



# Metodología para cuantificar la probabilidad de errores humanos durante el mantenimiento de aeronaves

## Methodology to quantify human error probability during aircraft maintenance

Néstor Viego-Ariet<sup>I</sup>, Armando Díaz-Concepción<sup>II,\*</sup>, Reicelis Casares Li<sup>II</sup>, Jesús Cabrera-Gómez<sup>II</sup>, Alexander Alfonso-Álvarez<sup>III</sup>, Joel Guillen-García<sup>IV</sup>, Alberto J. Rodríguez-Piñero<sup>II</sup>

I. Aeropuerto Internacional José Martí, Terminal 1, Grupo Aeronáutico de Mantenimiento S.A., GAM technics. La Habana, Cuba.

II. Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría, Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento, CEIM. La Habana, Cuba.

III. Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Mecánica. La Serena, Chile.

IV. Universidad Técnica de Manabí. Puertoviejo. Ecuador

\*Autor de correspondencia: [adiaz@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:adiaz@mecanica.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 1 de mayo de 2024

Aceptado: 11 de junio de 2024

### Resumen

En la investigación se desarrolló una metodología para evaluar la confiabilidad humana durante el mantenimiento de aeronaves utilizando un modelo matemático para cuantificar la probabilidad de ocurrencia del error humano en un sistema técnico complejo. La estructura de la propuesta incluyó tres etapas y tomó como base los principios de la Tecnología para el Tratamiento Ergonómico del Error Humano, combinado con la Técnica para la Predicción de la Tasa de Error Humano y la Técnica para la Reducción y Evaluación del Error Humano. Se utilizó el árbol de eventos para determinar el efecto del error humano sobre el sistema o

proceso y herramientas ergonómicas con el objetivo de identificar las condiciones latentes. Como caso de estudio, la metodología se aplicó a un proceso de inspección visual general a las estructuras de las aeronaves. Se concluyó indicando que la metodología diseñada permite identificar los errores humanos, evaluarlos y establecer soluciones para la gestión de la seguridad operacional, favoreciendo la toma de decisiones durante el mantenimiento de aeronaves.

**Palabras claves:** confiabilidad humana, seguridad operacional, mantenimiento aeronáutico.

### Abstract

In the research a methodology to evaluate Human Reliability during aircraft's maintenance using a mathematical model to quantify human error probability in a complex technical system is described. The proposal includes three stages and is based on the principles of Technology for the Ergonomic Treatment of Human Error, combined with the Technique for Human Error Rate Prediction and Human Error Assessment & Reduction Technique. Event Tree is used to determine the effect of human error on the system or process, and ergonomic evaluations with the aim of identifying

performance shaping factors. As a case study, the methodology was applied to a general visual inspection process on aircraft's structural parts in order to assess its usefulness. As conclusion, with the methodology designed is possible to identify human errors, evaluate them and propose solutions for safety management, improving decision making during the aircraft's maintenance.

**Key words:** human reliability, safety management, aircraft maintenance.

### Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Viego Ariet N, Díaz Concepción A, Cáceres Le R, Cabrera Gómez J, Alfonso Álvarez A, JGuillen Garcia J, et al. Metodología para cuantificar la probabilidad de errores humanos durante el mantenimiento de aeronaves. Ingeniería Mecánica. 2024;27(3):e697.

## 1. Introducción

El mantenimiento de aeronaves es un elemento fundamental del sistema en que se apoya la industria aeronáutica. Según la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI), a medida que se imponen mayores exigencias respecto a la operación de las aeronaves, es necesario comprender mejor el tema de los factores humanos [1-3] y aplicar dicho conocimiento de forma más amplia y activa en las tareas de mantenimiento e inspección.

El elemento humano ha sido mencionado por diferentes autores como un componente integrante de la confiabilidad operacional, al definirla como la capacidad de un sistema formado por equipos, procesos,

tecnologías y personas para cumplir las funciones para las cuales ha sido concebido, dentro de ciertos límites y para un contexto operacional dado [4]. En opinión del Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento, CEIM la confiabilidad operacional es la acción sinérgica del equipamiento, el recurso humano y el proceso tecnológico, para lograr que un sistema técnico complejo cumpla las funciones requeridas en un tiempo y contexto operacional determinados y puede ser expresada a través de un indicador [5]. En el concepto planteado, se aprecia la necesidad de cuantificar la confiabilidad operacional, integrando los elementos que la compone, cada uno de sus elementos debe ser representado a través de un valor numérico y así los análisis resultantes contribuyen a la toma de decisiones en las organizaciones en función de su mejora continua.

Se han propuesto varios conceptos para analizar la confiabilidad humana en sistemas complejos. En criterio de García Palencia [6], la confiabilidad humana es la capacidad de desempeño eficiente y eficaz de las personas en todos los procesos, sin cometer errores derivados del conocimiento y del actuar humano durante su competencia laboral, en un entorno organizacional específico. El autor comenta que la gestión de la confiabilidad humana implica la creación de una nueva cultura organizacional donde las estrategias de su optimización buscan esencialmente recuperar el valor de las personas en la organización, al comprender que el desarrollo del talento humano es un proceso vital para alcanzar un buen nivel de competitividad internacional.

