

Medición y Predicción de Atrición con Logística Adversa

Eduardo Fogliato¹ y Ricardo T. Ferreyra¹.

¹Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 23/10/2019
 Fecha de aceptación del manuscrito: 27/03/2020
 Fecha de publicación: 30/04/2020

Resumen—Si bien las organizaciones ordinarias rara vez operan sistemas con tecnologías peligrosas, algunas se encuentran en un entorno complejo, rápidamente cambiante, con muchas dificultades. Cuando estas organizaciones enfrentan en tales entornos, buscan herramientas que contribuyan a su desenvolvimiento en un ambiente seguro y confiable.

Los modelos de confiabilidad y degradación para la predicción del comportamiento de un sistema son esenciales en su diseño y evaluación. La necesidad de conocer las condiciones que provocan la degradación de un sistema y cuando es oportuno brindar el apoyo logístico necesario que proporcione la continuidad de su funcionamiento es fundamental en el sector aeronáutico, nuclear y aeroespacial.

En este estudio, el sistema consiste en una flota de aviones, todos los niveles de personal funcionales para su operación en una situación adversa y los factores externos que la condicionan. Dicho sistema es compensador cuando se encuentra en equilibrio. En este sentido observamos que los atributos del sistema aéreo no se mantienen constantes en un período de tiempo, sino que puede existir un estado inicial, una transición y un estado final. Por ese motivo, la información actualizada del estado del sistema es necesaria a lo largo del tiempo para el análisis predictivo y de confiabilidad.

Palabras clave—Inercia, Degradación, Adaptativo, Simulación, Medición, Estimación.

Abstract—While regular organizations rarely operate systems with hazardous technologies, others work in a complex, rapidly changing environment with many difficulties. When these organizations face these environments, they look for resources that could contribute to their development in a safe environment; that is, reliable.

Reliability and degradation models for predicting the behavior of a system are essential in its design and evaluation. The necessity to understand the conditions that lead the degradation of a system and, where appropriate, to supply logistical support to provide the continuity of its operation is fundamental in the aviation, nuclear and aerospace sector.

This analysis considers a fleet of planes as a system, all levels of maintenance for operation in an adverse situation, and in an environment with conditioning factors. This system is balanced when is in equilibrium without affecting additional resources. In this context, we can observe that not necessarily the system kept constant in a certain period, so an initial status and other at the end can exist later. For this reason, updated information about the status of the system is necessary over the time for predictive and reliable analysis.

Keywords—Inertia, Degradation, Adaptative, Simulation, Measurement, Approximation

INTRODUCCIÓN

Un sistema aéreo (o aeroespacial) es un caso típico de sistema dinámico, muchas veces operando en condiciones desfavorables. Se investigará la evolución de su comportamiento a través de la aplicación de un modelo analítico basado en su dinámica. A partir de este, se lo estudiará en un marco referencial del que se pueda

obtener conclusiones valederas y que permita realizar una prospectiva con un adecuado grado de certeza. De esta manera se pueden elaborar modelos que buscan representar su estructura dinámica disminuida o condicionada por estar en un ambiente adverso.

Estos modelos orientados al estudio de la confiabilidad y a la predicción son esenciales en la evaluación de un diseño. Las predicciones proporcionan una base racional para las decisiones de diseño tales como la opción entre conceptos alternativos; opción de niveles de calidad, factores limitantes, empleo de elementos probados, aplicación de técnicas actualizadas del estado del arte, etc. Además, los pronósticos son usados como base para medir el rendimiento de confiabilidad [5]. Una predicción de

Dirección de contacto:

Eduardo Fogliato^a y Ricardo T. Ferreyra^b. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba, Argentina. a) fliafogl1@hotmail.com, b) ricardotf45@hotmail.com, <http://www.portal.efn.uncor.edu/>

confiabilidad básica estima la demanda del mantenimiento y el apoyo logístico necesario.

El problema por resolver se relaciona con un sistema aéreo que se compone de personal y material [6, 7, 8, 9]. El personal opera, mantiene y restituye los recursos para darle continuidad a la operación aeronáutica. El objetivo mismo del sistema aéreo usualmente está relacionado con el transporte, distribución de personal y de material, el funcionamiento en paralelo con otros sistemas o subsistemas logísticos, navegación o vuelo y el apoyo a sistemas en emergencia o al sistema en sí mismo. Tal escenario está siempre presente en Líneas Aéreas, Sistemas de Mantenimiento Aeronáuticos, Industrias Aeronáuticas, Fábricas de Aviones, Talleres Aéreos, Bases Aéreas, etc.

