



IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN ROBOT CON SISTEMA DE LOCOMOCIÓN *WHEELED-LEGGED* PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROTOCOLO DE INSPECCIÓN DE TOMAS DE AIRE EN AVIONES CAZA EN ESTADO PREVIO AL VUELO

IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF A WHEELED-LEGGED LOCOMOTION ROBOT FOR OPTIMIZING THE PREFLIGHT AIR INTAKE INSPECTION PROTOCOL OF FIGHTER AIRCRAFT

Mayki Mamani^{1,*} , Jhonathan Uchamaco¹ , David Meneses¹ ,
 Yuri Silva¹ , Jorge Apaza¹ 

Recibido: 12-05-2025, Recibido tras revisión: 02-06-2025, Aceptado: 11-06-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen


Los protocolos de mantenimiento e inspección en la industria aeroespacial están diseñados para salvaguardar la integridad estructural de las aeronaves y la seguridad de los pilotos. Las tomas de aire de los aviones caza presentan un acceso limitado para los técnicos de mantenimiento durante la inspección en estado previo al vuelo. Ante esta limitación, se propone una solución innovadora mediante la implementación de un robot con sistema de locomoción *wheeled-legged*, que permite acceder a dichas tomas de aire y optimizar significativamente el protocolo de inspección. En esta investigación se desarrolló e implementó un robot con tecnología de locomoción *wheeled-legged*, cuyo propósito específico es facilitar la inspección de las tomas de aire en aviones caza previo al vuelo. Para su diseño y fabricación se consideraron cuidadosamente los requerimientos operativos de los técnicos de la Fuerza Aérea del Perú (FAP), lo que resultó fundamental en la definición de las especificaciones del sistema. El resultado fue un diseño adaptativo y compacto que permite al robot desplazarse con eficacia a través de las tomas de aire, optimizando el tiempo y los recursos empleados en las inspecciones. Mediante pruebas estandarizadas se evaluó el rendimiento del prototipo, demostrando su capacidad para acceder e inspeccionar eficazmente dichas estructuras. Esto permite mejorar el protocolo de mantenimiento tradicional mediante la incorporación de tecnología avanzada en los procesos de inspección aeronáutica.

Palabras clave: robot, diseño, inspección, tomas de aire, aviones caza, locomoción, wheeled-legged

Abstract

Maintenance and inspection protocols in the aerospace industry are designed to safeguard the structural integrity of aircraft and ensure pilot safety. However, the air intakes of fighter aircraft pose significant access challenges for maintenance technicians during preflight inspections. To address this limitation, this study presents an innovative solution: the implementation and evaluation of a robot equipped with a wheeled-legged locomotion system. This system enables efficient access to the air intakes, significantly enhancing the inspection protocol. The robot was developed in close alignment with the operational requirements of Peruvian Air Force (FAP) technicians, which was critical to defining its design specifications and manufacturing parameters. Its adaptive and compact architecture allows it to navigate confined intake structures effectively, optimizing inspection time and resource utilization. The prototype's performance was rigorously assessed through standardized tests, demonstrating its capability to reliably access and inspect air intakes under preflight conditions. This advancement contributes to the modernization of conventional aircraft maintenance procedures by integrating robotic technologies into the aeronautical inspection process.

Keywords: Robot, design, inspection, air intake, fighter aircraft, locomotion, wheeled-legged

^{1,*}Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Facultad de Producción y Servicios, Universidad Nacional de Ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. 
 Autor para correspondencia ✉: mmamanimar@unsa.edu.pe.

Forma sugerida de citación: M. Mamani, J. Uchamaco, D. Meneses, Y. Silva y J. Apaza, "Implementación y evaluación de un robot con sistema de locomoción *wheeled-legged* para la optimización del protocolo de inspección de tomas de aire en aviones caza en estado previo al vuelo," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 34, pp. 126-139, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.10>.

1. Introducción

Actualmente, en la industria aeronáutica se prioriza el óptimo funcionamiento de las aeronaves con protocolos de mantenimiento especializados, los cuales garantizan altos estándares de seguridad [1]. Uno de los componentes críticos durante estas labores son las tomas de aire. Estas estructuras, de geometría compleja, están conformadas por múltiples compuertas periféricas cuya función es redirigir el flujo del aire hacia el motor, contribuyendo así al rendimiento óptimo de la aeronave [2] y [3].

En la Fuerza Aérea del Perú (FAP), los aviones caza presentan particular dificultad de acceso a las tomas de aire, lo cual complica las tareas de inspección por parte del personal técnico. Esta limitación puede derivar en la omisión de defectos estructurales o en la presencia de objetos extraños (*Foreign Object Debris*, FOD) [4], los cuales representan un riesgo significativo de incidentes catastróficos, pérdidas de vidas humanas y daños materiales con consecuencias económicas elevadas [5].

En la FAP, se realiza mantenimiento diario y semanal y diario que incluye la extracción de los motores para la inspección de las tomas de aire [6]. No obstante, durante la inspección previa al vuelo, el tiempo disponible es limitado, y desmontar el motor resulta inviable, lo cual impide a los técnicos inspeccionar adecuadamente las tomas de aire [7].

Se ha investigado el uso de periscopios como herramienta para acceder visualmente a zonas de difícil inspección en aeronaves, y estos han sido implementados en la FAP. Sin embargo, su alcance reducido y la complejidad estructural de las tomas de aire continúan generando riesgo de omitir defectos en el fuselaje o la presencia de FOD [8] y [9]. Aunque estos dispositivos mejoran parcialmente los protocolos de mantenimiento, persiste el riesgo de que no se detectan fallos en la fase previa al vuelo.

Por otro lado, los avances en tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, han tenido un crecimiento significativo en diversas ramas de la industria [10], especialmente en el campo de la robótica, facilitando la creación rápida de diseños complejos para inspección en espacios difíciles, con bajos costos [11–15].

Asimismo, la robótica se ha implementado progresivamente en procesos de mantenimiento aeronáutico. Ejemplos de ellos son: el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la inspección de aeronaves en la Fuerza Aérea Española en colaboración con Airbus [16], la tecnología Vortex aplicada a la inspección de fuselajes y alas [17]; los robots octópodos capaces de adherirse a las superficies de los aviones para revisar remaches [18, 19]; el desarrollo de robots continuos que ingresan en cavidades para inspeccionar motores [20, 21]; y el uso de robots modulares diseña-

dos para examinar el interior de las alas y su estructura interna [22].

Si bien estas tecnologías han sido investigadas para el mantenimiento general de aeronaves, no abordan la inspección de las tomas de aire, debido a que se trata de espacios confinados, de geometría variable y difícil acceso. Actualmente, existe una carencia de estudios y validaciones que respalden la aplicación de robots en el interior de estas estructuras.

