

# Tareas preventivas para mejorar la confiabilidad del sistema de acondicionamiento de aire en una aeronave

## Preventive tasks for improving aircraft's environmental control system reliability

Néstor Viego Ariet<sup>1</sup>, Julio Abril Romero García<sup>2</sup>, Armando Díaz Concepción<sup>3</sup>, Jesús Cabrera Gómez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo Aeronáutico de Mantenimiento, La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Corporación de la Aviación Cubana (CACSA), La Habana, Cuba

<sup>3,4</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: nestor.ariet@cubana.avianet.cu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional



Recibido: 23 de abril del 2017      Aprobado: 15 de junio del 2017

### Resumen

La investigación se realizó en una empresa de aviación y se basó en los resultados obtenidos previamente durante la evaluación de los elementos integrantes de la confiabilidad operacional para el sistema de acondicionamiento de aire de una aeronave. El objetivo de la investigación consistió en definir tareas preventivas como respuesta a la baja confiabilidad del sistema de acondicionamiento de aire y sus activos, fundamentada en un análisis de modos de fallo y sus efectos (AMFE) y análisis de Weibull. Los resultados obtenidos demuestran que la solución es técnicamente eficaz y sostenible para disminuir los tiempos de indisponibilidad de los activos con mayor incidencia.

Palabras claves: mantenimiento proactivo, industria aeronáutica, confiabilidad operacional

### Abstract

The research was carried out in an aviation company and was based on the results previously obtained during the evaluation of the elements of operational reliability for the air conditioning system of an aircraft. The objective of the research was to define preventive tasks in response to the low reliability of the air conditioning system and its assets, based on a Failure Mode Analysis and its Effects (AMFE) and Weibull analysis. The results obtained show that the solution is technically efficient and sustainable to reduce the unavailability times of the assets with the highest incidence.

Key words: proactive maintenance, aeronautical industry, operational reliability

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se continuó la investigación realizada en la actividad de mantenimiento en una empresa de aviación [1], donde se evaluaron los indicadores de cada elemento integrante de la confiabilidad operacional en el sistema de acondicionamiento de aire de un tipo de aeronave, para facilitar la toma de decisiones y mejorar la gestión del mantenimiento. Se definieron tareas con un enfoque preventivo, basadas en la confiabilidad operacional, para disminuir los tiempos de indisponibilidad de los activos con mayor incidencia del sistema de acondicionamiento de aire, para lo cual se utilizó un AMFE [2-4] y los parámetros de la distribución de Weibull [5-7]. En el estudio se identificaron los fallos funcionales que presentan los activos en el momento de cumplir su función y los modos de fallos que lo causan, demostrándose, que el mantenimiento proactivo, aplicando tareas de restauración programada es una solución técnicamente eficaz y sostenible para disminuir los tiempos de indisponibilidad de los activos del sistema estudiado, pues para cada activo se pudo determinar la vida útil del elemento y establecer una zona de desgaste acelerado.

El objetivo de la investigación consistió en definir tareas preventivas como respuesta a la baja confiabilidad del sistema de acondicionamiento de aire y sus activos, fundamentada en un análisis de modos de fallo y sus efectos (AMFE) y análisis de Weibull.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el procesamiento y elaboración de los análisis se obtuvo de los reportes de tripulación y mantenimiento, y de los programas especializados donde se almacenan los datos sobre el comportamiento de cada sistema de la aeronave durante su operación.

La función de diseño de cada activo, el análisis funcional, modos de fallo y sus efectos fueron definidos teniendo en cuenta el *Manual de Mantenimiento de la Aeronave*, en su referente al sistema de acondicionamiento de aire, donde se encuentra una detallada descripción.

Al tener una muestra de los datos necesarios se realizó inicialmente una prueba de bondad de ajuste utilizando el programa de análisis StatGraphics versión 5.1, comprobando que estos siguen una distribución de Weibull. Por lo que la valoración de la función supervivencia se realizó utilizando la ecuación 1.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

donde:

$\alpha$ : Escala de Weibull.

$\beta$ : Forma o pendiente de Weibull.

$t$ : Parámetro tiempo.

Posteriormente, se determinó el punto de probabilidad condicional de falla y la vida útil para cada activo. Se estableció como criterio que el 10 % de porcentaje acumulado sería el punto límite para la cantidad de horas a partir de la cual la tasa de fallas se incrementa.

Se comprobó la vida útil de cada activo para demostrar que la mayor parte de los fallos ocurren a partir de este valor, establecer frecuencias de mantenimiento y elaborar los planes de revisión, reparación o remplazo de los de aquellos activos que han finalizado su vida útil.

