

DOSSIER

Limitaciones humanas y riesgo en pilotos de líneas aéreas: sueño y fatiga

Human limitations and risk in airline pilots: sleep and fatigue

Marcelo Muro

Médico examinador del personal aeronáutico, especialista en Cirugía General, Emergencias, Medicina del Trabajo, exprimer oficial Airbus 340 y Boeing 737/38 en Aerolíneas Argentinas, facilitador Factores Humanos CRM-TEM OACI-ANAC.
marcelormuro@gmail.com

Alejandro López Camelo

Excomandante Airbus 340, Boeing 735/37 en Aerolíneas Argentinas, RVP IFALPA, investigador de accidentes aéreos, facilitador de Factores Humanos CRM, TEM Instructor de SMS de OACI.
eventos.apla@gmail.com

Palabras clave: Sueño-Fatiga-Seguridad Operacional- Limitación Humana- Jetlag.

Keywords: Sleep-Fatigue-Safety-Human Limitation - Jetlag.

Recibido: 16/12/23

Aceptado: 28/01/24

Resumen

Se analiza en el presente trabajo distintos aspectos fisiológicos y patológicos del sueño y de la fatiga, y su relación con alteraciones parciales o permanentes del desempeño en los pilotos de línea aérea. Se describen los tipos y ciclos de sueño, revisando los últimos estudios científicos en la materia. Asimismo, se analizan los vuelos transmeridianos, la problemática de la adaptación al cambio horario y la influencia en el ritmo circadiano. Se introduce la relación sueño-fatiga como una diada fundamental a la hora de reglamentar las operaciones aéreas.

Se presenta el Fatigue Risk Management System (FRMS) como un método para evaluar la fatiga en tripulaciones y el desarrollo de softwares que pretenden tabular con mayor o menor dificultad el riesgo de una determinada operación. Este método, desarrollado por la OACI, la IFALPA y la IATA, se utiliza como guía principal de la reglamentación para todas las operaciones aeronáuticas. Finalmente, se establecen distintos tipos de recomendaciones a los efectos de salvaguardar la seguridad de las operaciones.

Abstract

Different aspects of the physiopathology of sleep and fatigue are analyzed in this paper and the relationships with other tasks determine a continuous variation of their normal mechanisms as it happens in airliners international crews. Recent scientific studies about the cycles of sleep are mentioned including the problem of jet lag in transmeridian flights. The dyad composed of sleep and fatigue must be taken as a main concern at the moment of evaluating the regulations in air operations.

Fatigue Risk Management System (FRMS) is developed to assess and evaluate the fatigue level in crews and has determined the development of software to calculate the maximum level of risk to perform and authorize the operation. This method, developed by ICAO, IFALPA, and IATA, is being used as the main guide of the regulations for all aeronautical operations. Finally, some recommendations are suggested to keep high enough the safety of the operations.

Introducción

La actividad de la aviación aerocomercial ha crecido de manera permanente en los últimos cuarenta años con algunas interrupciones puntuales. Este hecho y las condiciones inherentes a la globalización han determinado una competencia comercial cada vez mayor para, en algunos casos, mantener la ganancia y en otros, sostener las empresas en pie.

La pandemia profundizó aún más esta situación ya que el cese de operaciones normales en gran parte del mundo generó un sentido de subsistencia a cualquier costo con una cierta tolerancia mayor para prácticas límite desde el punto de vista de la cultura de la seguridad. Dentro de este marco se han generado múltiples fusiones de líneas, y conversiones y desapariciones de otras.

Dentro de esta creciente puja económica financiera, se han comenzado a producir ideologías que buscan modificar las condiciones de trabajo de las tripulaciones técnicas, sin tomar en cuenta adecuadamente las limitaciones fisiológicas, como la fatiga y la desadaptación del sueño que pueden afectar no solamente de forma importante el desempeño de manera inmediata, con el consiguiente aumento del riesgo operativo, sino también de manera crónica generando condiciones que favorecen la irrupción de enfermedades de distinto tipo.

El motivo de este trabajo es, tomando como base información científica actualizada sobre fatiga y sueño, generar recomendaciones concretas a fin de proteger la operación aeronáutica —en particular de las líneas aéreas— del embate que sufren para hacerlas presuntamente más eficientes y eficaces, deteriorando la seguridad de las mismas y alterando el elemento más rico, complejo y vulnerable del sistema: los operadores.

Metodología

Comenzaremos por abordar la definición de fatiga como un proceso y no como un estado únicamente, para posteriormente analizar su descripción clínico-etiológica y los últimos estudios científicos que relacionan la fatiga, el sueño, el *jet lag* y su impacto en las operaciones.

Posteriormente realizaremos una descripción y análisis crítico de las herramientas con que se trata de estimar el nivel de fatiga, e incluso de predecirlo mediante modelos matemáticos, ya que no es costumbre medirlo de manera objetiva y validada científicamente.

Según la Organización de Aviación Civil Internacional [2], en su anexo 1, la fatiga es una reducción fisiológica de la capacidad de desempeño físico y/o síquico que puede reducir la conciencia situacional y la habilidad de la tripulación de operar de manera segura la aeronave y las actividades relacionadas.

En nuestra opinión, la fatiga representa un desbalance entre el esfuerzo y el descanso, y el descanso no es solo dormir, ya que es fundamental el desarrollo psicosocial del individuo para preservar sus condiciones de equilibrio cognitivo para un mejor desempeño operativo. Este incluye las distracciones, la práctica de deportes, estar junto a sus familias y amigos, estudiar o tocar un instrumento, en fin, cualquier actividad de socialización que lo aparta de aquel criterio de que la vida es volar y dormir.

Es muy importante establecer desde el inicio mismo de este ensayo que la fatiga es un estado al cual se llega luego de un proceso que se desarrolla en el tiempo. Sería muy inadecuado que al decir fatiga pensemos solo en aquel que está sufriendo el síndrome de “sujeto quemado” o burn-out.

Si bien obviamente eso es una consecuencia crónica y persistente de la fatiga, sin duda ese cuadro se fue dando a lo largo de múltiples episodios del desbalance mencionado, que origina primero episodios de cansancio extremo, luego fatiga aguda sin adecuada recuperación y cuando no hay una aproximación adecuada, entonces desemboca en la fatiga crónica. Todas tienen distintas opciones terapéuticas y miradas sobre la relación de los desempeños degradados y el riesgo operacional.

Etapas del proceso que deriva en la fatiga

Cansancio: desgaste psicofísico de una jornada que se recupera en un período corto de descanso adecuado. Su intensidad depende de las horas que llevo despierto y la demanda de la tarea.

Fatiga aguda: proceso de desgaste que se prolonga en el tiempo y cuya recuperación requiere descansos más largos. (Más de 3 días sucesivos de descanso normal interrumpido, deuda de sueño).

Fatiga acumulativa o crónica: cuadro clínico de distinta gravedad con impacto importante en la cognición y la motivación de quien lo sufre, con deterioro de las herramientas de afrontamiento, y que requiere —aparte del descanso— distintos tipos de tratamientos de apoyo.

