

Mejora de las inspecciones de 100 horas en aeronaves agrícolas Thrush S2R-T34 mediante mantenimiento ajustado

(Enhancement of 100-Hour Inspections on Thrush S2R-T34 Agricultural Aircraft through Lean Maintenance)

John Oswaldo Cajamarca Guerrero, Rodger Benjamín Salazar Loor
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador
jcajamarca@uteq.edu.ec, rsalazarl@uteq.edu.ec

Resumen: En la aviación agrícola empleada para la aplicación aérea de herbicidas en plantaciones, las inspecciones de 100 horas especificadas por la normativa de la FAA -14 CFR §91.409 garantizan seguridad y disponibilidad, pero enfrentan problemas como inventarios excesivos, desplazamientos innecesarios y reprocesos. Este trabajo propone aplicar *Lean Maintenance* en aviones Thrush S2R-T34, integrando la metodología 5S para optimizar talleres, un sistema *Just-in-Time* para suministro eficiente de repuestos y una lista de verificación digital basada en Análisis Modal de Fallos y Efectos y Diagrama de Análisis de Procesos. La intervención mostró una reducción del 40 % en inventario improductivo, del 45 % en tiempo de gestión de repuestos y del 26,7 % en desplazamientos. Además, los indicadores revelaron mejoras significativas: el MTBF aumentó de 13,0 h a 26,6–29,5 h (+115 %), el MTTR disminuyó de 4,3–4,6 h a $\approx 3,1$ h (–30 %) y la disponibilidad mecánica se incrementó del 74–75 % al 90 %, liberando aproximadamente 120 h-vuelo adicionales por semestre y aeronave. Este modelo escalable ofrece una estrategia replicable para optimizar mantenimiento aeronáutico.

Palabras clave: AMFE, 5S, justo a tiempo, MRO aeronáutico, disponibilidad mecánica.

Abstract: In agricultural aviation used for aerial herbicide application in plantations, 100-hour inspections as specified by FAA regulation 14 CFR §91.409, ensure safety and availability but face issues such as excessive inventories, unnecessary movements, and rework. This study proposes applying Lean Maintenance to Thrush S2R-T34 aircraft, integrating the 5S methodology to optimize workshops, a Just-in-Time system for efficient spare-parts supply, and a digital checklist based on Failure Mode and Effects Analysis and a Process Analysis Diagram. The intervention reduced non-productive inventory by 40%, spare-parts management time by 45%, and movements by 26,7%. Key indicators also improved significantly: MTBF increased from 13,0 h to 26,6–29,5 h (+115%), MTTR dropped from 4,3–4,6 h to $\approx 3,1$ h (–30%), and mechanical availability rose from 74–75% to 90%, freeing approximately 120 flight-hours per semester per aircraft. This scalable model offers a replicable strategy to optimize aircraft maintenance.

Keywords: FMEA, 5S, Just-in-Time, Aeronautical MRO, Mechanical availability.

1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura intensiva, el uso de aeronaves tripuladas o no tripuladas se ha consolidado como la alternativa más rentable y ágil para el control fitosanitario, pues permite reaccionar con rapidez ante brotes inesperados de plagas y cubrir grandes extensiones sin dañar ni el cultivo ni la estructura del suelo, a diferencia de la maquinaria terrestre [1]. Además, operar a la altitud óptima contribuye a lograr

una deposición más uniforme de las gotas, incrementando la eficacia biológica y reduciendo tanto los costes como los tiempos de aplicación en comparación con los métodos convencionales [2]. Sin embargo, estas aeronaves afrontan condiciones operativas extremas como cargas cíclicas elevadas, abrasión por partículas y ciclos térmicos bruscos, que aceleran los procesos de fatiga estructural y corrosión superficial, generan microfracturas en el fuselaje y, en última instancia, acortan su vida útil [3].

Para hacer frente a estos retos, el sector ha adoptado modelos de mantenimiento integrados que optimizan la planificación de las intervenciones y reducen los costes operativos. Por una parte, el análisis predictivo, fundamentado en la estimación de la demanda y en la caracterización del rendimiento de los equipos, define umbrales que evitan tareas innecesarias. Este enfoque continuo y basado en datos anticipa posibles fallos, minimiza los tiempos de inactividad y mejora la programación de actividades [4]. Por otra parte, el mantenimiento basado en la condición (CBM) emplea el estado real del activo, medido mediante variables como vibración, temperatura, desgaste o análisis de aceite, para detectar la degradación y programar acciones correctivas cuando los indicadores superan umbrales predefinidos, en lugar de hacerlo por calendario [5].

En este contexto, los procesos de Mantenimiento, Reparación y Revisión (MRO) resultan imprescindibles para garantizar la seguridad y la fiabilidad operacional; este mercado factura anualmente alrededor de 78.500 millones de dólares, suponiendo aproximadamente el 11 % de los costes operativos de una aerolínea [6]. Siendo esencial la eliminación de desperdicios y control de costes para mejora de su eficiencia, ya que un MRO reactivo incrementa significativamente las incidencias, los fallos y los periodos de inactividad, poniendo en riesgo la disponibilidad de la flota [7].

En el ámbito de la aviación comercial, donde la fiabilidad y la disponibilidad son pilares de la seguridad operacional, los costes de mantenimiento representan aproximadamente un 13 % de los gastos de explotación, mientras que las interrupciones no planificadas pueden absorber entre el 15 % y el 60 % del presupuesto total. Los enfoques tradicionales de mantenimiento, ya sea la reparación reactiva tras una avería o la ejecución de programas preventivos rígidos, presentan limitaciones claras: el primero genera elevados costes de oportunidad al operar de forma estrictamente reactiva, y el segundo realiza intervenciones innecesarias al no ajustarse al estado real de los activos, lo que conduce a sobrecostes y a una reducción de la eficiencia global [8].

El enfoque Lean se concibe como un sistema de creación de valor orientado a la eliminación de actividades que no aportan valor y a la promoción de la mejora continua impulsada por el equipo humano, lo que exige adaptaciones específicas en los procesos de MRO debido a la baja frecuencia de las intervenciones y la complejidad técnica involucrada [9]. El mantenimiento ajustado traslada estos principios al ámbito aeronáutico, integrando prácticas de mantenimiento productivo total (TPM) y mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para optimizar la planificación de las intervenciones, reducir costes y maximizar la disponibilidad operativa de los activos [10].

Entre sus herramientas fundamentales destaca el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), metodología sistemática y preventiva originalmente desarrollada por la NASA para anticipar y mitigar modos de fallo en entornos aeroespaciales, así como la gestión *Just in Time* (JIT) de repuestos y el mantenimiento predictivo basado en condición, que permiten programar acciones correctivas de acuerdo con el estado real de los componentes [11]. Asimismo, se aplican metodologías como 5S, Kanban y *Single Minute Exchange of Die* (SMED) para reducir tiempos de preparación y eliminar desperdicios asociados a la sobreproducción, los tiempos de espera y los movimientos innecesarios, alineando los procesos de MRO con objetivos de eficiencia y calidad [12].

De igual modo, al integrar metodologías Lean en el MRO, como 5S, TPM, mantenimiento autónomo y gestión visual, se han eliminado tareas no productivas de las rutas críticas, mejorado el rendimiento de los equipos técnicos, potenciado el resultado de las acciones de mantenimiento y se ha aumentado la eficiencia de la cadena de suministro, liberando espacio y recursos, reforzando la

autonomía del personal, optimizando las condiciones ergonómicas y de seguridad, y reduciendo significativamente los tiempos de inactividad, lo que consolida un mantenimiento más ágil y sostenible [13], [14]. En este sentido, *Lean Maintenance* se erige como la evolución natural del TPM al integrar estrategias de mantenimiento proactivo con prácticas de manufactura esbelta, dando lugar a un ciclo de mejora continua que maximiza la eficiencia operativa, crea mayor valor para clientes y partes interesadas, y alinea las operaciones de MRO con los objetivos estratégicos de negocio y la excelencia operacional [15].

Ante el reto de asegurar la máxima disponibilidad y seguridad de la flota, tanto en mantenimiento en línea como en revisiones de hangar, se identifican desperdicios operativos que lastran la eficiencia del sistema MRO. Entre ellos destacan la sobreproducción, los desplazamientos y movimientos innecesarios, el exceso de inventario de piezas, las demoras por espera de repuestos o documentación, las tareas que no aportan valor y la subutilización de las competencias técnicas del personal [16].

El mantenimiento Lean ha aliviado muchos desperdicios, pero las inspecciones periódicas en MRO aún se topan con cuellos de botella críticos. Aunque cada aeronave cuenta con documentación técnica personalizada y en condiciones normales no deberían existir diferencias con su configuración real, en la práctica aparecen discrepancias puntuales, como supersedencias de números de parte, certificados suplementarios de tipo recientes o boletines de servicio aún no reflejados, que retrasan la localización de piezas esenciales; el uso exclusivo de planos bidimensionales con detalles operativos incompletos obliga a consultas frecuentes al fabricante; las condiciones ergonómicas deficientes y los espacios reducidos aumentan la fatiga de los técnicos y prolongan los tiempos de intervención; la similar morfología de múltiples componentes en entornos complejos complica su identificación; y las largas secuencias de desmontaje y montaje generan desplazamientos y esperas innecesarias que elevan costes, ponen en riesgo la seguridad y merman la disponibilidad de la flota [17].

La normativa de Estados Unidos (FAA, 14 CFR §91.409 y 14 CFR Parte 43, Apéndice D, edición 2025) exige, además de la inspección anual, una revisión cada 100 horas de vuelo para las aeronaves empleadas en operaciones comerciales o instrucción remunerada. La inspección de 100 horas puede ser realizada y aprobada para retorno al servicio por un mecánico con licencia A&P o por un taller de reparación certificado conforme a la parte 145. En cambio, la inspección anual requiere un inspector con autorización IA. Se contempla un plazo de hasta diez horas de vuelo para trasladar la aeronave al taller sin interrumpir el siguiente ciclo de inspección y, en flotas de alta utilización, este proceso puede dividirse en fases más cortas para minimizar el tiempo de inactividad [18].