Ante esta problemática, han explorado diversas tecnologías de locomoción para acceder a las tomas de aire, entre ellas: orugas, ruedas convencionales, diseños adaptativos, sistemas omnidireccionales, robots continuos, electro adhesivos y vehículos aéreos no tripulados (UAV) [23]. Dentro de estas alternativas, destaca la tecnología de locomoción *wheeled-legged* [24], que combina ruedas y patas en plataformas móviles, permitiendo un desplazamiento estable sobre superficies irregulares, como las presentes en las tomas de aire.

Esta hipótesis es respaldada por desarrollos como el robot Centauro, del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), el cual emplea un sistema híbrido de locomoción para operar en terrenos accidentados en misiones de búsqueda y rescate [25]; y el Roller Walker [26], que incorpora ruedas para desplazamiento en superficies lisas y patas articuladas para superar obstáculos. No obstante, ninguno de estos desarrollos se orienta al uso de robots híbridos en espacios confinados dentro de aeronaves.

En este trabajo se implementa y evalúa el robot ALLQU, dotado de un sistema de locomoción *wheeled-legged*, orientado a optimizar los protocolos de mantenimiento mediante el acceso e inspección de tomas de aire. Para su validación se emplean tres referentes metodológicos: el protocolo de pruebas NIST-ASTM aplicable a robots en entornos complejos [23], el protocolo de mantenimiento POCHE de la FAP, y la metodología NASA TLX, que permite analizar la carga de trabajo percibida por los operadores, a fin de evaluar la usabilidad del sistema, así como sus ventajas y limitaciones en el contexto planteado.

2. Materiales y métodos

2.1. Robots *wheeled-legged*

Los robots *wheeled-legged*, como se muestra en la Figura 1, combinan ruedas y patas con el objetivo de mejorar la movilidad en terrenos variados. Estos sistemas emplean actuadores que permiten alternar entre distintos modos de locomoción según las características del terreno. Sin embargo, esta versatilidad puede incrementar la complejidad operativa, aspecto que se evalúa en esta investigación mediante la metodología NASA TLX [27].

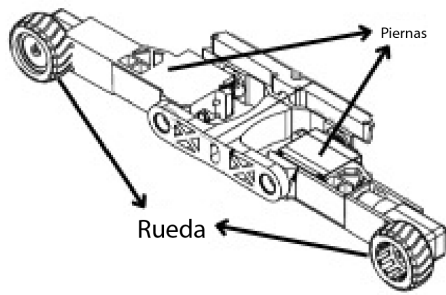
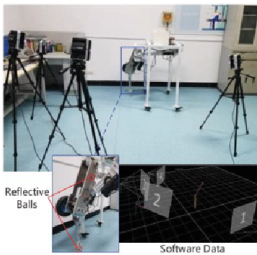
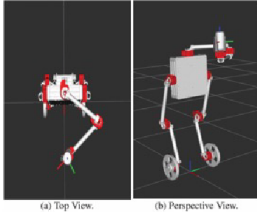
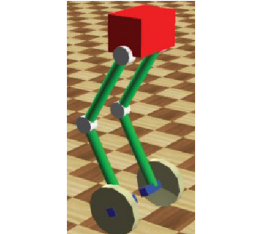

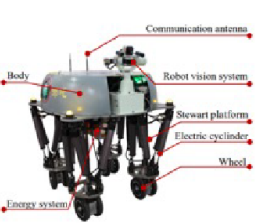


Figura 1. Robot *wheeled-legged*

Algunas de las ventajas y desventajas de este tipo de robots, según lo señalado por Li et al. en su investigación, se resume en la Tabla 1 [27].

En general, su capacidad de adaptación y estabilidad —entendida como la habilidad para mantener su posición y orientación sin volcar ni deslizarse excesivamente— los convierte en una opción adecuada para aplicaciones en entornos de difícil acceso, como el considerado en esta investigación.

Tabla 1. Ejemplos de robots *wheeled-legged*

Trabajos previos	Características
<p>[28]</p> 	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> Alta movilidad Alta estabilidad Gran capacidad de evasión de obstáculos
<p>[29]</p> 	<p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> Alto nivel de control
<p>[30]</p> 	
<p>[31]</p> 	
<p>[32]</p> 	

2.2. Estudio del ambiente de trabajo

Se analizó el entorno de la toma de aire del Mirage 2000, cuya estructura está compuesta principalmente de aluminio. Su ubicación se muestra en la Figura 2(a). Los componentes principales, tales como las entradas, salidas, compuertas y secciones críticas, se encuentran mapeadas en la Figura 2(b).

La entrada de la toma de aire tiene una altura de 16 cm, Figura 2(c); mientras que la salida, correspondiente al área del compresor, presenta un diámetro de 78 cm, Figura 2(d). En una de las secciones críticas, la altura máxima registrada es de 14 cm. La compuerta periférica 1 tiene caída de 12 cm, una abertura de 35 cm y una pendiente de 30°, Figura 2(e). Por su parte, la compuerta 2 presenta una altura de 5 cm, Figura 2(f).

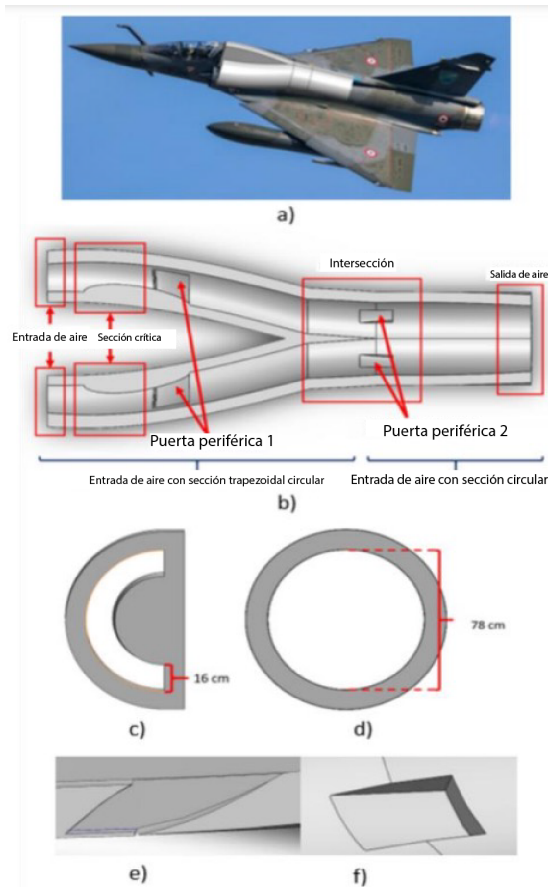


Figura 2. Características de las tomas de aire de los aviones de combate Mirage 2000: (a) Ubicación de la toma de aire en los aviones de combate [?]. (b) Componentes de la toma de aire. (c) Sección en la entrada de la toma de aire. (d) Sección en la salida de la toma de aire. (e) Compuerta periférica 1. (f) Compuerta periférica 2.

