

Aviones disponibles y fiables en vuelo: el mantenimiento, factor clave

MARTIN CUESTA ALVAREZ
Ingeniero Aeronáutico

INTRODUCCION

LOS componentes de un sistema o equipo industrial en general, o aeronáutico en particular, ya sean equipos de a bordo de los sistemas funcionales de las aeronaves –hidráulico, neumático, eléctrico, alimentación de combustible, mandos de vuelo, tren de aterrizaje, sistema de armas– ..., o equipos de tierra, como los de control de la navegación aérea y las comunicaciones, están físicamente unidos entre sí, de muy diversas formas: en serie, en paralelo de distintos tipos de redundancia: total, parcial, o secuencial; son mantenibles, a veces, incluso funcionando el equipo, y automáticamente puede entrar en funcionamiento un componente, cuando otro de igual función ha fallado.

La fiabilidad de este tipo de configuraciones, se analiza siguiendo las leyes probabilísticas convencionales, (2 y 5); los modos aeronáutico y espacial, fueron pioneros en su aplicación, y continúan líderes ahora, tras su evolución con el tiempo (3, 7 y 8).

Pudiera pensarse que cuando no hay ligazón física, como puede ser entre un avión en vuelo y tierra, o entre un conjunto de aviones entre sí, aquellas leyes no podrían aplicarse; pues bien, analizando cuidadosamente el problema, los relés automáticos o los interruptores manuales, pueden sustituirse por operaciones de reparación o mantenimiento, considerando los tiempos de vuelo T, para el cálculo de la fiabilidad (probabilidad de no fallo), y los de mantenimiento t para la mantenibilidad (probabilidad de cumplimentar el mantenimiento), incluso, en casos justificados, considerar solo el tiempo de vuelo, cuando el de mantenimiento es mucho menor que aquel.

No solo para un avión son aplicables análisis de este tipo, sino también para un conjunto de aviones, puede abordarse el cálculo de su disponibilidad y la fiabilidad para su misión en vuelo, como exponemos a continuación, y cuyo objetivo es demostrar, tras su cuantificación numérica, la efectividad del Mantenimiento (6 y 9), y por extensión, la impor-

tancia de la Formación para el Mantenimiento (12).

DISPONIBILIDAD DE UN AVION Y FIABILIDAD PARA SU MISION DE VUELO

La disponibilidad de avión queda definida como la probabilidad de que esté listo para volar cuando alcanza

Cuadro 1 (Referencia a las figs. 1,2 y 3)
Datos para supuestos prácticos

λ .- tasa de fallos	μ .- tasa de mantenimiento
λ .- 0,025 fallos / hora	μ = 2 operaciones / hora
T.- tiempo de vuelo por misión	t.- tiempo en mantenimiento por misión
T= 3 horas	t= 0,75 horas
λ_2 .- tasa de fallos equivalentes	

Fig. 2 : $\lambda_2 = 2\lambda^2 / (3\lambda + \mu) = 6,024 \times 10^{-4} \text{ f / h}$

Fig. 3 : $\lambda_2 = \lambda^2 / (2\lambda + \mu) = 3,049 \times 10^{-4} \text{ f / h}$

Cuadro 2 (Referencia a la fig. 4)
Formulación y supuesto práctico
(con los mismos datos del Cuadro 1, para fig. 1).

• Fiabilidad (avión en vuelo o disponible por mantenimiento)

– a tiempo T : $P_0(T) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-\lambda T} = 98,87 \%$

– a largo plazo : $P_0(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = 98,76 \%$
(T $\rightarrow \infty$)

• Infiabilidad (con fallo en vuelo o no disponible por mantenimiento)

– a tiempo T : $P_1(T) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-\lambda T} = 1,13 \%$

– a largo plazo : $P_1(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = 1,24 \%$
(T $\rightarrow \infty$)

un tiempo de vuelo determinado, debido al efecto combinado de su fiabilidad funcional en vuelo y al de hacer el mantenimiento en un tiempo igual o menor que el máximo permisible de trabajo. Como indicamos en la Fig. 1, esta disponibilidad viene dada por la suma de la fiabilidad correspondiente al tiempo de vuelo, y el

de que ocurran una serie de fallos durante el tiempo de vuelo y que pudieran ser reparados por mantenimiento dentro del tiempo límite fijado, viene determinado por el producto de la ley de probabilidad de Poisson para esos fallos, por la probabilidad de que puedan ser reparados (pues son sucesos -matemáticamente hablando- in-

asegurada ésta, aún cuando falle uno, el conjunto tiene símil con un equipo de dos componentes en redundancia activa total, que funciona correctamente, en tanto no fallen los dos (fig. 2).