El AMFE se empleó como fundamento para realizarlos cambios en el programa de mantenimiento de los activos [8] e incluyó la confección de los siguientes documentos:

1. Hoja de información, con las funciones que cumple los distintos activos del sistema, sus modos de fallas y efectos de los fallos funcionales.
2. Hoja de decisión, para evaluar las consecuencias de los fallos, enfatizando en su impacto.
3. Salidas del proceso, para establecer las tareas y los ejecutantes de las mismas.

El diagrama metodológico del modelo de gestión del mantenimiento se muestra en la figura 1 y fue desarrollado con referencia a lo establecido por las normas SAE JA-1011/1012 [9].

Los elementos del proceso de planificación se consideraron a partir del número de horas en que la tasa de fallo se incrementó. Estos valores se ajustaron a las formas de mantenimiento de la aeronave y requirió decidir cuáles activos eran los más susceptibles, así como calcular los recursos necesarios para aplicar las tareas preventivas. La frecuencia de ejecución de las tareas se seleccionó de forma que fuera posible ejecutarlas en la práctica [10].

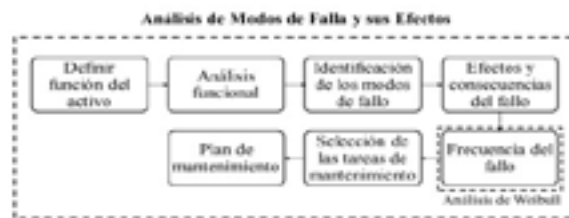


Fig. 1. Gestión del mantenimiento aplicando el análisis de modos de falla y sus efectos

Se estableció que en el caso de los modos de fallo con consecuencias operacionales las acciones serán sostenibles si en un período de tiempo dado, su costo era menor que la consecuencia más el costo de reparación de los fallos que se estaban evitando y para los modos de fallo con consecuencias no operacionales la tarea preventiva iba a ser sostenible si su costo era menor que el costo de reparación [11, 12].

Para mostrar las posibilidades del estudio, se seleccionó el subsistema de extracción de aire, pues durante el período 2014 – 2016 de un total de 107 fallos confirmados en el sistema de acondicionamiento de aire, el 69 % sucedieron durante la extracción de aire desde los motores, como se precisa en la tabla 1.

Tabla 1. Cantidad de fallos en los el sistemas de aire acondicionado

Subsistema	Cantidad de fallos	%
Extracción de aire	74	69
Distribución	26	24
Enfriamiento	7	7
Total	107	100

#### Análisis funcional del subsistema de extracción de aire

En la figura 2 se muestra un diagrama del sistema de acondicionamiento de aire. La aeronave, para realizar la extracción de aire cuenta con 4 subsistemas idénticos, que operan en paralelo. La extracción de aire caliente se realiza desde la séptima etapa de compresión de cada uno de los motores de manera independiente y después pasa al subsistema de enfriamiento. Las tuberías y activos que forman parte del mismo están localizados en zonas no presurizadas de la aeronave, donde la proporción de aire es regulada a través de válvulas mezcladoras, sensores y elementos de control electrónicos.

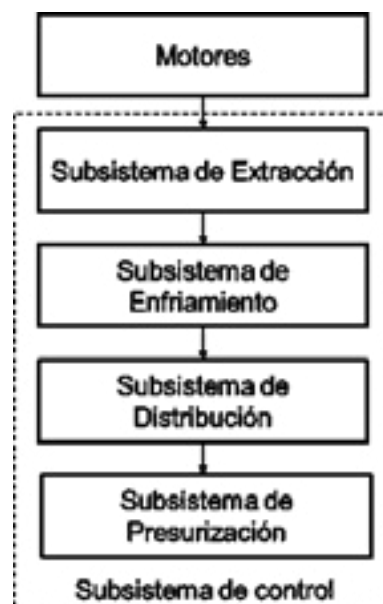


Fig. 2. Subsistemas integrantes del sistema de acondicionamiento de aire

En la tabla 2 se muestran algunos datos significativos que debe cumplir el subsistema de extracción de aire durante su operación.