El protocolo de mantenimiento previo al vuelo del Mirage 2000, basado en el manual POCHE, contempla seis componentes principales, los cuales se muestran en la Figura 3. Entre ellos, la toma de aire —que pre-

senta condiciones de acceso difíciles— constituye el foco central de esta investigación.

Dicho mantenimiento incluye la inspección del fuselaje interno, la verificación de que las compuertas se encuentren correctamente cerradas y la ausencia de FOD en el sistema.

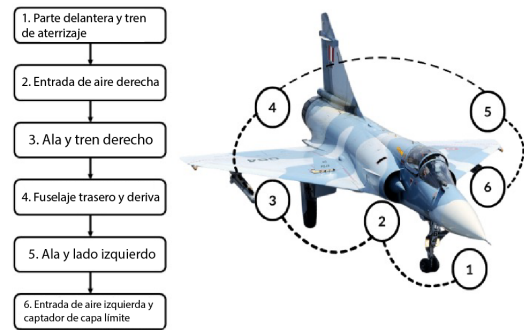


Figura 3. Procedimiento de mantenimiento previo en aviones caza Mirage 2000

Se recopilaron y analizaron los requerimientos del personal técnico de la FAP mediante encuestas y entrevistas estructuradas, utilizando escalas de puntuación. Los resultados se agruparon en dos categorías: requerimientos técnicos (dimensiones, alcance, detección de FOD, estabilidad, maniobrabilidad y velocidad) y requerimientos económicos (costo y disponibilidad).

Las entrevistas se realizaron a tres grupos clave del personal de la FAP involucrado en la inspección de tomas de aire:

1. Técnicos encargados de la inspección manual del avión.
2. Personal responsable de la extracción de objetos extraños.
3. Supervisores encargados de la documentación y registro de las actividades de inspección.

Los promedios obtenidos de las encuestas y entrevistas se presentan en la Tabla 2. El puntaje final corresponde al promedio entre ambas fuentes, el cual se visualiza en el gráfico de barras de la Figura 4.

El orden de importancia asignado a los criterios evaluados para el diseño del prototipo fue el siguiente: Efectividad (4,8), Alcance (4,6), Maniobrabilidad (4,4), Adaptabilidad (4,05), Dimensiones (3,5), Disponibilidad (3,4), Estabilidad (2), Velocidad (1,15) y Costo (0).

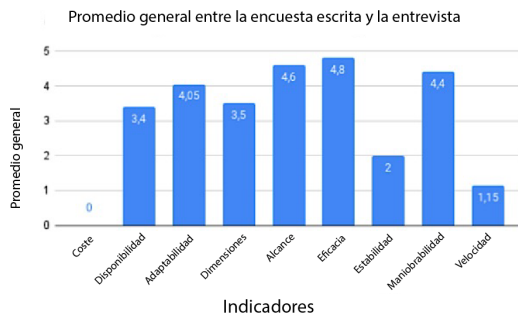


Figura 4. Puntaje promedio entre las encuestas escritas y entrevistas al personal de la FAP

Tabla 2. Análisis de resultados de la encuesta escrita y de la entrevista

Indicadores	Promedio		Promedio General
	Encuesta	Entrevista	
Costo	0	0	0
Disponibilidad	3,3	3,5	3,4
Adaptabilidad	3,8	4,3	4,05
Dimensiones	3	4	3,5
Alcance	4,6	4,6	4,6
Efectividad	4,8	4,8	4,8
Estabilidad	4	0	2
Maniobrabilidad	4,1	4,7	4,4
Velocidad	2,3	0	1,15

Nota: La puntuación va de 1 a 5 en función de la importancia creciente.

Luego de analizar el entorno de trabajo de la toma de aire, el protocolo de mantenimiento de la FAP en estado previo al vuelo, así como los resultados de las encuestas, entrevistas realizadas al personal técnico, se determinaron los requerimientos que debe cubrir el robot ALLQU, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Lista de requisitos

Característica	Requerimiento
Función principal	Inspección del fuselaje interno de las tomas de aire y detección de FOD
Dimensionamiento	El tamaño del robot se basa en la sección crítica, con altura hasta 140 mm y longitud mínima de 350 mm.
Movilidad	Desplazamiento por todo el interior de las tomas de aire.
Adaptabilidad	El sistema debe adaptarse a la forma de la toma de aire.
Estabilidad	El robot debe ser estable en todo su recorrido.

3. Resultados y discusión

3.1. Diseño, construcción e implementación de robot con sistema *wheeled-legged*

Basándose en los requerimientos previamente establecidos, las dimensiones del robot se detallan en la Figura 5: altura máxima de 140 mm, ancho de 250 mm y largo de 400 mm. Este último valor supera la abertura de 350 mm de la compuerta periférica 1, lo que permite que el robot atraviese dicha sección sin riesgo de atascos.

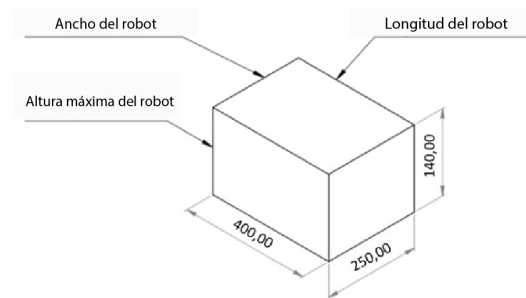


Figura 5. Dimensiones conceptuales del robot según el espacio disponible en la sección crítica de la toma de aire del avión caza Mirage 2000

3.2. Diseño del sistema *wheeled-legged*

El diseño y ensamblaje de los componentes mecánicos del robot ALLQU se realizaron mediante software de modelado tridimensional, como se muestra en la Figura 6. Se priorizó un diseño compacto y adaptativo, fundamental para operar en espacios confinados.

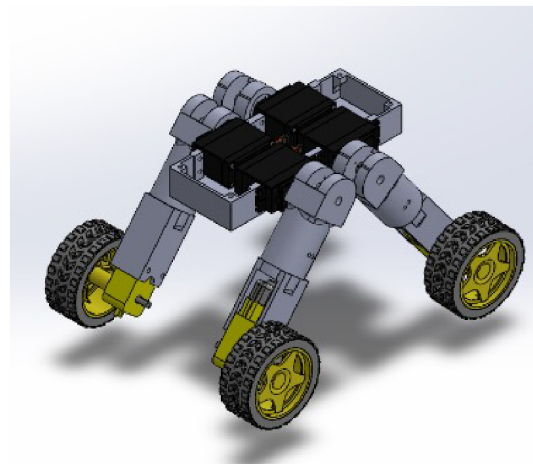


Figura 6. Ensamblaje 3D de robot ALLQU en software SolidWorks

Se seleccionó un sistema de locomoción híbrido *wheeled-legged* debido a su capacidad comprobada para

combinar la eficiencia de las ruedas con la adaptabilidad de las patas. Esta configuración permite al robot contraer y extender su estructura para desplazarse de manera estable y eficiente a través de las geometrías complejas presentes en las tomas de aire, incluidas las compuertas periféricas y las secciones críticas.

