



Diseño de un procedimiento de inspección para el sistema neumático de la aeronave A320 mediante el análisis termográfico

**Manuel Andrés Gómez Pérez
Carlos Andrés Hoyos Sánchez**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Medellín, Colombia
2020

Diseño de un procedimiento de inspección para el sistema neumático de la aeronave A320 mediante el análisis termográfico

**Manuel Andrés Gómez Pérez
Carlos Andrés Hoyos Sánchez**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electromecánico

Director:

Dr. Hernán David Salinas Jiménez

Línea de Investigación:

Materiales

Grupo de Investigación:

Semillero pregrado Ingeniería Electromecánica

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Medellín, Colombia

2020

*La educación ayuda a la persona a ser capaz
de ser.*

Hesíodo

Dedicatoria

A mi hija María Ángel y mi esposa, por su amor, paciencia y apoyo durante todo este tiempo de formación y ser el motor que me ha permitido llegar a cumplir un sueño más. De igual forma quiero expresar mi gratitud a Dios por todas las bendiciones que llenan mi vida.

(Manuel Andrés Gómez Pérez)

Agradezco a Dios por tantas bendiciones recibidas, por guiarme a lo largo del camino, a mis padres Sandra y Carlos por inculcarme siempre valores y principios, por ser mi apoyo incondicional y pilar para poder llegar hasta aquí y cumplir una vez más otro de tantos sueños propuestos.

(Carlos Andrés Hoyos Sánchez)

Agradecimientos

Expresamos un profundo agradecimiento a la academia por los años de formación, a los profesores y amigos que me han acompañado durante todo este proceso por extender su mano en los momentos difíciles

Resumen

Los ensayos no destructivos desde hace cumplen un papel importante en los procesos de diagnóstico y mantenimiento de la aviación civil. En la actualidad los ensayos termográficos permiten identificar fuentes de fugas en componente de las aeronaves, como también identificar pérdidas de aislamiento y fallos eléctricos. En el presente trabajo se consigna y describe a detalle un procedimiento de inspección por termografía infrarroja para los ductos, juntas y conexiones de los elementos que conforman las unidades de suministro de aire acondicionado de la aeronave Airbus A320, partiendo de los principios de inspección para sistemas mecánicos, eléctricos y neumáticos como de los principios físicos de la radiación infrarroja. Se llevó a cabo pruebas en campo para inspección de los componentes que conforman las dos unidades PACKS de una aeronave con operación regional en Colombia y, mediante el análisis de los termogramas fue posible encontrar fugas neumáticas y de agua en las juntas y cuerpos de diferentes componentes del sistema de aire acondicionado de la aeronave. Para el desarrollo de las pruebas se hizo uso de una cámara termográfica FLIR de resolución media y se tuvieron en cuenta factores relacionados con la calidad de las imágenes como enfoque, distancia y emisividad de los materiales presentes en las unidades. Se pudo comprobar que es posible emplear la termografía como medio de inspección de sistemas neumáticos de aire acondicionado de aeronaves de transporte de pasajeros y da pie al diseño de protocolos de inspección para más sistemas neumáticos de aeronaves comerciales. Se pudo visualizar que pueden ocurrir afectaciones de los termogramas debidos a discontinuidades mecánicas de los componentes de la aeronave al igual que pueden ocurrir interpretaciones inadecuadas de los patrones de temperaturas relacionados con la presencia de materiales extraños en la superficie de los componentes de las unidades PACKS. Sin embargo, es posible solventar estos problemas con el conocimiento adecuado de los sistemas a inspeccionar y el uso de la termografía infrarroja para unidades neumáticas se puede llegar a convertir en un proceso de respaldo para las

inspecciones visuales que actualmente son la única forma de verificación de la integridad de los componentes de las unidades de aire acondicionado de la aeronave Airbus A320.

Palabras clave: Termografía, mantenimiento predictivo, sistemas neumáticos, aeroespacial.

Abstract

Non-destructive testing for several decades has played an important role in the diagnostic and maintenance processes of civil aviation. Currently, infrared thermography tests allow identifying possible leaks in aircraft components as well as identifying insulation losses and electrical faults. In this text, an infrared thermography inspection procedure for the ducts, joints and connections of the elements that make up the air conditioning supply units of the Airbus A320 aircraft is recorded and described in detail, based on the inspection principles for systems mechanical, electrical and pneumatic as of the physical principles of infrared radiation. Field tests were carried out to inspect the components that make up the two PACKS units of an aircraft with regional operation in Colombia and, by analyzing thermograms, it was possible to find pneumatic and water leaks in the joints and bodies of different components of the air conditioning system of the aircraft. For the development of the tests, a medium resolution FLIR thermal camera was used and factors related to the quality of the images were considered, such as focus, distance and emissivity of the materials present in the units. It was verified that it is possible to use thermography as a means of inspection of pneumatic air conditioning systems for passenger transport aircraft and leads to the design of inspection protocols for more pneumatic systems of commercial aircraft. It was possible to visualize that thermogram affectations can occur due to mechanical discontinuities of the aircraft components as well as inadequate interpretations of the temperature patterns related to the presence of foreign materials on the surface of the components of the PACKS units. However, it is possible to solve these problems with the adequate knowledge of the systems to be inspected and the use of infrared thermography for pneumatic units can become a backup process for visual inspections that are currently the only form of verification of the integrity of the components of the air conditioning units of the Airbus A320 aircraft.

Keywords: Thermography, predictive maintenance, pneumatic systems, aerospace.