La forma de cómo se llega a cuantificar la disponibilidad de avión y la fiabilidad para la misión de vuelo, exige el cálculo previo de la tasa de fallos equivalente, que es el parámetro más complejo de obtener, calculado a través del tiempo medio entre fallos funcionales (en vuelo), de acuerdo con la teoría de fiabilidad de equipos en redundancia activa total, aplicado en este caso para dos componentes, y del tiempo medio equivalente entre fallos, por estar en mantenimiento, cuya expresión incluimos en el Cuadro 1 (1, 10 y 11).

En el caso de la fiabilidad para misión de vuelo, puede observarse que aparece un exponente doble de la tasa de mantenimiento: la razón estriba en que ahora son dos los componentes (en nuestro caso dos los aviones) que hay que mantener.

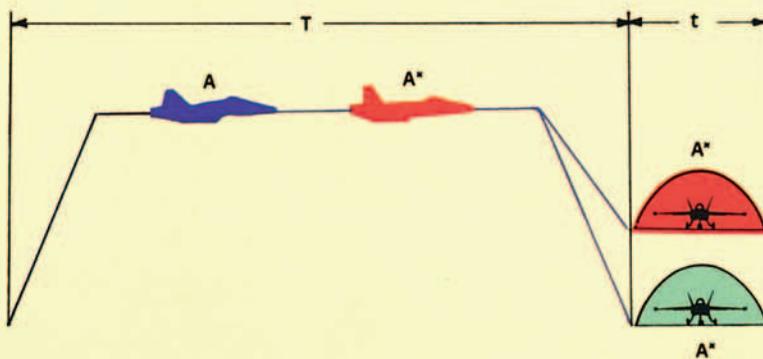
DISPONIBILIDAD DE AVION Y FIABILIDAD PARA MISION DE VUELO, DE UN AVION OPERATIVO Y OTRO EN RESERVA

Para un avión (A), efectuando una misión y que falla o pierde capacidad operativa, otro avión (B), en espera, realiza la misión de aquel; el conjunto que forman esos dos aviones tiene un símil con el de un equipo de dos componentes iguales en redundancia secuencial, entrando el segundo avión en vuelo cuando ha fallado el primero (fig. 3).

La forma de cómo pueden cuantificarse la disponibilidad de avión y la fiabilidad para misión de vuelo, se expone en dicha figura, previo cálculo de la tasa de fallos equivalentes (Cuadro nº 1) (1, 10 y 11).

Como se observará ahora en el cálculo de la fiabilidad para misión de vuelo aparece como exponente el valor unitario de la tasa de mantenimiento, pues el mantenimiento habría de hacerse a un solo avión, dado que el otro está disponible para entrar en vuelo cuando fuere necesario.

Figura 1
Disponibilidad de avión y fiabilidad para misión de vuelo



- Fiabilidad (probabilidad de no fallo en T)
- Infiabilidad (probabilidad de fallo en T)
- Mantenibilidad (probabilidad de hacer el mantenimiento en t)
- No mantenibilidad (probabilidad de no hacer el mantenimiento en t)

– Disponibilidad de avión

$$D_A = \text{fiabilidad} + \text{Infiabilidad} \times \text{Mantenibilidad}$$

– Fiabilidad para misión de vuelo

$$F_m = [\text{Fiabilidad}] (\text{No mantenibilidad})$$

Formulación y supuesto práctico

$$\text{Fiabilidad} : e^{-\lambda T} \quad \text{Infiabilidad} : 1 - e^{-\lambda T}$$

$$\text{Mantenibilidad} : 1 - e^{-\mu t} \quad \text{No mantenibilidad} : e^{-\mu t}$$

$$\bullet \text{ Disponibilidad de avión} : D_A = e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})(1 - e^{-\mu t}) = 98,39 \%$$

$$\bullet \text{ Fiabilidad para misión de vuelo} : e^{-\lambda T, 2\mu t} = 98,34 \%$$

producto de la infiabilidad (lo que ha fallado) por la mantenibilidad (lo que puede repararse) (7). La fiabilidad para misión de vuelo, es la probabilidad de que sea cuales fuere el número de misiones de vuelo, cada una de ellas de una duración determinada, los fallos en cualquier misión puedan ser subsanados por mantenimiento, restituyendo el avión para el servicio en un tiempo de trabajo igual o menor que el máximo permisible (7).