Para alcanzar un equilibrio entre peso, resistencia y funcionalidad, se utilizaron 14 componentes estructurales ligeros y robustos, fabricados mediante impresión 3D. El diseño resultante alcanzó un peso total de 1,350 kg y dimensiones de 140 mm de alto, 250 mm de ancho y 400 mm de largo, lo cual permite su adaptación precisa a la sección crítica de 14 cm de altura y a la abertura de 35 cm de la compuerta periférica 1.

Esta configuración fue orientada a maximizar la maniobrabilidad y la capacidad de acceso en entornos restringidos, equilibrando estos atributos con la complejidad inherente al control y el costo de fabricación.

El robot cuenta con seis componentes mecánicos principales, ilustrados en la Figura 7. Está equipado con cuatro ruedas de goma de 22,5 mm de radio, adaptadas mediante acoples mostrados en la Figura 7(a), que permiten su conexión a los motorreductores.

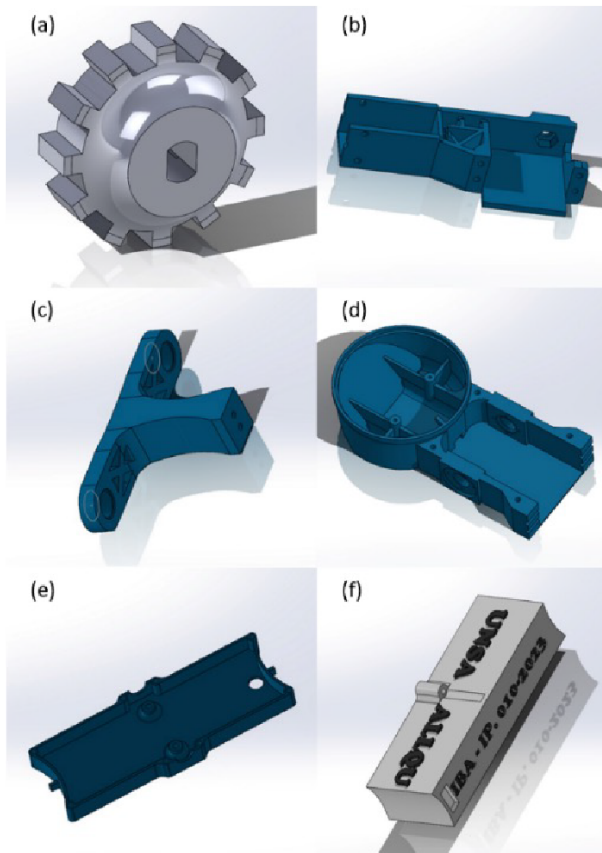


Figura 7. Modelado 3D de componentes de robot ALLQU en software SolidWorks: (a) Acople de rueda, (b) Pata, (c) Estructura de pivote, (d) Chasis, (e) Tapa, (f) Módulo de electrónica

Las patas estructurales, que soportan los motores, se representan en la figura 7(b) y se acoplan a pivotes según la 7(c), permitiendo su movimiento mediante servomotores independientes. El chasis, mostrado en la Figura 7(d), proporciona estabilidad estructural y soporte general al conjunto. La tapa, Figura 7(e), protege los servomotores y actúa como soporte para el sistema electrónico, que se encuentra alojado en la Figura 7(f).

Se evaluaron dos escenarios de operación en la sección crítica del sistema, representados en la Figura 8: el ingreso del robot con sus cuatro ruedas a una pendiente de 30° Figura 8(a) y su salida con dos ruedas sobre superficie plana Figura 8(b).

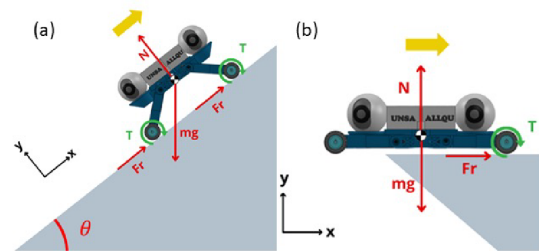


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre de robot: (a) Inclinado a 30° con 4 ruedas en contacto, (b) Plano horizontal a 0° con 2 ruedas en contacto

Con una masa de 1,35 kg y coeficientes de fricción estática y rodante de $C_f = 0,7C$ y $C_r = 0,005$, respectivamente, se calcularon fuerzas requeridas de 6,679 N para el ascenso inclinado y 0,066 N para el desplazamiento en plano. Considerando un radio de rueda de 22,5 mm, se determinó un torque necesario de 0,038 Nm, valor inferior al límite máximo de 0,052 Nm, lo cual asegura tracción suficiente y evita el deslizamiento.

Se simuló el desplazamiento del robot en la sección crítica de la toma de aire (Figura 9). La simulación confirmó que sus dimensiones, junto con el sistema *wheeled-legged*, le permiten atravesar dicha sección de manera efectiva.

En la Figura 9(a) se observa el ingreso del robot utilizando únicamente las ruedas, mientras que en la Figura 9(b), se representa la salida mediante el uso de sus patas.

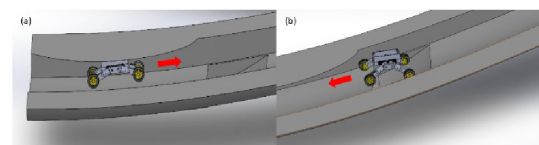


Figura 9. Simulación de movimiento en SolidWorks de robot en sección crítica de la toma de aire: (a) Ingreso de robot, (b) Salida del robot

Tabla 4. Torque requerido

Torques	Descripción	Torque Parámetros (Nm)
Torque en motor de ruedas requerido	2 ruedas en contacto e inclinación 0°.	Treq 0° = 0,002 Nm
	4 ruedas en contacto o inclinación 30°.	Treq 45° = 0,038 Nm
Torque máximo de tracción en ruedas	2 ruedas en contacto e inclinación 0°.	Tmax.tractivo 0° = 0,104 Nm
	4 ruedas en contacto e inclinación 30°.	Tmax.tractivo 45° = 0,052 Nm

3.3. Construcción e implementación

La construcción del robot ALLQU se llevó a cabo en el laboratorio de manufactura de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, como se muestra en la Figura 10. El diseño incluye un total de 14 piezas estructurales fabricadas mediante impresión 3D, junto con 4 acoples de ruedas, 4 patas, 2 pivotes, 2 estructuras de chasis, una tapa y un módulo electrónico central.