Durante la inspección de 100 horas, obligatoria cuando la aeronave se emplea para trabajo aéreo o instrucción remunerada, la ejecución se realiza dentro del programa de mantenimiento aprobado del operador. Este programa se basa en las instrucciones y manuales del fabricante, con sus tareas, referencias e intervalos, y se adapta a los activos y medios de operación del explotador con la aceptación de la autoridad aeronáutica. En esa inspección se revisan en detalle la integridad de largueros, costillas y uniones alares; los cables, poleas y bisagras de los sistemas de control; los puntos de fijación y las posibles fugas del motor; así como el desgaste, la corrosión y el funcionamiento de los amortiguadores del tren de aterrizaje. Aunque algunos fabricantes permiten ajustes de trimado o rigging en tierra, se desaconseja realizarlos sin la documentación aplicable y la validación en vuelo correspondientes, ya que podrían comprometer la estabilidad certificada del ala. Al cierre, el mecánico autorizado registra la fecha, el total de horas y su firma en el libro de mantenimiento. El operador, por su parte, verifica la vigencia del certificado de aeronavegabilidad, el registro, las limitaciones operativas y el cálculo de peso y balance antes de autorizar el siguiente vuelo [19].

El mantenimiento aeronáutico de aviónica está sometido a los más exigentes estándares de la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos (FAA) y de la Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA), que cubren la formación y certificación del personal, así como procedimientos exhaustivos de inspección, calibración y reparación de los sistemas eléctricos, electrónicos, de navegación, comunicación e instrumentación de la aeronave. Cada intervención debe

quedar documentada de manera detallada, lo que refuerza la fiabilidad y la seguridad operacional de los sistemas y protege al operador de posibles sanciones administrativas o responsabilidades penales cuando se respeta la normativa. Asimismo, corresponde al operador comprobar que todas las labores de mantenimiento aeronáutico de aviónica se han ejecutado conforme a los manuales de servicio y a las directrices regulatorias vigentes, garantizando así la continuidad de la aeronavegabilidad [20].

Como complemento al exigente marco regulatorio del mantenimiento aeronáutico, la metodología 5S, de origen japonés, se despliega en cinco fases encadenadas: *Seiri* (clasificar), *Seiton* (ordenar), *Seiso* (limpiar), *Seiketsu* (estandarizar) y *Shitsuke* (disciplina) [21]. Su propósito es eliminar actividades sin valor añadido, optimizar los flujos de trabajo y mantener los espacios de taller limpios y ordenados. Mediante ayudas visuales y procedimientos estandarizados, 5S reduce drásticamente los tiempos de búsqueda de herramientas e insumos, minimiza movimientos y retrabajos, y mejora la seguridad, la ergonomía y la productividad. Sin embargo, la durabilidad de estos resultados exige el compromiso activo de todos los niveles de la organización y un patrocinio constante de la alta dirección; de lo contrario, incluso las prácticas 5S más consolidadas tienden a degradarse con el tiempo y a poner en riesgo la cultura de mejora continua [22].

Sumado a la estandarización 5S, los indicadores clave de desempeño (KPIs) aportan métricas objetivas para medir tanto la eficiencia de las operaciones de mantenimiento como la fiabilidad de los activos [23]. Tras definir indicadores como el tiempo medio entre fallos (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR), se despliegan sistemas de monitorización en tiempo real y ciclos de evaluación periódica que capturan datos precisos. Esta información alimenta modelos predictivos, permite optimizar la planificación de intervenciones y priorizar recursos donde generen mayor impacto. Al cuantificar el rendimiento frente a los objetivos estratégicos, los KPIs validan la efectividad de cada acción, facilitan la detección temprana de desviaciones y respaldan la gobernanza de los activos mediante informes integrados y paneles de control dinámicos [24].

El objetivo de esta investigación es optimizar las inspecciones de 100 horas en los aviones agrícolas Thrush S2R-T34 aplicando un enfoque de mantenimiento ajustado. Se analiza cómo la implantación de 5S, el abastecimiento JIT y el (AMFE) contribuye a minimizar tiempos no productivos, reducir el mantenimiento correctivo reactivo y elevar la disponibilidad operativa y la fiabilidad de la flota. Para cuantificar estos beneficios, se identifican y miden los principales desperdicios durante la inspección y su impacto global, usando los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad mecánica.

2. METODOLOGÍA

Metodológicamente, la intervención arranca con la organización y agilización del taller mediante 5S y un sistema JIT para eliminar desplazamientos y esperas innecesarias. A continuación, se despliega el AMFE para anticipar y priorizar modos de fallo críticos, definiendo acciones preventivas concretas. La eficacia de cada fase se valida mediante la comparación de los KPIs, MTBF, MTTR, antes y después de la implementación. Finalmente, se propone un modelo modular y escalable que otras organizaciones de aviación agrícola puedan adaptar para mejorar sus procesos de mantenimiento y optimizar costes operativos.

El AMFE se llevó a cabo conforme a la norma UNE-EN 60812, un estándar internacional para el análisis sistemático de riesgos en sistemas complejos [25]. Según esta guía, el AMFE es un método analítico y estructurado que identifica modos de fallo potenciales, determina sus causas y evalúa los efectos sobre el desempeño del sistema, así como las vías de detección temprana. La priorización resultante facilita el diseño de acciones correctivas y preventivas orientadas a mitigar los riesgos más críticos.

El procedimiento siguió el diagrama de flujo de la norma UNE-EN 60812 que se muestra en la Figura 1, que organiza de manera ordenada cada fase del AMFE: selección del componente, identificación de modos de fallo, análisis de causas y efectos, evaluación del riesgo y definición

de acciones de mitigación. En primer lugar, se determinó el conjunto de elementos críticos del Thrush S2R-T34; para cada uno se registraron los posibles modos de fallo, se analizaron sus causas raíz y se describieron sus consecuencias operativas. Posteriormente, estos datos sirvieron de base para calcular el número de prioridad de riesgo (NPR) y priorizar las medidas preventivas y correctivas más efectivas.

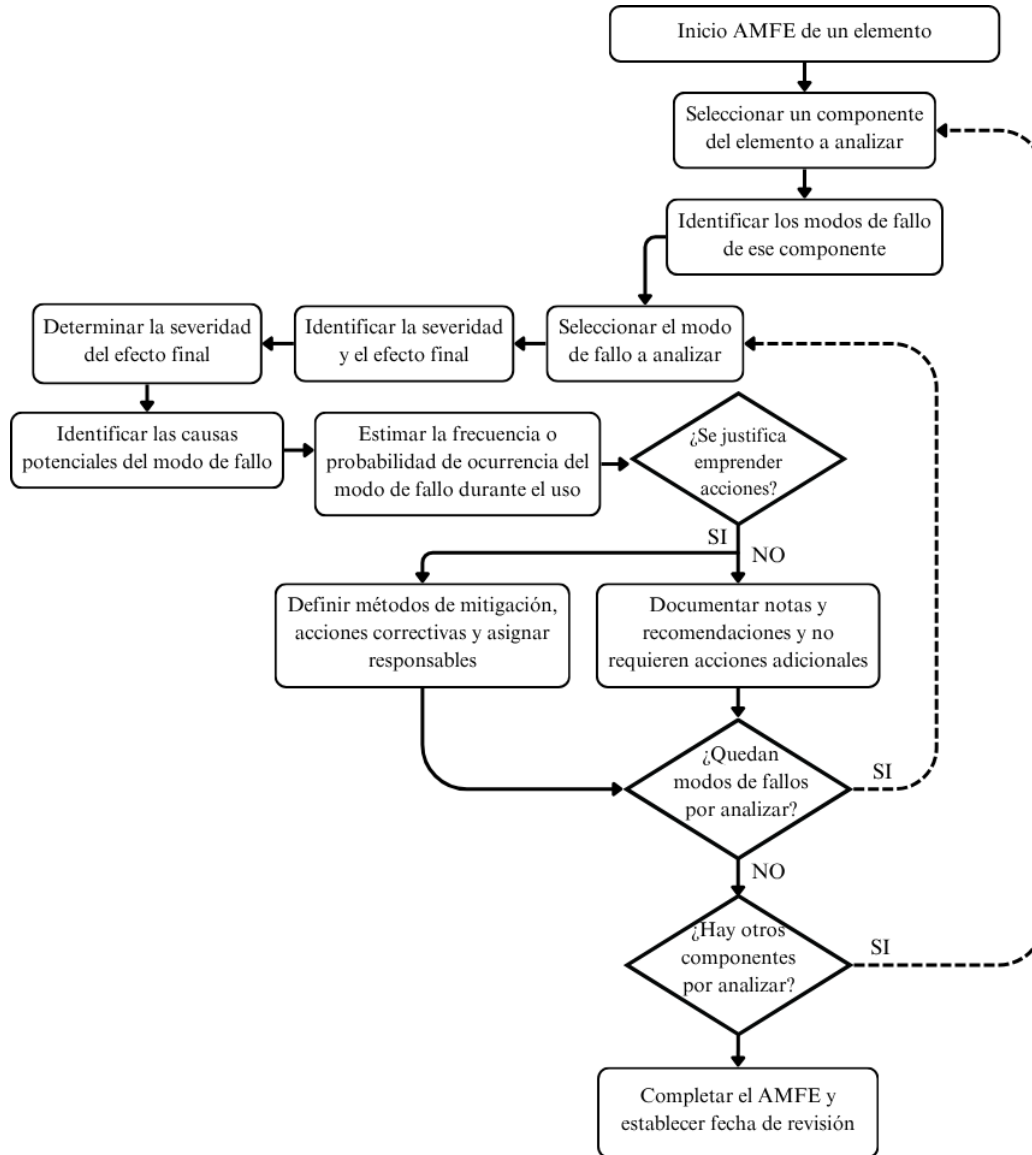


Figura 1. Procedimiento AMFE: diagrama de flujo basado en la norma UNE-EN 60812.