La contribución metodológica que se pretende tiene que ver con medir, analizar y predecir las propiedades dinámicas del sistema aéreo en forma casi continua. Este problema se plantea a través de la siguiente necesidad para la operación: Elaboración de un modelo de mayor alcance para la predicción de frecuencias e intensidades de operación de sistemas aéreos regionales en términos de unidades prácticas de ejecución como número de salidas diarias de vuelos, horas de mantenimiento, desgastes, cantidad de personal, velocidad de procesamiento de la información, etc.; y, en lo posible, conservando la máxima calidad de ejecución disponible que debe caracterizar al sistema aéreo.

La Confiabilidad define la probabilidad, de un sistema, en permanecer satisfactoriamente cumpliendo la función para el cual fue desarrollado, durante cierto período de tiempo y en condiciones de operación definidas. Así un suceso que interrumpa ese funcionamiento se denomina falla. En consecuencia, la confiabilidad es sólo una probabilidad y la especificación de un período de tiempo dado y de unas condiciones de empleo no bastan para predecir, en forma determinística, el estado de funcionamiento. En efecto, el tiempo de funcionamiento de los equipos que son objeto de este estudio presenta una apreciable dispersión. Naturalmente, la probabilidad de supervivencia de un dispositivo depende de las condiciones de operación. Si no fijamos éstas, el concepto de confiabilidad carece de sentido. En efecto, es importante especificar las condiciones ambientales; internas y externas.

En este contexto, hablaremos de operación que se realiza dentro del periodo de análisis, el cual a su vez está definido dentro del período de “edad madura” [1, 2, 3, 4].

En esta etapa, también llamada de fallos aleatorios, la falla es normalmente debida a operaciones que exceden el umbral superior. Para la vida útil, con tasa de fallo constante, adoptamos una función de densidad exponencial.

$$C(t) = e^{-\lambda(t-t_0)} \tag{1}$$

- C: Reliability.
- t: Time.
- t₀: Initial time.
- λ: Failure rate.

Con λ>0 refleja la tasa de fallas del sistema aéreo.

Se denomina tasa instantánea de fallo, o simplemente tasa de fallo, en el instante t, al cociente entre la variación de la confiabilidad y la confiabilidad misma con el signo cambiado,

$$\lambda(t) = -\frac{\frac{d}{dt}C(t)}{C(t)} \tag{2}$$

Si $C(t) = e^{-\lambda(t-t_0)}$ es la confiabilidad del sistema, entonces $X(t) = 1 - e^{-\lambda(t-t_0)}$ será la falta de confiabilidad la cual cuantifica la degradación del material. Sin embargo, variantes de $X(t)$ fueron introducidas en varios trabajos siendo de especial interés el desarrollo presentado por J.M. Epstein [6, 7, 8] en donde introduce “α”, véase Gráfico 1.

$$X(t) = 1 - e^{-\lambda\alpha(t-t_0)} \tag{3}$$

Esta representa el equilibrio entre la cantidad de salidas posibles versus la capacidad del mantenimiento.

Las variables que intervienen en el cálculo de α son:

F(t): Fuerza estimada que sobrevive después de la última salida del día t.

Per(t): Número de personal disponible luego de la última salida del día t.

hh: Tiempo de trabajo, medido en horas, que ocupa al personal destinado al mantenimiento directo correspondiente al primer escalón.

Sd: Cantidad de salidas diarias.

Tvs: Tiempo de vuelo por salida. Se calcula sobre la totalidad de las salidas ejecutadas por día.

TM: Tiempo total de mantenimiento requerido por hora de vuelo. Se lo cuantifica en horas / hombre.

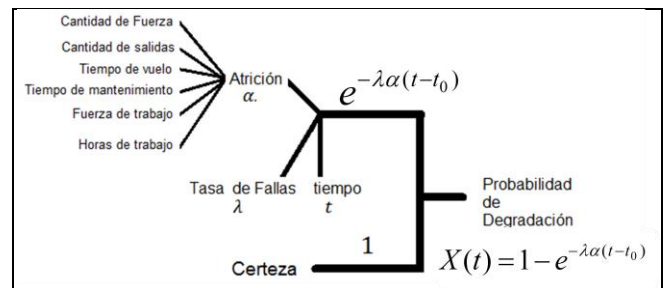


GRÁFICO 1. Principales variables que afectan a la degradación y la ubicación del tiempo de mantenimiento.