La justificación de la formulación para cálculo de esta fiabilidad de misión, estriba en que la probabilidad

dependientes), lo que considerado ese número de fallos teóricamente infinito, da como resultado la expresión expuesta, al haber pasado de la ley de probabilidad de Poisson, a su función de distribución, incluso con la posibilidad de cero fallos.

DISPONIBILIDAD DE AVION Y FIABILIDAD PARA MISION DE VUELO, DE DOS AVIONES OPERANDO A SIMULTANEO

Para dos aviones que han de desarrollar una misión conjunta, estando

DISPONIBILIDAD DE AVION Y FIABILIDAD PARA MISION DE VUELO PARA TIEMPOS DE MANTENIMIENTO PEQUEÑOS

En este caso, el tiempo que debe considerarse, es solamente el de vuelo T : este supuesto es similar al de una carrera de coches de "Fórmula 1", en donde el tiempo en "boxes", una vez iniciada la carrera, es mucho menor que la duración de ésta.

En este caso de considerar solo el tiempo de vuelo, la disponibilidad de avión y la fiabilidad para misión de vuelo, coinciden en su formulación, pues el tiempo de mantenimiento no aparece en el planteamiento.

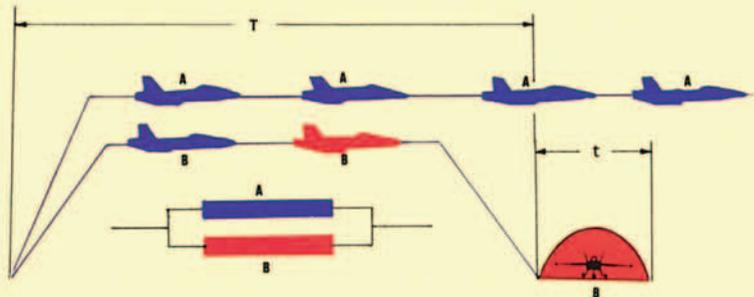
Para su cálculo, uno de los procedimientos más idóneos es hacer uso de un tipo de cadena de Markow, aplicada a procesos en los cuales el tiempo T es continuo y los estados discretos, entendiendo por estados el que el avión pueda estar en vuelo o en mantenimiento, pudiendo ser ambos estados satisfactorios, en cuanto que no hay fallo en vuelo, y que el mantenimiento puede restituir al avión para vuelo en un tiempo muy pequeño (un diferencial de tiempo, matemáticamente hablando), o no satisfactorios: avión con fallo en vuelo y que no puede restaurarse por mantenimiento.

En la fig. 4 exponemos el planteamiento de las cadenas de Markow, por las cuales se llega a la determinación de la fiabilidad, englobada en ésta la disponibilidad de avión y la fiabilidad para misión de vuelo, y su correspondiente infiabilidad, que obviamente la suma con aquella es el 100%.

Digamos que para la resolución de ese sistema de ecuaciones, se considera que el avión en el origen de tiempos ($T=0$), se supone que comienza el vuelo, esto es, no está en mantenimiento.

Para tener una idea más convincente del comportamiento de este avión, en las condiciones de tasa de fallos y tasa de mantenimiento fijadas, lo mejor es considerar los resultados de fiabilidad e infiabilidad a largo plazo que son solamente función de aquellas tasas (cuadro nº 2).

Figura 2
Disponibilidad de avión y fiabilidad para misión de vuelo de dos aviones que operan a simultáneo
(simil con un equipo de dos elementos en redundancia total)



Formulación y supuesto práctico

- Disponibilidad de avión : $D_A = e^{-\lambda_2 T} = 99,82\%$
- Fiabilidad para misión de vuelo : $F_m = e^{-\lambda_2 T} e^{-2\mu t} = 99,99\%$