Contenido

	Pág.
Resumen	VI
Abstract	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
1. Justificación	3
2. Objetivos	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos específicos	5
3. Marco de referencia	6
3.1 Marco de antecedentes	6
3.2 Marco Teórico	10
3.2.1 Fundamentación teórica – Principios físicos	10
3.2.2 Avión de referencia	17
3.2.3 Descripción del sistema neumático y de aire acondicionado	19
3.2.4 ATA Standard Numbering System (ISPEC 2200)	19
3.2.5 Manuales de mantenimiento	21
3.2.6 ATA 21 - Sistema de Aire Acondicionado (Air Conditioning and Pressurization)	22
3.2.7 Termografía	40
3.2.8 Marco legal	47
4. Metodología	50
5. Resultados	52
5.1 Procedimiento de inspección para el sistema neumático de las unidades PACKS mediante termografía infrarroja	52
5.1.1 Título	52
5.1.2 Objetivo	52
5.1.3 Alcance	52
5.1.4 Documentos técnicos de referencia	53

5.1.5	Responsabilidades y calificación del personal	53
5.1.6	Materiales de los componentes	54
5.1.7	Técnica usada	54
5.1.8	Equipo	54
5.1.9	Descripción del ensayo	55
5.1.10	Interpretación de imágenes e indicadores	57
5.1.11	Normas de seguridad	59
5.1.12	Formato de inspección propuesto	59
5.2	Prueba: Inspección de unidades PACKS empleando el procedimiento propuesto	59
6.	Conclusiones y recomendaciones	64
6.1	Conclusiones	64
6.2	Recomendaciones	65
7.	Bibliografía	67
A.	Anexo A: Formato de inspección para el protocolo de inspección de las unidades de PACK.....	71
B.	Anexo B: Registro fotográfico de pruebas en búsqueda de anomalías de la unidad de PACK 1.....	74

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. n del PIB de transporte aéreo en Colombia (Oliviera, Cabrera, Bermúdez, & Hernández, 2011).	7
Figura 2. Termografía aplicada a aeronaves de transporte comercial (GmbH I. , 2019).	9
Figura 3. Ejemplos de inspección de fugas en instalaciones industriales (FLIR, GF320 de FLIR utilizada para detectar fugas en instalaciones de biogás, 2019).	9
Figura 4. Concepto de función de onda y ecuación general de onda	12
Figura 5. El espectro electromagnético. Frecuencias y longitudes de onda para los diferentes segmentos del espectro (Young & Freedman, 2008).	12
Figura 6. Figura 6. Bandas de Infrarrojo La CIE (GmbH G. U., 2019).	13
Figura 7. Aeronave Airbus A320neo (AIRBUS, 2019).	18
Figura 8. Estructuración de algunos de los sistemas de un avión de acuerdo con ATA 100 (Freepng.es, 2019).	19
Figura 9. Subdivisiones del código numérico del sistema de referencia ATA 100 (Aviación D, 2019).	20
Figura 10. Diagrama de flujo, funcionamiento del sistema de aire acondicionado de una aeronave (AIRBUS, 2011).	23
Figura 11. Mirada general del funcionamiento del sistema de control de temperatura de cabina para el A320 (AIRBUS, 2011).	25
Figura 12. Ubicación de los componentes principales del sistema de aire acondicionado de la aeronave A320 (AIRBUS, 2011).	26
Figura 13. Vista esquemática de la conexión de PACKS con la unidad mezcladora (AIRBUS, 2006).	26
Figura 14. Ubicación del mamparo de presión trasero (Pressure Bulkhead) de una aeronave (FAA, 2019).	28
Figura 15. Mirada general del funcionamiento del sistema presurización de cabina para el A320 (AIRBUS, 2011).	28
Figura 16. Ubicación de los componentes del sistema de ventilación (AIRBUS, 2011).	29
Figura 17. Ubicación de la RCPU del sistema de presurización (AIRBUS, 2011).	29
Figura 18. Configuraciones del sistema de ventilación de aviónica de la aeronave A320 (AIRBUS, 2011).	30
Figura 19. Ubicación de la válvula de fuselaje de entrada y salida del sistema de ventilación (AIRBUS, 2011).	31
Figura 20. Funcionamiento del sistema de ventilación y calefacción de los compartimientos de carga de la aeronave A320 (AIRBUS, 2011).	32
Figura 21. Ubicación de las entradas y salidas de aire del sistema de ventilación y calefacción de compartimiento de carga delantero (AIRBUS, 2011).	32

Figura 22. Ubicación de las entradas y salidas de aire del sistema de ventilación y calefacción del compartimiento de carga trasero (AIRBUS, 2011).	33
Figura 23. Vista esquemática de componentes y conexiones de las unidades PACKS (AIRBUS, 2006).	34
Figura 24. Ubicación del sistema de aire acondicionado de servicio (AIRBUS, 2006).	34
Figura 25. Elementos y componentes de una unidad PACK (AIRBUS, 2006).	39
Figura 26. Paletas de colores disponible en cámaras termográficas (Outdoors-Bay, 2019).	44
Figura 27. Captura termográfica con enfoque y desenfoco (Heymans, 2019).	45
Figura 28. Comparación de imágenes del mismo sistema a diferentes resoluciones (FLIR, test-meter.co.uk, 2019).	45
Figura 29. Imágenes termográficas con rangos de temperatura de -20 a +120°C (izquierda), 0 a 650 °C (centro) y +250 a +1200°C(derecha). Las demás configuraciones de la cámara no cambian (Heymans, 2019).	46
Figura 30. Influencia de la emisividad de los materiales en el diagnostico mediante termografía infrarroja (FLIR, FLIR, 2019).	47
Figura 31. Cambios en la temperatura media debido a la distancia desde el punto medición y el objeto de interés (Heymans, 2019).	47
Figura 32. Cámara termográfica FLIR T530. Fuente propia.	55
Figura 33. Identificación de fugas de agua en ductos de la unidad PACK. Fuente propia.	57
Figura 34. Identificación de fugas de aire en componente (imagen superior) y juntas (imagen inferior) de la unidad PACK. Fuente propia.	58
Figura 35. Formato de detección de anomalías por fugas de agua del ducto de la unidad PACK 1 (página 1). Fuente propia	60
Figura 36. Formato de detección de anomalías por fugas de agua del ducto de la unidad PACK 1 (página 2). Fuente propia Resultados positivos en detección de anomalía por fuga de aire del ducto de la unidad PACK 1. Fuente propia.	61
Figura 37. Formato de detección de anomalías por fugas de agua del ducto de la unidad PACK 1 (página 1). Fuente propia.	62
Figura 38. Resultados positivos en detección de anomalía por fuga de aire del ducto de la unidad PACK 1 (página 2). Fuente propia.	63