El robot está equipado con 4 ruedas de goma de alto agarre, acopladas a motorreductores de corriente continua (DC) de 3–6 V. Cada pata es accionada por servomotores DC de 4,8–7,2 V. Además, cuenta con 2 cámaras inalámbricas con sistemas de iluminación LED e infrarroja, destinadas a facilitar la inspección en espacios de baja visibilidad.

**Figura 10.** Ensamblaje de robot ALLQU

Las dimensiones del robot ALLQU y de la unidad de control operativa (OCU) se presentan en la Figura 11 y la Tabla 5. Estas fueron registradas con el robot en su configuración extendida, como se muestra en la Figura 8(b). Las medidas obtenidas permiten su maniobra en espacios reducidos, como las tomas de aire de aeronaves caza.

La estructura del robot, fabricada con componentes impresos en 3D, es ligera y resistente, lo que contribuye a una mayor eficiencia operativa. Por su parte, las cámaras integradas (ver Tabla 6) fueron seleccionadas específicamente para permitir grabación en condiciones de baja luminosidad, como las que se presentan en el interior del Mirage 2000.

**Figura 11.** Robot ALLQU y OCU**Tabla 5.** Características del robot ALLQU y OCU

Características	Descripción	Parámetro
Características de robot	Peso robot	1,350 kg
	Largo robot	350 mm
	Ancho robot	150 mm
	Alto robot	110 mm
Características unidad de control del operador (OCU)	Peso OCU	300 gramos
	Largo OCU	150 mm
	Ancho OCU	175 mm
	Alto OCU	40 mm

Tabla 6. Características de la cámara

Descripción	Parámetro
Tecnología de conectividad	Inalámbrico
Protocolo de conectividad	Wifi
Peso de la cámara	20 gramos
Tipo de fuente de luz	LED e infrarrojo
Potencia	15 watts

La versión construida del robot ALLQU se muestra en la Figura 12, donde también se ilustran los ángulos máximos que pueden formarse entre las patas y el cuerpo del sistema. En la Figura 12(a), se observa un ángulo de 70° cuando las patas se encuentran posicionadas por debajo del cuerpo. En la Figura 12(b), se registran ángulos de 25° entre el cuerpo y la pata delantera en dirección ascendente, y de 15° entre el cuerpo y la pata trasera en la misma dirección.

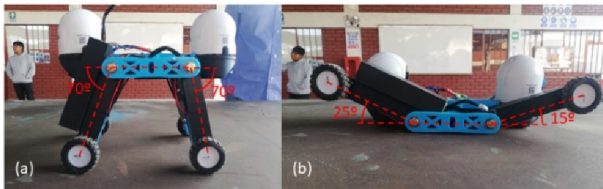


Figura 12. Robot ALLQU con sistema de locomoción *wheeled-legged*: (a) Ángulo máximo entre cuerpo y patas hacia abajo. (b) Ángulos máximos entre cuerpo y patas hacia arriba.

A continuación, se presenta la Tabla 7, donde se observan las especificaciones técnicas del robot.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del robot

Características	Descripción
Tipo de locomoción	Wheeled-Legged
Dimensiones del robot	Largo: 350 mm
	Ancho: 150 mm
	Alto: 110 mm
Peso del robot	1,350 kg
Ruedas	4 de goma
	Radio: 22,5 mm
Patas	4 servomotores
Cámaras de inspección	2 inalámbricas
Conectividad	Wifi
Peso de la cámara	20 g
Fuente de luz (cámara)	LED-infrarrojo
Potencia (cámara)	15W
Dimensiones del OCU	Largo: 150 mm
	Ancho: 175 mm
	Alto: 40 mm
Peso del OCU	300 g

3.4. Análisis del set y metodología de pruebas

En este capítulo se describen las características de las dos pruebas que se realizarán al robot ALLQU. En la primera prueba se evaluará la efectividad de giro del sistema *wheeled-legged*, así como el desempeño de la cámara en condiciones reales. En la segunda prueba se medirá la efectividad general del sistema de locomoción *wheeled-legged* y la carga mental percibida por el operador tras manipular el robot.

3.4.1. Prueba de la efectividad de giro del sistema *wheeled-legged* y efectividad de la cámara

Se utilizó un ducto de ventilación, representado en la Figura 13 y descrito en la Tabla 8, que simula un espacio estrecho con condiciones de baja iluminación. Este entorno permitió evaluar la capacidad de giro del robot ALLQU y la calidad del video capturado por su cámara.

La prueba se repitió diez veces, variando los ángulos entre el cuerpo del robot y sus patas. A continuación, el robot se desplazó progresivamente hacia la cartilla, capturando imágenes a distintas distancias, y luego retornó al punto de partida por el mismo extremo.



Figura 13. Ducto de ventilación para las pruebas.

Tabla 8. Características del ducto de ventilación

Característica	Valor
Perfil	Circular
Longitud	1,83 m
Diámetro	0,62 m
Material de superficie	Acero

3.4.2. Prueba de la efectividad del sistema de locomoción *wheeled-legged* y análisis de la carga mental con NASA TLX

La prueba del sistema de locomoción *wheeled-legged* y de la carga mental del operador se realizó en la base aérea, específicamente en las tomas de aire del Mirage 2000. Debido a las condiciones del entorno,

se presentaron restricciones tanto en el alcance como en la cantidad de pruebas realizadas. Los detalles del entorno experimental se encuentran descritos en la Figura 14.



Figura 14. Ducto de ventilación del avión Mirage

La evaluación incluyó el análisis de la efectividad del desplazamiento y el tiempo de recorrido en las secciones indicadas previamente en la Figura 2: dos tomas de aire laterales y una intersección central. Siguiendo el protocolo de mantenimiento POCHE de la FAP, el robot se posicionó inicialmente en la toma derecha, se desplazó hacia la intersección y regresó por la toma izquierda.

Se hicieron ocho pruebas, con la participación de cuatro operadores previamente instruidos. Posteriormente, se aplicó la metodología NASA TLX para medir la carga mental percibida por los participantes, considerando factores como esfuerzo físico y mental, rendimiento percibido, nivel de frustración y demanda del entorno operativo.

3.5. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el robot equipado con un sistema *wheeled-legged*, según lo descrito anteriormente.

3.5.1. Prueba de la efectividad de giro del sistema *wheeled-legged* y efectividad de la cámara

Se evaluó la efectividad de giro del robot ALLQU, así como el rendimiento de la cámara integrada. Para la prueba de giro, se realizaron diez ensayos dentro del ducto de ventilación, considerando diferentes ángulos

entre el cuerpo del robot y las patas orientadas hacia la parte inferior del mismo.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9, donde se detalla el desempeño del robot en términos de su capacidad de giro bajo las condiciones descritas.