Diferentes autores plantean que el análisis de la confiabilidad humana requiere la aplicación de alguna técnica donde se identifiquen, cuantifiquen y propongan acciones para mitigar los errores humanos. Dhillon [7], menciona emplear el árbol de eventos como un método útil para el análisis y cálculo del error humano en la industria aeronáutica, centrándose en determinar las probabilidades de ocurrencia del error humano. En la metodología propuesta por Chen y Huang [8], se propone cuantificar la confiabilidad humana en el mantenimiento de aeronaves mediante un enfoque de red bayesiana para modelar las relaciones de dependencia del rendimiento humano. Lin y Pan [9], emplean el Método Cognitivo de Confiabilidad y Análisis de Errores (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*, CREAM) para predecir la probabilidad de los errores humanos en tareas operativas con aeronaves. En la investigación efectuada por Reiser, Bayma y da Fonseca [10], se presenta un modelo que combina las redes bayesianas y lógica fuzzy para realizar un análisis de confiabilidad humana aplicada a un evento de descompresión de una aeronave a partir de un fallo del sistema de oxígeno. Se observa que en estas investigaciones realizadas en la industria aeronáutica hay análisis cuantitativo de la probabilidad del error humano, sin embargo, no se especifica que se evalúa ergonómicamente el contexto operativo, ni las propuestas precisan un plan integral de mejora de la confiabilidad humana con un enfoque hacia la gestión de la seguridad operacional (SMS) [1,11].

La investigación se realizó con el objetivo de desarrollar una metodología para evaluar la confiabilidad humana durante el mantenimiento de aeronaves al integrar modelos y técnicas existentes asociadas a un sistema técnico complejo, a fin de estimar la probabilidad del error humano y sus efectos sobre los activos durante el mantenimiento de aeronaves. La estructura de la propuesta fue desarrollada en tres etapas y toma como base los principios de la Tecnología para el Tratamiento Ergonómico del Error Humano (*Technology for the ergonomic treatment of human error*, TEREH) [11], combinado con la Técnica para la Predicción de la Tasa de Error Humano (*Technique for Human Error Rate Prediction*, THERP) [12] y la Técnica para la Reducción y Evaluación del Error Humano (*Human Error Assessment and Reduction Technique*, HEART) [13, 14], se fundamenta en el análisis documental, la observación de los procesos y la participación de especialistas. A partir de los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión que la metodología propuesta tiene beneficios y su implementación contribuye a mejorar la gestión de la seguridad operacional durante el mantenimiento de aeronaves de alas fijas.

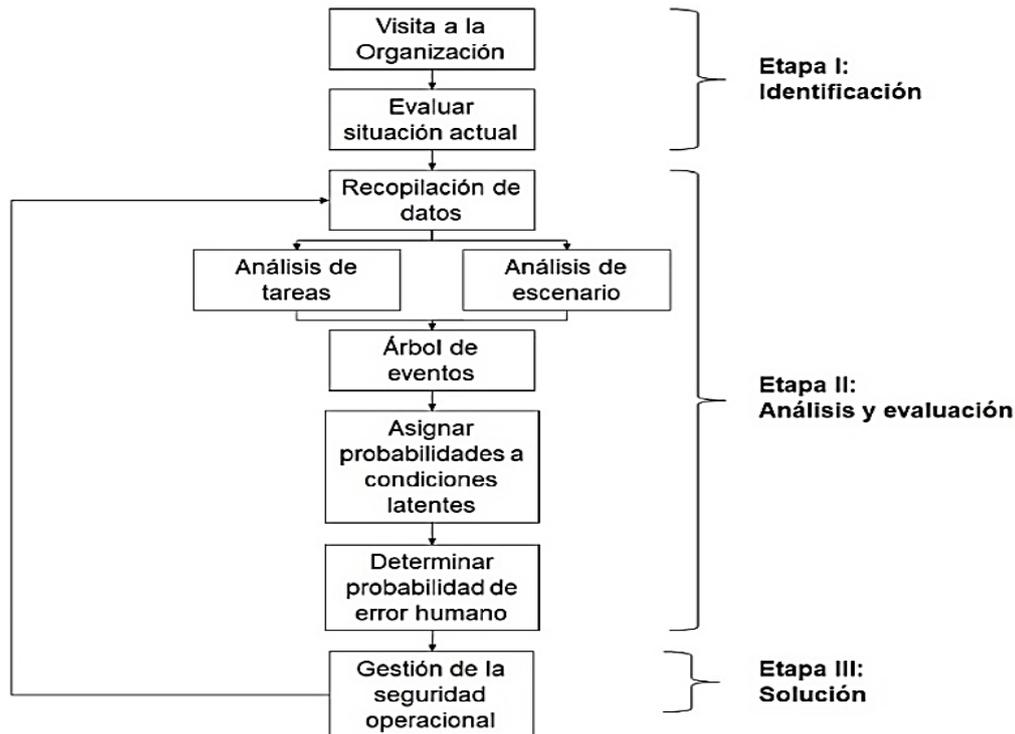
## 2. Métodos y Materiales

La secuencia utilizada en la metodología para realizar el análisis y proponer soluciones a los errores humanos en la esfera del mantenimiento aeronáutico [11, 15], fue hecha con referencia al diagrama que se muestra en la figura 1.

En la primera etapa de la metodología se caracterizó el contexto operacional mediante un equipo de trabajo conformado por 7 especialistas que revisó la documentación y realizó observaciones directas de las áreas y ambiente de trabajo y evaluó mediante un análisis ergonómico las condiciones generales del escenario que pueden influir en que ocurran errores humanos. El equipo decidió realizar un análisis predictivo, teniendo en cuenta que actualmente en el centro no existe una base de datos donde se documente la existencia de fallos activos causados por errores humanos. El objetivo es establecer un sistema proactivo de gestión de riesgos basado en peligros que incidan en la seguridad operacional, identificando las tareas, áreas o procesos críticos; la predicción de errores específicos y sus consecuencias y contribuir a crear una cultura justa para ayudar al sistema de gestión de la seguridad operacional.