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Emisividad de algunos materiales a 300 K (Cengel & Ghajar, 2011).	16
Tabla 2. Secciones y designación de numero de página de acuerdo con ATA 100 (Aviación D, 2019).	20
Tabla 3. Primeros 30 capítulos correspondientes a Airframe Systems de acuerdo con ATA 100 (Aviación D, 2019).	21
Tabla 4. Manuales de mantenimiento de aeronaves en los cuales se emplea ATA 100 (Aviación D, 2019)	21
Tabla 5. Normatividad aplicable al protocolo de inspección.	48
Tabla 6. Lista de emisividades de los materiales de las unidades PACKS. Abderrahmane, D., & Ali, D. (2016).	55

Introducción

El mantenimiento de aeronaves representa inversiones importantes de dinero y tiempo para los operadores aéreos como resultado de las diferentes regulaciones con las que deben cumplir, el grado de especialización del personal de mantenimiento, las instalaciones, los insumos y materiales empleados en la ejecución de las tareas. La duración de un servicio de mantenimiento puede variar desde 10 horas, requiriendo de 50 horas hombre; hasta tres semanas, requiriendo 6.000 horas hombre. Los costos de los diferentes procedimientos pueden variar entre los 25.000 y los 800.000 USD y abarcan los procesos de inspección, reparación y servicio a componentes, sistemas y piezas de la aeronave (ITAérea, 2019).

Toda tarea que involucre cualquier acción de una aeronave debe contar con una trazabilidad que permita determinar la validez de los trabajos y acciones ejecutadas; esto junto a una auditoria permanente que asegure que los procesos cumplan con los parámetros de calidad. De igual manera, verificar que los servicios de mantenimiento se realizan conforme a la normatividad emitida por las autoridades regulatorias aeronáuticas de los países de fabricación y operación, las cuales sostienen estricta vigilancia sobre el mantenimiento de las aeronaves (Aerocivil, 2019).

Dentro de las tareas más recurrentes del mantenimiento se encuentra la inspección, en la cual se evalúa la integridad y funcionalidad de los diferentes equipos, elementos y sistemas que conforman la aeronave. El objetivo primordial de la inspección consiste en verificar que un elemento o sistema cumple, por lo menos, con los mínimos estándares de seguridad exigidos por los diferentes agentes regulatorios, de forma que se pueda garantizar la operación segura de las aeronaves sin que se vea afectada la seguridad de las aeronaves y sus ocupantes.

Se ha identificado, que en muchas ocasiones la inspección que se realiza a los diferentes componentes y sistemas de una aeronave son del tipo visual VT (por sus siglas en ingles Visual Testing) y ésta depende en gran medida de la perspicacia, habilidad y experiencia del personal encargado para dichas tareas; sin desconocer la importancia que tienen algunos de estos procedimientos mundialmente aceptados, como el caso de la inspección visual, es pertinente buscar mejoras empleando tecnologías adicionales no invasivas que faciliten el proceso de inspección para sistemas con una gran cantidad de elementos, inspección para zonas cerradas de difícil acceso, con elementos y sistemas a altas temperaturas, de forma que se garantice un buen diagnóstico sin poner en riesgo la integridad de la persona o se vea afectada la confiabilidad de la aeronave.

Dentro de una estación reparadora que presta servicios de mantenimiento a diferentes tipos de aeronaves, se detectó la oportunidad de mejora del proceso de inspección de las conexiones y unidades de aire acondicionado PACKS, pertenecientes al sistema neumático y de acondicionamiento de aire de las aeronaves Airbus A320. Actualmente se llevan a cabo procesos de inspección para la detección de fugas en las juntas y uniones de las conexiones neumáticas mediante inspección visual y tacto, lo cual resulta riesgoso para el personal de mantenimiento pues varias conexiones se encuentran en una zona de difícil acceso y algunos de los elementos alcanzan temperaturas superiores a los 80°C durante la prueba, el aire que circula es extraído de los motores o de las unidades de potencia de la aeronave y el sistema de aire acondicionado se evalúa dentro la aeronave.

La oportunidad de mejora que se desarrolló sugiere un procedimiento de inspección mediante termografía infrarroja para las unidades de aire acondicionado PACKS de la aeronave Airbus A320, como técnica de ensayo no destructivo. La ejecución de este análisis termográfico, permite hacer una valoración del estado e integridad de las conexiones neumáticas, de forma más precisa, esto mediante la evaluación de la distribución de temperaturas mostrada en los termogramas. La implementación del procedimiento de inspección por termografía brinda una mejora en el diagnóstico del estado de los sistemas neumáticos de las aeronaves, reduciendo tiempos asociados a la trazabilidad del procedimiento, los costos asociados a las horas hombre empleadas y reducción de riesgos asociados a tareas de inspección.