Degradación:
Proceso por el cual un sistema pierde de manera progresiva las cualidades que posibilitan su empleo eficiente, provocando una disminución en su confiabilidad.

El mantenimiento disponible debe cubrir al menos el requerimiento de mano de obra para cumplir con una cantidad factible de salidas diarias Sd no penalizadas por limitaciones de apoyo técnico.

$$TM \leq F Sd Tvs \leq hh Per \tag{4}$$

Como podemos observar, cuando sucede la igualdad el sistema se encuentra en equilibrio [13, 14, 15, 16]. Este equilibrio es dinámico ya que una variación en algún término del miembro derecho se va a compensar con una o más variaciones en el miembro izquierdo.

El mantenimiento disponible, debe cubrir al menos el requerimiento de mano de obra para cumplir con una cantidad factible de salidas diarias no penalizadas por limitaciones de apoyo técnico [8].

Por Ec. (4), considerando una tasa de fallas $\lambda = 1$ (las fallas internas asociadas a la fabricación y diseño no se consideran aquí) tenemos:

$$X(t) = 1 - e^{-(\lambda=1)\alpha(t-t_{0\alpha})} \tag{5}$$

Entonces, podemos calcular la integral definida de la degradación en el intervalo (t_1, t_2) , lo cual se interpreta como proporcional al efecto que la degradación (desde el entorno operativo) tiene sobre el sistema en el tiempo.

Como una nueva fuerza de trabajo en $t_{0\alpha} = 0$ debe atender una demanda intensiva de esfuerzo en un corto período de duración donde $\alpha \neq 1$. La Ec. (5) permite calcular el área de atrición $X(t)$.

Atrición
Reducción gradual en el número de subsistemas disponibles para su empleo debido al deterioro excepcional generado por las condiciones a los que son sometidos.

Por otro lado, al analizar $X(\alpha)$ con $\alpha = 1$ verificamos la existencia de una curva correspondiente al área mínima de atrición. Esta integral, representa el efecto mínimo de la degradación en el sistema. Esto sucede cuando tenemos, por ejemplo, una fuerza de trabajo envejecida, $t_{0\lambda} \leq 0$ que nunca ha sido empleada a lo largo del tiempo $\alpha = 1$. La curva, Ec. (6), asociada con el área mínima de desgaste ($\alpha=1$) es:

$$X(t) = 1 - e^{-(\alpha=1)\lambda(t-t_{0\lambda})} \tag{6}$$

Por las razones anteriormente presentadas, podemos distinguir algunos casos. Por ejemplo, formulando para un caso más realista, es posible encontrar el intervalo "I", donde el desgaste promedio \bar{X} tiene lugar. Este intervalo puede ser definido por $I = [0,1]$ donde:

$$I = \frac{1}{\bar{X}} \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{1-e^{-(\alpha=1)\lambda(t-t_{0\lambda})}}^{1-e^{-(\alpha=1)\lambda(t-t_{0\alpha})}} dx \tag{7}$$

, donde la longitud de este intervalo se obtiene de Ec. (7), generalmente con $t_{0\alpha} = 0$ y $t_{0\lambda} \leq 0$. Esto se debe al hecho de que el desgaste después de la fabricación comienza primero y dura más tiempo. Es decir, comienza en el pasado y continúa incluso después de un ciclo corto (un ciclo que contiene desgaste y restauración en presencia de una degradación duradera).

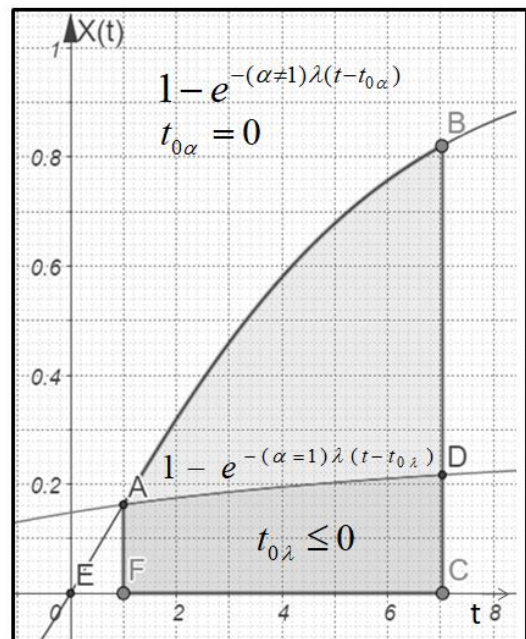


GRÁFICO 2.1. Atrición interna y externa en el tiempo.