Tabla 2. Datos técnicos de operación del subsistema de extracción de aire

Descripción	Valor
Volumen de la cabina presurizada	900 m <sup>3</sup>
Cantidad total de aire suministrado durante la etapa crucero a la cabina desde los 4 motores	
Condiciones normales:	(10 000 ± 600) kg/h
Modo económico:	(7 400 ± 740) kg/h
Fugas de aire tolerables (sin señales de advertencias)	< (450 ± 150) kg/h
Distribución normal de aire (ventilación y calefacción) entre los consumidores durante la etapa crucero con los 4 motores)	
Compartimiento de vuelo	800 kg/h
Cabina delantera de pasajeros	1 160 kg/h
Cabina principal de pasajeros	2 500 kg/h
Cabina trasera de pasajeros	1 620 kg/h
Cocina	230 kg/h
Baños	130 kg/h

Tomando como referencia los datos de la tabla 2, se definieron las funciones de cada activo según el nivel de rendimiento establecido.

Válvula de control de flujo: controla el flujo durante la extracción de aire desde la VII etapa del compresor de alta presión de los motores sea de 2 500 ± 150 kg/h en condiciones normales de operación y 1 850 ± 185 kg/h en modo económico.

Intercambiador de calor aire-aire: disminuye la temperatura del flujo de aire extraído desde la VII etapa del compresor de alta presión de los motores a 250 ± 5 °C.

Válvula de control de temperatura en línea aire caliente: controla que la temperatura del flujo de aire a la salida del intercambiador aire-aire sea de 200 ± 10 °C.

Transmisor de la presión de aire del regulador de flujo de canal: mide la presión del flujo de aire en el canal en un rango de 0–5 kg/cm<sup>2</sup> y entrega una señal eléctrica de corriente continua proporcional a esa presión.

Transmisor diferencial de presión del regulador de flujo de aire: sensa la diferencia de presión entre la entrada y salida del regulador del flujo de aire en un rango de 0–0,16 kg/cm<sup>2</sup> y entrega una señal eléctrica proporcional a esa presión.

Sensor de la temperatura del flujo de aire: detecta la temperatura del flujo de aire en el canal antes que pase al subsistema de enfriamiento y entrega una señal eléctrica de corriente continua proporcional a esa temperatura, en un rango de trabajo de -60 °C a 250 °C.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los índices de confiabilidad se determinaron mediante la ecuación 1 y los valores obtenidos para cada activo se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de confiabilidad de cada activo del subsistema de extracción de aire

Agregados	Parámetro $\beta$	Parámetro $\alpha$	R(t)	R(t) %
Intercambiador de calor aire – aire	6,208 41	11 092,7	0,524	52,4
Válvula de control de flujo	3,493 62	10 157,4	0,502	50,2
Válvula de control temperatura línea aire caliente	3,104 48	10 107,8	0,476	47,6
Transmisor de la presión de aire del regulador de flujo de canal	6,134 74	10 678,3	0,516	51,6
Transmisor diferencial de presión del regulador de flujo de aire	3,341 92	12 150,6	0,495	49,5
Sensor de la temperatura del flujo de aire	4,559 63	10 983,5	0,547	54,7

Se puede observar en la tabla 3 que los valores de  $\beta$  ( $\beta > 2$ ) son típicos para activos con una probabilidad de fallo creciente. Los valores de confiabilidad son aproximadamente de un 50 %, lo que está por debajo de los estándares que se exige en la industria aeronáutica. El activo de menor confiabilidad fue la válvula de control de temperatura de la línea de aire caliente con 47,6 % y el de mayor confiabilidad fue el sensor de la temperatura del flujo de aire con 54,7 %.

Considerando que en el análisis de Weibull el parámetro  $\beta$  describe el grado de variación de la tasa de fallos, los valores obtenidos indican que las fallas en los activos más críticos responden a un patrón de falla como se muestra en la figura 3. La evaluación del parámetro  $\beta$  en las válvulas de control de flujo y de control de la temperatura de la línea de aire caliente y el transmisor diferencial de presión del regulador de flujo de aire, en los que se cumple que  $1 < \beta < 4$ , indica, que existen fallas de modo mecánico y en los activos donde  $\beta > 4$  implica que hay deterioro rápido por edad de uso. Ambos criterios coinciden que hay un desgaste de los elementos por una disminución constante de su resistencia lo que ocasiona los fallos funcionales de los activos mencionados y que además tienen un punto donde hay un incremento rápido de la probabilidad condicional de falla.



Fig. 3. Patrón de falla de los activos del subsistema de extracción de aire

En la figura 4 se pueden observar los valores de probabilidad condicional de fallo obtenidos para la válvula de control de flujo. El punto límite del 10 % de porcentaje acumulado de la distribución acumulativa de Weibull, corresponde con 5 333 h, considerando que la forma de mantenimiento planificado más próxima a este valor sería 6 000 h, se demuestra que solo en 3 ocasiones que el activo ha presentado fallos no se ha alcanzado este límite de horas, por lo que la supervivencia del activo garantiza que en el momento que la tasa de fallas se incrementa, se hayan tomado acciones para restaurar a la condición inicial. Este tipo de análisis se realizó en cada uno de los activos que componen el subsistema para establecer relaciones entre los ciclos de vida y los modos de falla.