Tabla 9. Resultados de prueba de giro del robot

Ángulo entre patas y cuerpo	¿Se logró el giro?
70°	Sí
65°	Sí
60°	Sí
55°	Sí
50°	Sí
45°	No
40°	No
35°	No
30°	No
25°	No

La Tabla 9 muestra que el robot ALLQU ejecuta giros de manera eficaz cuando el ángulo entre el cuerpo y las patas supera los 50°. Sin embargo, no logra completar el giro por debajo de los 45°, debido a las limitaciones físicas del entorno de prueba. La capacidad de giro está directamente relacionada con el espacio disponible, siendo más restrictiva en zonas estrechas.

La Figura 15 presenta la prueba realizada con la cartilla Snellen y una de las imágenes capturadas por la cámara del robot. Los resultados de agudeza visual obtenidos en esta evaluación se resumen en la Tabla 10.

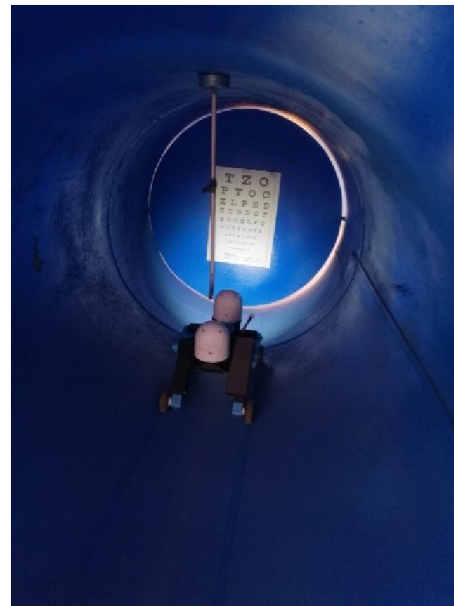


Figura 15. Robot ALLQU en el tubo de ventilación, haciendo pruebas de visión con una cartilla SNELLEN

Tabla 10. Resultados de prueba de giro del robot

Tipo de fuente de luz	Distancia	Zoom	Agudeza visual	Última letra
LED	0,4 m	No	20/12,5	P
		Sí	20/12,5	P
	1,5 m	No	20/20	P
		Sí	20/16	E
Infrarrojo	0,4 m	No	20/12,5	P
		Sí	20/12,5	P
	1,5 m	No	20/16	E
		Sí	20/16	E

La agudeza visual obtenida por la cámara del robot varió en función de la fuente de luz, la distancia y el uso del zoom. Con iluminación LED y a una distancia de 0,4 m, se alcanzó una agudeza de 20/12,5, tanto con zoom como sin él. A una distancia de 1,5 m, el valor fue de 20/20 sin zoom, mejorando a 20/16 al activarlo, lo cual evidencia su utilidad en distancias mayores.

Bajo iluminación infrarroja y a 0,4 m, la agudeza visual también fue de 20/12,5 en ambos casos. A 1,5 m sin zoom se obtuvo 20/16, manteniéndose dicho valor al aplicarlo.

Estos resultados indican que el sistema de visión del robot presenta un buen desempeño en distancias cortas, mientras que el uso del zoom contribuye significativamente a mejorar la precisión visual en distancias mayores. En conjunto, el sistema demuestra adaptabilidad a diferentes condiciones de iluminación y entorno.

3.5.2. Prueba de la efectividad del sistema de locomoción *wheeled-legged* y análisis de la carga mental con NASA TLX

Se llevó a cabo una prueba con ocho recorridos realizados por cuatro operarios, con el objetivo de evaluar la efectividad del sistema de locomoción *wheeled-legged* en las tomas de aire del Mirage 2000, siguiendo el protocolo POCHE establecido por la FAP. La Figura 16 ilustra las posiciones del robot durante el recorrido.

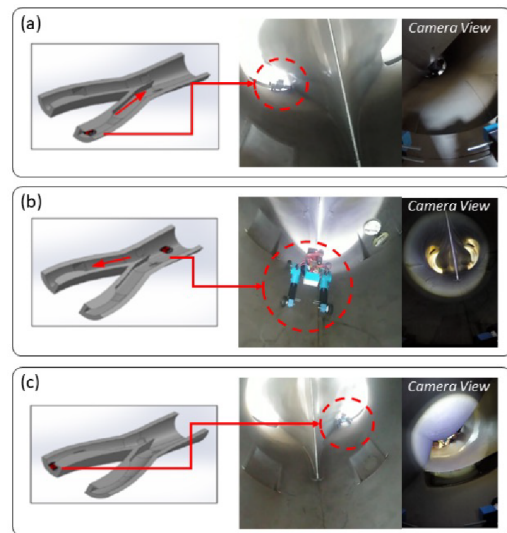


Figura 16. Robot ALLQU en la toma de aire de un avión caza Mirage 2000, llevando a cabo pruebas de locomoción e inspección: (a) Ingreso del robot por la toma de aire derecha. (b) Robot en la intersección. (c) Salida del robot por la toma de aire izquierda.

Los resultados de esta prueba de locomoción, que incluyen la eficacia del sistema, las distancias recorridas y los tiempos de desplazamiento, se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de prueba visual en ducto de ventilación

Componente toma de aire	Distancia recorrida	Tiempo	Prueba
Toma de aire Derecha	0,94 m	55,6 s	Se logró completar el circuito en las 8 pruebas.
Intersección motor	3,36 m	36,4 s	
Toma de aire izquierda	0,94 m	48,7 s	

La operación del robot por parte de cuatro operadores en las tomas de aire del Mirage 2000 (Figura 17) fue evaluada mediante la metodología NASA TLX. Los resultados obtenidos incluyen las puntuaciones individuales, el cuadro de asignación de pares para el

cálculo de la puntuación ponderada y la clasificación final de la carga de trabajo mental. Estos se presentan en las Tablas 12, 13 y 14, respectivamente.



Figura 17. Operadores preparando las pruebas

Tabla 12. Puntuación de la metodología NASA TLX

Dimensión	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Persona 4
Exigencia mental	12	20	10	20
Exigencia física	4	20	5	17
Exigencias temporales	12	20	13	14
Rendimiento	20	20	16	18
Esfuerzo	14	20	11	18
Nivel de frustración	10	10	15	10

La Tabla 12 muestra que la carga mental y física percibida varió entre los participantes, siendo la Persona 2 la que presentó los valores más altos en la mayoría de las categorías evaluadas. Las exigencias temporales evidenciaron una dispersión moderada, mientras que el rendimiento fue elevado, especialmente en las Personas 1 y 2, quienes obtuvieron puntuaciones máximas de 20.