La valoración de los riesgos se realizó mediante tres escalas estandarizadas con valores de 1 a 10 para severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D), de acuerdo con la norma UNE-EN 60812 y adaptadas en las Tablas 1 a 3. La severidad (Tabla 1) clasifica el impacto de cada modo de fallo en el rendimiento y la seguridad del sistema, donde 1 = sin efecto y 10 = peligroso sin aviso. La ocurrencia (Tabla 2) cuantifica la frecuencia prevista, donde 1 = remoto y 10 = casi inevitable. Por último, la detección (Tabla 3) mide la probabilidad de identificar un fallo antes de su manifestación, donde 1 = detección casi segura y 10 = detección absolutamente incierta, en función de la eficacia de los controles de diseño y supervisión.

Tabla 1. Escala de severidad de modos de fallo para AMFE.

Severidad	Criterios	S
Ninguna	No hay efecto apreciable.	1
Muy pequeña	Ajuste y acabado del elemento con chirrido o ruido no conforme. Defecto percibido por clientes exigentes (< 25 %).	2
Menor	Ajuste y acabado del elemento con chirrido o ruido no conforme. Defecto percibido por el 50 % de los clientes.	3
Muy baja	Ajuste y acabado del elemento con chirrido o ruido no conforme. Defecto percibido por la mayoría de los clientes (> 75 %).	4
Baja	Vehículo o elemento operativo, pero reducción en la operatividad de los elementos de confort y comodidad. Cliente de algún modo insatisfecho.	5
Moderada	Vehículo o elemento operativo, pero elementos de confort y comodidad no operativos. Cliente insatisfecho.	6
Alta	Vehículo o elemento operativo, pero con nivel de prestaciones reducido. Cliente muy insatisfecho.	7
Muy alta	Vehículo o elemento no operativo (pérdida de función principal).	8
Peligroso con aviso	Muy alto rango de severidad cuando un modo de fallo potencial afecta a la operación segura del vehículo o supone el incumplimiento de leyes gubernamentales con aviso.	9
Peligroso sin aviso	Muy alto rango de severidad cuando un modo de fallo potencial afecta a la operación segura del vehículo o supone el incumplimiento de leyes gubernamentales sin aviso.	10

Tabla 2. Escala de ocurrencia de modos de fallo para AMFE.

Ocurrencia del modo de fallo	O	Frecuencia por millar de vehículos o elementos	Probabilidad
Remoto: Fallo improbable	1	$\leq 0,010$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
Bajo: Relativamente pocos fallos	2	0,1	1×10^{-4}
	3	0,5	5×10^{-4}
	4	1	1×10^{-3}
Moderado: Fallos ocasionales	5	2	2×10^{-3}
	6	5	5×10^{-3}
	7	10	1×10^{-2}
Alto: Fallos repetidos	8	20	2×10^{-2}
	9	50	5×10^{-2}
Muy alto: Fallo casi inevitable	10	≥ 100	$\geq 1 \times 10^{-1}$

Tabla 3. Escala de detección de modos de fallo para AMFE.

Detección	Posibilidad de detección mediante Control de Diseño	D
Casi segura	Detectará casi con seguridad una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	1
Muy alta	Muy alta posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	2
Alta	Alta posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	3
Moderadamente alta	Moderadamente alta posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	4
Moderada	Posibilidad moderada de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	5
Baja	Baja posibilidad de que el Control de Diseño detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	6
Muy baja	Muy baja posibilidad de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	7
Remota	Posibilidad remota de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	8
Muy remota	Posibilidad muy remota de que detecte una causa o mecanismo potencial y el subsiguiente modo de fallo.	9
Absolutamente incierto	No detectará una causa o mecanismo potencial ni el subsiguiente modo de fallo; o no existe Control de Diseño aplicado.	10

Para integrar estas tres valoraciones en un único indicador que permita priorizar los modos de fallo, se calculó el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), definido como:

$$NPR = S \times O \times D \quad (1)$$

Un NPR elevado señala modos de fallo de alto riesgo que requieren intervenciones inmediatas y detalladas, mientras que valores más bajos indican riesgos menores susceptibles de atenderse con controles rutinarios. Dado que S, O y D toman valores de 1 a 10, el NPR varía entre 1 y 1000. Para su interpretación se adopta la siguiente clasificación por intervalos y la acción recomendada en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del Número de Prioridad de Riesgo.

Intervalo NPR	Categoría	Criterio resumido	Acción recomendada
1–50	Muy bajo	Riesgo residual	Mantener controles y seguimiento rutinario
51–125	Bajo	Riesgo controlado	Plan de mejora a medio plazo
126–250	Moderado	Riesgo relevante	Plan de mejora priorizado con responsable y plazo
251–500	Alto	Riesgo significativo	Acciones correctivas inmediatas y verificación
501–1000	Crítico	Riesgo inaceptable	Contención inmediata, posible paro de proceso y rediseño

De este modo, el NPR facilita una asignación de recursos más eficiente y una planificación de mantenimiento dirigida a los puntos críticos. Tras completar el análisis AMFE y calcular el NPR, se incorpora un Diagrama de Análisis de Procesos (DAP) para descomponer y visualizar el flujo de actividades del mantenimiento. Este diagrama segmenta cada tarea según su función (operaciones, transporte, inspección, esperas y almacenamiento) siguiendo los principios de la ingeniería de métodos [26]. Al clasificar las acciones de este modo, resulta inmediato detectar aquellos pasos que no aportan valor, así como redundancias, desplazamientos innecesarios y tiempos ociosos. En la práctica, la elaboración del DAP implica observación directa en el taller, midiendo con cronómetros digitales y registros estructurados la duración de cada tarea, las distancias recorridas y la frecuencia de los eventos, de modo que la sistematización de datos respalde mejoras concretas en el proceso.

Para cuantificar el desempeño se emplean tres indicadores clásicos de confiabilidad y mantenimiento: la disponibilidad mecánica MA, entendida como la proporción entre el tiempo de operación efectiva y el tiempo total considerado, medidos mediante el MTBF y MTTR [27, 28]. El MTBF representa el promedio de horas de funcionamiento entre eventos de fallo, mientras que el MTTR refleja el tiempo medio necesario para restaurar la operatividad tras cada reparación; y la MA expresa la fracción de tiempo en que el activo está operativo [29].

Estos indicadores se obtienen a partir de las Ecuaciones (2), (3) y (4):

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo de inactividad}}{\text{Número de paradas}} \quad (2)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento}}{\text{Número de reparaciones}} \quad (3)$$

$$MA = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (4)$$

Adicionalmente, se analiza la fiabilidad $R(t)$, definida como la probabilidad de operar sin falla durante un intervalo t [30]. Con tasa de falla constante $\lambda \approx 1/MTBF$, la función de fiabilidad se expresa mediante la Ecuación (5):

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (5)$$

3. RESULTADOS

A partir del mapeo exhaustivo de los dieciocho sistemas críticos de la Thrush S2R-T34 (hélice, motor, lubricación y combustible, tren de aterrizaje, superficies de control y aviónica), y tal como se muestra en la Figura 2, la organización estructuró su programa de mantenimiento en tres niveles interdependientes orientados a maximizar la seguridad, la fiabilidad operativa y la disponibilidad de la flota. El mapeo se realizó conforme a la codificación ATA 100/2200; en esta norma el sistema eléctrico corresponde al capítulo 24, el hidráulico al 29, el tren de aterrizaje al 32 y los controles de vuelo al 27, numeración que también guía las referencias en manuales y tarjetas de trabajo. Este esquema se alinea con los procedimientos técnicos del fabricante [31] e integra prácticas 5S junto con estrategias Lean de mejora continua.

Para clarificar el alcance de cada tipo de intervención y su peso relativo en la carga de trabajo, se organizaron las actividades de mantenimiento en tres niveles conforme a la práctica de la entidad y al manual del fabricante. La Tabla 5 sintetiza la periodicidad o disparador, las actividades clave, ejemplos representativos y el esfuerzo aproximado asignado a cada nivel en las aeronaves Thrush S2R-T34.

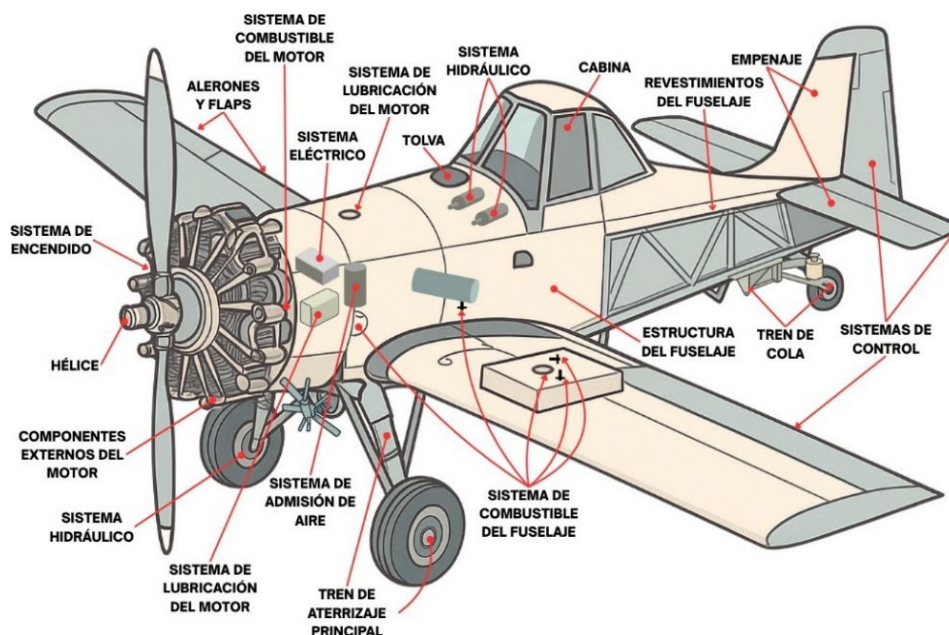


Figura 2. Mapa de ubicación de los sistemas críticos en la aeronave agrícola Thrush S2R-T34.