Podemos observar en la Figura 2.1., en particular, el estudio del desgaste en un entorno operativo adverso por la teoría clásica [8], propone estimar el coeficiente α :

$$\alpha = 1 - \frac{hh \text{ Per}}{\Delta TM \text{ Tvs Sd F}} \tag{8}$$

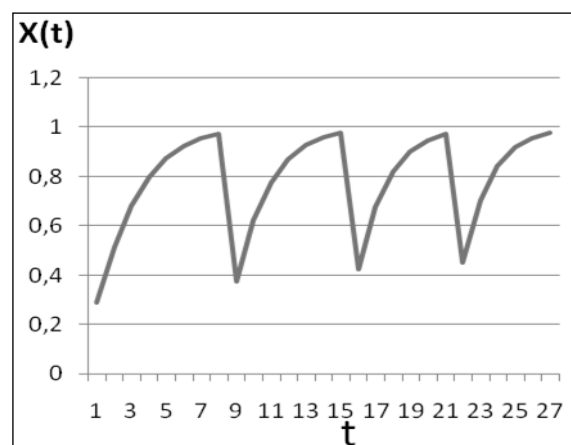


GRÁFICO 2.2. Modelo de Epstein

La aplicación del modelo de Epstein [8] se sintetiza en el Gráfico 2.2 y en la Ec. (8), donde se observa que en cada período, que contiene un proceso de atrición y un proceso de restauración, se produce un comportamiento típico con forma de aleta de tiburón.

MODELO PARA ENTORNO OPERATIVO ADVERSO, EOA

El sistema está compensado cuando se encuentra en equilibrio dinámico. A partir del modelo de Epstein, consideramos que el tiempo de mantenimiento es variable dentro del periodo de "madurez" del sistema debido a que a medida que pasa el tiempo el esfuerzo de mantenimiento es mayor y por lo tanto condiciona la cantidad de aviones disponibles [10, 11]. Esta situación influye desfavorable en la disponibilidad de aeronaves para su empleo.

Caso I Límite	Tasa de fallas nula $\lambda = 0$
Caso II Límite	Tasa de fallas infinita $\lambda = \infty$
Caso III (Real)	$0 < \lambda < \infty$ $\alpha = cte$ $t \in [t_0, t_f]$ $\alpha = 1 - \frac{hhPer}{\Delta TMT vs SdF}$ Epstein (1987)
Caso IV (Real)	$0 < \lambda < \infty$ $\forall i (i = 0, 1, \dots, n - 1): \alpha_i = (cte)_i$ $\alpha_i = 1 - \frac{hhPer}{(\Delta TMT)_i T vs SdF}$ $\alpha_{i-1} < \alpha_i < \alpha_{i+1}$ $t_0 < \dots < t_i < \dots < t_f$ $t \in [t_i, t_{i+1}]$ $X(t_i) \in [X_i(t), X_{i+1}(t)]$ Fogliato (2001)
Caso V (Real), (Multivariable)	$\alpha(t_i) = 1 - \frac{hh(t_i)Per(t_i)}{\Delta TMT(t_i) T vs(t_i) Sd(t_i) F(t_i)}$ $A(t_i) = -\lambda \alpha(t_i)$ $A_i = A(t_i)$ Este trabajo

TABLA 1 Modelos de Atrición $A(t_i)$ en Entornos Operativos Adversos, EOA. Modelo discreto.

En este trabajo consideramos que todos los atributos son variables a lo largo del tiempo (horas hombre, tiempo de mantenimiento, tiempo de vuelo, salidas diarias, cantidad de aviones, cantidad de mecánicos en el mantenimiento). Es decir, el Tiempo de Mantenimientos TM es variable a lo largo del tiempo debido a que el esfuerzo de mantenimiento es diferente, la cantidad de aviones disponibles para el

vuelo cambia, la cantidad de operarios activos se modifica y esto implica que se condiciona en forma seria la actividad global completa. Por ejemplo, en caso de una crisis está claro que no se puede precisar recursos y disponibilidades para un día y la hora determinados. Sin embargo, se puede colaborar en la predicción. Por lo tanto sabemos que ΔTM es el incremento del tiempo de mantenimiento requerido y se lo cuantifica en horas / hombre.