En la segunda etapa se diagnosticaron los posibles errores y sus factores de riesgo. Se definió el proceso de inspección visual general a las estructuras de las aeronaves para estimar la probabilidad del error humano, estableciendo sus objetivos, funciones y características principales. Posteriormente, se identificaron todas las interacciones durante el desempeño humano con sistemas y componentes, mediante un análisis de tareas y escenario, donde cualquier factor que influyera en el desempeño humano, se designó como condición latente y para su estudio se dividió en tres clases: externas, internas y estresores. Se adoptó para documentar la relación entre fallos activos y condiciones latentes la taxonomía denominada Sistema de Análisis y Clasificación de

Factores Humanos (*Human Factors Analysis and Classification System*, HFACS) con amplio uso en la industria aeronáutica [16].



**Fig. 1.** Diagrama de flujo para la metodología propuesta. Fuente: autores

El proceso seleccionado se descompuso en acciones simples para predefinirle tasas de error y estimar los efectos de las condiciones latentes. Se utilizó THERP [12], para cuantificar la probabilidad condicional del error humano pues proporciona una base de datos para poder realizar correlaciones analíticas a dichas probabilidades de fallo y que hacen posible determinar el efecto de la fiabilidad humana.

La herramienta que se empleó en la metodología para determinar el efecto del error humano sobre el sistema o proceso, fue el árbol de eventos, estructurado a partir de eventos básicos de error humano, llamados acciones no seguras. Se eligió el árbol de eventos pues posibilita cuantificar el fallo humano a partir de una estructura lógica deductiva. Los caminos de fallo se cuantificaron a partir del producto de las probabilidades de fallo de las acciones inseguras que lo forman. Una vez dibujado correctamente, la probabilidad de cada camino fue calculada multiplicando las probabilidades condicionales de sus ramas, al completar esta fase, cada uno de los fallos activos fue valorado para establecer prioridades según su nivel de peligro.

La probabilidad del error humano de las acciones no seguras representadas en el árbol de eventos se cuantificó según la ecuación (1):

$$BHEP = \sum_1^n (NHEP_i \cdot F_i) \quad (1)$$

Donde:

*BHEP*: probabilidad básica del error humano

*NHEP<sub>i</sub>*: probabilidad nominal de fallo humano para cada camino de fallo

*F<sub>i</sub>*: probabilidad de las acciones inseguras para cada camino de fallo

*n*: cantidad de caminos de fallo

*BHEP* considera la probabilidad del error humano sobre una acción que no es afectada por otra. *NHEP* hace referencia al valor nominal, o genérico, de la probabilidad de fallo humano de las acciones no seguras sin considerar los efectos de las condiciones latentes y las diferencias personales.

Se incorporó el método HEART para estimar el valor del impacto de los efectos de cada una de las condiciones latentes definidas y que aumentan la tendencia a fallar.

El impacto de cada condición latente se determinó mediante la siguiente secuencia:

1. Se identificó el multiplicador mediante el cual se incrementa la tendencia a fallar, asociando las condiciones latentes identificadas con los elementos que se relacionan en HEART.
2. Se estimó la proporción del efecto de cada condición latente en la tarea mediante el juicio de especialistas, este valor estará en el rango de 0 – 1 y representa la probabilidad de influencia que tiene la condición latente sobre la tarea.
3. Se calculó el impacto de la condición latente mediante la ecuación (2):

$$P(EFC_i) = [(multiplicador - 1) \cdot proporción del efecto] + 1 \quad (2)$$

El modelo cuantitativo de estimación probabilista del error humano, incluyendo la influencia de las condiciones latentes se obtiene sumando todos los caminos de fallo e incluyendo el impacto de las condiciones latentes, ecuación (3):

$$HEP = \sum_1^n (NHEP_i \cdot F_i) \cdot \prod_1^m P(EFC_i) \quad (3)$$

Donde:

$HEP$ : probabilidad del error humano

$P(EFC_i)$ : impacto de cada condición latente

$m$ : cantidad total de condiciones latentes

La tercera etapa va a estar orientada a la gestión de la seguridad operacional, identificando las acciones de mitigación, los recursos necesarios y modificaciones a la estructura organizativa. La aplicación de este tipo de soluciones se estableció considerando los criterios sugeridos en la tabla 1 y han sido adaptados de lo expuesto en TEREH [11] y teniendo en cuenta lo planteado por OACI [1] y el Manual de gestión de la seguridad operacional, [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/9859\\_cons\\_es\\_2.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/9859_cons_es_2.pdf) en el control del error humano, donde se requiere dos métodos distintos: primeramente, minimizar el número de errores y, en segundo lugar, reducir el impacto o las consecuencias de los errores mediante el uso de enfoques que promuevan la seguridad.

**Tabla 1.** Criterios sugeridos para determinar las acciones de mitigación. Fuente: autores

Criterio	Descripción
Tipo de solución	La solución es de: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reducción: Estrategia encaminada a aumentar la capacidad de detección y los niveles de respuesta.</li> <li>▪ Captación: Supone que se cometa algún error, por lo que trata de captarlo antes de la etapa operativa.</li> <li>▪ Tolerancia: Se refiere a la capacidad del sistema de aceptar el error sin que ocurran consecuencias catastróficas.</li> </ul>
Tiempo de implementación	Tiempo en que se demora en implementar la solución
Efectos en la seguridad operacional	Determinar cómo la alternativa de solución mejora la seguridad operacional de la organización
Evaluación y seguimiento de las acciones de mitigación	Evaluar y controlar la eficacia de las acciones de mitigación