1. Justificación

La alta complejidad que presentan las tareas de inspección de los sistemas neumáticos de las aeronaves comerciales se deben tanto a los diferentes tipos de daños que los sistemas pueden presentar como taponamientos u obstrucciones, desconexiones internas, grietas, abolladuras, fugas en uniones, fracturas, daños en los sistemas de aislamiento, desperfectos por envejecimientos; como a la ubicación y complejidad de las redes de circulación de aire, la temperatura del aire dentro de los ductos y por ende de los elementos constituyentes del sistema que ponen en riesgo la integridad del personal de mantenimiento designado a los procesos de testeo, ensayo e inspección.

De igual forma la alta demanda de servicios aeronáuticos asociados al mantenimiento, requieren de tecnologías y procedimientos más precisos, efectivos y rápidos que satisfagan las exigencias de la industria y a su vez, faciliten las tareas de operación y mantenimiento. Es entonces cuando los ensayos no destructivos juegan un papel importante dentro de este campo de la industria.

Los ensayos no destructivos NDT (por sus siglas en inglés Non Destructive Testing) han sido empleados en la industria aeronáutica y aeroespacial desde hace ya varios años, pues con este tipo de técnicas es posible evaluar la condición de los componentes de las aeronaves y determinar su estado funcional, si requieren reparación o deben ser reemplazados para que la aeronavegabilidad de la aeronave no se vea comprometida en su operación. La implementación de este tipo de técnicas requiere una inversión considerablemente costosa en adquisición equipos de testeo, y personal altamente calificado para la realización de los ensayos, sin olvidar los costos por capacitación de personal y calibración de equipos, sin embargo se han convertido en la mejor opción para la realización de diferentes pruebas que sin la existencia de este tipo de tecnologías serían

prácticamente imposibles de realizar sin efectuar una acción invasiva en la aeronave, como es el caso de la detección de humedad en las estructuras de materiales compuestos cada vez más presentes en el fuselaje.

Dentro de los diferentes tipos de ensayos no destructivos la termografía, apoyada con inspección visual, aparece como una alternativa para realizar la tarea de inspección de las conexiones, juntas e integridad del sistema neumático, dado que ha sido implementada exitosamente en campos similares, como es el caso de la revisión de fugas en ductos y conexiones de plantas de procesamiento químico e industriales y para las cuales se pueden encontrar en el mercado cámaras termográficas específicamente diseñadas para esta actividad y empresas prestadoras de servicios de inspección de fugas de diferentes tipos de gases .

La implementación de esta técnica en los procesos de mantenimiento de aeronaves disminuirá los costos asociados a la inspección de los sistemas neumáticos y unidades de aire acondicionado PACKS al facilitar el proceso de testeo y revisión de fugas como resultado de una menor cantidad de horas hombre empleadas. De igual forma se reduce el riesgo de accidentes por quemaduras del personal de mantenimiento al ya no ser requerido el proceso de palpar y sentir con la mano las fugas y escape de aire caliente en las zonas de difícil acceso donde se encuentran dichos sistemas.

Además, la implementación de termografía infrarroja presenta ventajas adicionales en cuanto al proceso de testeo de los componentes al no ser necesario el desmontaje de los equipos y componentes, se realiza de manera rápida y ágil sin que se vea interrumpido el funcionamiento de los sistemas; esto se traduce a un menor tiempo de las tareas de mantenimiento y de los aviones inoperativos en tierra y un aumento de la disponibilidad de operación de la aeronave para el transporte comercial.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar un procedimiento de inspección mediante termografía para la detección de fugas en las conexiones neumáticas de las unidades de aire acondicionado PACKS de las aeronaves de la familia Airbus A320.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar y describir de forma detallada los componentes principales y el funcionamiento de las unidades neumáticas y de aire acondicionado PACKS.
- Desarrollar un método de inspección empleando termografía para las unidades PACKS de la aeronave A320, acorde a las exigencias y estándares de la industria aeronáutica.
- Efectuar pruebas y proponer mejoras para el protocolo de inspección desarrollado.

3. Marco de referencia

3.1 Marco de antecedentes

“El transporte aéreo es uno de los servicios más importantes de la economía colombiana” (Oliviera, Cabrera, Bermúdez, & Hernández, 2011). En primer lugar, la topografía del país dificulta la operación de cualquier otro tipo de transporte, y el transporte aéreo facilita la conectividad e integración de las diferentes regiones, ciudades y se ha convertido en un servicio esencial para llegar a las zonas más apartadas del territorio nacional. En segundo lugar, permite la conexión con la economía mundial, hecho que se vuelve imprescindible en la dinámica de globalización mundial. En este orden de ideas, el estado considera al transporte aéreo como un servicio público esencial (art. 68, ley 336 de 1996), lo cual hace indudable su papel como un factor vital para el desarrollo económico del país (Oliviera, Cabrera, Bermúdez, & Hernández, 2011).

En los últimos años su crecimiento en Colombia se ha acelerado. Para el periodo comprendido entre la apertura económica de 1990 y el año anterior a la crisis económica de 1999, el producto interno bruto PIB del transporte aéreo creció a una tasa anual promedio de 2,7% en términos reales, y tuvo un índice de desaceleración de 1,3%, durante el periodo de la crisis de 1999 a 2002. No obstante, entre 2003 y 2009 el crecimiento fue mayor, de un 4,1%, ver Figura 1. La evolución observada es similar a la presentada por la economía nacional, lo cual sugiere que, en parte, la demanda por transporte aéreo aumenta con el crecimiento y reactivación de la economía. En lo que concierne a la evolución del tráfico de pasajeros por tránsito aéreo se evidencia un crecimiento más alto, con un 8% anual promedio entre los años 2002 y 2010, con un 10,1% si se considera la evolución de los pasajeros con origen o destino internacional. El transporte de carga, comparado con el de pasajeros, representa un 18% de la actividad del sector. La evolución que se ha presentado en el transporte aéreo colombiano ha permitido que este ocupe un puesto importante a nivel mundial. El transporte aéreo colombiano ocupó en el 2009 el puesto 22 en toneladas-

kilómetro y el puesto 38 en pasajeros-kilómetro transportados, mientras que dentro de la región Colombia ocupó el tercer y cuarto lugar respectivamente (Oliviera, Cabrera, Bermúdez, & Hernández, 2011).