Estrés: proceso psicofísico de respuesta a los cambios que utiliza mediadores químicos que se usan en el funcionamiento cognitivo habitual. El sujeto estresado, sobre todo de manera sostenida, sin poder afrontarlo, con sensación de inescapable, aumenta el esfuerzo de las tareas, cualquiera sea su contexto, por consumir los mediadores químicos para intentar sostener los procesos cognitivos enfocados en disociar lo que le preocupa. El estrés no es similar a la fatiga, pero por el mecanismo descrito claramente la empeora.

Los modernos estudios del sueño normal y patológico, así como sus alteraciones con los cambios del ritmo circadiano y el jet lag, han aportado la base de datos para entender la fatiga. Pero estas determinaciones sufren naturalmente la variabilidad individual y temporal del ser humano. Las limitaciones al desempeño descritas en los modelos de gestión de riesgo de las organizaciones en general y en aquellas actividades de alta confiabilidad, antes llamadas de alto riesgo, como el transporte, la industria de las energías, la minería y la atención de la salud, son básicamente cuatro: la mencionada fatiga en todas sus formas, la gestión del estrés, la irrupción de un evento sorpresivo de magnitud y cualquier alteración o enfermedad que pueda disminuir la aptitud psicofísica del operador.

También se han diseñado distintas metodologías para tratar de cuantificar la fatiga y volcar los datos a tablas y modelos matemáticos predictivos, con distintos resultados y opciones de aplicación, que analizaremos más adelante.

La actividad aerocomercial se desarrolla generando múltiples causas posibles de fatiga.

- Alteraciones del sueño, en cantidad y calidad.
- Jornadas de trabajo prolongadas y contextos operativos variables.
- Desempeño en áreas donde se ve alterado el ritmo circadiano y el cambio de estación, con grandes amplitudes térmicas que dificultan la adaptación.
- Excesiva carga de trabajo síquico o físico.
- Acumulación de uno o de varios de los factores.
- Insuficiente recuperación tras los diversos esfuerzos, síquicos y físicos.

La sintomatología de la fatiga oscila desde la sensación de malestar general, o de incomodidad —que siente el ser humano al finalizar una jornada cansadora—, a la alteración de la capacidad de percibir y comprender adecuadamente lo que ocurre y, consecuentemente, a la degradación de la toma de decisiones o de la necesaria evaluación de sus consecuencias, y su potencial corrección.

Esta condición puede contribuir a decisiones que resultan no comprensibles o irreconocibles y da lugar a las tristemente comunes expresiones de “¿cómo hicieron esto?!", “¿qué estaban haciendo?!". Las siguientes son las manifestaciones clínicas de fatiga operacional:

- Sensación de malestar general.
- Hipodinamia y somnolencia.
- Irritabilidad emocional. Apatía y desinterés.
- Disminución de la capacidad dinámica de concentración.
- Alexitimia.

- Pérdida o aumento del apetito.
- Alteración en las percepciones sensoriales.
- Degradación en la toma de decisiones. Decisiones irreconocibles.

El incremento en el tiempo de reacción genera respuestas inadecuadas en tareas secuenciales que requieren sincronización e incluyen pausas. [3]

También se ha verificado la necesidad de incrementar la magnitud de los estímulos sensoriales para activar una respuesta. La afectación progresiva en la calidad de la atención promueve la focalización como recurso inmediato ante la disminución de esta y puede resultar, en algunas etapas del vuelo, sumamente peligrosa, ya que en las mismas se requiere aplicar una atención distributiva rotativa e intermitente para controlar varios parámetros fundamentales para la operación segura.

¿Cómo dormimos?

Para responder a esta pregunta, nos referiremos a continuación a los estudios del sueño normal en los seres humanos. [6]

En la antigüedad, antes de la era de los estudios específicos del dormir, se definía una buena calidad del sueño, al que entonces se llamaba reparador, cuando el paciente podía recordar claramente los escenarios de sus sueños, aun las pesadillas. Esto tiene consistencia con la presencia de varios ciclos de sueño profundo o REM que veremos a continuación, pero nos adelantamos a decir que son los períodos en los cuales el cerebro, que se halla permanentemente activo, se repara y resetea con mayor eficiencia.

Actualmente, la polisomnografía se constituye en la herramienta fundamental de estudio y de pronóstico. La misma implica tres estudios distintos: la electroencefalografía (EEG), que registra las ondas eléctricas cerebrales, el electrooculograma (EOG), que nos permite registrar los movimientos de los ojos, fundamentales para el sueño y utilizado para determinar los ciclos, y el electromiograma (EMG), que analiza los movimientos de los músculos que se estudien.

Con el advenimiento y modernización de estos métodos, se concluyó que el sueño es un mecanismo complejo y delicado, influenciado por múltiples factores y capaz de originar distintos tipos de alteraciones cuando su calidad no permite cumplir con la función fisiológica. Se compondría de dos etapas diferentes pero integradas, que se clasifican según estén presentes en los registros de los movimientos en los ojos; a saber: el sueño con movimientos rápidos de los ojos, cuya sigla en inglés es REM (Rapid Eyes Movement) o sin ellos, NO REM. [4, 5]

A continuación, detallamos las características más importantes del sueño NO REM. Un período de sueño normal comienza con esta etapa, que se caracteriza por ser superficial, de fácil reversión, e insuficiente por sí sola para producir la reparación cerebral, que complementa un descanso adecuado.

- Comienza a disminuir la frecuencia de las ondas cerebrales, cardíaca y respiratoria.
- No hay constancia de actividad onírica significativa (los estudiados no recuerdan haber soñado).
- Se inicia como superficial, de fácil reversión.
- El cerebro funciona al 80 %, se encuentra menos activo en un cuerpo activo: son frecuentes los movimientos de las piernas y los brazos que, de acuerdo a la frecuencia, pueden llegar a constituir patologías del sueño, como el síndrome de piernas inquietas.
- La respuesta cognitiva de buena calidad, inmediata al despertar, es aún posible.

Esta etapa inicial dura entre 20 y 35 minutos. Una vez que los movimientos oculares se hacen más frecuentes, el sueño se profundiza, y si queremos despertar al sujeto, aun cuando lo logremos en forma rápida, tardará entre 10 y 20 minutos para volver a estar completamente conectado con la realidad. Esto se denomina inercia del sueño y es una de las amenazas en la seguridad de las operaciones.

Las características de la etapa en la que el sueño se muestra con movimientos oculares rápidos, gran actividad eléctrica cerebral y recuerdo de sueños, es cuando la actividad cerebral es similar a la de estar despierto. Esta etapa en cantidad suficiente de ciclos por noche es determinante del descanso eficaz.

- Los ojos se mueven de un lado al otro de la órbita: este fenómeno es más evidente en niños y adolescentes.
- Se suelen recordar los sueños al despertar, pero el no hacerlo no puede usarse como indicador negativo de la calidad del dormir.
- Se producen movimientos musculares involuntarios y la frecuencia cardíaca y la respiración son irregulares.
- El cerebro está activo y, sin embargo, su estímulo se bloquea en su base y el cuerpo no lo copia. Aparecen sueños donde queremos movernos y estamos paralizados.