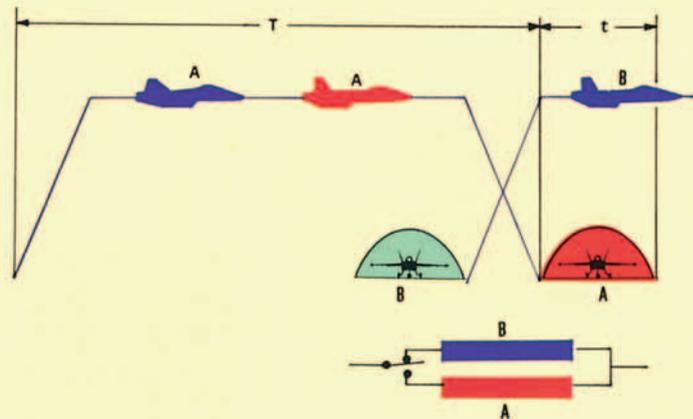
DISPONIBILIDAD Y FIABILIDAD DE MISION DE UN CONJUNTO DE AVIONES

Ambos conceptos tienen igual significado y cuantificación, en tanto se

considera como más idóneo, cuando se exige alta disponibilidad del conjunto de aviones, considerar solamente el tiempo de vuelo T , como hemos hecho en nuestro enunciado anterior.

En la fig. 5 se incluye un caso que

Figura 3
Disponibilidad de avión y fiabilidad para misión de vuelo de un avión operativo (A) y otro en reserva (B)
(simil con un equipo de dos elementos en redundancia secuencial)



Formulación y supuesto práctico

- Disponibilidad de avión : $D_A = e^{-\lambda_2 T} = 99,91\%$
- Fiabilidad para misión de vuelo : $F_m = e^{-\lambda_2 T} e^{-\mu t} = 99,99\%$

estimamos puede acercarse a la realidad en tanto que se presenta para 18 aviones (número de aviones de un escuadrón), de los cuales descontados 3 que pueden estar en mantenimiento mayor (tercer escalón), de los 15 restantes el mando fija que como mínimo 12 han de estar dispuestos para operar u operando, y más, si el mantenimiento menor puede ponerlos disponibles para el vuelo.

El caso general queda formulado en la figura, con el siguiente razonamiento:

El problema es el mismo que el de un equipo en paralelo en redundancia parcial, para el cual, si el equipo tiene n componentes, son necesarios que al menos K estén en funcionamiento. Aquí n son nuestros aviones disponibles y K los que como mínimo han de estar operativos, o dispuestos para operar de forma inmediata.

Si K como mínimo han de estar en vuelo o disponibles para el vuelo, y por lo tanto $n-K$ en mantenimiento menor, la probabilidad de que esto ocurra para una determinada secuencia (por ejemplo de numeración de aviones), vendrá determinada por el producto de ambas probabilidades: P_o^K (probabilidad de K aviones en estado para vuelo) y P_1^{n-K} (probabilidad de que estén en mantenimiento menor $n-K$), $P_o^K \cdot P_1^{n-K}$.

Como lo de menos importancia es el orden numérico de los aviones disponibles o no disponibles, sino su número, para calcular la probabilidad de que en un instante dado haya K aviones listos para el vuelo, tendremos que multiplicar la probabilidad anterior, por el número de secuencias distintas en que pueden presentarse K aviones listos y $n-K$ en mantenimiento; este número es el de las combinaciones de n aviones tomados en grupos de K , que se corresponde con la ley de probabilidad binomial, y por lo tanto la probabilidad de que existan en el instante T , un número K , o más, de aviones disponibles para el vuelo vendrá dado por la distribución binomial, cuya expresión es la que incluimos en la fig. 5 (11).

Si se desea conocer la disponibilidad a largo plazo, sustituiremos en la expresión general, los valores de P_o y P_1 calculados antes para un solo avión.

CONSIDERACIONES FINALES

Estimamos de interés comparar los resultados obtenidos; por una parte los de disponibilidad de avión, y por otra los de fiabilidad para misión, en los supuestos de tasa de fallo, tasa de mantenimiento, tiempo de vuelo, y tiempo de mantenimiento especificados (cuadro nº 1).

Nos referimos a avión único, tanto para la disponibilidad como para la misión (figs. 1, 2 y 3) pues aún cuando en los casos de las figs. 2 y 3 se cuenta con dos aviones, como hemos dicho, basta con la disponibilidad de uno para la operación satisfactoria.