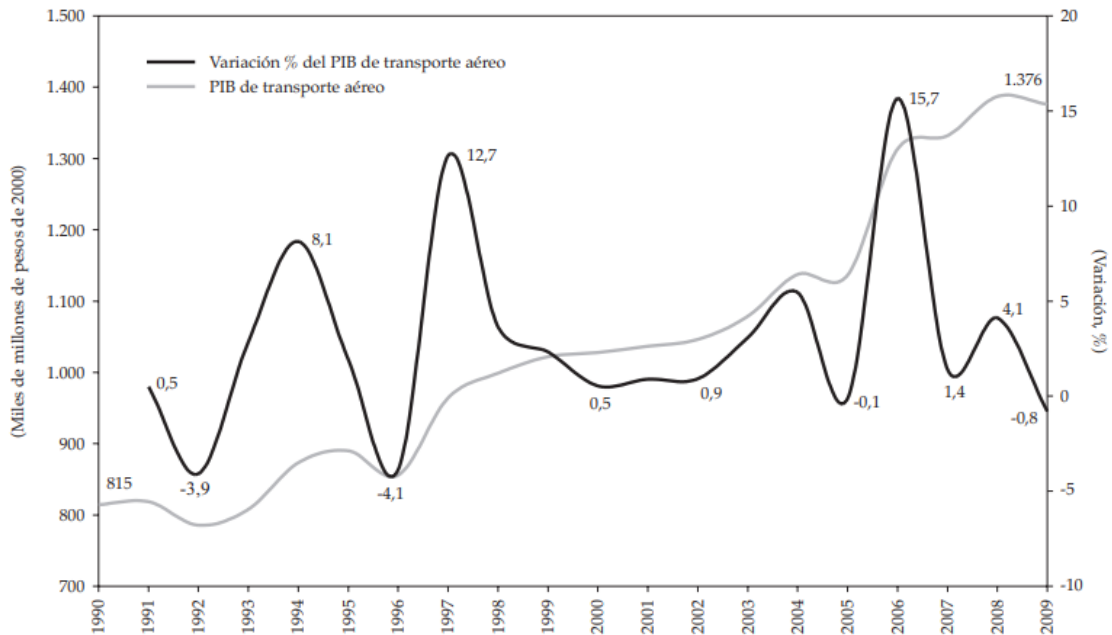


Figura 1. Evolución del PIB de transporte aéreo en Colombia (Oliviera, Cabrera, Bermúdez, & Hernández, 2011).

Partiendo de la importancia del transporte aéreo en Colombia y la necesidad global de suplir la demanda de la economía mundial con relación al transporte rápido y seguro de carga y pasajeros la industria aeronáutica llega a la necesidad de contar con aviones comerciales con sistemas de control, neumática, hidráulica, aviónica y potencia cada vez más robustos que garanticen mayor confiabilidad y disponibilidad de las aeronaves, incrementando la rentabilidad en la industria (Abderrahmane & Ali, 2016). De igual forma, se ha hecho necesario desarrollar e implementar métodos de mantenimiento más eficientes y confiables que requieren de sistemas de inspección innovadores para cumplir con las demandas de los clientes de una inspección confiable y rápida de piezas y sistemas complejos.

Las pruebas no destructivas (NDT) son una herramienta poderosa utilizada en las industrias aeroespacial y de aeronaves para detectar y analizar fallas estructurales y daños de las

piezas. Los métodos NDT más utilizados en la industria aeroespacial son las pruebas de corrientes parasitas (ECT), líquidos penetrantes, infrarrojos y termografía, pruebas ultrasónicas, emisión acústica y pruebas de radiográficas (tomografía computarizada y rayos X) (Namkung & Wincheski, 2016).

Los ensayos no destructivos, generalmente consisten en captar la respuesta de un elemento a un estímulo externo o sin estimulación, de forma que el estudio no altera de forma permanente las propiedades del objeto. La termografía infrarroja activa es una técnica de inspección que requiere de una fuente externa de energía para inducir una diferencia de temperatura entre las áreas defectuosas y no defectuosas de una muestra o sistema bajo examen (Deane, y otros, 2019). La termografía es una técnica NDT por medio de la cual la radiación infrarroja emitida por el elemento de muestra es procesada y convertida en una imagen que ilustra las diferencias de temperaturas presente en el componente (Jafferry & Dubey, 2014). La imagen que se obtiene es comparada con una de referencia del componente en operación óptima y normal para después ser sometida a evaluación bajo los parámetros establecidos por la prueba de estado y condición del componente (Corigliano, Crupi, Epasto, E Guglielmino, & Risitan, 2015). Es una de las tecnologías no destructivas más nuevas y ha demostrado proporcionar mejoras sustanciales en el rendimiento, así como ahorros en costos, permitiendo un mantenimiento más frecuente con una mano de obra mínima.