Tabla 5. Niveles de mantenimiento y alcance (Thrush S2R-T34).

Nivel	Periodicidad / disparador	Actividades clave	Ejemplos de tareas	Esfuerzo aprox.
Preventivo	Cada 25 h de vuelo	Lubricación; inspecciones visuales y funcionales; cambio de fluidos según fabricante	Lubricar bisagras, rodamientos y articulaciones; cambiar aceite de motor, hidráulico y combustible	35 %
Programado	Cada 100 h de vuelo	Verificaciones y pruebas de sistemas; inspección estructural	Sincronización de magnetos; verificación del gobernador de la hélice; pruebas de estanqueidad de frenos y combustible; inspección de fuselaje, alas y empenaje; comprobación de sistemas eléctricos e instrumentación de cabina	35 %
Correctivo	Ante avería o hallazgo	Reparaciones inmediatas derivadas de fallas en vuelo o durante inspecciones	Reparación de motor tras sobrecalentamiento; refuerzo de larguerillos; sustitución de paneles corroídos; reparación de cableados; cambio de llantas o discos de freno tras aterrizajes exigentes	30 %

a. Implementación de las 5S

En la entidad operadora, la implantación de las 5S, compuestas por Clasificar (*Seiri*), Ordenar (*Seiton*), Limpiar (*Seiso*), Estandarizar (*Seiketsu*) y Mantener (*Shitsuke*), se concibió como pilar del sistema Lean aplicado a las inspecciones de 100 horas de vuelo en los Thrush S2R-T34. El despliegue ordenado de cada etapa impulsó una organización más clara del taller, redujo tiempos improductivos y reforzó la seguridad del entorno de trabajo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de estos cinco ámbitos.

Seiri: Durante la fase de *Seiri* se llevó a cabo una auditoría exhaustiva del inventario en el pañol, las carretas móviles y la mesa de trabajo, clasificando cada ítem según su contribución a las inspecciones de 100 horas. Esto permitió identificar y retirar elementos obsoletos, duplicados o de muy baja rotación, reduciendo el volumen almacenado en un 40 %. El material descartado se trasladó al almacén de baja conforme al procedimiento interno. A continuación, se definió un stock esencial basado en herramientas críticas, como llaves mixtas y especiales, juegos de dados, dispositivos neumáticos, lubricantes y equipos de medición; a cada artículo se le asignó una ubicación única, identificada mediante códigos de color y rotulación alfanumérica para garantizar su trazabilidad. Mediante esta depuración se liberaron espacios operativos que se destinaron a zonas específicas de tránsito y estacionamiento de carretas. La Figura 3 ilustra el antes y el después de aplicar esta primera etapa de la metodología 5S.

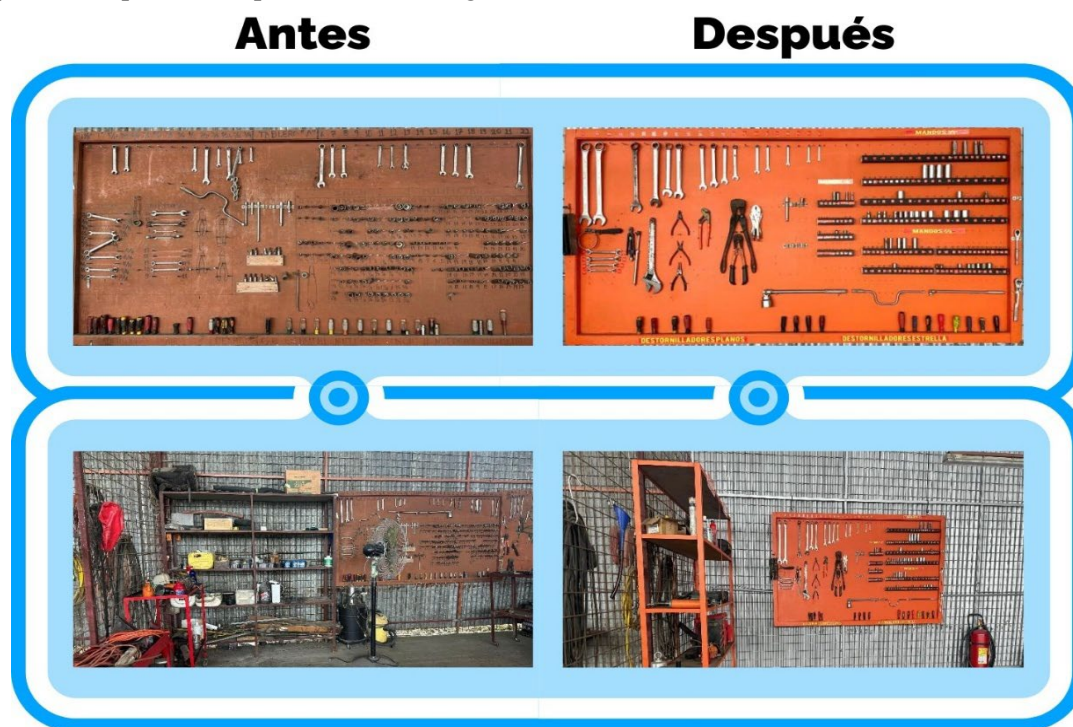


Figura 3. Pañol de herramientas del hangar (tablero y estanterías): comparativa antes y después de *Seiri* (5S).

Seiton: En la fase de *Seiton* se organizó el inventario crítico resultante de *Seiri* en un sistema de ubicación inequívoca y reposición ágil. Según la Tabla 6, los 66 artículos esenciales se consolidaron en un único tablero perforado del pañol, ordenados por familias y frecuencia de uso. Cada posición lleva silueta y código alfanumérico visible; el color identifica la familia y el código la ubicación y el calibre. Se fijaron alturas de alcance entre 80 y 140 cm para reducir flexiones y se separaron las herramientas calibradas con etiqueta de vigencia. La reposición se realiza con

niveles mínimo y máximo y tarjeta de señalización cuando falta un elemento. Se implementó además una bitácora de préstamo y devolución al cierre de turno. Con estas medidas se eliminaron duplicidades, se liberaron superficies de estantería, se despejaron pasillos y se redujo el tiempo de búsqueda y preparación antes de la inspección, mejorando la ergonomía y la seguridad en el hangar.

Tabla 6. Área de mantenimiento mecánico (pañol de herramientas del hangar): sistema de ubicación y etiquetado de herramientas críticas en la fase *Seiton* de 5S.

Ubicación	Frecuencia de uso	Elemento
Mesa de trabajo	Pocas veces a la semana	Martillo neumático sin fitting
		Taladro neumático sin fitting
	Se utiliza constantemente	Pernos, tornillos, rodelas
		Trípode “SENECA” (x2) Trípode “THRUSH” (x4)
Pañol de herramientas	Casi nunca	Bomba hidráulica
		Comprobador y limpiador de bujías
		Extintores
	Pocas veces a la semana	Soldadora
		Soporte de bujías
		Tanque de oxígeno y acetileno
		Tecele
		Gata hidráulica
	Rara vez a la semana	Máscara de soldar
		Juegos de expansores de tubos
		Taladro de pedestal
		Cama de trabajo
		Cargador de baterías
		Compresor de aire
		Conjunto de baterías
	Todos los días	Cortadora de láminas
		Esmeril 1
Esmeril 2		
GPU AMI-2400		
GPU START PACK con remolque		
Juego de tarraja		
Línea de aire		
Línea eléctrica 110 V		
Línea eléctrica 220 V		
Llave francesa 18"		
Pistola de calor		

Ubicación	Frecuencia de uso	Elemento
		Prensa 360° para taladro de pedestal Prensa hidráulica Prensas mecánicas Pulidora Remachadora manual POP Serrucho Sincronizador de magnetos
		Taladro eléctrico Taladro manual Torquímetros
Perchas	Pocas veces a la semana Rara vez a la semana Se utiliza constantemente Todos los días	Graseros Gata grande de 10 ton Gata pequeña de 2 ton Aceites Cajas de herramientas Grasas Lubricantes Engrasadores
Tablero de herramientas	Casi nunca Pocas veces a la semana Todos los días	Calibrador de bujías Medidor de presión de aire Dados copa corta de 12 puntos 1/2 Dados copa corta de 12 puntos 1/4 Dados copa corta de 12 puntos 3/8 Dados copa corta de 6 puntos 1/2 Dados copa corta de 6 puntos 1/4 Dados copa corta de 6 puntos 3/8 Dados copa profunda de 12 puntos 1/2 Dados copa profunda de 12 puntos 1/4 Dados copa profunda de 12 puntos 3/8 Dados copa profunda de 6 puntos 1/2 Dados copa profunda de 6 puntos 1/4 Dados copa profunda de 6 puntos 3/8 Extensiones Llaves mixtas y especiales Raches

Seiso: La fase de *Seiso* convirtió la limpieza en una actividad rutinaria del mantenimiento. Primero se eliminaron restos y desechos del pañol y del hangar, lo que permitió liberar espacio para perchas exclusivas de lubricantes y un tablero dedicado a las herramientas de uso más frecuente. A continuación, se instaló un Panel 5S (Tabla 7) que asigna responsables, materiales y un cronograma diario de limpieza para las siete zonas críticas: pañol, perchas, mesa de trabajo, carretas, hangar, vestidores y comedor. El horario de limpieza se ha ajustado para no interferir con las inspecciones de 100 h, de modo que al final de cada jornada se restablecen las condiciones de higiene definidas como referencia. Todas las tareas quedan registradas en el panel y se auditan quincenalmente, lo que permite corregir cualquier desviación antes de que impacte en la operatividad del taller.