En esta situación consideramos que en aquellos países carentes de una industria aeronáutica sólida [17], donde la reposición de materiales críticos es nula o muy difícil, las ponderaciones sobre las variables presentes en la Ec. (8) deben ser mayores en cada t y consecuentemente actualizadas con la frecuencia que la situación demande. Entonces, proponemos la Ec. (9):

$$\alpha(t) = 1 - \frac{hh(t) Per(t)}{\Delta TMT(t) T vs(t) Sd(t) F(t)} \quad (9)$$

Por este motivo definimos $A(t) = -\lambda \alpha(t)$. Esta expresión incluye tanto el factor interno “ λ ” (configuración original) y como así también el externo “ $\alpha(t)$ ” (entorno operativo) de la degradación.

$$X(t) = 1 - e^{A(t)} \quad (10)$$

El método de trabajo es incluir datos que fueron adquiridos de manera experimental. Observamos cuales son los puntos de inicio de la degradación $X(t_{min})$ en caso de producirse un descaso y cuál sería la máxima degradación para las condiciones de stress sobre el material aéreo. Luego:

X(t)	$\frac{h(t) - h(t_{0\lambda})}{= 1 - e^{-(\lambda=cte)(\alpha=cte)(t-t_{0\lambda})}}$	Sin Operatividad, Sin Adversidad
	$\frac{g(t) - g(t_{0\alpha})}{= 1 - e^{-(\lambda=cte)\alpha(t-t_{0\alpha})}}$	Con Operatividad. Adversidad Centralizada
	$A_i \rightarrow A(t)$ $g, h \rightarrow f$ $f(t) = 1 - e^{A(t)}$ Validez instantánea. Tiempo inicial arbitrario. El modelo EOA de adversidad multivariable se actualiza (a nivel modelo) en tiempo real con cada valoración o medición	Con Operatividad. Adversidad Distribuida , Modelo Continuo. También aplicable al caso Discreto. Frecuencia de muestreo acorde a la Adversidad. $f \rightarrow X$

TABLA 2. Función $A(t)$ para cálculo de Atrición en entornos de adversidad. Modelo continuo.

La adversidad es global y se reconoce a la variable que la delata primero, entonces utilizamos a esa variable

delatadora para cuantificarla. Estamos analizando a una adversidad que si bien es global se cuantifica a través de la variable de mayor sensibilidad. Se presenta como la variable “premonitoria” y difícil de gestionar o controlar. El control o descontrol de ella dependerá de la adversidad (en naturaleza e intensidad). Con frecuencia, la variable de mayor sensibilidad es el tiempo de mantenimiento que aumenta ante la adversidad. Entonces, la adversidad se analiza de manera centralizada a través del tiempo de mantenimiento. Si tomamos a la tasa de fallas variable en el tiempo se tiene $\alpha = \alpha(t)$ y se pone en evidencia que es posible una mayor probabilidad de degradación ante, por ejemplo, salidas sin descanso.

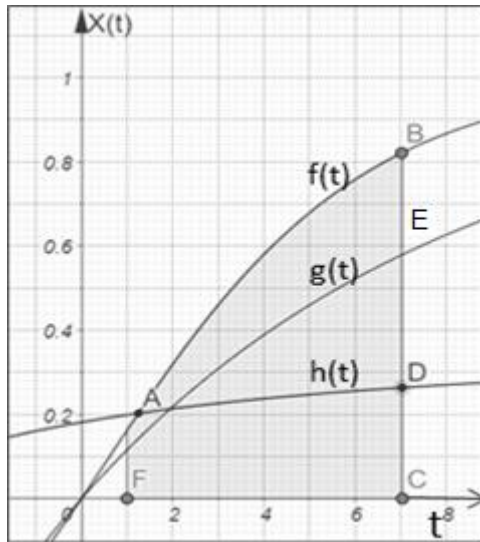


GRÁFICO 3. Degradación $X(t)$: Función f: con operación y con adversidad (sin reposición de materiales), Función g: con operación y sin adversidad y Función h: Sin operación y sin adversidad tomando $t_{0\lambda} < 0$.

En el Gráfico 3., se puede observar la degradación a lo largo del tiempo donde la actividad aérea se encuentra reducida y la restauración dilatada o aletargada en días. Esto se hace a los efectos de poder mantener niveles aceptados de degradación sin suspender la actividad aérea. También se observa que el área debajo de la curva es proporcional a la degradación. En efecto, el área circundada por ABCF asociada a la operación sin reposición de material (con adversidad) es claramente mayor que las áreas ADFC y AECF donde no hay adversidad, y esto es independiente de que la operación se realice o no.