Cuantas más horas la persona ha permanecido despierta, su cerebro requerirá más fases de sueño REM. Esta relación puede usarse como valor predictivo en fatiga y representa el proceso homeostático del sueño.

Resultados y discusión

Como mencionamos anteriormente, una clara definición de fatiga es un desbalance entre el esfuerzo y el descanso, y siendo la calidad del dormir fundamental para el mismo, discutiremos a continuación distintos factores que lo afectan y que se relacionan con la actividad de las tripulaciones aeronáuticas.

También hemos visto cómo la polisomnografía ha permitido sumergirnos en la fisiología del sueño y por su intermedio, en la temática de la fatiga. El sueño es una sucesión de ciclos NO REM/REM (90 minutos) que se interrumpen por breves despertares en intermitencias. Es variable, pero siempre comienza con sueño superficial y reversible y, al profundizarse, aparecen los movimientos oculares y su fase específica. Se trata entonces de la sucesión de ciclos REM/NO REM y terminamos despertando de sueño REM cuando lo hacemos espontáneamente; no así cuando usamos un despertador. El ritmo circadiano habitual genera más cambios en el sueño REM.

Si contáramos con datos más precisos, deberíamos reformular aquella pregunta de los exámenes sicotécnicos sobre cuántas horas se duerme habitualmente, para saber cuántos ciclos se necesitan para reintegrar capacidades operativas del individuo.

Cuanto más se interrumpe el ciclo No REM/REM, mayor es el deterioro y la necesidad posterior de recuperación. Esto ocurre frecuentemente en las tareas con turnos de trabajo que interrumpen el sueño normal. Algunas legislaciones lo consideran entre las 23 y las 6 de la mañana, por coincidir con la definición de la noche como disparador del mecanismo del dormir. Más adelante, consideraremos qué ocurre cuando se produce el cruce rápido de más de tres meridianos, que es cuando comienzan a hacerse más relevantes los efectos de la alteración del ritmo circadiano habitual.

El sueño a bordo es más liviano e interrumpe ciclos más frecuentemente que en tierra. Las siguientes son las distintas razones por las cuales el dormir a bordo de una aeronave —aun cuando se cuente con dormitorio separado con literas—, suele ser muy distinto al habitual.

- Ruidos varios, prestación de los servicios a pasajeros, desde galley, cinturones *on, off*.
- No tener sueño a la hora del turno.
- Incomodidad ergonómica manifiesta, largo, ancho, almohadas, regulación de temperatura.
- Turbulencias.
- Pensamientos varios, desconocimiento de la tripulación.
- Levantarse para ir al baño.
- Problemas personales que impedirían el sueño normal en cualquier sitio.

Sin lugar a duda, la capacidad de adaptación a dormir en estas condiciones tiene características variables y subjetivas, y debe considerarse un promedio de estas experiencias. Consideramos que estos períodos de descanso a bordo no pueden asimilarse a períodos de descanso normal.

Ritmo circadiano

Veamos cómo influye en nuestro dormir el denominado ritmo circadiano. El conjunto de mecanismos vehiculizado por las hormonas y otros mediadores químicos es regulado por una parte del cerebro denominada hipotálamo. Las investigaciones determinan que el ciclo fisiológico del ser humano es cercano a 25 horas.

Este ciclo se ve influenciado por temperatura central del organismo y por la iluminación que el cerebro percibe a través de sus receptores visuales. Existen dos momentos de temperatura mínima corporal en el día: 3-5 am y 3-4 pm (siesta), que coinciden con los períodos de máxima somnolencia. La sucesión del día y la noche (iluminación) mantiene el ritmo circadiano.

De acuerdo con ciertas características genéticas, el ser humano se comportaría espontáneamente con mayor disponibilidad psicofísica dentro de uno de los siguientes dos modos: matinales, denominados alondras, o vespertinos/nocturnos, llamados lechuzas. Esto significa en qué momento nos sentimos más plenos para la actividad que realicemos y la tendencia al descanso se vería beneficiada si lo hiciésemos en el horario opuesto.

Este delicado proceso fisiológico, tan afectado en la actualidad por el ritmo de vida y el estrés cotidiano incrementado en las áreas y costumbres urbanas, se altera cuando realizamos actividades con turno variable, turnos opuestos de adaptación rápida, como por ejemplo los vuelos que transcurren durante toda o gran parte de una noche, y se programa otro vuelo diurno sin contar con los intervalos necesarios, aun cuando se realicen dentro del mismo huso horario.

Hemos mencionado más arriba la importancia que la exposición a la luz solar tiene en el sueño. Al atravesar rápidamente los husos horarios, la diferente posición relativa del sol en cada lugar genera un desfase de los ritmos endógenos y produce una reestructuración de los sistemas oscilantes mencionados.

Esta es la situación de los vuelos transmeridianos, que deben ser considerados en base a la diferencia angular entre origen y destino, ya que de ella depende esencialmente la hora de la salida y de la puesta del sol. La determinación de que cada huso horario se encuentra separado del otro por 15 grados de longitud es solo una referencia administrativa para establecer las horas de los países.

Se considera que a partir de los 45 grados de diferencia angular, equivalente a tres husos horarios, comienzan a sentirse los signos y síntomas de ese desacople fisiológico llamado del jet lag.

El *jet lag* es esencialmente fisiológico y representa el conjunto de mecanismos con que el organismo pretende adaptarse al nuevo horario.

A continuación, listamos el conjunto de signos y síntomas del síndrome *jet lag*. [7]

- Alteraciones del sueño (60-80 %).
- Incremento de la fatiga por disminución en la calidad del descanso.
- Cambios gastrointestinales. Hambre ingesta y ritmo evacuatorio.
- Alteraciones endócrinas.
- Alteraciones sicointelectuales.
- Sensación general de incomodidad.

Volar rápido a través de husos horarios modifica el ritmo circadiano principalmente por el cambio de exposición a la luz solar. Cuanto mayor es la diferencia angular, más tiempo requiere la adaptación. Cuando nos transportamos hacia el este, es peor y más lenta, porque el día se acorta y se corre la hora registrada por el cerebro como habitual para dormir hacia la mitad de la madrugada. La peor situación operativa se da cuando existe una deuda de sueño

previa sumada al *jet lag*. No se busca que los pilotos tengan una adaptación completa al lugar de destino, como si fuera un pasajero, pero sí que se logre la denominada adaptación mínima de seguridad operativa, que consiste en tener las capacidades de conciencia situacional, reacción y toma de decisión en un nivel suficiente para resolver los problemas habituales y potenciales de un vuelo estándar -como manejo de emergencias o condiciones anormales infrecuentes, pero que requieren un esfuerzo físico y cognitivo mayor que lo usual-. [8]

Tomando en cuenta que la afirmación sobre la clara influencia que la fatiga y el sueño alterado han tenido en la cadena de eventos que llevó a siniestros catastróficos —no solo en el transporte aéreo—, es básicamente empírica y de sentido común, los autores Signal, Gader, Perelli, entre otros, trabajaron en modelos de identificación predictiva del riesgo para vincular la calidad del sueño a la fatiga. Autoreportes de riesgos de fatiga y encuestas de investigación de fatiga en tripulaciones, como el Índice de Sam Perelli, son algunos de los métodos utilizados con el objeto final de determinar los límites de una operación segura desde el punto de vista específico de la adaptación mínima de seguridad operativa mencionada. También comenzaron a relevarse los análisis del plan de vuelo programado versus tiempo volado real y las condiciones de estos. [9].