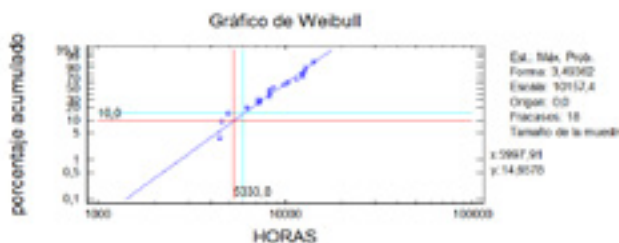


Fig. 4. Gráfico de probabilidad Weibull de la válvula de control de flujo

Con la información recopilada se definieron once fallos funcionales que presentan los activos en el momento de cumplir su función.

1. No hay extracción de aire desde la VII etapa del compresor de alta presión de los motores.
2. La cantidad de aire suministrado durante la etapa crucero es menor a  $2\,500 \pm 150$  kg/h en condiciones normales de operación y  $1\,850 \pm 185$  kg/h en modo económico.
3. No se enfría el flujo de aire extraído desde la VII etapa del compresor de alta presión de los motores.
4. La temperatura del flujo de aire es mayor a  $250 \pm 5$  °C.
5. No hay control de la temperatura del flujo de aire a la salida del intercambiador aire-aire.
6. La temperatura del flujo de aire es mayor a  $250 \pm 5$  °C.
7. No hay medición de la presión de aire en el canal.
8. No se envía una señal eléctrica de corriente continua proporcional a la presión  $0-5$  kg/cm<sup>2</sup>.
9. No se comprueba el diferencial de presión entre la entrada y salida del regulador del flujo de aire.

10. No se envía una señal eléctrica de corriente continua proporcional al diferencial de presión de 0–0.16 kg/cm<sup>2</sup>.

11. No se envía una señal eléctrica de corriente continua proporcional al rango de trabajo de -60 °C a 250 °C.

Para los fallos funcionales anteriores se identificaron veinticinco modos de fallos, relacionados con la pérdida en la capacidad que tienen algunos elementos de los activos:

- Intercambiador de calor aire – aire: rotura de la placa tubular que contiene los tubos de transferencia de calor; corrosión en los tubos de transferencia de calor; suciedad en el flujo de aire.

- Válvula de control temperatura línea aire caliente: tubo capilar del bulbo sensor de temperatura roto; vástago de la válvula trabado por corrosión; ángulo de fijación del bulbo sensor incorrecto; bulbo sensor instalado en posición incorrecta; elementos de fijación del bulbo sensor flojos.

- Transmisor de la presión de aire del regulador de flujo de canal: rotura de la membrana sensitiva; vástago para el desplazamiento de la membrana trabado; no hay alimentación eléctrica para el funcionamiento de los elementos electrónicos; fallo del conversor electrónico de la señal.

- Transmisor diferencial de presión del regulador de flujo de aire: no hay alimentación eléctrica para el funcionamiento del señalizador diferencial; resorte que desplaza el elemento sensible del señalizador trabado; contactos gastados; suciedad en los elementos fijo y móvil del mecanismo de contacto; resorte del contacto con fallo por fatiga.

- Sensor de la temperatura del flujo de aire: rotura del alambre de platino que se emplea como elemento sensitivo; resistencia eléctrica del elemento termosensible fuera de parámetros.

Se utilizó una hoja de decisión, para evaluar las consecuencias de los fallos, enfatizando en su impacto y establecer las tareas de mantenimiento, su frecuencia y quien las ejecuta.

Al realizar la evaluación de las consecuencias de los fallos se comprobó que ninguno constituye un riesgo para la seguridad y el medio ambiente, pues no existen evidencias en los registros oficiales que así lo demuestren, por tanto, las afectaciones son únicamente operacionales y su impacto tiene lugar durante la salida de los vuelos, el tiempo de parada por cada fallo, así como en los costos de operación y la calidad en el servicio que se brinda a los clientes.

La aplicación de este proceso proporcionó las bases para decidir si el mantenimiento proactivo es sostenible en cada caso, debido a que las consecuencias son solo del orden operacional, las tareas preventivas propuestas serán factibles si en un período de tiempo dado, su costo es menor que el de las consecuencias operacionales más el costo de reparación del fallo.

