgano otolítico y el grado de alabeo estará condicionado por la resultante de ambas fuerzas, conse-

cuencia de la fuerza centrífuga a la que se somete.

Una situación similar se plantea durante la aceleración o deceleración de una aeronave, principalmente durante las maniobras de despegue y aterrizaje. La fuerza de inercia igual y de sentido contrario a la de aceleración o deceleración, junto con la fuerza de gravedad tiene como resultado una fuerza que tomada como la de gravedad simula el cabeceo hacia arriba de la aeronave en caso de aceleración o hacia abajo en caso de deceleración, como se observa en la figura 11.

Otro tipo de ilusión somatográvica es la denominada "Inversión gravitoinercial", ésta ocurre durante el ascenso de una aeronave en forma de parábola, nivelando a la altura deseada de una manera brusca. Como consecuencia de ello el piloto se somete a una fuerza $-G_z$, hasta el momento de nivelar, en que se añade otra $+G_x$, además de la fuerza gravitoinercial normal $+1G$, ello tiene como consecuencia la de crear una resultante gravitoinercial que se dirige hacia atrás y arriba con respecto a la posición del piloto, ello estimula los otolitos que identifican dicha resultante como la consecución de un vuelo invertido. Si el piloto responde llevando la palanca hacia delante acentuará la situación previa, dicha sensación puede verse acentuada si existen turbulencias durante el vuelo y ejecución de dicha maniobra.

Se ha descrito un tipo de ilusión que se relaciona cuantitativamente con el número de G 's a que el piloto se ve sometido, es la denominada "ilusión por exceso de fuerza gravitoinercial". Si el piloto en posición sentado es sometido a una aceleración de $+1G_z$, pero si inclina la cabeza hacia delante 30° , el desplazamiento de los otolitos corresponderá a una aceleración de $0,5 G$. Si la aceleración es de $2 G$, el desplazamiento de los otolitos a 30° es

de $1G$, es decir, la misma sensación que si hubiera estado inclinado 90° hacia delante con una aceleración de $1G$, es decir, $2 \text{ sen } 30^\circ = \text{sen } 90^\circ$, lo que puede generar falsas ilusiones de cabeceo o alabeo que no siempre deben ser atribuidas al efecto Coriolis.

El término ilusión oculográvica se refiere al aparente movimiento y errónea localización de un punto determinado y que es debido a la fuerza gravitoinercial resultante de las ilusiones somatográvicas. Podríamos decir que es el componente visual de la misma, en el caso de aceleración habría un aparente desplazamiento del objeto hacia arriba, al contrario ocurriría en caso de deceleración, estos cambios en la dirección y magnitud del vector resultante pueden tener su compensación con la aparición de nistagmus. El efecto es particularmente peligroso cuando no existen o son mínimas las aferencias visuales debido a mal tiempo o vuelo nocturno.

VERTIGO ALTERNOBARICO

Se trata de la intensa sensación vertiginosa que aparece tanto durante el ascenso como descenso, sobre todo a cotas bajas, donde los cambios de presión son mayores. Es de aparición súbita y relacionado directamente con los cambios de presión que se producen en el oído medio. El vértigo es intenso acompañado de visión borrosa y movimiento del campo visual. La incidencia oscila entre el 10 y 17%. Parece estar directamente relacionado con alteraciones agudas o crónicas que interfieren con la correcta apertura de la trompa de Eustaquio o presiones por encima de $4,31 \text{ kPa}$ para abrirla.

El mecanismo fisiopatológico de producción no está totalmente aclarado pero parece estar relacionado con la estimulación de los receptores ampulares. La sobrepresión en el oído medio puede no ser transmitido de igual forma a la endo y perilinfa y desplazar la cúpula en uno o más canales del oído afecto.