Todos estos estudios no evalúan de manera técnica la cognición *in situ*, por lo cual sus resultados se integran a una franja de grises que hace más relevante y dificultoso el tironeo entre aquellos negacionistas que buscan más producción y los tripulantes que aún muy cansados sufren la presión de distintas maneras para no cambiar nada.

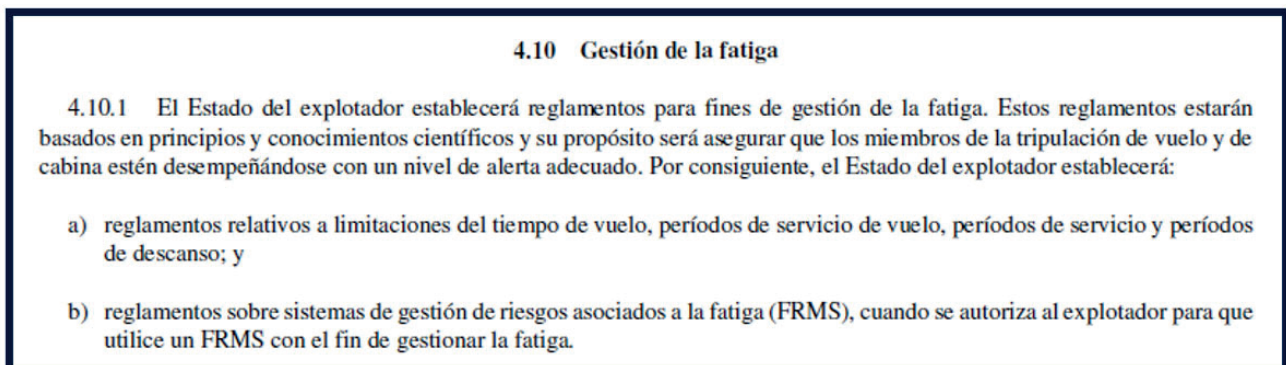
La fatiga comenzó a tratar de estimarse también en los formularios de reporte de fatiga OACI, en el Documento 9858, en el Manual del Curso Safety Management System (SMS), que diferencia entre desempeño aceptable e inaceptable, dando sustento al tiempo mínimo de adaptación operativa.

La investigación retrospectiva comenzó a hacerse en tripulaciones: datos demográficos, calidad del sueño en casa y afuera, experimentación de fatiga y sus causas. Se comenzó a trabajar con el monitoreo de la fatiga en vuelo con dos grupos de métodos (subjettivos: Karolinska y Sam Perelli, y objetivos: actigrafía, polisomnografía y monitoreo del ritmo circadiano).

Finalmente, en julio del año 2011, la OACI incluyó en su documento 9966 el programa Fatigue Risk Management System (FRMS), como recomendación para los Estados contratantes. Este enfoque está basado en la *performance* del individuo y busca recopilar información e identificar peligros, analizar y evaluar riesgos y determinar acciones de mitigación y evaluación. Posteriormente, el programa también buscó determinar y proponer algunas herramientas objetivas que permitieran calcular el riesgo de una operación, tomando en cuenta la fatiga y la conveniencia y factibilidad de su realización. La International Air Transport Association (IATA) y la International Federation Airliners Pilots Association (IFALPA) han apoyado esta gestión y controlan su aplicación.

En la Figura 1, podemos ver las normas del Anexo 6 de la OACI, Parte I, Enmienda 35, del 15 de diciembre de 2011, que establece lo siguiente en su punto 4.10 Gestión de fatiga:

Figura 1. Gestión de fatiga



En la Figura 2 podemos observar los requisitos que la OACI determina para la gestión de fatiga en sus normas del Anexo 6, Parte I, y su correlación con las regulaciones para Latinoamérica.

Figura 2 Requisitos del sistema de gestión de fatiga

APÉNDICE 8. REQUISITOS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RIESGOS ASOCIADOS A LA FATIGA

Nota 1.— El Manual de sistemas de gestión de riesgos asociados a la fatiga para los encargados de la reglamentación (Doc 9966) contiene orientación acerca del desarrollo, implantación, aprobación y vigilancia de los FRMS.

Los sistemas de gestión de riesgos asociados a la fatiga (FRMS) establecidos de conformidad con el párrafo 4.10.6 del Capítulo 4, incluirán, como mínimo, lo siguiente:

1. POLÍTICA Y DOCUMENTACIÓN SOBRE EL FRMS

1.1 Criterios FRMS

También según la OACI- LAR 121, Cap. N / LAR 135, Cap. F. Obligaciones del explotador: Cumplimiento de requisitos, el explotador tendrá como mínimo que:

- incorporar principios y conocimientos científicos en el FRMS;
- identificar constantemente los peligros y los riesgos resultantes;
- asegurar la pronta aplicación de medidas correctivas;
- facilitar el control permanente y la evaluación periódica de la mitigación de los riesgos;
- facilitar el mejoramiento continuo de la actuación global del FRMS.

En todas ellas se constata la incorporación de la fatiga y el FRMS como dispositivo de estudio y modificación de todas las situaciones que resultasen necesario corregir. También podemos detallar los momentos en que el tripulante debe realizar el chequeo:

- Prevuelo.
- Tope del ascenso.
- Antes y después del 1º y 2º descanso.
- Antes de iniciar el descenso de aproximación.
- Antes de abandonar el aeropuerto.

Observemos también, a modo de ejemplo, el rango que se le asigna a la sección de autoencuesta en los momentos indicados anteriormente (Figura 3).

Figura 3. Puntaje de la lista de chequeo de Sam Perelli

| Ranking | Nivel de riesgo | Descripción |
|---------|-----------------|-------------------------|
| 1 | Bajo | Totalmente alerta |
| 2 | | Muy animado y receptivo |
| 3 | | Bien |
| 4 | Moderado | Poco cansado |
| 5 | | Moderadamente cansado |
| 6 | Alto | Extremadamente cansado |
| 7 | Extremo | Completamente exhausto |

Utilizando estas listas se determina un puntaje total del tramo del vuelo que lo califica como más o menos riesgoso al tomar en cuenta condiciones de sueño, fatiga y descanso. En algunos casos se desaconseja totalmente, sin que se tomen medidas correctivas.

Sin embargo, hemos observado con preocupación que algunos vuelos se realizan al límite de la tolerancia, con el agravante de que los programas mencionados no toman en cuenta situaciones especiales de cada vuelo, como por ejemplo la experiencia y conformación de los tripulantes, la turbulencia en vuelo, el plan de vuelo realizado anteriormente y distintos factores como el estado del avión o la meteorología en vuelo que, al no ser considerados como factores en el rango, sacan conclusiones a veces incompletas, que lejos están en algunos casos de la realidad.