Una suposición importante que se asumió durante el enfoque preventivo es que las tareas de revisión, restauración o sustitución de elementos restablece la condición inicial del activo sin efectos colaterales.

La propuesta para la gestión de los modos de falla se basó en el mantenimiento proactivo, aplicando tareas de restauración programada para cada uno de los activos en los servicios programados según se expone en la tabla 4.

Tabla 4. Tareas de mantenimiento preventivo

Activo	Tarea de mantenimiento	
	Descripción	Frecuencia (h)
Válvula de control de flujo	Sustituir los carbones del actuador electrónico	1 000
	Sustituir el limitador de posición del actuador electrónico	3 000
	Lubricar los cojinetes del actuador electrónico	1 000
	Lubricar los cojinetes del actuador electrónico	1 000
	Limpiar los carbones del actuador electrónico	250
	Sustituir los cojinetes del actuador electrónico	2 000
	Sustituir los cojinetes de la válvula	2 000
Intercambiador de calor aire – aire	Inspeccionar condición técnica del intercambiador de calor aire - aire	6 000
Válvula de control temperatura línea aire caliente	Inspeccionar condición técnica de la válvula de control temperatura línea aire caliente	3 000
Transmisor de la presión de aire del regulador de flujo de canal	Inspeccionar condición técnica del transmisor de presión	1 000
Transmisor diferencial de presión del regulador de flujo de aire	Inspeccionar condición técnica del transmisor diferencial de presión	2 000

En el caso específico del sensor de la temperatura del flujo de aire no fue posible encontrar una tarea preventiva técnicamente factible por lo que se optó implementar una tarea alternativa de trabajo hasta el fallo.

Atendiendo a los resultados obtenidos, se recomendó la implementación de un plan de mantenimiento proactivo aplicando tareas de restauración cíclica a los activos, el cual debe ser incorporado en las formas de mantenimiento periódico según se establece en los manuales y recomendaciones del fabricante de la aeronave y las autoridades aeronáuticas. Además, se debe desarrollar un programa de capacitación del personal según los niveles de la organización, con el fin de establecer un sistema de mantenimiento basado en la confiabilidad operacional que permita realizar todas o la mayor parte de las reparaciones en los talleres nacionales. Finalmente, se deben realizar diagnósticos periódicos a las acciones implementadas.

## CONCLUSIONES

Se demostró que si se identifica la edad en la que los activos exhiben un rápido incremento en su probabilidad de fallo, conviene implementar tareas de restauración o sustitución programadas.

Se evidenció que las tareas de mantenimiento cíclicas son modificadas según las interacciones entre los ciclos de vidas y los modos de falla de los sistemas

## REFERENCIAS

1. Díaz Concepción A, Cabrera Gómez J, Viego Ariet N, et al. Estudio de confiabilidad operacional como soporte al mantenimiento aeronáutico en Cuba. *Revista Ingenierías*. 2015;28(66):6-11.
2. Hernández PI, Carro M, Montes de Oca J, et al. Optimización del mantenimiento preventivo utilizando las técnicas de diagnóstico integral. *Fundamento teórico práctico. Ingeniería Energética*. 2008;29(2):24-32.
3. Aguilar Otero JR. Análisis de modo de fallas, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia y Educación*. 2010;25(1):15-26.
4. Stamatis DH. *Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution*. Wisconsin, USA: ASQ-American Society of Quality; 1995.
5. Abbas P, Gholam A, Mansour S. Inferencia para la distribución Weibull basada en datos difusos. *Revista Colombiana de Estadísticas*. 2013;36(2):337-56.
6. Martínez Fernández L. *Métodos de inferencia para la aplicación de la distribución de Weibull: aplicación en fiabilidad industrial*. Vigo, España: Universidad de Vigo; 2011. [Citado Disponible en: [https://eio.usc.es/pub/mte/descargas/Proyecto\\_613.pdf](https://eio.usc.es/pub/mte/descargas/Proyecto_613.pdf)]
7. Serrano JC. Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et Technica*. 2013;18(2).
8. Dhillon BS. *Maintenance and Reliability for Engineers*. London, England: CRC Press Taylor & Francis Group; 2006.
9. Moubray J. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-Centred Maintenance)*. Londres, Reino Unido: Aladon Ltd; 2004.
10. Benítez Montalvo RI, Díaz Concepción A, Cabrera Gómez J, et al. Assessment of components of operational reliability in walk-in freezer. *Ingeniería Mecánica*. 2016;19(2):78-84.
11. Marko E. *Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications*. New York, USA: Springer; 2011.
12. Nakagawa T. *Maintenance Theory of Reliability*. Londres, England: Springer-Verlag; 2005.