El modelo es claramente dinámico dado que el valor del tiempo de mantenimiento no es fijo, ΔTM se actualiza para cada t siendo este el mejor índice que el sistema puede entregar. Es importante resaltar que mientras λ muestra la capacidad (interna) de que el sistema se encuentre en servicio en respuesta a las condiciones de diseño, α muestra la capacidad del operador de mantener el sistema en condiciones de trabajo en un entorno operativo (externo) y que $\alpha_i = \alpha(t_i)$ puede señalar la presencia de adversidad siendo en definitiva un indicador de su existencia.

En este contexto el valor de $\alpha = \alpha(t)$ actúa como variable de aceptación de la situación. Típicamente, se consideró como variable de análisis la cantidad de salidas diarias $Sd = Sd(t)$. En el Gráfico 4 se muestra que la adversidad tiene carácter global y se describe en forma centralizada. Al

exceder $\alpha = \alpha(t)$ el valor de 0,5 se produce un descanso para la recuperación o restitución del material disponible y luego se reanuda la actividad con menor Sd para compensar los valores elevados de atrición. La variable delatadora es la variación del tiempo de mantenimiento ΔTM que incrementa en el tiempo [9, 10, 11].

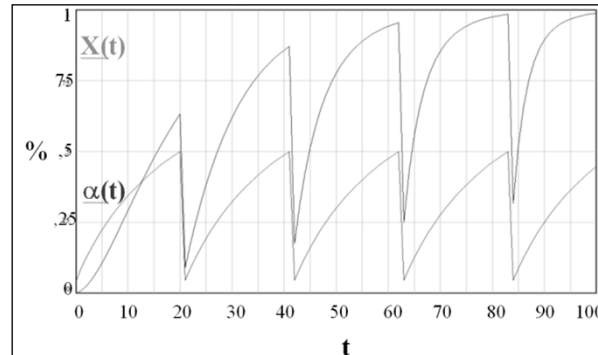


GRÁFICO 4. $X(t)$, $\alpha(t)$

El modelo de degradación propuesto en este trabajo, véase Gráfico 5., permite analizar en forma diferenciada los índices λ y α , donde el valor instantáneo de $\alpha = \alpha(t)$ depende de otros factores que cambian en forma apreciable o repentina. El modelo es especialmente adecuado para considerar el comportamiento de cada variable por separado a lo largo del tiempo donde su valor se establece o simula dentro de un rango preestablecido.

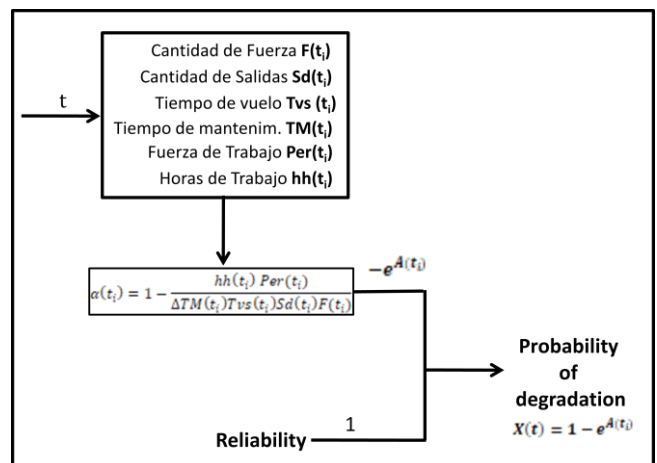


GRÁFICO 5. Modelo de Degradación Propuesto

En el Gráfico 6., se muestran las salidas con Adversidad Operativa, AO donde las causas de adversidad son múltiples y se manifiesta desde diferentes variables que cambian en forma simultánea en el tiempo. La adversidad está distribuida entre las partes del sistema dinámico. Se trata de variación de la cantidad de aeronaves, cambios en el tiempo de mantenimiento, cambios en la cantidad de personal y cambios en las demás variables. En este caso, está a nuestro alcance poder reconocer los distintos focos de adversidad. A veces, los cambios se compensan otras se acentúan. Sin embargo, el modelo aquí propuesto para lidiar con la adversidad operativa AO casi siempre distribuida permitiendo predecir cómo, donde y cuando sucederá la compensación o descompensación en valores probabilísticos. La descompensación se lee como el aumento irregular de la atrición interrumpiendo el ciclo

conocido o previsible de atrición-restauración. En el Gráfico 6., se puede ver la atrición dentro de un período típico real cuando el sistema se encuentra en un Entorno Operativo Adverso EOA (la forma de aleta de tiburón se pierde) y se aprecia como una forma descompensada de evolucionar.