### 3. Resultados y Discusión

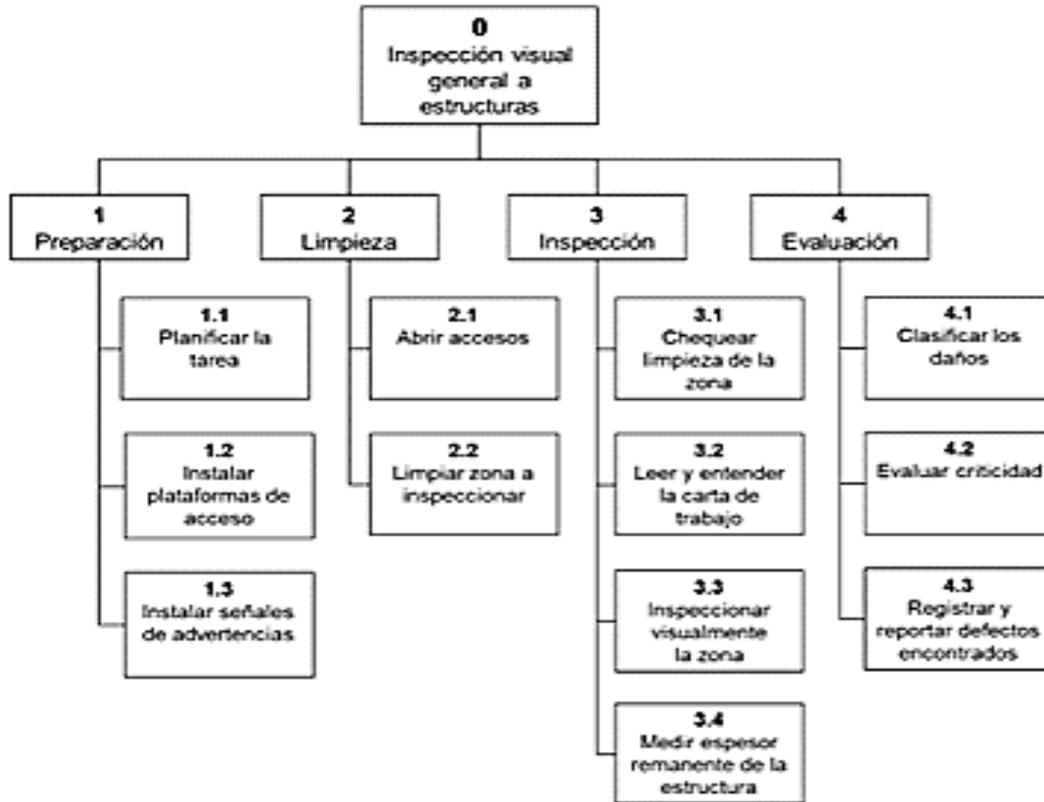
Durante la evaluación del contexto operativo el análisis ergonómico reveló los siguientes aspectos como influyentes en los errores durante los servicios de mantenimiento:

- Posturas de trabajo que exigen movimientos repetitivos, rápidos y forzados o que requieren mantener una posición fija durante períodos largos.
- Exposición al trabajo repetitivo.
- Ejecución de trabajos en sistemas técnicos complejos que requieren formación específica.
- Ocurren situaciones y hechos que provocan que se pierda la atención de la tarea técnica que se está efectuado.
- Las tareas técnicas ejecutadas sistemáticamente, no son asentadas en los documentos donde se registra la experiencia laboral.
- Hay tendencia a la complacencia y confianza al chequear, ejecutar o inspeccionar tareas.
- Existen condiciones de riesgo en el sitio para que puedan suceder incidentes y accidentes graves.
- Factores como fatiga y estrés influyen a veces en la disminución de la atención para el cumplimiento de las tareas.
- Presión para completar las tareas de mantenimiento.
- Exposición a un medio ambiente con elevados niveles de ruido, altas temperaturas y humedad relativa.
- La ejecución de trabajos nocturnos se ve afectada por no existir una iluminación inadecuada.
- Durante el cumplimiento de ciertas tareas hay exposición a vibraciones, humos y vapores tóxicos y ambientes con restricciones de movimiento.

Los factores internos y externos identificados demuestran que las labores de mantenimiento e inspección de aeronaves incluyen tareas complejas y variadas, con escenarios de trabajo donde la probabilidad de cometer errores es alta y por tanto es imprescindible minimizar la frecuencia con que estos ocurren y sus consecuencias. El proceso seleccionado como caso de estudio para evaluar la utilidad de implementar la metodología propuesta tiene como objetivo detectar irregularidades estructurales en las aeronaves, evaluarlas y posteriormente

corregirlas. La metodología de inspección visual se ejecuta conforme a la documentación establecida en el Manual de Mantenimiento de la Aeronave, denominada Descripción para inspección visual general en activos estructurales, la cual contiene información necesaria para desarrollar la inspección visual, dividida en cuatro actividades: preparación, limpieza, procedimiento de inspección y evaluación del daño.

En la figura 2 se presenta un diagrama con la descripción de las acciones desempeñadas durante la tarea de inspección.