Seiketsu: La fase de *Seiketsu* consolidó las mejoras de organización, orden y limpieza convirtiéndolas en hábitos permanentes dentro del sistema de mantenimiento. Para ello, se diseñó un cronograma semanal que agrupa las actividades de clasificación, limpieza, verificación y auditoría en franjas horarias compatibles con las inspecciones de 100 h, de modo que no se interrumpa el flujo operativo ni las rutinas críticas. En la Figura 4 se muestra este programa estandarizado, que detalla día a día los horarios y frecuencias de cada tarea, garantizando una secuencia coherente y sostenible a lo largo de la semana laboral.

Tabla 7. Sistema de limpieza rutinaria (*Seiso*) con panel de seguimiento de tareas.

Área	Descripción	Materiales	Frecuencia	Horarios
Pañol de Herramientas	Espacio para almacenamiento de herramientas, lubricantes, máquinas, etc.	Trapo de limpieza Desengrasante Organizadores	Diario	17:30 – 18:00
Perchas	Área designada para colgar y organizar productos de lubricación y herramientas menores.	Trapo de limpieza Detergente Pulverizador	Diario	17:30 – 18:00
Mesa de Trabajo	Superficie destinada al ensamblaje y ajustes de componentes aeronáuticos.	Trapo absorbente Desengrasante Solvente	Diario	17:30 – 18:00
Carretas de Herramientas	Carros móviles para transportar y organizar herramientas durante el mantenimiento.	Paños secos Detergente Cepillo manual	Diario	17:30 – 18:00
Hangar de Mantenimiento	Área principal de inspección y reparación de las aeronaves.	Escoba Aspiradora industrial Bolsa de basura	Diario	17:30 – 18:00
Vestidores	Espacio de uso personal del personal técnico.	Detergente Desinfectante Bolsa de basura	Diario	17:30 – 18:00
Comedor	Área de alimentación y descanso para los colaboradores.	Trapos húmedos Detergente Bolsa de basura	Diario	17:30 – 18:00

Para asegurar que los avances de *Seiri*, *Seiton* y *Seiso* se mantengan en el tiempo, se implementó un marco de gobernanza basado en ocho prácticas complementarias (Figura 5). En primer lugar, se nombró a un líder 5S responsable de coordinar y monitorear el cumplimiento de los estándares. A continuación, se integraron inspecciones periódicas con listas de verificación visuales para detectar desviaciones y activar acciones correctivas de inmediato. Todos los integrantes reciben formación Lean al incorporarse y acceden a formatos estandarizados que facilitan la documentación y el seguimiento de cada tarea. Asimismo, se garantizó un abastecimiento continuo de materiales y repuestos en cada estación de trabajo, y se definieron protocolos para identificar y suprimir obstáculos antes de que afecten el flujo operativo.

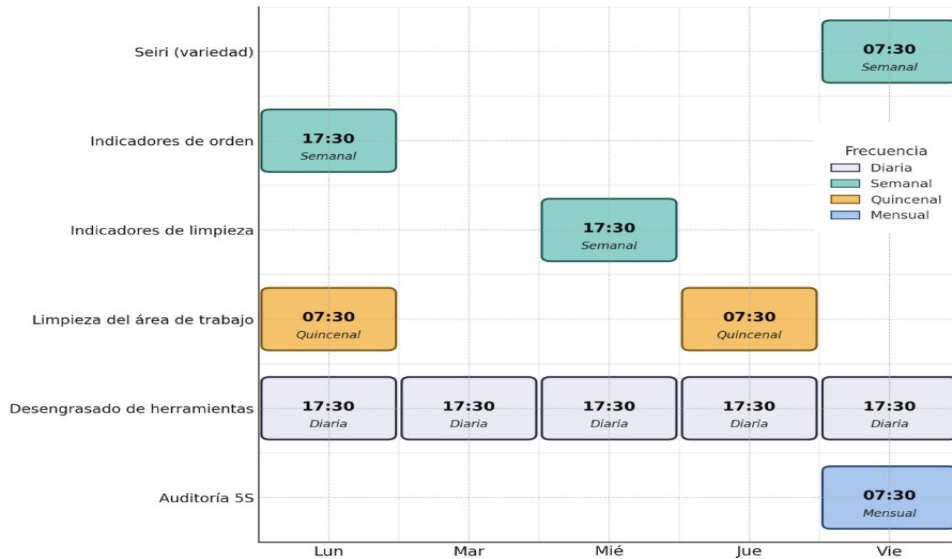


Figura 4. Programa estandarizado de *Seiketsu* en mantenimiento aeronáutico (5S).



Figura 5. Prácticas de gobernanza para la estandarización de *Seiketsu* en 5S.

Shitsuke: La fase *Shitsuke* instauró la disciplina necesaria para consolidar las mejoras del ciclo 5S como hábitos permanentes. Cada semana, el equipo revisa las desviaciones detectadas, define las prioridades de la próxima etapa y refuerza los principios de orden y limpieza, dando forma a un cronograma mensual escalonado (Figura 6). Durante las primeras semanas se lleva a cabo limpieza diaria y verificación de pasillos y áreas de trabajo; en las siguientes, se efectúan auditorías de herramientas, reorganización de zonas críticas y comprobación de inventario; finalmente, se realiza una revisión integral del sistema 5S y el mantenimiento de las carretas de soporte. Todas las tareas quedan registradas en el Panel 5S y se validan mediante auditorías quincenales, lo que asegura la trazabilidad de cada acción y facilita la comunicación entre turnos a través de documentación digital.

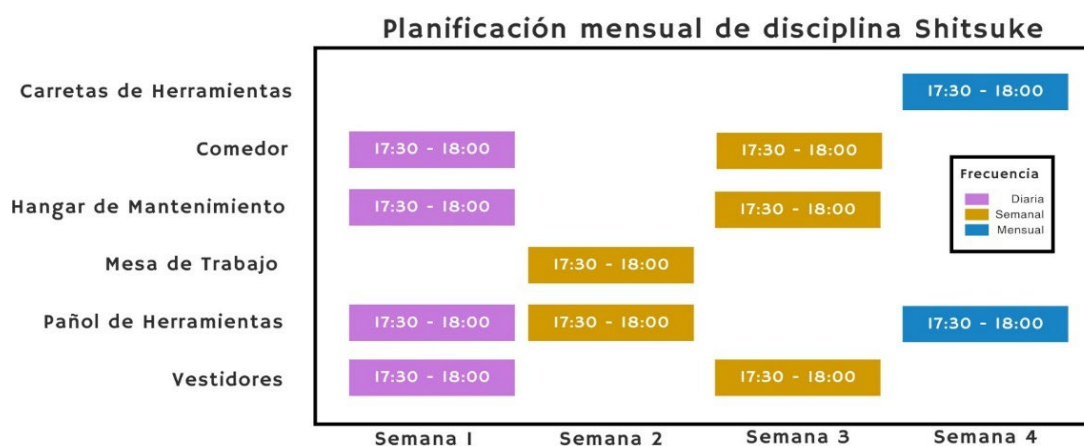


Figura 6. Programación mensual de *Shitsuke* para disciplina y auditoría en el hangar.

b. Implementación del JIT

En la entidad operadora, la incorporación de JIT tuvo como propósito ajustar los niveles de herramientas y repuestos a las demandas reales de las inspecciones de 100 horas. Para ello se revisó el histórico de consumos de los últimos 12 meses, desagregado por familia de ítems y por ciclo de inspección, y con esa base se fijaron niveles mínimos y máximos calculando el punto de pedido como la demanda durante el lead time más un stock de seguridad equivalente a un ciclo. Se desplegó un Kanban híbrido (tarjeta plastificada con código QR y registro digital espejo) que, al alcanzarse el punto de pedido, genera automáticamente la requisición y notifica a compras. Cada tarjeta contiene ubicación, unidad de medida, nivel mínimo y máximo, proveedor y lote estándar; el escaneo del QR actualiza existencias y traza la orden de reposición. Paralelamente, se acordaron lead times más cortos con proveedores estratégicos y se formó al equipo en gestión visual y reposición por arrastre, con auditorías 5S semanales. La operación diaria se sincronizó con el plan de inspecciones mediante carretas JIT pre abastecidas por turno y una ventana de reposición a primera hora, mientras que el desempeño se siguió con indicadores de servicio como fill rate, rupturas de stock y días de inventario revisados de forma quincenal. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de su despliegue operativo.

Sobreinventario: Uno de los primeros frentes de intervención se centró en el exceso de existencias en el pañol: hasta entonces, las herramientas se administraban mediante listados de texto sin control de rotación, lo que saturaba el espacio y ralentizaba las inspecciones de 100 horas. La solución, sintetizada en la Figura 7, implicó migrar toda la información a una base de datos estructurada por categoría funcional, frecuencia de uso y ubicación física; además, se incorporó un semáforo visual (verde = disponible; amarillo = reposición parcial; rojo = pedido inmediato) que activa la orden de compra únicamente al alcanzar el punto de reabastecimiento. Paralelamente, se retiraron los artículos obsoletos, duplicados o de rotación nula, y el stock esencial se reubicó siguiendo los principios 5S, asignando a cada pieza un único soporte rotulado y codificado por

colores. Este rediseño liberó espacio en estanterías, despejó pasillos y redujo en un 45 % el tiempo dedicado a gestionar inventarios, eliminando las interrupciones por faltantes o excedentes de materiales.



Figura 7. Digitalización y control visual del inventario bajo lógica JIT.

Movilidad: El segundo despilfarro identificado correspondía a los desplazamientos innecesarios entre el pañol y las aeronaves durante las inspecciones de 100 horas. El DAP de las Tablas 8 y 9 compara el estado previo y posterior a la intervención: inicialmente se registraban 10 traslados, 900 metros recorridos y 27 minutos de espera por búsqueda o préstamo de herramientas; tras implementar estaciones móviles completamente aprovisionadas la tarde anterior, estos valores se redujeron a 6 traslados, 640 metros de recorrido y 10 minutos de espera. Esta preparación JIT redujo la carga operativa de 15 horas-hombre (hh) a 11 hh por ciclo, lo que equivale a una reducción del 26,7 %, eliminó cuellos de botella, despejó pasillos y disminuyó el riesgo de trayectorias cruzadas en el hangar.