Los niveles de esfuerzo y frustración también mostraron variabilidad entre los operadores; sin embargo, la frustración se mantuvo en niveles bajos. Estos resultados reflejan una carga general elevada, acompañada de una respuesta emocional moderada por parte de los participantes.

Tabla 13. Cuadro comparativo por pares

Dimensión	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Persona 4
Exigencia mental	3	2	2	4
Exigencia física	1	4	0	0
Exigencias temporales	5	4	4	1
Rendimiento	4	1	2	3
Esfuerzo	2	1	3	4
Nivel de frustración	0	3	4	3

La Tabla 13 presenta los valores de ponderación asignados a cada dimensión del índice NASA TLX, reflejando la importancia percibida de cada factor en la carga de trabajo. La exigencia temporal obtuvo el mayor peso relativo, especialmente en la Persona 1 (peso 5) y la Persona 3 (peso 4), debido a los tiempos superiores a 30 segundos registrados en las secciones críticas del recorrido.

La exigencia mental también destacó, con especial énfasis, en la Persona 4, quien le asignó un peso de 4. La frustración tuvo mayor impacto en las Personas 3

y 4, mientras que la exigencia física fue más relevante para las Personas 1 y 2.

Tabla 14. Carga de trabajo mental

Nivel de carga mental	Persona 1	Persona 2	Persona 3	Persona 4
Bajo				
Medio			985	
Alto	1040	1350		1250

La Tabla 14 muestra una carga mental elevada en la mayoría de los participantes, con excepción de la Persona 3, quien registró un nivel medio de 985 unidades. Esta diferencia se atribuye al manejo del robot en la sección crítica, ilustrada en la Figura 2(b). Las pruebas realizadas, tanto en el ducto de ventilación como en el Mirage 2000, validaron el rendimiento operativo del robot ALLQU, así como la percepción de carga cognitiva por parte del usuario.

El robot demostró su capacidad para optimizar el tiempo de inspección, reduciendo tanto el periodo de inactividad de la aeronave como la dependencia de personal altamente especializado. Las pruebas estandarizadas se desarrollaron en dos escenarios:

1. **Prueba de giro y visión:** realizada en un ducto de ventilación circular de acero, con un diámetro de 0,62 m y una longitud de 1,83 m, en condiciones de baja iluminación. Se utilizó una cartilla Snellen para evaluar la calidad de imagen capturada por la cámara del robot.
2. **Prueba de locomoción y carga mental:** llevada a cabo en las tomas de aire de un avión caza Mirage 2000 real, ubicado en un hangar de la FAP. Esta prueba permitió evaluar el desempeño del robot en geometrías críticas de entrada, como secciones de 16 cm de altura y 78 cm de salida, bajo condiciones reales de campo establecidas por el protocolo POCHE.

4. Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo e implementación de un robot con sistema de locomoción *wheeled-legged*, diseñado para mejorar la inspección previa al vuelo de las tomas de aire en aviones caza. El robot demostró ser eficaz para desplazarse e inspeccionar el interior de dichas estructuras, optimizando recursos al reducir el tiempo de inactividad de las aeronaves y la necesidad de personal especializado, como se evidenció en las pruebas realizadas en ductos de ventilación y en tomas reales de aviones Mirage 2000.

Los principales hallazgos del estudio son los siguientes:

- El sistema de locomoción *wheeled-legged* permitió movimientos estables en las tres secciones evaluadas del Mirage 2000, registrándose un tiempo promedio de 36,4 s en la intersección del motor y de 52,15 s en las tomas de aire laterales.
- La capacidad de giro en espacios confinados depende directamente del área disponible. En un ducto de 0,62 m de diámetro, el giro solo fue posible con ángulos entre cuerpo y patas superiores a 50°.
- El sistema visual, compuesto por sensores ópticos con iluminación LED e infrarroja, mostró alta agudeza visual incluso en condiciones de baja luminosidad. El zum óptico mejoró significativamente la resolución en zonas de difícil visibilidad.

La evaluación mediante la metodología NASA TLX indicó una carga mental elevada, especialmente en zonas críticas del recorrido, donde el operador debe controlar múltiples elementos del robot de forma simultánea.

Las pruebas realizadas confirman la viabilidad operativa del robot ALLQU para la inspección de tomas de aire en aviones caza. No obstante, se identificaron algunas limitaciones técnicas, entre ellas:

- Dificultades para ejecutar giros cerrados con ángulos menores a 45°.
- Capacidad de inspección limitada a observación visual superficial, sin detección subsuperficial.
- Autonomía restringida debido a la duración limitada de la batería.
- Robustez estructural aún no validada en entornos extremos (temperaturas elevadas, polvo, vibraciones).
- Carga cognitiva elevada para el operador durante el manejo en zonas críticas.

Para superar estas limitaciones, se plantean futuras mejoras, tales como el desarrollo de algoritmos de control más ágiles, la incorporación de sensores de ensayos no destructivos (END), el aumento de la autonomía energética, la validación del sistema en condiciones operativas diversas y la implementación de una interfaz más intuitiva que contribuya a reducir la carga mental del operador.

Más allá de su eficiencia operativa, el robot ALLQU ofrece ventajas cualitativas frente a los métodos tradicionales. Reduce los riesgos asociados a la inspección manual en espacios confinados y proporciona una inspección objetiva, con registros visuales consistentes que facilitan la trazabilidad y el seguimiento de posibles anomalías estructurales a lo largo del tiempo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hubo ningún conflicto de intereses en el desarrollo de este trabajo de investigación. Las pruebas se realizaron directamente sobre la prótesis desarrollada sin ser utilizada por ningún individuo.

Financiación

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Prototipo de un robot de inspección de las tomas de aire de un avión caza durante el pre vuelo”, el cual ha sido financiado por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa bajo el contrato número PI-010-2023-UNSA.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más profundo y sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el invaluable apoyo brindado a lo largo de esta investigación. Su compromiso y respaldo fueron fundamentales para el desarrollo y éxito del proyecto.

Asimismo, se agradece al Escuadrón de Comunicaciones y Electrónica, así como al Escuadrón de Mantenimiento Aeronáutico del Grupo Aéreo N.º 4 de la Fuerza Aérea del Perú, cuyo apoyo fue decisivo para la ejecución de las pruebas necesarias y para el avance de la presente investigación.

Rol de autores

- **Mayki Mamani:** metodología, redacción-borrador original.
- **Jhonathan Uchamaco:** metodología, redacción-borrador original.
- **David Meneses:** validación, visualización.
- **Yuri Silva:** redacción-revisión y edición, visualización.
- **Jorge Apaza:** validación, visualización.