PREVENCION

Muchos van a ser los factores que deben considerarse dentro de este apartado, pueden clasificarse en (1, 9, 14, 19):

1. Factores dependientes de la aeronave

1.1. Instrumentación

Sobre todo durante el vuelo en condiciones no visuales, éstos deben ser claros y fiables, la utilización del "Head Up Display" (HUD) ha sido de enorme ayuda como elemento de transferencia de información desde el medio externo a la cabina y viceversa. La incorporación de sistemas como el horizonte artificial mediante rayo láser tipo Malcom, permite utilizar la visión periférica, y se ha demostrado de gran ayuda para conseguir una mejor orientación en todo momento. Es indispensable confiar en los instrumentos de la aeronave.

1.2. Aspectos ergonómicos

La disposición de la cabina, instrumentos, mandos, cúpula, etc., son de crucial importancia. Hemos visto cómo movimientos de la cabeza pueden ser origen de ilusiones y sensaciones vertiginosas tremendas, el propio equipo personal o los elementos de control que se van a incorporar a las nuevas aeronaves, pueden ser un serio obstáculo al campo visual necesario para tener una buena visión periférica. La posición de la cabina, muy adelantada o muy elevada, que impide ver el morro del avión o los planos del mismo, dificultando materializar una valiosa información para un correcto y seguro vuelo visual.

2. Factores operacionales

Fundamentalmente relacionados con la experiencia del piloto en vuelo instrumental o visual, los primeros estarán más predispuestos a sufrir fenómenos de desorientación si no están habituados a hacerlo con instrumentos. Es evidente que sólo se puede volar aque-



a) Vertifugo.



Figura 12.

b) Gyrolab.

llas misiones en las condiciones y con las maniobras para las que el piloto esté debidamente preparado.

3. Factores Humanos

3.1. Selección

Existen diferencias individuales respecto a una mayor o menor susceptibilidad a estímulos rotacionales o sujetos que presentan alteraciones vestibulares específicas.

3.2. Aptitud psicofísica

Es evidente que aquellos tripulantes que sufran procesos vestibulares agudos o crónicos tienen una mayor susceptibilidad a sufrir fenómenos de desorientación espacial, dichas alteraciones como laberintitis, infecciones de vías respiratorias altas, S. de Meniere y otros problemas vestibulares deben ser causa de baja temporal o definitiva en vuelo.

Errores de percepción y atención focalizada pueden acentuarse si existen factores endógenos como ansiedad, fatiga, exceso de trabajo o factores psicosociales que deben estar siempre presentes en el contexto general del problema.

3.3. Medicación

Cualquier sustancia farmacológica activa que tenga efectos a nivel central y disminuir la capacidad cognitiva del sujeto, puede incrementar la susceptibilidad a fenómenos de desorientación espacial. El alcohol se puede considerar, por sus efectos depresores sobre el SNC, como sustancia que puede potenciar ilusiones tanto visuales como vestibulares.

3.4. Entrenamiento

Cualquier estadística nos enseña que todos los pilotos, independientemente de su experiencia en vuelo, ha sufrido algún episodio de desorientación.

Este debe tener un conocimiento claro de las causas, manifestaciones y forma de tratar este tipo de ilusiones en vuelo. Para ello es fundamental que el piloto disponga de la necesaria información respecto a la fisiología básica de los órganos del equilibrio, las mani-

festaciones clínicas de las ilusiones sensoriales, sus aspectos operacionales y mediante demostraciones prácticas enseñar al tripulante cómo los órganos de los sentidos no siempre van a ser fiables en condiciones de vuelo.

Desde un punto de vista operacional podemos considerar dos clases de fenómenos de desorientación, el denominado tipo I, caracterizado porque el piloto no aprecia o reconoce que está desorientado, supone por tanto, un serio peligro para la seguridad de la aeronave ya que éste puede basar el control de la misma en una percepción totalmente errónea. En el llamado tipo II, el piloto experimenta un serio conflicto entre lo que sus sentidos indican y la información aportada por los instrumentos de la aeronave, frecuentemente este conflicto se resuelve y raramente conduce a un serio incidente. Se ha descrito un tipo III, caracterizado por ser incapacitante y que conduce, casi siempre, a una pérdida del control de la aeronave.