**Fig. 2.** Acciones desempeñadas durante la inspección visual a estructuras. Fuente: autores

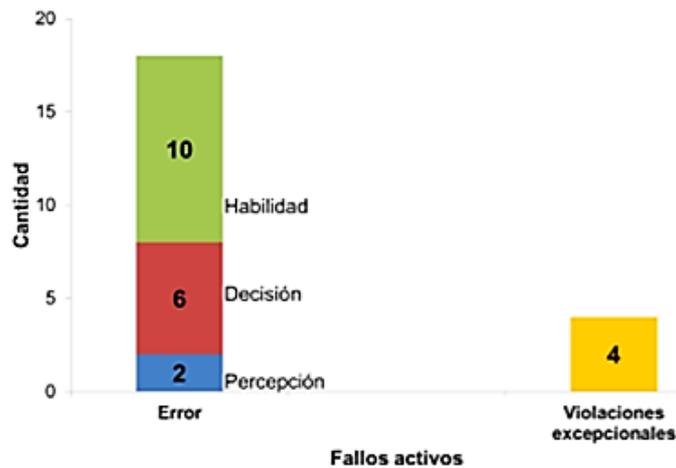
Se identificaron para cada una de las tareas los posibles fallos activos y los tipos de errores humanos que tienen asociados según la taxonomía seleccionada, detectándose para el contexto operacional analizado veintidós errores potenciales:

- Planificación incorrecta del área a inspeccionar. (F<sub>1.1</sub>)
- Se selecciona la plataforma de acceso incorrecta. (F<sub>1.2</sub>)
- No se chequea instalación de las señales de advertencia para prohibir la operación de componentes mecánicos. (F<sub>1.3</sub>)
- No abrir el acceso que está definido en el esquema de la tarea. (F<sub>2.1</sub>)
- No realizar una correcta limpieza del área a inspeccionar. (F<sub>2.2.1</sub>)
- Seleccionar productos y herramientas incorrectas para el tipo de superficie. (F<sub>2.2.2</sub>)
- No se chequea el estado de la limpieza en el área a inspeccionar. (F<sub>3.1</sub>)
- El inspector chequea una zona incorrecta al no recibir la carta tecnológica correcta. (F<sub>3.2.1</sub>)
- El inspector chequea incorrectamente el área pues recibe las instrucciones de trabajo incompletas. (F<sub>3.2.2</sub>)
- El inspector realiza una lectura incorrecta de las instrucciones. (F<sub>3.2.3</sub>)
- Interpretación incorrecta de las indicaciones. (F<sub>3.2.4</sub>)
- No se selecciona el equipamiento correcto para apoyar la inspección. (F<sub>3.3.1</sub>)
- El inspector opera incorrectamente el equipamiento. (F<sub>3.3.2</sub>)
- El inspector no puede definir el tipo de defecto pues se inspecciona el área a la distancia incorrecta. (F<sub>3.3.3</sub>)
- El inspector no puede definir el tipo de defecto pues la iluminación no es la adecuada. (F<sub>3.3.4</sub>)
- No se miden correctamente los remanentes de la estructura. (F<sub>3.4</sub>)
- No se evalúa el defecto encontrado. (F<sub>4.1.1</sub>)
- Se evalúa incorrectamente el defecto encontrado. (F<sub>4.1.2</sub>)
- Evaluación incorrecta de la criticidad del defecto. (F<sub>4.2</sub>)

- El inspector no registra un defecto detectado. (F<sub>4.3.1</sub>)
- El inspector registra incorrectamente el defecto detectado. (F<sub>4.3.2</sub>)
- El inspector no reporta el defecto detectado. (F<sub>4.3.3</sub>)

En el proceso se detectaron 22 fallos activos, siendo la etapa de inspección visual la más crítica con 10, lo que representa el 46 % del total, determinando que en esta fase la combinación de condiciones puede provocar una alta predisposición a que ocurran errores humanos, con efectos directos para que ocurran errores de mantenimientos, incidentes o accidentes, así como futuras consecuencias operacionales. La etapa de evaluación fue la segunda más crítica con 6 fallos activos, un 27 % del total, siendo la preparación y limpieza las de menor incidencias con 3 fallos activos cada una.

En la figura 3 se puede observar el resultado de la clasificación de los posibles errores humanos durante la inspección visual general a las estructuras de las aeronaves según la taxonomía utilizada, donde los errores por habilidad, decisión o percepción representan el 82 %, siendo los de habilidad los que tienen una mayor significación, resultado que coincide con estudios similares en el mantenimiento aeronáutico [15, 17].



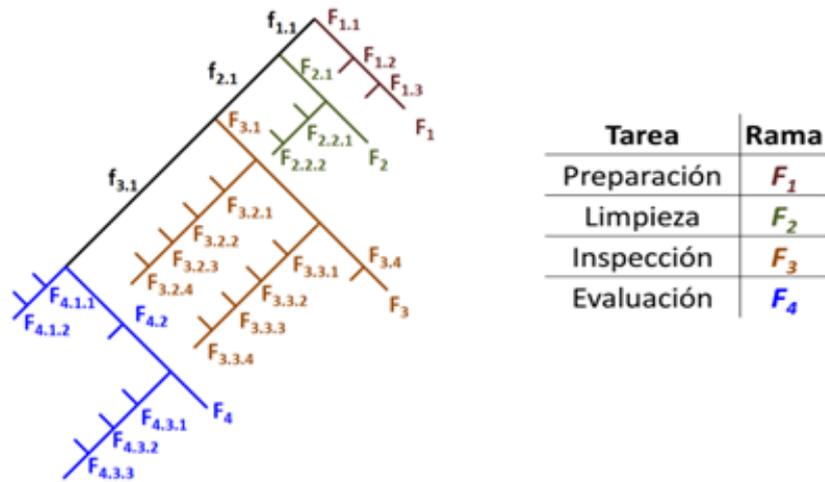
**Fig. 3.** Clasificación de los fallos activos según la taxonomía utilizada. Fuente: autores

En la tabla 2 se presenta como se clasificaron por el equipo de trabajo las condiciones latentes identificadas como influyentes en los errores humanos durante la ejecución de las tareas de mantenimiento e inspección en el contexto de estudio.