Referencias

- [1] V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, “Electrical power generation in aircraft: Review, challenges, and opportunities,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 3, pp. 646–659, Sep. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1109/TTE.2018.2834142>

- [2] A. V. Chatzi, “Safety management systems: an opportunity and a challenge for military aviation organisations,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 91, no. 1, pp. 190–196, Jan. 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1108/AEAT-05-2018-0146>
- [3] Y. D. Yasuda, F. A. Cappabianco, L. E. G. Martins, and J. A. Gripp, “Aircraft visual inspection: A systematic literature review,” *Computers in Industry*, vol. 141, p. 103695, Oct. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103695>
- [4] T. Chauhan, C. Goyal, D. Kumari, and A. K. Thakur, “A review on foreign object debris/damage (FOD) and its effects on aviation industry,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 4336–4339, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.457>
- [5] K. K. R. Yadav, A. R. Paul, A. Jain, and F. Alam, “Effects of synthetic jets on swirl inflow in a variable-geometry twin air-intake,” *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 111, no. 4, pp. 1193–1225, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00481-8>
- [6] M. Maddox, *Human Factors Guide for Aviation Maintenance*. Washington, DC: Aviation Medicine, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, 1996. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r1>
- [7] M. Tsakalerou, D. Nurmaganbetov, and N. Beltenov, “Aircraft maintenance 4.0 in an era of disruptions,” *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 121–131, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.211>
- [8] D. Xie, M. Xu, and H. Dai, “Effects of damage parametric changes on the aeroelastic behaviors of a damaged panel,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 97, no. 2, pp. 1035–1050, Jun. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05029-y>
- [9] S. Bowling, S. Kaewkuekool, M. Khasawneh, R. Desai, and K. Gramopadhye, “Confined space work in aircraft maintenance industry: Scope for improving safety and reducing errors,” 05 2002. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r9>
- [10] M. Verhoeff, W. Verhagen, and R. Curran, “Maximizing operational readiness in military aviation by optimizing flight and maintenance planning,” *Transportation Research Procedia*, vol. 10, pp. 941–950, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.048>
- [11] S. Fu and N. P. Avdelidis, “Prognostic and health management of critical aircraft systems and components: An overview,” *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8124, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23198124>
- [12] M. Siegel, P. Gunatilake, and G. Podnar, “Robotic assistants for aircraft inspectors,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 389–400, Dec. 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/01439919810240234>
- [13] Y. Zhang, P. Li, J. Quan, L. Li, G. Zhang, and D. Zhou, “Progress, challenges, and prospects of soft robotics for space applications,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, no. 3, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/aisy.202200071>
- [14] A. H. Alami, A. Ghani Olabi, A. Alashkar, S. Alasad, H. Aljaghoub, H. Rezk, and M. A. Abdelkareem, “Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 11, p. 102516, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>
- [15] J. S. Bennett, B. E. Vyhnalek, H. Greenall, E. M. Bridge, F. Gotardo, S. Forstner, G. I. Harris, F. A. Miranda, and W. P. Bowen, “Precision magnetometers for aerospace applications: A review,” *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5568, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s21165568>
- [16] D. A. Rodríguez, C. Lozano Tafur, P. F. Melo Daza, J. A. Villalba Vidales, and J. C. Daza Rincón, “Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review,” *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102330, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102330>
- [17] M. Kaur Dhoot, I.-S. Fan, and Z. Skaf, “Review of robotic systems for aircraft inspection,” *SSRN Electronic Journal*, 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3718054>
- [18] J. Shang, T. Sattar, S. Chen, and B. Bridge, “Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, no. 6, pp. 495–502, Oct. 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1108/01439910710832093>
- [19] M. Fujita, S. Ikeda, T. Fujimoto, T. Shimizu, S. Ikemoto, and T. Miyamoto, “Development of universal vacuum gripper for wall-climbing robot,” *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 283–296, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1447238>

- [20] Y. L. Silva Vidal, E. D. Supo Colquehuanca, D. F. Meneses Huanca, E. J. Valdeiglesias Flores, F. J. Uchamaco Noa, J. A. Guevara Mamani, J. L. Apaza Gutierrez, and G. W. Galdos Alvarez, "Analysis of robotics applied to mobility in the air intakes of a fighter aircraft," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 11, no. 12, pp. 937–947, Dec. 2022, [En línea]. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r20>
- [21] D. M. Helevera, *Visual examinations and manual checks to determine the condition of an aircraft and its component*. National Aviation University, Ukraine, 2022. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r21>
- [22] S. Kumar Thukaram, *Robot based 3D welding for jet engine blade repair and rapid prototyping of small components*. University of Manitoba, 2010. [Online]. Available: <https://upsalesiana.ec/ing34ar10r22>
- [23] R. M. Groves, *3.12 Inspection and Monitoring of Composite Aircraft Structures*. Elsevier, 2018, pp. 300–311. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10340-6>
- [24] M. Bjelonic, V. Klemm, J. Lee, and M. Hutter, *A Survey of Wheeled-Legged Robots*. Springer International Publishing, Aug. 2022, pp. 83–94. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15226-9_11
- [25] T. Klamt, D. Rodríguez, M. Schwarz, C. Lenz, D. Pavlichenko, D. Droschel, and S. Behnke, "Supervised autonomous locomotion and manipulation for disaster response with a centaur-like robot," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, Oct. 2018, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594509>
- [26] G. Endo and S. Hirose, "Study on roller-walker – Improvement of locomotive efficiency of quadruped robots by passive wheels," *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 8–9, pp. 969–988, May 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1163/156855312X633066>
- [27] J. Li, Y. Liu, Z. Yu, Y. Guan, Y. Zhao, Z. Zhuang, and T. Sun, "Design, analysis, and experiment of a wheel-legged mobile robot," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, p. 9936, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13179936>
- [28] J. Niu, H. Wang, Z. Jiang, L. Chen, J. Zhang, Y. Feng, and S. Guo, "Kinematic analysis of a serial-parallel hybrid mechanism and its application to a wheel-legged robot," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111 931–111 944, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001653>
- [29] F. Raza, W. Zhu, and M. Hayashibe, "Balance stability augmentation for wheel-legged biped robot through arm acceleration control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 54 022–54 031, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071055>
- [30] Y. Xin, H. Chai, Y. Li, X. Rong, B. Li, and Y. Li, "Speed and acceleration control for a two wheel-leg robot based on distributed dynamic model and whole-body control," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 180 630–180 639, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959333>
- [31] V. S. Medeiros, E. Jelavic, M. Bjelonic, R. Siegwart, M. A. Meggiolaro, and M. Hutter, "Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots driving in challenging terrain," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4172–4179, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2990720>
- [32] H. Peng, J. Wang, S. Wang, W. Shen, D. Shi, and D. Liu, "Coordinated motion control for a wheel-leg robot with speed consensus strategy," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 1–1, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2975083>