Defectos y Reprocesos: La evaluación AMFE de la inspección de 100 horas identificó como principal fuente de reprocesos la falta de una guía estandarizada (RPN = 288), seguida de la descalibración del torquímetro (RPN = 96) y del uso de piezas defectuosas (RPN = 84) (Tabla 10) Para atajar este desperdicio, se incorporó una lista de verificación digital sincronizado con el manual de mantenimiento Thrush T34-2: cada punto crítico debe confirmarse antes de avanzar, el sistema impide omisiones de paso y registra sellos temporales inalterables. Al aplicar este formato “en lugar y momento exactos”, se redujeron drásticamente las omisiones de verificación y los desplazamientos al pañol por herramientas olvidadas, integrando la inspección en el flujo continuo que exige JIT. Los registros de hangar de los tres meses posteriores muestran una caída notable de reprocesos por errores de procedimiento, lo que disminuyó la exposición a fallos humanos, redujo el riesgo de daños en sistemas ya ajustados y aumentó la fiabilidad operativa de la aeronave.

Tabla 8. DAP de traslados antes de estaciones móviles JIT.

Paso	Categoría	Tiempo (min)	Distancia (m)	Descripción del proceso
1	Almacenamiento	15	5	Preparación de herramientas para la inspección.
2	Transporte	5	5	Transporte de herramientas al área de inspección.
3	Inspección	240	–	Inspección de componentes críticos que se realizan en la inspección de 100 horas.
4	Transporte	10	10	Desplazamiento a otro hangar por herramientas faltantes para la inspección.
5	Espera	15	–	Tiempo de espera por falta de herramientas para continuar con la inspección.
6	Operario	300	–	Mantenimiento de sistemas de la avioneta que se hace en la inspección.
7	Transporte	10	7	Desplazamiento para buscar herramientas en uso por otro técnico.
8	Espera	5	–	Tiempo de espera por falta de herramientas para la inspección.
9	Operario	180	–	Culminación del mantenimiento realizado, verificando el ajuste de los componentes que se realizaron en la inspección.
10	Inspección	120	–	Inspección de verificación para garantizar la correcta operatividad de la avioneta.

Tabla 9. DAP de traslados después de estaciones móviles JIT.

Paso	Categoría	Tiempo (min)	Distancia (m)	Descripción del proceso
1	Almacenamiento	5	5	Preparación de herramientas para la inspección.
2	Transporte	5	5	Transporte de herramientas al área de inspección.
3	Inspección	180	–	Inspección de componentes críticos que se realizan en la inspección de 100 horas.
4	Operario	240	–	Mantenimiento de sistemas de la avioneta que se hace en la inspección.
5	Operario	120	–	Culminación del mantenimiento realizado, verificando el ajuste de los componentes que se realizaron en la inspección.
6	Inspección	90	–	Inspección de verificación para garantizar la correcta operatividad de la avioneta.

Tabla 10. Análisis AMFE de defectos y reprocesos en la inspección de 100 h (S, O, D y RPN).

Modos de fallo	Efectos	Causas	O	D	RPN
Torquímetro mal calibrado; incorrecto torque aplicado en componentes críticos	Desajuste en los componentes, lo que genera fallos o incluso daños a la aeronave.	Falta de calibración adecuada o mantenimiento inadecuado del torquímetro.	4	4	96
Piezas defectuosas o dañadas que requieren ser reemplazadas nuevamente	Aumento de costos, tiempos operativos y posibles riesgos de seguridad.	Piezas defectuosas provenientes del fabricante o no verificadas adecuadamente.	3	4	84
Falta de una guía estandarizada y detallada para la inspección	La inspección no cubre todos los puntos críticos y se omiten pasos importantes.	Ausencia de una lista de verificación estructurada y detallada.	6	6	288
La aeronave no está correctamente posicionada o nivelada para la inspección, afectando componentes clave	Retrasos en el proceso de inspección debido a la necesidad de repositionar la aeronave, además de errores en la evaluación de piezas.	No asegurarse de que la aeronave esté correctamente ubicada o nivelada antes de comenzar la inspección.	3	4	72

Integración JIT en la inspección de 100 h. La primera fase consistió en sustituir las antiguas listas genéricas por un formato secuencial (Tabla 11) que desglosa minuciosamente los dieciocho sistemas críticos del Thrush S2R-T34, desde hélice y motor hasta tren de aterrizaje y neumática. A continuación, se establece la lista de verificación: cada módulo incluye casillas de validación única que el técnico debe completar antes de continuar, eliminando así cualquier omisión o repetición de pasos. Paralelamente, se habilitaron tres mecanismos interdependientes que dotan de inteligencia JIT al proceso: la validación en el punto de uso impide los saltos de paso y erradica reprocesos; los registros temporales irrevocables, con sello “usuario-hora”, garantizan trazabilidad y responsabilidad individual; y el vínculo automático con el semáforo de inventario actualiza en tiempo real el stock de filtros, lubricantes y recambios, activando la reposición solo cuando el consumo efectivo lo demanda. Durante los tres meses piloto, no se registraron reprocesos por torque incorrecto ni por componentes no conformes, y el tiempo efectivo de inspección se redujo significativamente al suprimir desplazamientos y búsquedas innecesarias.

Tabla 11. Lista de verificación secuencial JIT para la inspección de sistemas críticos en 100 h.

Parte	Procedimiento de Inspección	Diario	50 h	100 h	400 h
Sistema de Combustible del Fuselaje	Retire, inspeccione, limpie y vuelva a instalar el filtro de combustible principal de 25 micras del fuselaje.			X	
	Vacíe los depósitos de las alas, el colector, los sistemas de ventilación y el separador. Inspeccione el depósito residual “EPA” y tome medidas correctivas si es necesario.	X			
	Encienda la bomba eléctrica de combustible y compruebe si hay fugas en los conductos de combustible.			X	
	Inspeccione los conductos de combustible y los soportes en busca de seguridad y signos de daño o desgaste.			X	
Sistema de Combustible del Fuselaje	Compruebe si hay fugas en la válvula de cierre de combustible en posición abierta y cerrada.			X	
	Compruebe el correcto funcionamiento de los indicadores del depósito de combustible. Agite las alas para verificar la libertad de los punteros.	X			
Tolva	Inspeccione la seguridad y el estado de los deflectores de la tolva.			X	
	Compruebe el estado del cierre y la seguridad de los pestillos de la tapa de la tolva.			X	
	Inspeccione la tolva en busca de fugas y verifique su seguridad.			X	
	Compruebe que la compuerta no presenta fugas y que funciona correctamente.			X	
	Compruebe la corrosión y la seguridad del tubo de ventilación de la tolva.			X	
	Compruebe las juntas de los conductos de retorno y de salida.			X	
	Inspeccione si hay grietas alrededor de las soldaduras en el asa de la compuerta de la tolva y en la varilla de empuje. Verifique el estado de la bota de la varilla de empuje.			X	
	Compruebe si la válvula de cierre de emergencia presenta fugas y funciona correctamente.		X		
Alerones y Flaps	Compruebe el recorrido de las superficies móviles: • Elevador arriba: $27^\circ \pm 1^\circ$ • Elevador abajo: $17^\circ \pm 1^\circ$ • Timón: $24^\circ \pm 1^\circ$ • Tab up: $8^\circ \pm 1^\circ$ • Lengüeta hacia abajo: $22^\circ \pm 1^\circ$.			X	

Parte	Procedimiento de Inspección	Diario	50 h	100 h	400 h
	Compruebe si los contornos de las superficies fijas están deformados debido a un apriete incorrecto de los tirantes.				X
	Inspeccione los puntales en “V” del estabilizador horizontal, los accesorios y los herrajes en busca de seguridad, grietas y corrosión.			X	
	Inspeccione el desgaste de todas las bisagras y sustituya los cojinetes sellados si es necesario.			X	
	Compruebe la seguridad de todos los pasadores.			X	
	Compruebe el estado general de los revestimientos exteriores.			X	
	Compruebe que los orificios de drenaje no estén obstruidos.			X	
Pieles de Fuselaje	Inspeccione todos los paneles y capós en busca de grietas, rozaduras y seguridad de las fijaciones.			X	
	Compruebe la corrosión, el desgaste y la acción de bloqueo de los receptáculos Camloc.			X	
Marco del Fuselaje	Inspeccione los tubos del fuselaje en busca de signos de corrosión o grietas, especialmente alrededor de las soldaduras y en la zona de la bota.			X	
	Compruebe si hay agujeros alargados en los soportes de montaje del motor y en los bellcranks.			X	
	Inspeccione todos los accesorios de fijación del engranaje de resorte, la viga/soporte del engranaje principal y las placas de los extremos de la viga, en busca de seguridad, grietas y corrosión.			X	
	Compruebe el estado de la pintura y repíntela si es necesario.			X	

c. Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs)

Con el propósito de evaluar objetivamente el impacto de las prácticas Lean (5S y JIT) en las inspecciones de 100 horas, se analizaron tres KPIs: MTBF, MTTR y MA. El análisis comparativo abarcó dos lapsos de tres meses, uno previo y otro posterior a la adopción de Lean, e incluyó una exhaustiva depuración y validación de los registros de vuelo y las bitácoras de paradas para garantizar la fiabilidad de los datos. Cada evento registrado se clasificó como mantenimiento preventivo programado (PM) o falla no planificada (F), anotando con precisión su fecha y duración (Figura 8). Para cuantificar la mejora operativa descrita, se calcularon los KPIs MTBF, MTTR y MA según las ecuaciones (2), (3) y (4), empleando los registros de vuelo y de paro exhaustivamente depurados y validados.