- Disponibilidad de avión

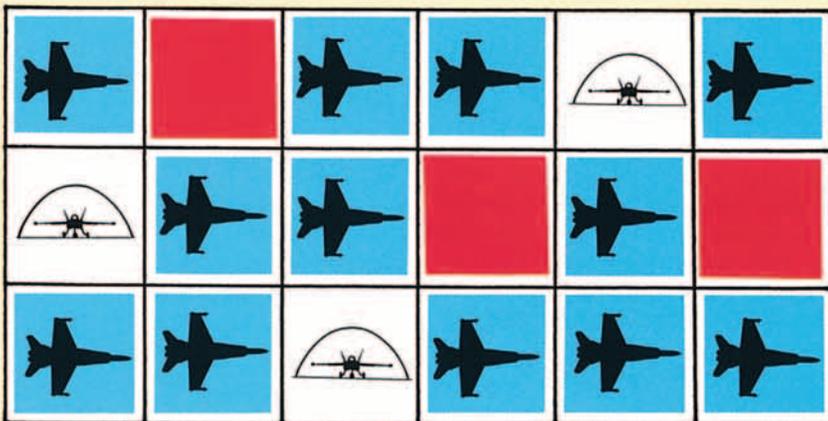
Un solo avión alcanza una disponibilidad del 98'39%; dos aviones ope-

rando a simultáneo, el 99'82% y dos aviones, de los cuales uno está operando y otro en reserva, el 99'91%.

Estos resultados, estimamos que son coherentes con el planteamiento; en efecto, el avión único tiene menos fiabilidad que los dos que comienzan operando a simultáneo, pues en este caso aún cuando falle uno, continúa disponible probabilísticamente, el otro; y el caso de un avión operativo y otro en reserva, es el que proporciona mayor disponibilidad, pues la probabilidad de fallo es menor dado que solo está en vuelo un avión, y el otro en espera por si falla aquel, continuar la operación.

Para la disponibilidad de avión con un tiempo de vuelo T , de igual valor que el de los tres casos precedentes ($T = 3h$), se alcanza una disponibilidad del 98'87%, que es superior al

Figura 5
Disponibilidad de un conjunto de aviones



- Número total de aviones $N = 18$
- Número de aviones en mantenimiento mayor $N_M = 3$
- Número de aviones potencialmente disponibles (en vuelo o en mantenimiento menor) $n = 15$
- Número mínimo de aviones que han de estar operativos $K = 12$
- Número máximo de aviones que pueden estar en mantenimiento menor $n-K = 3$

Formulación y supuesto práctico

• Caso general:

Probabilidad de que K aviones, o más, de un total de n , estén operativos a tiempo T_n

$$P(x \geq K) = \sum_{i=K}^n \binom{n}{i} [P_o(T)]^i [P_1(T)]^{n-i}$$

• Caso del ejemplo de la figura (a largo plazo)

$$P(x \geq 12) = 99,99\%$$

del avión único con tiempo t específico para mantenimiento (98'39%), en tanto que es superada aquella disponibilidad cuando operan dos aviones a simultáneo (99'82%), o dos en símil con redundancia secuencial (99'91%).

En todo caso, las diferencias son muy pequeñas, y la razón estriba en que se ha considerado el tiempo de vuelo pequeño, como puede ser el caso de aviones de combate de autonomía limitada a valores conservativos, como es el de nuestro supuesto.

- Fiabilidad para misión de vuelo

Comparando los resultados obtenidos, resultan mas favorables los de comienzo de la operación con dos aviones, o uno operativo y otro en reserva (99'99%, ambos resultados iguales); obviamente debe ser así, pues la fiabilidad para misión considera que puedan repararse cuantos fallos ocurran en cada misión y con un solo avión en vuelo, y otro en tierra en espera, la probabilidad de fallo en vuelo es menor, y cuando los dos están operativos, aun cuando falle uno, la misión está, probabilísticamente, asegurada.

La fiabilidad a largo plazo, tanto de disponibilidad como para misión, es ligeramente menor que a tiempo fijo (98'76% frente a 98'87%), pero como hemos dicho, el planteamiento de las cadenas de Markow nos ha permitido calcular esa fiabilidad que proporciona la probabilidad del com-

portamiento del avión, más allá del tiempo fijo T .

Cuando se dispone de 15 aviones (fig. 6), de los cuales como mínimo 12 han de estar operativos, se alcanza para este supuesto una probabilidad del 99'99%, partiendo de una fiabilidad del 98'76% de cada avión por separado, valor este correspondiente a largo plazo y por lo tanto la del conjunto es mayor pues hay una gama probabilística de 3 aviones más, que pueden resultar disponibles.