Si por algunos de los factores mencionados el descanso a bordo se viera tan degradado que pudiese ser considerado inexistente o insuficiente, podríamos encontrarnos a una tripulación que, al momento del aterrizaje, con la carga de esfuerzo que ello significa, y muchas veces en medio de la noche, no se encuentre en la mejor condición para resolver las distintas situaciones que pudiesen ocurrir.

Atento a todas las evidencias descriptas más arriba podemos afirmar que después de una noche de sueño perdido, el objetivo es restaurar los ciclos necesarios, por lo cual se requieren dos noches consecutivas sin interrupción. La primera noche habrá más ciclos de sueño NO REM que lo usual y no habrá lugar ni espacio para el sueño REM. En la segunda noche habrá más sueño REM. La tercera noche el balance estará normalizado. No es igual a dos días *off*. Son dos noches completas *off* después de tres husos horarios de diferencia.

Se han propuesto distintos métodos para combatir los efectos de los desfases horarios. A continuación, se describen algunos procedimientos:

- Si la escala es corta —inferior a un día—, permanecer al ritmo acorde al horario del país de partida.
- Si la escala es mayor a un día, adoptar inmediatamente el ritmo de país de llegada para acelerar la sincronización.
- En la escala, mantener un ciclo regular de alternancia vigilia- sueño y horarios de comidas (favorecer la sincronización).

La restricción de sueño de dos horas menos por día genera una deuda de sueño acumulativa. A partir del cuarto día, el sujeto comienza a ser peligroso. Esto se investigó a fines de la década pasada en Canadá, en donde se observó que tras el cambio horario estival la cantidad de accidentes de carretera aumentaron en un porcentaje significativo. Este registro motivó reducir ese cambio a una hora. Ya mencionamos que la cognición se degrada con menos sueño de la mano de la afectación de la atención. En situaciones de fatiga persistente, el cerebro se desconecta por instantes (no más de dos minutos). Es el cabeceo característico que se puede observar en quien se queda dormido en el puesto de trabajo. Este verdadero reinicio del cerebro sería el causante de muchos de los siniestros durante la madrugada o en las primeras horas de la mañana, en los que los conductores profesionales de camiones y ómnibus pierden el control del vehículo y, en algunas oportunidades, se generan verdaderas catástrofes.

Otro elemento importante es que, dado que la toma de decisión y la comunicación se ven más afectadas por la fatiga que otras acciones, y depende el período del ciclo en el que un sujeto es despertado, el mismo puede tardar varios minutos en recuperar los niveles cognitivos necesarios para una resolución adecuada, por encontrarse en la mencionada inercia del sueño.

Por otra parte, ningún programa de gerenciamiento de la fatiga contempla las consecuencias crónicas de la misma. Aquellos que duermen menos tienen más probabilidad de enfermar de diabetes, obesidad y enfermedades cardiovasculares.

Independientemente de los turnos de sueño en las literas o en asientos reservados a tal efecto, se proponen las siestas en la cabina de comando con las siguientes condiciones de aplicación: [10.11.12.13]

- Solo de a uno por vez, con el cinturón colocado, y controles libres de interferencia mecánica.
- Tanto el control automático de la potencia y el piloto automático (*autothrust* y *autopilot*) deben estar funcionando.

- Las debe administrar el capitán para disminuir la fatiga en los peores momentos del vuelo.
- Debe estar claro quién duerme y los límites del período, y el piloto al mando puede suspenderlo a su criterio de acuerdo a sus necesidades.
- El capitán debe aclarar en qué condiciones interrumpir su sueño.
- Estas siestas en el puesto de pilotaje no deben superar los treinta minutos, para evitar la inercia de sueño y la dificultad para despertarse.
- Pueden ser controladas por otro personal de vuelo en lo que dura la siesta de uno de ellos.

Modelos biomatemáticos de predicción de fatiga [14]

Consideraciones iniciales

Históricamente, la industria de la aviación ha regulado el riesgo de fatiga mediante la prescripción de tiempos máximos de servicio y tiempos mínimos de descanso en el marco de los esquemas de limitación del tiempo de vuelo y de servicio (FTL).

En los últimos años, se ha buscado pasar de estas prácticas tradicionales a la adopción de sistemas y técnicas de gestión de la tripulación conforme con el rendimiento. La legislación basada en el desempeño especifica lo que se debe lograr, pero no cómo.

Los medios de cumplimiento se dejan en gran medida a la discreción del operador, con la orientación y auditoría de un regulador maduro y proactivo, y se enmarcan en los sistemas de gestión de la seguridad de los Estados.

Los modelos biomatemáticos son herramientas para predecir los niveles de fatiga, basados en una comprensión científica de algunos factores que contribuyen a la misma (Australian Civil Aviation Safety Authority, 2015). Son conjuntos de ecuaciones que predicen cuantitativamente valores de riesgo de fatiga en función a factores como el historial de sueño, la hora del día de la tarea y, en menor medida, la carga de trabajo. Por ello, las predicciones de fatiga nunca deben constituir el único medio para tomar las decisiones operativas sobre su gestión y las tripulaciones de vuelo y los tomadores de decisiones operativas deben ser entrenados para interpretar adecuadamente los resultados de estas herramientas.

Los resultados de tales modelos pueden dar la ilusión de ser precisos y cuantitativos a pesar del hecho de que predicen una medida cualitativa como es la fatiga subjetiva. Las puntuaciones derivadas de los modelos biomatemáticos no pueden proporcionar una "luz verde" para cambios rotundos en la gestión de la seguridad operacional. La información mínima típicamente requerida para la predicción de la fatiga incluye el horario de trabajo y descanso y/o datos de sueño. La información del sueño se puede obtener a partir de datos subjetivos (por ejemplo, con el registro personal de sueño) o datos objetivos, desde un dispositivo de muñeca o incorporado a un reloj pulsera.

Modelos de fatiga y análisis

A continuación, listamos los modelos de fatiga.

- Boeing Alertness Model (BAM)
- Circadian Alertness Simulator (CAS)
- Fatigue Assessment Tool by Interdynamics (FAID)
- Fatigue Risk Index (FRI)
- System for Aircrew Fatigue Evaluation (SAFE)
- Sleep, Activity and Task Effectiveness Model Associated Fatigue Avoidance Scheduling Tool (SAFTE FAST)
- Sleep Wake Predictor (SWP)

En la aviación civil los modelos de riesgo de fatiga serían más completos y precisos si además de la información obtenida de sistemas de recopilación de datos de vuelo en tiempo real (FOQA) y de las tasas de incidentes y accidentes de la tripulación, se desarrollaran investigaciones *in situ* con estudios neurocognitivos del desempeño y la calidad en las condiciones de duración, desfase de zonas horarias y situaciones operativas de las tripulaciones.

En la práctica, la dificultad de medir el desempeño de las tareas operativas, las tasas relativamente bajas de accidentes de aviación y el costo de la recopilación y el análisis de datos presentan barreras para el enfoque de validación de modelos.