En industria del transporte aéreo y en general en el campo de la aeronáutica, el uso de termografía se enfoca principalmente a la detección de daños en las estructuras de materiales compuestos, la detección de deformaciones y grietas en componentes con o sin la implementación de algoritmos de procesamiento de información (Capka, y otros, 2017), ver Figura 2. En los últimos años, se ha empleado en la detección de humedad y daños por humedad de las estructuras tipo sándwich en materiales compuestos y además se han desarrollado aplicaciones de termografía para procesos de aseguramiento de calidad en fabricación de turbinas, específicamente para el control de la manufactura de componentes por maquinado, mejorando la calidad final de los componentes que hacen parte del motor y los tiempos de procesamiento de las líneas de producción (Sarfels, Liebelt, Brockmann, & Gierlings, 2015). Otra de las aplicaciones en inspección incluye el uso de una técnica basada en termografía para la detección de despegues y delaminaciones de materiales

constituidos por superposición de láminas metálicas y de compuestos, y en compuestos avanzados con refuerzo metálicos, en los que es posible detectar la rotura de fibras y defectos adhesivos de forma clara, además de realizar una medición básica de los daños (Avdelidis, Hawtin, & Almond, 2003).

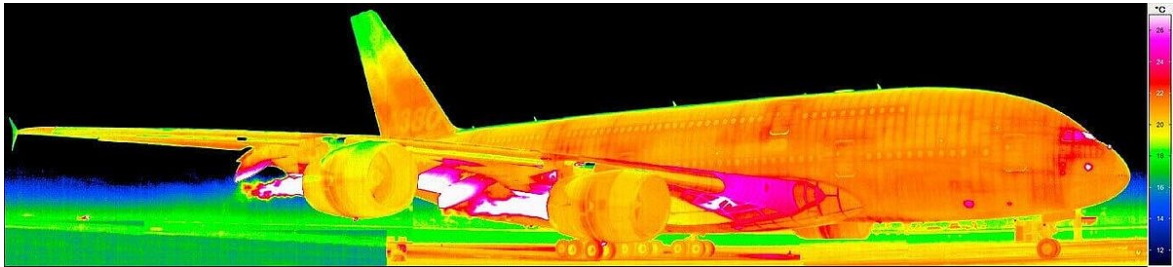


Figura 2. Termografía aplicada a aeronaves de transporte comercial (GmbH I. , 2019).

Con relación a la inspección de sistemas neumáticos de las aeronaves empleando pruebas no destructivas como termografía infrarroja, no se encontraron desarrollos recientes que se empleen en la actualidad. Sin embargo, se ha encontrado cámaras especializadas para la detección rápida y segura de fugas en ductos y conexiones en procesos industriales. La visualización óptica de gases empleando cámaras térmicas, presenta una serie de beneficios en comparación con las herramientas de detección de gases “sniffers” ya que se puede supervisar un área más amplia de forma mucho más rápida y en zonas de difícil acceso para el uso de herramientas de medida por contacto, ver Figura 3. Este tipo de tecnología se ha implementado en diferentes tipos de industrias como petroquímicas, refinerías, extracción de petróleo y gas, etc.



Figura 3. Ejemplos de inspección de fugas en instalaciones industriales (FLIR, GF320 de FLIR utilizada para detectar fugas en instalaciones de biogás, 2019).

En conclusión, la termografía infrarroja como técnica NDT destaca por la rapidez en la adquisición de datos y la facilidad de aplicación en diferentes campos de la industria dada la portabilidad de las herramientas empleadas y se puede encontrar en diferentes campos

como las industrias químicas y de transformación, construcciones civiles, distribución eléctrica, producción y procesamiento de alimentos, manufactura industrial, entre otros. Existen diferentes estudios y desarrollo que permiten evidenciar la versatilidad de la técnica como método de inspección que constantemente se optimizan para la adquisición de información más precisa. Una de las aplicaciones no tan exploradas o estudiadas es la inspección de sistemas y conexiones neumáticas; Sin embargo, en la actualidad es posible encontrar soluciones en el mercado diseñadas para este tipo de actividades. Este tipo de técnicas pueden ser empleadas en la inspección de los sistemas neumáticos y de aire acondicionado de las aeronaves, postulándose como una herramienta valiosa que permitiría la reducción de tiempos y recursos humanos en las tareas de inspección en mantenimiento aeronáutico.

3.2 Marco Teórico

3.2.1 Fundamentación teórica – Principios físicos

Ondas electromagnéticas: Las ondas electromagnéticas se originan de la perturbación simultánea de los campos eléctricos y magnéticos existentes en una misma región. Las ondas originadas por la interacción de carácter transversal, al encontrarse en fase, y las vibraciones se encuentran accionadas en planos que son perpendiculares entre sí. Este tipo de ondas no requieren de un medio material para la propagación, un ejemplo de ellas son la luz visible y las ondas de radio (EcuRed, 2019).

La transmisión a distancia de energía y la cantidad de movimiento de las ondas electromagnéticas se explican mediante las **Ecuaciones de Maxwell:**

Ley de gauss para \vec{E} : El flujo eléctrico a través de una superficie cerrada S es proporcional a la carga eléctrica total interna (Meneses, 2019).

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0} \rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Ec. (1-1).

Ley de gauss para \vec{B} : El flujo magnético a través de una superficie cerrada S es proporcional a la carga magnética total interna. El flujo es siempre igual a cero porque NO hay monopolos magnéticos (Meneses, 2019).

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Ec. (1-2)

Ley de Faraday: La circulación de campo eléctrico en una curva cerrada C es equivalente a la rapidez de cambio en el tiempo del flujo magnético que atraviesa el área S limitada por la curva, trayectoria o espira (Meneses, 2019).

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Ec. (1-3)

Ley de Ampere: La circulación de campo magnético en una curva cerrada C es proporcional a la suma de la intensidad de corriente de conducción total (constante) y la intensidad de corriente de desplazamiento (equivalente a la rapidez de cambio de tiempo del flujo eléctrico) que atraviesan el área S limitada por la curva (Meneses, 2019).