Nos permitimos insistir, que se han alcanzado altos valores, tanto para la disponibilidad como para la misión, por ser el tiempo T bajo, resultados que no hubieran sido así, si el tiempo de vuelo acumulado fuera mayor, esto es, sin ser sometidos los aviones a mantenimiento menor, pues ocurriría un acusado descenso de la fiabilidad, aun cuando la tasa de fallos fuera constante, que dejaría de serlo y aumentaría si no se sometieran los aviones a mantenimiento mayor o revisión, para iniciar un nuevo ciclo de vida en servicio.

FINAL

La Organización de la Gestión de Mantenimiento, tanto de la planificación (lo que hay que hacer), como de su programación (cuando hay que hacerlo), puede incidir de forma destacada en la disponibilidad de avión o aviones, y de la fiabilidad para las misiones de vuelo, pues como se ha expuesto, en los cálculos intervienen

factores, que la mayor parte de ellos deben ser alcanzados o fijados por Mantenimiento.

Así:

λ .- La tasa de fallos es función del mantenimiento a que son sometidos los aviones, en tanto que el objetivo del mantenimiento es limitar su valor dentro de la gama para el periodo útil de vida en servicio, que es función del tiempo medio entre revisiones programadas, y de la fiabilidad que se trata de conseguir (9 y 11).

μ .- La tasa de operaciones de mantenimiento, depende, además de los medios logísticos para su consecución, de la cualificación del personal que hace el mantenimiento, cualificación que debe alcanzarse con programas de formación específica, para cada tipo de avión (12).

T .- El tiempo de vuelo, depende del diseño operativo del avión, de las exigencias del mando para su utilización, y del criterio de Mantenimiento para que la fiabilidad no decaiga por debajo de aquella que haría aumentar la tasa de fallos (5, 9 y 11).

t .- El tiempo que el avión ha de estar en mantenimiento, está íntimamente ligado con la tasa de operaciones de mantenimiento μ en tanto que el producto μt va a cuantificar la mantenibilidad. Mantenimiento, especialmente los responsables de su gestión, son los que han de fijar este tiempo de mantenimiento, que obviamente ha de ser compatible, con las exigencias de mando (12).

BIBLIOGRAFIA

(Referencias)

- Publicaciones de diversos autores
- *Reliability of some Two Units Redundant Systems*. Sixth National Symposium on Reliability and Quality Control. Benjamin Epstein and J. Hosford. USA, January 1960.
- *Mathematical Models for System Reliability*. The Sylvania Technologist. E. Barlow and L.C. Hunter. USA, January 1960.
- *Reliability, Principles and Practices*. Mc Graw Hill. S.R. Calabro. New York, 1962.
- *Las Cadenas de Markow, en el análisis de riesgo*. Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica. Felipe Lafita Babio. Madrid, mayo 1984.
- Publicaciones de Martín Cuesta Alvarez.
- *Fiabilidad, Mantenimiento y Mantenibilidad*. Asociación Española de Mantenimiento (AEM). Barcelona, septiembre 1983.
- *Aplicaciones de la Fiabilidad, el Mantenimiento y la Mantenibilidad, a los equipos de los diversos sistemas de transporte*. III Congreso Iberoamericano de Mantenimiento Industrial. Rio de Janeiro, noviembre 1983.
- *Investigación Espacial y Tecnología Aeronáutica*. Revista de Aeronáutica y Astronáutica (Dossier: "La Investigación Espacial, para qué"). Madrid, octubre 1984.
- *Fiabilidad, Mantenimiento y Mantenibilidad de equipos para la Navegación Aérea*. Revista de Aeronáutica y Astronáutica (Dossier: "Navegación Aérea"). Madrid, octubre 1986.
- *Mantenimiento ideal y mantenimiento imperfecto*. Revista Mantenimiento, de la AEM. Barcelona, abril 1987.
- *Mantenibilidad de equipos redundantes*. Revista Mantenimiento, de la AEM. Barcelona, junio 1987.
- *Curso Superior de Fiabilidad, Mantenimiento y Mantenibilidad para Técnicos de Grado Superior, del Plan SACTA (Sistema Automático de Control de Tránsito Aéreo)*. Dirección General de Aviación Civil. Martín Cuesta Alvarez, Autor y Director del Curso. Madrid, 1985-1987.
- *La Enseñanza para el Mantenimiento Industrial*. X Congreso Europeo de Mantenimiento. Wiesbaden, Germany, octubre 1990.