**Tabla 2.** Clasificación de las condiciones latentes según sus categorías. Fuente: autores

Interna	Externa	Estresores
Capacitación/Destreza	Frecuencia y carácter crítico de la tarea	Exposición a trabajos repetitivos
Práctica/Experiencia	Ambiente de trabajo (temperatura, iluminación y ruido)	Presión para completar las tareas
Actitud ante el trabajo		Fatiga
		Estrés
		Distracciones/Interrupciones
		Alto nivel de riesgo
		Restricciones de movimiento
		Vibraciones
		Humos y vapores tóxicos

La condición de partida para determinar la probabilidad del error humano durante el proceso de inspección visual fue delinear el árbol de eventos, siguiendo una estructura lógica deductiva como se muestra en la figura 4 basada en los posibles fallos activos y el análisis de tareas.



**Fig. 4.** Árbol de eventos de fallos humanos de la inspección visual. Fuente: autores

La cuantificación de la probabilidad para cada camino del árbol de eventos se realizó de la siguiente forma:

$$F_1 = f_{1.1}F_{1.2}F_{1.3}$$

$$F_2 = f_{1.1}f_{2.1} F_{2.2}$$

$$F_2 = f_{1.1}f_{2.1}(F_{2.2.1}F_{2.2.2})$$

$$F_3 = f_{1.1}f_{2.1}F_{3.1}F_{3.2}F_{3.3}F_{3.4}$$

$$F_3 = f_{1.1}f_{2.1}F_{3.1}(F_{3.2.1}F_{3.2.2}F_{3.2.3}F_{3.2.4})(F_{3.3.1}F_{3.3.2}F_{3.3.3}F_{3.3.4})F_{3.4}$$

$$F_4 = f_{1.1}f_{2.1}f_{3.1}F_{4.1}F_{4.2}F_{4.3}$$

$$F_4 = f_{1.1}f_{2.1}f_{3.1}(F_{4.1.1}F_{4.1.2})F_{4.2}(F_{4.3.1}F_{4.3.2}F_{4.3.3})$$

Los valores de probabilidades de ocurrencia del fallo humano en las ecuaciones anteriores, fueron determinados tomando como referencia los resultados que se resumen en la tabla 3.

**Tabla 3.** Valores de probabilidades para el árbol de eventos. Fuente: autores

Acción	Probabilidad	Acción	Probabilidad
$f_{1.1}$	0,9970	$F_{3.2.4}$	0,0010
$F_{1.1}$	0,0030	$F_{3.3.1}$	0,0005
$F_{1.2}$	0,0010	$F_{3.3.2}$	0,0030
$F_{1.3}$	0,1000	$F_{3.3.3}$	0,0010
$f_{2.1}$	0,9995	$F_{3.3.4}$	0,0010
$F_{2.1}$	0,0005	$F_{3.4}$	0,0010
$F_{2.2.1}$	0,0030	$F_{4.1.1}$	0,0500
$F_{2.2.2}$	0,0030	$F_{4.1.2}$	0,0500
$f_{3.1}$	0,8000	$F_{4.2}$	0,0100
$F_{3.1}$	0,2000	$F_{4.3.1}$	0,0500
$F_{3.2.1}$	0,3000	$F_{4.3.2}$	0,0060
$F_{3.2.2}$	0,0030	$F_{4.3.3}$	0,0500
$F_{3.2.3}$	0,0500		

Por tanto, la probabilidad para cada uno de los caminos del árbol de eventos es:

$$F_1 = 3 \cdot 10^{-7}$$

$$F_2 = 4,5 \cdot 10^{-9} \rightarrow F_2 \ll 10^{-5}$$

$$F_3 = 1,3 \cdot 10^{-23} \rightarrow F_3 \ll 10^{-5}$$

$$F_4 = 3 \cdot 10^{-10} \rightarrow F_4 \ll 10^{-5}$$

La probabilidad nominal de fallo humano para cada camino de fallo (NHEP) para cada camino se cuantificó mediante el método HEART. En la tabla 4 se pueden observar los resultados obtenidos.

La probabilidad básica del error humano se obtuvo aplicando la ecuación 1:

$$BHEP = \sum_1^n (NHEP_i \cdot F_i) \quad (1)$$

$$BHEP = NHEP_1 \cdot F_1 + NHEP_2 \cdot F_2 + NHEP_3 \cdot F_3 + NHEP_4 \cdot F_4$$

$$BHEP = 0,120(3 \cdot 10^{-7}) + 0,007(\ll 10^{-5}) + 0,120(\ll 10^{-5}) + 0,120(\ll 10^{-5})$$

$$BHEP \approx 3,6 \cdot 10^{-8}$$

**Tabla 4.** Probabilidad nominal de fallo humano aplicando HEART. Fuente: autores

Tarea	Rama de árbol de eventos	Clase HEART	Percentil nominal
Preparación	F1	C	0,120
Limpieza	F2	E	0,007
Inspección	F3	C	0,120
Evaluación	F4	C	0,120

El equipo de especialistas definió que para el contexto analizado, las condiciones latentes que más influyen en la tarea de inspección visual general a las estructuras de aeronave son: falta de capacitación del inspector (EPC1); inexperiencia (EPC2); presencia de distracciones e interrupciones durante la ejecución de la tarea (EPC3) y existencia de presión para completar las tareas (EPC4). Se determinó la probabilidad de ocurrencia de cada una de estas condiciones utilizando el método HEART y se ajustó su impacto en la probabilidad de error humano de la tarea completa mediante la ecuación (2), los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5, donde se puede observar como dentro de las condiciones que predisponen que tengan lugar acciones de error humano en el escenario evaluado, las presiones organizacionales (EPC4) para completar las tareas de inspección son el factor fundamental y más influyente para que ocurran acciones humanas erróneas.