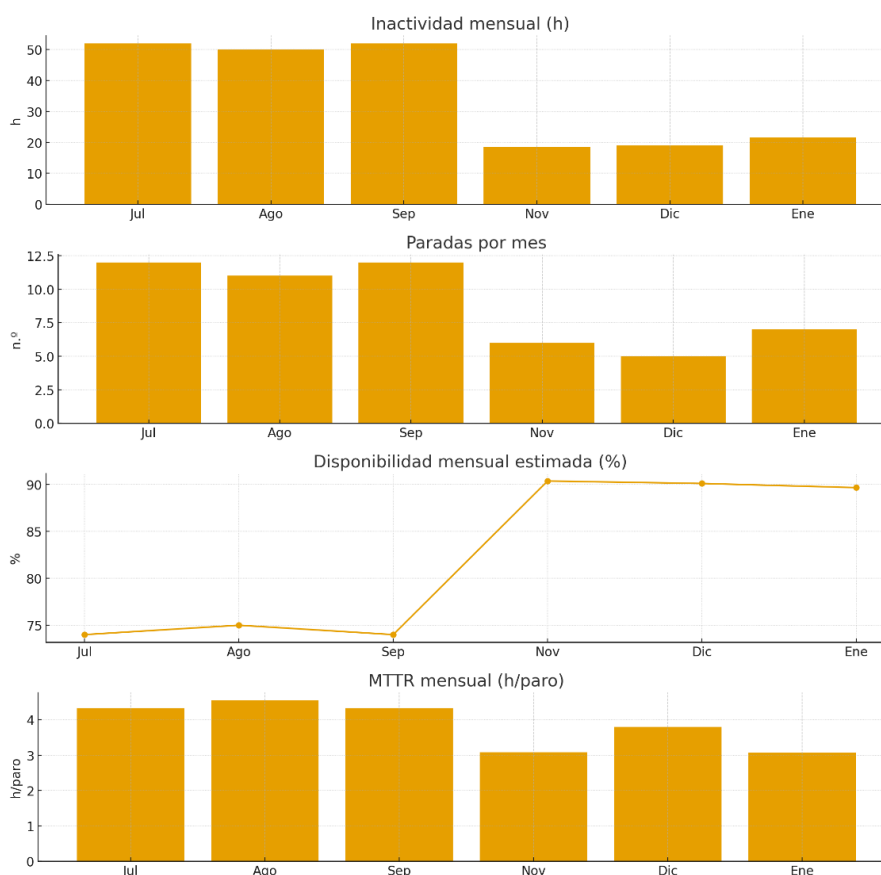


Figura 8. Comparativa de disponibilidad, inactividad y paradas antes y después de Lean.

Como muestran la Tabla 12 y la Figura 9 (vista general de una aeronave Thrus S2R-T34 durante la inspección de 100 horas), cuyos indicadores fueron calculados con las Ecuaciones (2) a (5), en el primer periodo de tres meses previo a la adopción de Lean las aeronaves CUA, CGC y CTT registraron un MTBF promedio de 13,0 h, un MTTR entre 4,3 y 4,6 h, una MA del 74 a 75 %, y una fiabilidad R entre 92,3 a 92,9 %, reflejo de averías frecuentes, traslados prolongados en taller y demoras por falta de repuestos. Tras desplegar en octubre el programa Lean, que combinó la reorganización 5S, carretas JIT pre abastecidas y una lista de verificación secuencial, en el periodo subsiguiente de tres meses el MTBF se ubicó entre 26,6 y 29,5 h (aumento del 115 % respecto del valor inicial), el MTTR descendió hasta aproximadamente 3,1 h (reducción del 30 %), la MA alcanzó el 90 % y la R subió de 3,7 a 4,1 pp. Este aumento de fiabilidad equivale a reducir la tasa de fallas efectiva de $0,08 \text{ h}^{-1}$ a $0,034\text{--}0,038 \text{ h}^{-1}$ (50 % menos), y se traduce operacionalmente en unas 120 h-vuelo adicionales por semestre y aeronave.

Tabla 12. KPIs de rendimiento (MTBF, MTTR y MA) antes y después de Lean.

Avioneta	MTBF	MTBF	MTTR	MTTR	MA	MA	R	R
	Antes (h)	Después (h)	Antes (h)	Después (h)	Antes (%)	Después (%)	Antes (%)	Después (%)
CUA	13,00	29,49	4,33	3,06	75	90	92,6	96,7
CGC	13,64	28,63	4,55	3,17	75	90	92,6	96,6
CTT	12,55	26,64	4,33	3,07	74	90	92,6	96,3



Figura 9. Vista general de una aeronave Thrusch S2R-T34 durante la inspección de 100 horas en el hangar.

4. DISCUSIÓN

La implementación conjunta de herramientas Lean, que incluyó 5S, JIT y un listado de verificación digital secuencial basado en AMFE y DAP, produjo una mejora significativa en la fiabilidad y la disponibilidad de las inspecciones de 100 horas en las aeronaves Thrusch S2R-T34. Antes de la intervención, el MTBF oscilaba entre 12,55 y 13,64 h, el MTTR se situaba entre 4,33 y 4,55 h y la disponibilidad mecánica era del 74 al 75 %. Con la implantación de 5S, la clasificación sistemática y el etiquetado visual redujeron inventario improductivo, tiempos de búsqueda y desplazamientos, y mejoraron la ergonomía del área de trabajo, en línea con la evidencia sobre 5S en operaciones de mantenimiento y servicios técnicos [32]. La lógica JIT, apoyada en carretas pre abastecidas (*kitting*) y semáforos visuales de stock, recortó el tiempo de gestión de repuestos y los movimientos internos, tal como describen las prácticas JIT y de *kitting* para operaciones de mantenimiento y logística [33]. Por su parte, la verificación digital mediante listas de chequeo estructuradas disminuye omisiones y errores humanos, y el AMFE prioriza los riesgos con el número de prioridad de riesgo (RPN) conforme a la norma IEC 60812, asegurando trazabilidad de las acciones correctivas. En conjunto, estas acciones duplicaron el MTBF hasta valores entre 26,64 y 29,49 h, redujeron el MTTR aproximadamente al 30 % (cerca de 3,1 h) y elevaron la disponibilidad al 90 %, resultados consistentes con aplicaciones de enfoques Lean en entornos MRO.

Estas cifras exceden los rangos que suele reportar la literatura para flotas ligeras y activos industriales comparables, donde los programas de mantenimiento predictivo y digitalización consiguen reducciones del tiempo de indisponibilidad del 20–50 % (lo que se traduce en recortes de MTTR en el orden del 20–30 %) y mejoras significativas de la confiabilidad/vida entre fallas (MTBF). En aviación, las revisiones recientes sobre CBM/PHM y Digital MRO documentan que la digitalización del flujo de trabajo (e-logbooks, e-task cards, sensórica y analítica) potencia los beneficios Lean al aportar trazabilidad y exhaustividad etapa por etapa, elevando la disponibilidad y la seguridad operacional. Asimismo, la convergencia de AMFE y DAP con KPI de mantenimiento (p. ej., MTBF, MTTR, disponibilidad) refuerza la solidez del enfoque al proporcionar un marco sistemático para priorizar riesgos y estandarizar la ejecución [34].

Sin embargo, este estudio presenta dos limitaciones principales. La muestra se redujo a tres aeronaves y un único hangar, lo que puede sesgar la inferencia externa, una restricción común en estudios Lean y de transformación operativa que subraya la necesidad de replicación en múltiples contextos industriales [34], [35]. El horizonte de seis meses tampoco permite valorar la sostenibilidad cultural de 5S sin refuerzos continuos, un desafío reportado de forma recurrente para el mantenimiento de 5S en el tiempo [36]. Asimismo, no se efectuó un análisis costo–beneficio detallado, recomendado por la literatura de CBM/PHM y guías oficiales para justificar económicamente cambios de política de mantenimiento [37], [38]. Tampoco se incorporaron criterios tribológicos (fricción y desgaste), clave para evaluar confiabilidad y desempeño a largo plazo en sistemas aeronáuticos y rotodinámicos [39], [40]. En consecuencia, futuras investigaciones deberían ampliar la muestra y el periodo de seguimiento, integrar un estudio económico integral y explorar la adopción de gemelos digitales para avanzar hacia mantenimiento predictivo interoperable en MRO [41], [42].

5. CONCLUSIONES

Las inspecciones de 100 horas exigidas por la normativa estadounidense FAA, 14 CFR §91.409 (conforme al FAR Part 43, Apéndice D) se ejecutan de forma adecuada en la flota Thrush S2R-T34. No obstante, la incorporación coordinada de 5S, JIT y un listado de verificación digital respaldado por AMFE y DAP permitió mejorar de manera clara el desempeño del mantenimiento: el MTBF se duplicó ($\approx +115\%$), el MTTR se redujo alrededor de 30% y la disponibilidad mecánica se elevó hasta 90% . En términos operativos, la reorganización sistemática del taller disminuyó el inventario improductivo ($\sim 40\%$) y acortó traslados y tiempos de gestión de repuestos ($\sim 45\%$), mientras que la verificación digital eliminó omisiones y reprocesos en las tareas de la inspección reglamentaria.