La utilización de entrenadores es una gran ayuda (20) para estos propósitos, utilizando desde los más básicos, como la silla de Barany, los más comunes (Vertifugo y Vertigón) o más complejos como el Gyrolab, que permite la estimulación en los tres planos del espacio (véase figura 12).

BIBLIOGRAFIA

1. GILLINHAM, K.K., WOLFE, J.W.: Spatial Orientation in flight. In Roy L. DeHart Ed. Fundamentals of Aerospace Medicine. 1st Ed. Philadelphia. Lea & Febiger. 1985. 299-381.
2. BARNUM, F., and BONNER, R.H.: Epidemiology of USAF spatial disorientation aircraft accidents 1 Jan 1958 - 31 Dec 1968. Aerospace Med. 1971, 42: 896-898.
3. BULEY, L.E., and SPELINA, J.: Physiological and psychological factors in the dark night takeoff accident. Aerospace Med. 1970, 41: 553-556.
4. KIRKHAM, W.R.: Spatial disorientation in general aviation accidents. Aviat Space Environ Med. 1978, 49: 1.080-1.086.
5. MOSER, R.: Spatial disorientation as a factor in accidents in an operational command. Aerospace Med. 1969, 40: 174-176.
6. LIEBOWITZ, H.W., DICHGAM, J.: The ambient visual system and spatial orientation. In spatial disorientation in flight: current problems. AGARD-CP-287. Neuilly-sur-Seine, France. NATO/OTAN.
7. GUYTON, A.C.: Human Physiology and mechanisms of disease in sensory receptors and the mechanoreceptive somatic sensations. Saunders W.B. Co. Philadelphia, 3rd Ed. 1982. 360-385.
8. A.J. BENSON: Spatial disorientation - general aspects. In Ernsting J. Kings, P. Eds. Aviation Medicine 2nd Ed. London: Butterworths, 1988. 277-296.
9. Aeromedical Training for flight personel. FM1-301. 1983: 9 (1-19).
10. MONERI, F.H.: Un update of findings regarding spatial disorientation in flight. A reconsideration of underlying mechanism. AGARD. Conference Proceedings, 1980, n° 287: B2 (1-6).
11. GUEDRY, F.E.: Motion sickness and its relation to some forms of spatial orientation: mechanisms and theory. In motion sickness: significant in Aerospace Operations and prophylaxis. AGARD LS 175. Neuilly-sur-Seine. NATO/OTAN 1991.
12. RIORDAN, R.H.: Monocular visual cues and space perception during approach and landing. Aerospace Med. 1974, 45: 766-771.
13. TREDICI, T.J.: Visual illusions as a probable cause of aircraft accidents. AGARD. Conference proceedings n° 287. 1980. B5 (1-5).
14. A.J. BENSON: Spatial disorientation - common illusions. In Ernsting J. King P. Eds. Aviation Medicine. 2nd Ed. London. Butterworth. 1988: 297-317.
15. GUEDRY, F.E., BENSON, A.J.: Coriolis crosscoupling effects: disorientation and nausea or not? Aviat Space Environ Med. 1978, 49: 29-35.
16. GKAYBIEL, A., JOHNSON, W.H., MONEY, K.E., MALCOLM, R.E., JENNINGS: Oculogravic illusion in response to straight-ahead acceleration of CF-104 aircraft. Aviat Space Environ Med. 1979, 50: 382-386.
17. PEDRIEL, G., BENSON, A.J.: Spatial Disorientation in flight. Current problems. AGARD. Conference proceedings n° 287. 1980.
18. WICKS, R.E.: Alternobaric vertigo: an aeromedical review. Aviat Space Environ Med. 1988, 60: 67-72.
19. DOWD, P.J.: Proposed spatial orientation flight training concept. Aerospace Med. 1974, 45: 758-765.
20. DOWD, P.J., CRAMER, R.L., WOLFE, J.W., MCKEAN, S.H.: Responses of USAF undergraduate pilot trainees to indoctrination in the spatial orientation trainer. Aerospace Medicine. 1970, 41: 544-549.