**Tabla 5.** Probabilidad de error humano considerando condiciones latentes. Fuente: autores

Tarea	BHEP	Condición latente	Multiplicador	Proporción del efecto	Valor del impacto	HEP
Inspección visual general en activos estructurales	3,6E-08	EPC1	3	0,55	2,1	1,12E-06
		EPC2	3	0,45	1,9	
		EPC3	1,1	0,35	1,035	
		EPC4	11	0,65	7,5	

Atendiendo a los resultados obtenidos se definió que los métodos de control en la gestión de la seguridad operacional seguirían dos componentes fundamentales: reducción del error y contención del error, considerando que en el mantenimiento e inspección de aeronaves, la mayor cantidad de tareas son realizadas mediante trabajos en grupos. Por tanto, en la medida que pueda ser mejorado el desempeño individual y la coordinación para comunicarse, trabajar en equipo, compartir conocimiento y contribuir a la toma de decisiones, las oportunidades para reducir los errores se incrementan. En este sentido se recomendó que deben implementarse soluciones de formación de competencias y desempeño para desarrollar prácticas positivas y asertivas de comunicación, así como la cooperación en equipo, siguiendo los atributos que se listan a continuación:

- Apoyo y participación de todo el personal de la organización.
- Debe convertirse en parte de la cultura organizacional.
- Dirigido a mejorar las habilidades de comunicación.
- Adaptado al contexto operacional, incluyendo la identificación y corrección de problemas potenciales.
- Incluye análisis del desempeño para todos los que participan en el programa.
- Incorporar estudios de trabajo en equipo.

Aunque la aplicación de este tipo de programa puede ser a corto plazo, los beneficios son tangibles en un período de tiempo más prolongado, pues implica un cambio en la cultura organizacional, modificación de procedimientos, métodos y estilos de trabajo y sobre todo un cambio en la forma en que cada uno de los miembros interioriza la necesidad y el propósito de evolucionar. Sin embargo, se sugirió considerar los siguientes aspectos que pueden inducir a que ocurran o continúe los fallos activos potenciales y su impacto en el proceso productivo:

- Diseño de documentos y procedimientos no ajustados al contexto operativo.
- Información emitida por el departamento de Ingeniería compleja y redundante.
- Instrucciones de trabajo inadecuadas.
- Uso inadecuado de las mejores prácticas en las técnicas de comunicación.

En la tabla 6 se muestran las propuestas para minimizar los errores durante el proceso de inspección visual y reducir su impacto en la seguridad operacional.

**Tabla 6.** Estrategias potenciales para mejorar la inspección visual. Fuente: autores

Fase	Objetivo Organizacional	Acciones de formación	Meta
Preparación	Rediseñar las órdenes de trabajo. Mejorar las plataformas de accesos	Entrenamiento en procedimientos	Mejora continua del sistema de gestión de la seguridad operacional
Limpieza	Garantizar los materiales y equipamiento para efectuar esta actividad	Entrenamiento en chequear limpieza de las áreas a inspeccionar	
Inspección	Crear condiciones de iluminación adecuada y equipamiento para apoyar las inspecciones	Entrenamiento en localización de la zona a inspeccionar y búsqueda visual y reconocimiento sobre indicaciones de posibles defectos	
Evaluación	Mejorar la retroalimentación de información hacia los inspectores y los marcajes de fallos detectados	Entrenamiento en toma de decisiones técnicas y creación de habilidades para escribir reportes	

Como resultado del análisis se plantearon modificaciones en relación al control y medición del rendimiento de la seguridad operacional en la organización y se incorporó un indicador (SPI) y metas de rendimiento (SPT) para observar, analizar y buscar tendencias.

El nuevo indicador de seguridad operacional se establece en la ecuación (4):

$$\% \text{ Defectos vs tareas de inspeccion} = \frac{\text{Defectos detectados en áreas inspeccionadas}}{\text{Total de tareas de inspeccion realizadas}} \cdot 100 \quad (4)$$

Este SPI mide la proporción de defectos detectados en áreas inspeccionadas respecto al total de tareas de inspección en por ciento y el resultado deseado es que sea un 3% o menor. El SPT es reducir en un 5 % cada año los defectos detectados en áreas que ya fueron inspeccionadas previamente. La junta de seguridad operacional de la empresa se encargará de realizar la evaluación del impacto de las acciones tomadas.

## Conclusiones

La metodología propuesta emplea herramientas ergonómicas para identificar las condiciones latentes y un modelo para la descripción y análisis de las tareas desempeñadas, además, potencia con las alternativas de solución la gestión de la seguridad operacional. Los resultados de la clasificación de los fallos activos según la taxonomía utilizada, confirmaron que en la industria aeronáutica los errores por habilidad tienen una mayor significación. La implementación de la metodología propuesta contribuye a la mejora continua del sistema de gestión de la seguridad operacional durante el mantenimiento de aeronaves de alas fija.