En consecuencia, el uso de la inspección de 100 horas conforme a la norma, combinado con herramientas Lean y soporte digital, mejora la seguridad, disponibilidad y eficiencia del mantenimiento en aeronaves agrícolas Thrush S2R-T34. Se recomienda institucionalizar el programa (estandarización 5S/*Seiketsu*, checklist digital y seguimiento de KPI) y extenderlo de forma replicable a otras aeronaves y hangares de la organización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y al personal operativo del taller aeronáutico por las facilidades brindadas en el marco del convenio de cooperación institucional, que permitió el acceso a las instalaciones, al hangar, a las aeronaves y a los recursos necesarios para el desarrollo y la validación de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] H. Chen, Y. Lan, B. K. Fritz, W. C. Hoffmann, y S. Liu, “Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV),” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 38–49, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5714>
- [2] H. Li, H. Zhu, Z. Jiang, y Y. Lan, “Performance characterization on downwash flow and spray drift of multirotor unmanned agricultural aircraft system based on CFD,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 1–8, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221503.7315>
- [3] L. Witek, “Failure analysis of the wing-fuselage connector of an agricultural aircraft,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 4, pp. 572–581, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.029>

- [4] I. Kabashkin, R. Fedorov, y V. Perekrestov, “Decision-making framework for aviation safety in predictive maintenance strategies,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 3, Feb. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app15031626>
- [5] H. Rivera-Gomez, D. Sanchez-Partida, A. O. Ortega-Reyes, y I. J. Gonzalez-Hernandez, “Optimizing JIT production and maintenance strategies for material management in the presence of quality decline and random demand fluctuations,” *Acta Logistica*, vol. 11, no. 2, pp. 281–292, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22306/al.v11i2.511>
- [6] W. J. C. Verhagen *et al.*, “Condition-based maintenance in aviation: Challenges and opportunities,” *Aerospace*, vol. 10, no. 9, Aug. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/aerospace10090762>
- [7] F. Khair, M. A. S. Putra, y I. Rizkia, “Improvement and analysis of aircraft maintenance flow process using lean manufacturing, PDCA, PICA, and VSM for sustainable operation system,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1324, no. 1, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1324/1/012071>
- [8] K. Khan *et al.*, “Recent trends and challenges in predictive maintenance of aircraft’s engine and hydraulic system,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, Aug. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03121-2>
- [9] S. C. Lee, “A literary survey on the challenges of adopting lean in aerospace production and aviation maintenance,” *Journal of Aviation Technology and Engineering*, vol. 12, no. 1, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7771/2159-6670.1243>
- [10] M. S. Mahapatra, y D. Shenoy, “Lean maintenance index: A measure of leanness in maintenance organizations,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 791–809, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/JQME-08-2020-0083>
- [11] L. Xu, Y. Zhang, y H. Wang, “Improving civil aviation service risk management with FMEA,” en *Proc. 5th Int. Conf. on Economic Management and Model Engineering (ICEMME)*, pp. 1–6, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4108/eai.17-11-2023.2342695>
- [12] M. Jasiulewicz-Kaczmarek, y A. Saniuk, “How to make maintenance processes more efficient using lean tools?,” en R. H. M. Goossens (Ed.), *Advances in Social & Occupational Ergonomics*, Cham: Springer, pp. 9–20, 2018. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60828-0_2
- [13] D. Mendes, H. Navas, y F. Charrua-Santos, “Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 842–862, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2022-0055>
- [14] T. Imanov, M. Yıldız, y E. Koruyucu, “Lean Six Sigma application for aircraft maintenance process,” en T. H. Karakoç, C. Ö. Çolpan, y A. Dalkıran (Eds.), *Progress in Sustainable Aviation*, Cham: Springer, pp. 137–153, 2022. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-031-12296-5_8
- [15] A. Korchagin, Y. Deniskin, I. Pocebneva, y M. Aleksandrovskiy, “Methodology for aviation MRO system management decision-making,” *E3S Web of Conferences*, vol. 376, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601093>

- [16] A. Korchagin, Y. Deniskin, I. Pocebneva, y O. Vasilyeva, “Lean Maintenance 4.0: Implementation for aviation industry,” *Transportation Research Procedia*, vol. 63, pp. 1521–1533, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>
- [17] A. Ceruti, P. Marzocca, A. Liverani, y C. Bil, “Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of augmented reality and additive manufacturing,” *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 516–526, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- [18] Aircraft Owners and Pilots Association, “Guide to aircraft inspections,” [En línea]. Disponible en: <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/maintenance-and-inspections/aircraft-inspections>
- [19] Federal Aviation Administration (FAA), *Weight-Shift Control Aircraft Flying Handbook*, FAA-H-8083-5, 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/FAA-H-8083-5.pdf
- [20] E. Wildgrove, *Aircraft Maintenance*, Kindle ed., Oslo, Norway: Publiflye AS, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://books.apple.com/pe/book/aircraft-maintenance/id6743449434>
- [21] M. Mazur *et al.*, “Implementation and benefits of the 5S method in improving workplace organisation – A case study,” *Management Systems in Production Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 498–507, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0047>
- [22] M. I. A. Wardhani, y T. N. Realita, “5S as a form of lean manufacturing implementation in the perspective of human resources: A case study in food SMEs,” *SOSMANIORA: Jurnal Ilmu Sosial dan Humaniora*, vol. 1, no. 4, pp. 599–605, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.55123/sosmaniora.v1i4.1275>
- [23] I. Stipanovic, S. Skaric Palic, J. Ramon Casas, R. Chacón, E. Ganic, “Inspection and maintenance KPIs to support decision making integrated into digital twin tool,” *CE/Papers*, vol. 6, no. 5, pp. 1234–1241, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cepa.2137>
- [24] F. Z. Berrabah, C. Belkacemic, y L. Zemmouchi-Ghomari, “Essential and new maintenance KPIs explained,” *International Journal of Education and Management Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 11–20, Dec. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.5815/ijeme.2022.06.02>
- [25] *Asociación Española de Normalización y Certificación*, UNE-EN IEC 60812:2018 (Ratificada). Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE y AMFEC), 2018.
- [26] E. J. De la Cruz Escobedo, y F. A. Ventura Felipe, “Incremento de la productividad de Manantial’s Tito EIRL, perfeccionando los métodos de trabajo y la eficacia en su proceso productivo,” *Impulso (Potosí, Bolivia)*, vol. 3, no. 5, pp. 45–59, Jul. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://revistaimpulso.org/index.php/impulso/article/view/133/207>
- [27] M. U. Danjuma, B. Yusuf, y I. Yusuf, “Reliability, availability, maintainability, and dependability analysis of cold standby series-parallel system,” *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 193–200, Abr. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE2202144>

- [28] J. Ben, A. O. Mohamed, y K. Muduli, “Effect of preventive maintenance on machine reliability in a beverage packaging plant,” *International Journal of System Dynamics Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 50–66, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4018/IJSDA.2021070104>
- [29] A. Breznická, M. Kohutiar, M. Krbaťa, M. Eckert, y P. Mikuš, “Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties,” *Systems*, vol. 11, no. 12, Art. no. 556, Dec. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/systems11120556>
- [30] A. Żyluk, M. Zieja, N. Grzesik, J. Tomaszewska, G. Kozłowski, y M. Jaształ, “Implementation of the Mean Time to Failure Indicator in the Control of the Logistical Support of the Operation Process,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, p. 4608, Apr. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app13074608>
- [31] Thrush Aircraft Inc., Thrush Aircraft S2R-R1340 Maintenance Manual: Single cockpit and dual cockpit, Rev. MM R1340, Albany, GA, USA: Thrush Aircraft Inc., Jan. 1, 2008, 227 pp.
- [32] Shuwandi Sumantri M., Imaduddin Murdifin, Muhammad Syafii, A. Basalamah, and Aryati Arfah, “Reducing waste by implementing lean maintenance approach through the 5S program,” Proc. 2nd IECON—International Conference on Economics and Business, Makassar, Indonesia, 2025, pp. 1–7.
- [33] UNEX Manufacturing, “Warehouse Kitting: Best Practices for Speed, Accuracy & Flexibility,” UNEX Manufacturing Blog. [En línea]. Disponible en: <https://blog.unex.com/warehouse-kitting-best-practices-for-speed-accuracy-flexibility>. Accessed: 7-Oct-2025
- [34] I. Kabashkin, y V. Perekrestov, “Ecosystem of Aviation Maintenance: Transition from Aircraft Maintenance to Platform Health Management,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, May. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app14114394>
- [35] R. R. Alexandre, “*Minimizing Aircraft Maintenance Lead Time Using Lean Thinking*” M.S. thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/30759>
- [36] S. C. Lee, “A Literary Survey on the Challenges of Adopting Lean in Aerospace Production and Aviation Maintenance,” *Journal of Aviation Technology and Engineering*, vol. 12, no. 1, 2023, [En línea]. Disponible en: doi.org/10.7771/2159-6670.1243.
- [37] R. S. Wagner, T. S. Hattingh, y H. Meijer, “Factors Affecting the Sustainability of Lean in Healthcare: A Systematic Literature Review,” *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 124–136, Nov. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7166/33-3-2813>.
- [38] S. Kanabar, R. Jirli, S. Katke, y V. K. Jha, “The Impact and Challenges of the Implementation of 5S Methodology in Healthcare Settings: A Systematic Review,” *Cureus*, vol. 16, no. 7, 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7759/cureus.64634>
- [39] N. B. Hölzel, y V. Gollnick, “Cost-benefit Analysis of Prognostics and Condition-based Maintenance Concepts for Commercial Aircraft Considering Prognostic Errors,” in Proc. Annual Conf. of the Prognostics and Health Management Society, 2015, pp. 1–16. [En línea]. Disponible en: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2716>

- [40] K. Feldman, T. Jazouli, y P. A. Sandborn, “A Methodology for Determining the Return on Investment Associated With Prognostics and Health Management,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 58, no. 2, pp. 305–316, Jun. 2009, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TR.2009.2020134>
- [41] U.S. Department of Defense, *Condition Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook*, Aug. 2024. [Online]. Available: Defense Acquisition University (DAU) website.
- [42] Y. Meng *et al.*, “A Review of Advances in Tribology 2020–2021,” *Friction*, vol. 10, no. 6, pp. 855–904, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>
- [43] T. Liskiewicz, A. Neville, y K. Stępień, “Advances in Sensing for Real-Time Monitoring of Tribological Systems,” *Wear*, vol. 532–533, 205151, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108965>
- [44] K. Moenck, J.-E. Rath, J. Koch, A. Wendt, F. Kalscheuer, T. Schüppstuhl, y D. Schoepflin, “Digital Twins in Aircraft Production and MRO: Challenges and Opportunities,” *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 1051–1067, May. 2024, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00740-y>

Copyright (2026) © John Cajamarca Guerrero y Rodger Salazar Loo.

Este texto está protegido bajo una licencia internacional [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También podrá adaptar: remezclar, transformar y construir sobre el material. [Ver resumen de la licencia.](#)