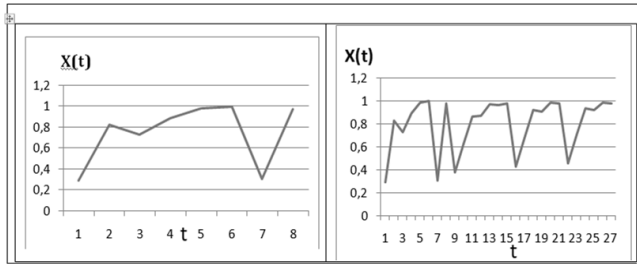


Gráfico 6. Degradación X(t) con Adversidad Operativa.

Específicamente, se observa una descompensación en el intervalo (7,9) de tiempo donde uno de los “pozos de atrición” ocasionados por que la restauración desaparece y la atrición salta hasta un valor máximo. Tener una predicción temprana de un evento de esta naturaleza puede ser muy favorable en la toma de decisiones sobre cómo actuar con las, en este caso, múltiples variables de control de este sistema (personal, horas hombre, salidas diarias, tiempos de vuelo, tiempos de mantenimiento, etc.).

Finalmente, los datos y conceptos que a continuación se presentan buscan comprobar la consistencia del empleo de un sistema aéreo en un entorno exigente. En general las bases de datos disponibles no cuentan con la totalidad de la información necesaria para su análisis.

Con el propósito de ejemplificar se consideraron datos históricos reales disponibles de sólo una parte del sistema aéreo en el conflicto de Malvinas a efectos de proveer, con un detalle aceptable, información en un Entorno Operativo Adverso EOA como es un conflicto bélico internacional permitiendo esbozar conclusiones fundadas a partir de los datos relevados [12].

En el Gráfico 7., se muestra, en forma retrospectiva, la disponibilidad de aviones afectados por la atrición del sistema en t. En este caso algunos condicionantes externos al sistema limitaron el promedio de la cantidad de salidas diarias a $Sd < 1$.

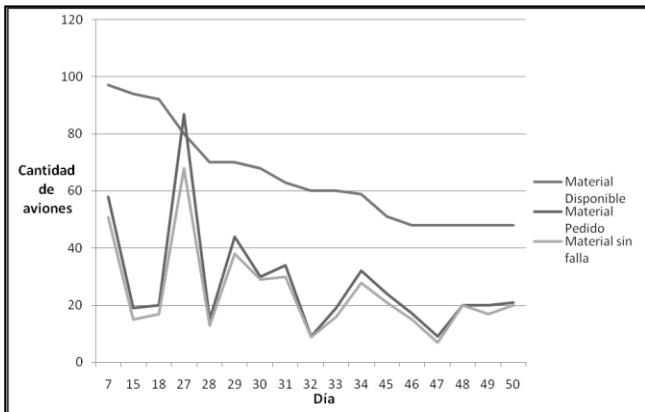


GRÁFICO 7. Atrición aérea “Caso Malvinas”.

Por esta razón el valor de α es lo suficientemente bajo para permitir que la fuerza de trabajo Ec. 9. (condicionada por el personal $Per(t)$ y las Horas hombre $Hh(t)$) satisfaga los

requerimientos con una probabilidad de degradación como la adoptada en este trabajo $X(t) \cong 0.07$.

Sin embargo, el sistema no se recupera totalmente en el descanso. Esta situación refuerza la afirmación que el estrés acumulado durante la exigencia del sistema provoca una demora en la recuperación y un aumento en la probabilidad de degradación del empleo siguiente. Por otro lado, la operación sin restitución o con restitución condicionada de personal y material agudiza el fenómeno.

CONCLUSIONES

En este análisis se ha puesto de manifiesto la influencia de la variable interna del sistema aéreo λ en un entorno de operación de laboratorio y de la variable externa α , que depende de la forma de operación, en un entorno exigido por falta de reposición de elementos críticos. La degradación X(t) es función de ambas. En consecuencia, el modelo propuesto es $A(t) = -\lambda \alpha(t)$.