La base científica para el desarrollo de la mayoría de los modelos proviene de experimentos de laboratorio, en los que el perfil de fatiga para sujetos sanos bajo restricción de sueño impuesta y prevista o cambios de zona horaria simulados se mide utilizando pruebas neuroconductuales objetivas (por ejemplo, tiempo de reacción, rendimiento psicomotor y/o cuestionarios de autoinforme y escalas de somnolencia).

Las relaciones directas entre las medidas de ensayo y los riesgos para tareas operativas específicas no se han establecido ampliamente. Sin embargo, las mediciones objetivas, como las disminuciones en el rendimiento de las pruebas, se consideran buenos indicadores de factores que aumentarán la probabilidad relativa de riesgos de error para una amplia gama de tareas.

Esencialmente, los modelos biomatemáticos de fatiga hacen la suposición tácita de que los cambios en los niveles de fatiga serán paralelos a cambios similares en el riesgo, pero la evidencia muestra, sin embargo, que la mayoría de los accidentes parecen ocurrir mientras el trabajador está despierto y están vinculados con respuestas lentas o inapropiadas en lugar de una falta total de respuesta.

Obviamente, no se trataría solamente de estar alerta, sino en condiciones neurocognitivas suficientes, y el PVT (Psychomotor Vigilance Task) no parece ser suficientemente sensible para tal definición. No es comparable accionar un botón ante un estímulo sonoro o vibratorio a comprender y decidir sobre procedimientos y situaciones esperables o inesperadas.

Los modelos pueden utilizarse eficazmente para comparar los efectos relativos de dos o más horarios de trabajo, pero no pueden responder definitivamente, por sí solos, a la pregunta de si un horario de trabajo en particular es aceptable o seguro.

Una razón obvia para esta falla es que el nivel de fatiga o riesgo que se considera aceptable dependerá claramente de los peligros asociados con la operación. Lo que puede ser un nivel aceptable de riesgo de fatiga en relación con un operador de fumigación de cultivos agrícolas podría ser totalmente inaceptable en el contexto de la operación de un gran avión de pasajeros en una línea aérea.

Hay dos líneas de evidencia que sugieren que los modelos biomatemáticos pueden subestimar enormemente el riesgo, simplemente porque consideran solo los efectos agudos de los horarios de trabajo y no los crónicos, o lo hacen por períodos determinados de tiempo.

Cho et al. (2000) identificaron déficits de rendimiento cognitivo y niveles más altos de cortisol en la tripulación de cabina de la aerolínea con más de tres años de experiencia de vuelo, en comparación con un grupo emparejado de tripulación de tierra que trabaja para la misma compañía.

En un estudio posterior, Cho (2001) comparó dos grupos de tripulantes de cabina de aerolíneas con diferentes períodos de recuperación de *jet lag* (arritmia circadiana) y encontró que los intervalos de recuperación cortos (≤ 5 días) se asociaron con una variedad de síntomas que incluyen un menor rendimiento cognitivo, niveles más altos de cortisol salival (relacionados con el estrés psicológico) y un volumen más pequeño del lóbulo temporal derecho.

Los hallazgos indicaron un efecto acumulativo de la exposición crónica a la alteración circadiana en la función cognitiva y en las estructuras cerebrales subyacentes.

Del mismo modo, Rouch et al. (2005) informaron un estudio transversal de una gran muestra de trabajadores industriales masculinos en la que encontraron déficits cognitivos entre los que habían estado expuestos al trabajo por turnos rotativos, en comparación con aquellos sin exposición. También informaron una disminución en el rendimiento de la memoria relacionada con la duración de la exposición al trabajo por turnos rotativos. Estos efectos fueron independientes de la edad autoinformada y la calidad del sueño, lo que sugiere que la exposición crónica a la desincronización circadiana influye en las deficiencias cognitivas observadas.

Limitación de los modelos: variabilidad individual

Una limitación importante de los modelos biomatemáticos de fatiga es que generalmente se han basado en calificaciones de fatiga promedio y otras medidas obtenidas de un número limitado de individuos. En muchos casos, estos individuos han sido estudiantes universitarios o personal militar y no está claro si sus resultados pueden

generalizarse válidamente. Los individuos difieren entre sí en una gama enormemente amplia de factores, muchos de los cuales pueden afectar sus niveles de fatiga y rendimiento de seguridad.

En su defensa, algunos de los modelos proporcionan intervalos de confianza asociados con cada valor predicho, lo que permitiría una estimación del rango probable entre individuos. A esta variabilidad individual se suma la variabilidad temporal en el mismo sujeto.

También hay una amplia gama de problemas de salud individuales que producen, entre otros, trastornos del sueño. Se identificaron cinco tipos de trastornos del sueño que podrían generar fatiga y afectan a la seguridad, a saber: insomnio, narcolepsia, síndrome de apnea obstructiva del sueño, trastorno del movimiento periódico de las extremidades y síndrome de piernas inquietas.

Otras alteraciones psicofísicas, como la rinitis, los dolores articulares y las migrañas, pueden comprometer el sueño y/o elevar la sensación de fatiga durante el día.

Finalmente, está claro que hay una amplia gama de otros factores relacionados con el individuo que pueden influir en la calidad y duración de su sueño. Ser despertado por niños pequeños, tener un largo viaje hacia y desde el trabajo, un segundo trabajo o pasatiempo extenuante o que consuma mucho tiempo, o sufrir estrés en la vida debido a problemas como el duelo, la mudanza, la enfermedad de un familiar o el divorcio.

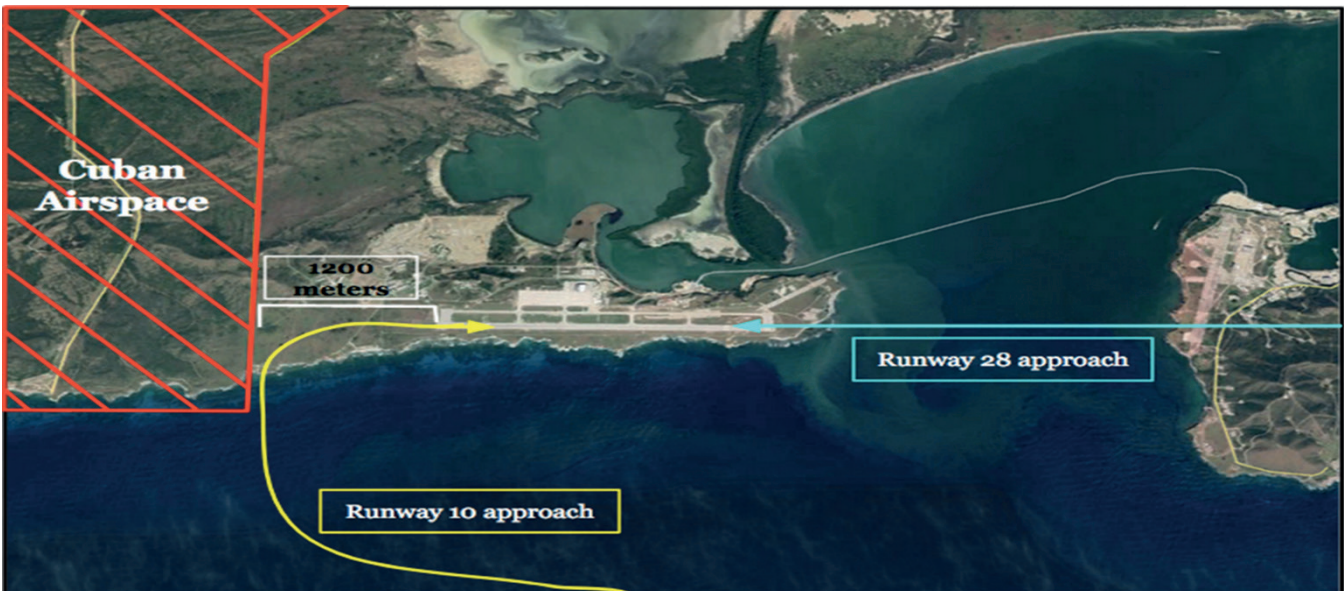
Ejemplos de Investigaciones de siniestros vinculados con la fatiga operacional