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_C + I_D) \rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J}_C + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Ec. (1-4)

De igual forma satisfacen la **Ecuación de onda** y su estudio es idéntico a las ondas elásticas (mecánicas) aunque hay diferencias en relación con la velocidad de propagación y los fenómenos de dispersión.

Funciones de onda y dinámica de onda: La función de onda $y(x, t)$ describe los desplazamientos de partículas individuales del medio. Las ecuaciones (15.3), (15.4) y (15.7) dan la ecuación de una onda senoidal que viaja en la dirección $+x$. Si la onda se mueve en la dirección $-x$, el signo menos de las funciones coseno se cambia por un signo más.

La función de onda debe obedecer una ecuación diferencial parcial llamada ecuación de onda, ecuación (15.12).

La rapidez de una onda transversal en una cuerda depende de la tensión F y de la masa por unidad de longitud μ . (Véase el ejemplo 15.3.)

$$y(x, t) = A \cos \left[\omega \left(\frac{x}{v} - t \right) \right]$$

$$= A \cos 2\pi f \left(\frac{x}{v} - t \right) \quad (15.3)$$

$$y(x, t) = A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (15.4)$$

$$y(x, t) = A \cos (kx - \omega t) \quad (15.7)$$

donde $k = 2\pi/\lambda$ y $\omega = 2\pi f = vk$

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (15.12)$$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (\text{ondas en una cuerda}) \quad (15.13)$$

Longitud de onda λ

Periodo T

Figura 4. Concepto de función de onda y ecuación general de onda (Young & Freedman, 2008).

Espectro electromagnético: Las ondas electromagnéticas cubren un espectro de longitud de onda y frecuencias extremadamente amplio. En el espectro se encuentran ondas como las de radio y televisión, la luz visible, rayos x, rayos gamma, la radiación infrarroja y la ultravioleta, ver Figura 5. Se han podido identificar ondas electromagnéticas con frecuencias muy variables en rangos desde 1 hasta 10^{24} Hz; en la Figura 5 representa la parte del intervalo del espectro electromagnético más común, y se identifican los intervalos de frecuencia y longitud de onda aproximados para cada segmento.

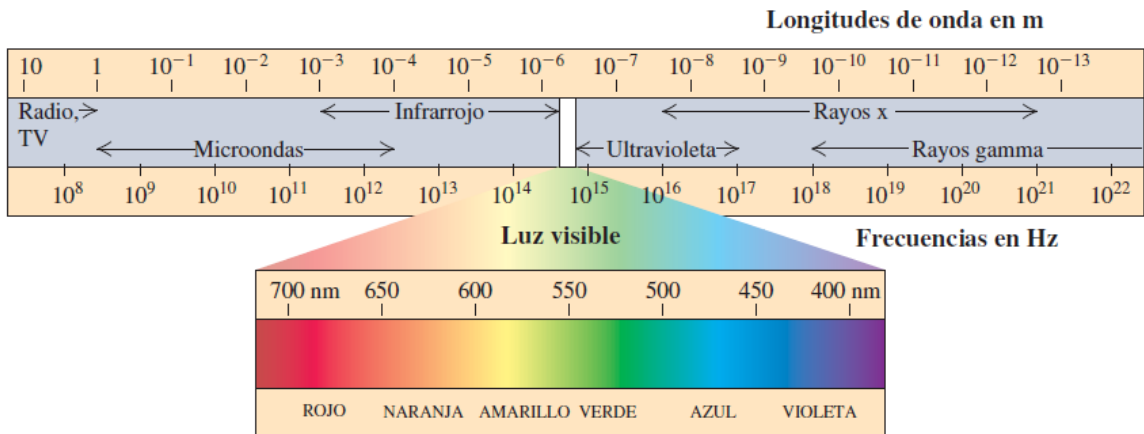


Figura 5. El espectro electromagnético. Frecuencias y longitudes de onda para los diferentes segmentos del espectro (Young & Freedman, 2008).

El espectro electromagnético que nos es posible detectar por medio del sentido de la vista es un segmento muy pequeño, y el intervalo lo denominamos luz visible. El intervalo de longitud de onda va de 400 a 700 nm y frecuencias de onda correspondientes de aproximadamente entre 750 y 430 THz. Las diferentes distancias dentro del intervalo de espectro de luz visible crean en los humanos las sensaciones de los diferentes colores.

Radiación infrarroja: La radiación infrarroja o también conocida como radiación térmica es uno de los espectros de la radiación electromagnética de una mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor a las microondas, razón por la cual no es visible al ojo humano, ver Figura 5. Todo cuerpo que experimente una temperatura superior a la temperatura de cero absoluto (aproximadamente -273°C o 0K) emite energía térmica en forma de radiación infrarroja. Este tipo de radiación es diferente a las de otros tipos al estar relacionada directamente con la temperatura del objeto, a diferencia de las microondas, rayos gamma, rayos x, ondas de radio y televisión. Comprende un segmento del espectro electromagnético que va desde desde 780 nm hasta 10.000 nm, limitando con el color rojo del espectro visible y con las microondas respectivamente como se muestra en la siguiente figura 6.



Figura 6. Bandas de Infrarrojo La CIE (GmbH G. U., 2019).

Temperatura y calor: La temperatura es indicador de la rapidez con la que se mueven los átomos y moléculas de algún cuerpo. Las unidades de medida pueden variar de Celsius, Fahrenheit o Kelvin, y se entiende que a mayor temperatura el movimiento o vibración de las moléculas o átomos es mayor.