## Referencias

1. Organización de Aviación Civil Internacional, OACI. Anexo 19 - Gestión de la seguridad operacional. Quebec: Organización de Aviación Civil Internacional; 2016. [Citado el: 25 de febrero de 2024] [https://www.dgac.gob.bo/wp-content/uploads/2018/05/PDE\\_1\\_Anexo19.pdf](https://www.dgac.gob.bo/wp-content/uploads/2018/05/PDE_1_Anexo19.pdf)
2. Mfundo N, Kapil G, Madindwa Mashinini. Causes and Impact of Human Error in Maintenance of Mechanical Systems. MATEC Web of Conferences. 2020;312(1):05001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031205001>
3. Zhe S, Jinding X, Pingbo T, Nancy J, Cooke, R, Boring L. Human reliability for safe and efficient civil infrastructure operation and maintenance – A review. Developments in the Built Environment. 2020;4:100028. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100028>
4. Benítez Montalvo RI, Díaz Concepción A, Cabrera Gómez J, García Palencia O, Maura Echenique A. Assessment of components of operational reliability in walk-in freezer. Ingeniería Mecánica. 2016;19(2): p.78-84.
5. Díaz Concepción A, del Castillo Serpa A, Cabrera Gómez J, Benítez Montalvo R, Villar Ledo L, Rodríguez Piñeiro AJ. Formulación de un nuevo concepto de confiabilidad operacional. Ingeniare. 2021;29(1):87-93. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000100087>
6. García Palencia O. Análisis de Confiabilidad Humana del personal de una planta de generación eléctrica. In: VII Congreso Mundial de Mantenimiento y Gestión de Activos. Cartagena de Indias: Colombia; 2015.
7. Dhillon B. Human Reliability, Error and Human Factors in Engineering Maintenance: with Reference to Aviation and Power Generation. Florida, USA: CRC Press. Taylor & Francis Group, LLC; 2009.

8. Chen W, Huan S. Human Reliability Analysis for Visual Inspection in Aviation Maintenance by a Bayesian Network Approach. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. 2014;2449(1):105-113. <https://doi.org/10.3141/2449-12>
9. Lin Y, Pan X, He C. Human Reliability Analysis in Carrier-based Aircraft Recovery procedure based on CREAM. In: First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE). Beijing, China: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/ICRSE.2015.7366420>
10. Reiser C, Bayma A, Angelo da Fonseca D. Campobasso Human reliability analysis in an aircraft decompression event. In: 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Belo Horizonte, Brasil: ICAS Legal notes; 2018. [Citado el: 23 de noviembre de 2023] Disponible en: [https://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018\\_0269\\_paper.pdf](https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0269_paper.pdf)
11. Casares Li R, Rodríguez Hernández AG, Viña Brito SJ Análisis de errores humanos mediante la tecnología TEREH: experiencias en su aplicación. Ingeniería Industrial 2016;XXXVII(1):49-58.
12. Dongwang Y, Hongwei L. Application of THERP HCR model for valve overhaul in nuclear power plant. AIP Conference Proceedings. 2017;1839(1):1-5. <https://doi.org/10.1063/1.4982410>
13. Cheng R. Human Factor Analysis about Human Error on Aviation Maintenance. Advances in Social Science, Education and Humanities Research (ASSEHR). 2018;181:120-124. <https://doi.org/10.2991/icsshe-18.2018.30>
14. Guglielmi D, Paolucci A, Cozzani V, Giovanni Mariani M, Pietrantoni L, Fraboni F. Integrating Human Barriers in Human Reliability Analysis: A New Model for the Energy Sector. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022;19(5):2797. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052797>
15. Virovac D, Domitrovic A, Ern Bazijanac E. The influence of human factor in aircraft maintenance. Promet – Traffic & Transportation. 2017;29(3):257-266. <https://doi.org/10.7307/ptt.v9i3.2068>
16. Hulme A, Stanton NA, Walker GH, Waterson P, Salmon PM. Accident analysis in practice: A review of Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) applications in the peer reviewed academic literature. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 2019;63(1):1849-1853. <https://doi.org/10.1177/1071181319631086>
17. Jiang T, Lu, C-t, Fu H, Palmer N, Peng J. An inductive approach to identify aviation maintenance human errors and risk controls. Collegiate Aviation Review International. 2022;40(1):113-142. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19884.28808>

**Editor:**

Evelio Palomino Marín.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

**Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

**Néstor Viego Ariet.** <https://orcid.org/0009-0008-5318-3919>

Participó en el diseño de la investigación, la investigación bibliográfica, diseño de los modelos, dirigió el trabajo del equipo de especialistas, trabajó en la definición del proceso de inspección visual general a las estructuras de las aeronaves, en el árbol de eventos, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.

**Armando Díaz Concepción.** <https://orcid.org/0000-0001-9849-0826>

Participó en el diseño de la investigación, la investigación bibliográfica, diseño de los modelos, dirigió el trabajo del equipo de especialistas, trabajó en la definición del proceso de inspección visual general a las estructuras de las aeronaves, en el árbol de eventos, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.

**Reicelis Casares Le.** <https://orcid.org/0000-0002-2829-5539>

Participó en el diseño de la investigación, la investigación bibliográfica, diseño de los modelos, dirigió el trabajo del equipo de especialistas, trabajó en la definición del proceso de inspección visual general a las estructuras de las aeronaves, en el árbol de eventos, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.

**Jesús Cabrera Gómez.** <https://orcid.org/0000-0002-9884-3692>

Trabajó en el diseño de la investigación, selección de las referencias, diseño de los modelos, análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.

**Alexander Alfonso Álvarez.** <https://orcid.org/0000-0001-5129-7164>

Trabajó en el diseño de la investigación, selección de las referencias, diseño de los modelos, análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.

**Joel Guillen García.** <https://orcid.org/0000-0002-5714-2400>

Trabajó en el diseño de la investigación, selección de las referencias, diseño de los modelos, análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.

**Alberto J. Rodríguez Piñero.** <https://orcid.org/0000-0002-9079-2050>

Colaboró en el diseño de los modelos, búsqueda de las referencias, análisis de los resultados y redacción del borrador del artículo y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del trabajo final.