Mucho antes del desarrollo de los primeros modelos biomatemáticos, un intento temprano de calcular el riesgo de fatiga fue aplicado por expertos de la NASA que ayudaron en la investigación del accidente de agosto de 1993 del vuelo 808 controlado en el terreno (CFIT) de la AIA en la bahía de Guantánamo, Cuba (National Transportation Safety Board, 1994; Rosekind et al., 1994).

La investigación de la National Transportation Safety Board (NTSB) determinó que las causas probables de este accidente CFIT incluían "el deterioro del juicio, la toma de decisiones y las habilidades de vuelo del capitán y de la tripulación de vuelo debido a los efectos de la fatiga" (NTSB, 1994: v).

La grabadora de voz de la cabina reveló que la tripulación de vuelo había decidido aterrizar en la pista 10 sin razones fundamentadas, y planeaba dar la vuelta y aterrizar en la pista 28 si fallaba. Durante la aproximación a la pista 10, el controlador de tránsito aéreo le recordó a la tripulación que debía permanecer dentro del espacio aéreo americano, señalado por una luz estroboscópica montada en la valla fronteriza cubana. Desconocido para el controlador, esta luz estroboscópica no funcionaba el día del accidente.

El capitán y la tripulación se obsesionó con tratar de localizar la luz estroboscópica, lo que lo llevó a comenzar el giro demasiado tarde y no pudo mantener su velocidad aerodinámica durante el giro pronunciado, a pesar de las advertencias de los otros miembros de la tripulación.



Después de haber iniciado servicio a la medianoche, el capitán había estado despierto de manera ininterrumpida 23,5 horas, el primer oficial durante 19 horas y el ingeniero de vuelo durante 21 horas en el momento del accidente.

Una mirada retrospectiva a los patrones de sueño de los miembros de la tripulación en las 72 horas anteriores al accidente reveló que los tres habían acumulado una gran deuda de sueño por trabajar en turnos largos.

En los tres días previos al accidente, el capitán había dormido un total de 15 horas, el primer oficial durante 18 horas y el ingeniero de vuelo 21,5 horas.

La mayoría de los turnos de la tripulación se hacían de noche, lo que les obligaba a intentar dormir durante el día, e interrumpía así su ritmo circadiano. Esto agravó los efectos del cansancio en la tripulación, y se observó que el capitán en particular padeció varios síntomas: el deterioro del juicio con su decisión de aterrizar en la pista 10, la percepción cognitiva inducida al tratar de localizar la luz estroboscópica que no estaba en funciones, la mala comunicación con su tripulación sobre su velocidad aerodinámica y su lento tiempo de reacción para recuperarse de la entrada en pérdida.

Otros factores citados que contribuyeron al accidente de la bahía de Guantánamo fueron el incumplimiento de las regulaciones de vuelo y tiempo de servicio aplicadas a 14 CFR, Parte 121, Transportista Aéreo Suplementario, Operaciones Internacionales, las circunstancias que resultaron en la extensión de las horas de vuelo/servicio y la fatiga de la tripulación de vuelo.

Para evaluar la contribución de la fatiga a este accidente, se calculó la deuda acumulada de sueño para los tres miembros de la tripulación, utilizando una proporción simple de vigilia/sueño, que se comparó con una línea de base habitual.

Desde entonces, se han calculado los niveles probables de riesgo de fatiga para los miembros de la tripulación involucrados en numerosos incidentes y accidentes de aviación, y en los últimos años, tanto los operadores como las agencias de investigación han empleado modelos biomatemáticos para ayudar con estos cálculos.

Otro caso más reciente es el vuelo Air Canada 759

La NTSB determina que la causa probable de este incidente fue la identificación errónea por parte de la tripulación de vuelo de la pista de rodaje C como la pista de aterrizaje prevista, que resultó de la falta de conocimiento de los miembros de la tripulación sobre el cierre de la pista paralela debido a su revisión ineficaz de la información de NOTAM antes del vuelo y durante la sesión informativa de aproximación.

Contribuyeron al incidente la incapacidad de la tripulación de vuelo para ajustar la frecuencia ILS para la guía lateral de respaldo, el sesgo de expectativa, la fatiga debido a la interrupción circadiana, la duración de la vigilia continua, y las fallas en el CRM.

Los miembros de la tripulación de vuelo informaron que comenzaron a sentirse cansados justo después de navegar a través de un área de tormentas eléctricas, que los datos de radar indicaron que era alrededor de las 21:45 (00:45 hora de verano del este [EDT]). El incidente ocurrió alrededor de las 23:56, que eran las 02:56 EDT de acuerdo con la hora normal del reloj biológico de la tripulación de vuelo; por lo tanto, parte del vuelo incidente ocurrió durante un momento en que la tripulación de vuelo normalmente habría estado dormida (según las entrevistas posteriores al incidente) y en un momento que se aproxima al inicio del período circadiano bajo humano descrito en la información de fatiga de Air Canada (en este caso, de 03:00 a 05:00 EDT). Además, en el momento del incidente, el capitán había estado despierto durante más de 19 horas, y el primer oficial había estado despierto durante más de 12 horas. Por lo tanto, el capitán y el primer oficial estaban fatigados durante el vuelo del incidente.

Varios modelos biomatemáticos se han propuesto para apoyar la investigación de incidentes/accidentes al evaluar la contribución potencial de la fatiga relacionada con el horario a los eventos de seguridad (por ejemplo, FAID: Fatigue Assessment Tool by Interdynamics) o analizar el nivel de fatiga de una persona en un momento específico basado en el análisis de su sueño anterior (por ejemplo, SAFE: System for Air crew Fatigue Evaluation).

Sin embargo, es importante señalar que la aplicación de esos modelos para la identificación y el análisis *post hoc* para ayudar a determinar el papel de la fatiga como factor que contribuye a los incidentes y accidentes de aviación

debe llevarse a cabo con gran cautela dada la variabilidad individual y la carencia de las mediciones *in situ* e *in vivo* del desempeño.