Asimismo, el aumento de $\alpha(t)$ (lo cual hemos analizado a través de la variación del tiempo de mantenimiento ΔTM) produce al menos un doble efecto. El primer efecto es durante el período de operación durante el que se incrementa la probabilidad de degradación en t. Esto se debe a que el incremento del tiempo de mantenimiento no logra ser compensado por las otras variables de ajuste y por lo tanto no se logra conservar un estado de equilibrio razonable para la operación. El segundo efecto se manifiesta en el insuficiente tiempo de descanso, que es el tiempo donde se produce la restauración. Se produce una insuficiencia restaurativa ya que el aumento de las necesidades de mantenimiento no es acompañado por el tiempo disponible para realizarlas. El tiempo de restauración se incrementa en t conforme se encuentra en un entorno de operación exigente.

Lo expuesto, pone de relieve la importancia de la variación del tiempo de mantenimiento ΔTM que influye en forma directa sobre el valor final de $\alpha(t)$ el cual, a su vez, induce por lo general un incremento de X(t). El aumento de ΔTM resulta de un cambio de múltiples variables bien conocidas que gobiernan al sistema y que, por lo tanto, aparecen en la formulación para $\alpha(t)$.

Finalmente, se demuestra que la adaptación propuesta para entornos con adversidad operativa EOA permite predecir en forma estadística la posibilidad de descompensaciones en la dinámica del sistema, como también su mecanismo y momento de aparición o probables intervalos de tiempo en los cuales puede tener lugar.

REFERENCIAS

- [1] National Aeronautics and Space Administration, 2000, “Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment”, USA.
- [2] Aeronautics and Space Administration, 2000, “TPm2000-207428 Reliability and Maintainability (RAM) Training”, USA.
- [3] Roberts, K. and Rousseau, D. M., 1989, Research in nearly failure-free, high reliability organizations, Having the bubble. IEEE Transactions on Engineering Management, 36 (2), 132-139.
- [4] Juan Carlos Redondo Expósito, 2007, Un Modelo Matemático Óptimo de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicado a la Aviación Comercial. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España.

- [5] Universidad Francisco de Paula Santander, 2018. (*Biblioteca udep, 2018*) *Teoría de la confiabilidad (5)*. Recuperado de: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_154_179_106_1463.pdf.
- [6] Joshua M. Epstein, *Measuring Military Power*, 1984, The Soviet Air Threat to Europe, Princeton University Press.
- [7] Joshua M. Epstein, 1985, *The Calculus of*, Editado por The Brookings Institution, Washington, D. C.
- [8] J.M. Epstein, 1987, *Strategy & Force Planning: The Case of the Persian Gulf*, the Brookings Institution, Washington, D.C.
- [9] E. Fogliato, 2001, *Un modelo para el dimensionamiento de una Fuerza Aérea*, Escuela Superior de Guerra Aérea, Fuerza Aérea Argentina.
- [10] Eduardo Fogliato, 2007. *Modelo Dinámico Predictivo de La Degradación de Sistemas Aéreos en Conflicto*, ENIEF 2007, XVI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Córdoba, Argentina. <http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/enief2007/>.
- [11] Eduardo Fogliato, Ricardo T. Ferreyra, July 2013, *A Dynamic Model of Degradation of Air Systems in Conflict*, págs. 453 – 457, *Journal of Mechanics and Automation Engineering*, Volume 3, Number 7
- [12] *Historia de la Fuerza Aérea Argentina, 1998, Tomo VI (Volumen I); Editado en talleres de Brapack S. A., Buenos Aires.*
- [13] Ricardo. T. Ferreyra, E. Fogliato, M. A. Ferreyra, S. García, 2008, *Oscilaciones de Relajación en la Dinámica No Lineal de la Depredación entre Sistemas*, *Revista de MECÁNICA COMPUTACIONAL* Vol. XXVII, 2008, págs. 2411-2417, ISSN 1666-6070.
- [14] Ricardo T. Ferreyra, 2013, *Nonlinear dynamics for the prediction of statistical distributions: An Operational Research perspective*, 26th European Conference on Operational Research, Sapienza University, Rome, Italy July 1-4 2013.
- [15] Ricardo T. Ferreyra, M. A. Ferreyra, 2013, *Dynamical Laws for Statistical Distributions: Application to Complex System Analysis*, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 3, Number 2.
- [16] Ricardo T. Ferreyra, 2015, *Data Processing Intervals through Dynamical Models Applied to the Analysis of Self-Degenerative Systems*, The Fourth International Conference on Data Analytics, Data Analytics 2015, July 19 - 24- Nice, France.
- [17] Karen Marais, Nicolas Dulac, and Nancy Leveson, 2009. *Accidents and high reliability organizations: The need for an alternative approach to safety in complex systems*. Paper presented at the Engineering Systems Division Symposium, MIT, Cambridge, MA, 29-31 March.