El pensamiento sistémico contemporáneo sobre la investigación y el análisis de la seguridad reconoce que las interacciones complejas entre numerosos factores contribuyen a la mayoría de los sucesos de seguridad.

Si bien puede ser posible identificar el potencial de la existencia de fatiga de la tripulación y la disminución de rendimiento relacionadas utilizando tales modelos después de un evento, es problemático establecer un vínculo denitivo o basado en la evidencia entre la fatiga y el evento específico.

Aislar la fatiga de los numerosos otros factores que pueden haber contribuido a un evento, y luego probar su contribución, puede no ser posible.

La validación de esta aplicación potencial de modelos biomatemáticos también es particularmente difícil en el dominio de la aviación, donde las tasas de accidentes son generalmente bajas, y puede ser difícil, lento y costoso medir el desempeño *in situ* del personal operativo. Esta situación genera las siguientes discordancias, que se describen a continuación:

- No contemplan la tarea ni sus variables como generadoras de fatiga.
- No contemplan la variación individual humana.
- Generan la ilusión de la precisión de datos no validados con la experiencia operativa.
- Utilizan test cognitivos de alerta inmediata que resultan insuficientes para contemplar los procesos de tomar decisiones dinámicas en una actividad compleja como la aviación u otras industrias complejas hoy llamadas de alta confiabilidad.
- Aplican modelos de medición y análisis cuantitativos al desempeño sometido a múltiples fenómenos cualitativos como es el ser humano en la mayoría de sus aspectos.
- No relacionan el pico mínimo del ritmo circadiano que parece anteceder a la peor situación de la fatiga.
- No contemplan los componentes crónicos de la fatiga y su impacto en la salud.
- No contemplan el contexto.
- La actigrafía registra falta de movimiento, no calidad del sueño REM-NO REM.
- Se arman con procesos de laboratorio y consultas de respuesta subjetiva a poblaciones no necesariamente similares a los destinatarios.
- No miden la fatiga, solo se reer en al sueño y no contemplan la calidad de la alerta.
- No reciben información de evaluaciones de desempeño en tiempo real y su vinculación con las tareas.

CONCLUSIONES

La fatiga operacional constituye la primera y más importante causa de incapacitación velada no evidente en vuelos. Degrada la capacidad para responder e incrementa el error, la omisión inadvertida. Un individuo fatigado va a tener problemas. Los estudios más modernos sobre sueño y fatiga aportan un abundante material científico para sacar del abstracto un tema tan concreto, y muchas veces considerado como una excusa o como de segundo nivel en la ocurrencia de siniestros no deseados. Vemos que la creencia de que la adrenalina que se desprende en el organismo frente a una emergencia efectivamente va a despertar al operador aun cuando esté muy cansado o fatigado es cierto solo en forma parcial: estar con los ojos abiertos o simplemente despierto no significa tomar las decisiones correctas.

Se han descrito las distintas metodologías de investigación y también su inclusión progresiva en las regulaciones de la Organización de Aviación Civil Internacional, y de las autoridades aeronáuticas de los países contratantes, describiendo las particularidades evolutivas que van teniendo.

Finalmente, la puja competitiva entre las corporaciones y fusiones de las líneas aéreas determinan un riesgo mayor al riesgo natural de las operaciones aeronáuticas, que en esta etapa de la aviación reside fundamentalmente en los factores humanos de las tripulaciones a las que tienden a presionar con el único objeto de bajar costos, muchas veces sin medir las consecuencias.

Tildadas como poco probables siempre pueden ser catastróficas. Esta puja entre la eficiencia y la seguridad hace que hoy se realicen operaciones en condiciones límite desde estos puntos de vista, y alertamos sobre la necesidad de preservar y proteger de estas presiones de la industria sobre las limitaciones humanas que, como se denominan, son condiciones fisiológicas que sufren agotamiento y modifican las conductas sin tener que ver con los valores monetarios que se puedan ahorrar.

Al comienzo de este artículo decíamos que las referencias de este trabajo estaban dirigidas a la actividad de las líneas aéreas principalmente. Queremos expresar nuestra profunda preocupación por lo que ocurre en la aviación general, ya que, si bien no contamos con tantos registros disponibles de calidad como en las líneas, todo lo expuesto resulta aplicable y los mismos operadores se reanuda en a sus contextos operacionales como salvajes. Sería muy importante implementar sistemas de gestión de riesgo de los estados maduros que permitan evitar condiciones poco seguras con consecuencias potenciales no solo en la operación misma, sino en los individuos involucrados.

Referencias Bibliográficas

Australian Civil Aviation Safety Authority. (2014). *Biomathematical Fatigue Models Guidance*. Document Summary.

Belenky, G., Wesensten, N. J., Thorne, D. R., Thomas, M. L., Sing, H. C., Redmond, D. P., Russo, M. B., & Balkin, T. J. (2003). Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: a sleep dose-response study. *Journal of Sleep Research*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.2003.00337.x>

Gander, P. H., Rosekind, M. R., & Gregory, K. B. (1998). *Flight crew fatigue VI: a synthesis*. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(9 Suppl), B49-60.

Gander, P., Hartley, L., Powell, D., Cabon, P., Hitchcock, E., Mills, A., & Popkin, S. (2011). Fatigue risk management: Organizational factors at the regulatory and industry/company level. *Accident; Analysis and Prevention*, 43(2), 573-590. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.11.007>

Gander, Philippa H. (2003). *Sleep in the 24-hour society*. Open Ming Publishing.

International Civil Aviation Organization (2011). *Fatigue Risk Management Systems: Manual for Regulators* (Doc. 9966).

Muhm, J. M., Signal, T. L., Rock, P. B., Jones, S. P., O'Keefe, K. M., Weaver, M. R., Zhu, S., Gander, P. H., & Belenky, G. (2009). Sleep at simulated 2438 m: Effects on oxygenation, sleep quality, and postsleep performance. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 80(8), 691-697. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2327.2009>

Redline, S., Kirchner, H. L., Quan, S. F., Gottlieb, D. J., Kapur, V., & Newman, A. (2004). The effects of age, sex, ethnicity, and sleep-disordered breathing on sleep architecture. *Archives of Internal Medicine*, 164(4), 406-418. <https://doi.org/10.1001/archinte.164.4.406>

Rosekind, M., Graeber, R., Dinges, D., Connell, L., Michael, Spinweber, C., & Gillen, K. (1994). *Crew factors in flight operations 9: Effects of planned cockpit rest on crew performance and alertness in long-haul operations*. NASA Ames research Center.

Rupp, T. L., Wesensten, N. J., Bliese, P. D., & Balkin, T. J. (2009). Banking sleep: realization of benefits during subsequent sleep restriction and recovery. *Sleep*, 32(3), 311-321. <https://doi.org/10.1093/sleep/32.3.311>

Signal, T. L. (2004). *Sleep in flight during long rest opportunities*. PH Van den Berg M, 34.

Signal, T. Leigh, Gale, J., & Gander, P. H. (2005). Sleep measurement in flight crew: comparing actigraphic and subjective estimates to polysomnography. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 76(11), 1058-1063.