Por otro lado, el calor es una de las formas de energía que se transmite a causa de las diferencias de temperaturas entre dos o más objetos que se encuentren en relación en un medio. Al igual que la temperatura, el calor se encuentra asociado al movimiento de átomos y moléculas. El flujo de calor obedece que siempre va de un objeto de mayor temperatura a uno de menor temperatura, además el objeto que recibe la energía transmitida en forma

de calor experimenta un aumento en su energía interna y por ende la energía general del objeto incrementa. La cantidad de energía que se requiere para elevar la temperatura de un objeto depende de la capacidad calorífica del material, la masa y la diferencia de temperatura que se pretende que el objeto aumente o disminuya (Cengel & Ghajar, 2011).

La transferencia de energía a un cuerpo se puede dar por dos mecanismos principales, Calor (Q) y trabajo (W). Se puede identificar una transferencia de energía de calor cuando existe un diferencial de temperatura que actúa como fuerza impulsora, de lo contrario la transferencia puede ser considerada como trabajo. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo se conoce como razón de transferencia de calor \dot{Q} y la razón de transferencia de calor por unidad de área se conoce como flujo de calor \dot{q} (Cengel & Ghajar, 2011).

Mecanismos de transferencia de calor: La transferencia de calor se puede dar por tres mecanismos y son conducción, convección y radiación.

La transferencia de calor por conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas hacia las adyacentes menos energéticas; este tipo de transferencia se puede dar en sólidos, líquidos y gases. Sin embargo, es el único modo de transferencia de calor que se pueden dar en sólidos; en los gases la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas en su movimiento aleatorio (Cengel & Ghajar, 2011).

La transferencia de calor por convección es la transferencia de energía entre una superficie sólida con un líquido o gas adyacentes que se encuentran en movimiento y comprende los efectos combinados del movimiento de fluidos y los de la conducción. La transferencia de calor por convección es mayor cuando el movimiento de los fluidos es más rápido. Cuando hay ausencia de movimiento del fluido se tiene que la transferencia de calor en el fluido es por conducción (Cengel & Ghajar, 2011).

En la transferencia de calor por radiación la materia emite energía en forma de ondas electromagnéticas, fotones, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, en la transferencia de calor por conducción no se requiere de un medio interventor y es el tipo de transferencia de calor más rápido dado que se da a la velocidad de la luz y no se sufre

de atenuación en el vacío. La radiación es un fenómeno de tipo volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases pueden emitir, absorber o transmitir radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación se considera como un efecto superficial para los sólidos que son considerados opacos a la radiación térmica, como es el caso de los metales, madera y rocas, pues las radiaciones emitidas en las regiones interiores de alguno de estos materiales nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación que incide sobre un cuerpo de alguno de estos materiales se absorbe algunas micras dentro de dichos sólidos (Cengel & Ghajar, 2011). La emisión de radiación infrarroja depende del valor de la emisividad y la temperatura del material, y en los casos en los que un cuerpo es alcanzado por la radiación está podrá ser absorbida, transmitida o reflejada dependiendo de la naturaleza del cuerpo.

- *Ley de Stefan-Boltzmann*: Expresa la razón máxima de radiación que una superficie puede emitir a una temperatura termodinámica T_s (en K) y está expresada por la Ecuación (1-1).

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad \text{Ec. (1-5)}$$

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la *constante de Stefan-Boltzmann*. La superficie idealizada que puede emitir radiación a esta razón máxima es lo que se conoce como *cuerpo negro*. La radiación de cuerpo negro es entonces, la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura determinada (Cengel & Ghajar, 2011).

- *Emisividad (ε)*: Es una medida de cuan próxima se encuentra una superficie de irradiar energía infrarroja comparada con un cuerpo negro y su valor se encuentra entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$. En el valor de la emisividad influyen varios factores como el color de la superficie (más oscuras mayor emisión) y el acabado superficial (mejores acabados superficiales producen una menor emisión de radiación), ver Tabla 2.

Tabla 1. Emisividad de algunos materiales a 300 K (Cengel & Ghajar, 2011).

Emisividades de algunos materiales
a 300 K

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

- **Absortividad (α):** Es otra de las propiedades relativas a la radiación de una superficie y representa la fracción de radiación incidente sobre la superficie que es absorbida por el material. De la misma forma que la emisividad su valor se encuentra definido en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. La razón a la cual la superficie absorbe radiación se determina a partir de la Ecuación (1-2)

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad \text{Ec.(1-6)}$$

La ley de *Kirchhoff* afirma que la emisividad y la absortividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda son iguales, y en muchas aplicaciones prácticas, la temperatura de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud y se puede aproximar la absortividad al mismo orden de magnitud de la emisividad promedio (Cengel & Ghajar, 2011).

- **Reflexión:** Es el cambio de la dirección de una onda incidente, para este caso electromagnética, que al entrar en contacto con una superficie hace que ésta regrese al medio inicial. El grado de la reflexión depende de las características de la superficie reflectante y la dirección de salida será igual al ángulo de la radiación incidente. La relación entre la radiación incidente, absorbida y reflectada está dada por la Ecuación (1-3)

$$\dot{Q}_{ref} = (1 - \alpha) \dot{Q}_{incidente} \quad \text{Ec.(1-7)}$$

- *Transmisión:* Se ha demostrado experimentalmente que la radiación infrarroja puede pasar fácilmente a través de los materiales volátiles como los gases y también a través de sólidos no densos y con muy poco espesor, no obstante, se detiene cuando entra en contacto con líquidos y sólidos densos. Algunos materiales transparentes a la radiación infrarroja presentan problemas para el monitoreo con cámaras infrarrojas ya que no es posible recibir la radiación de los elementos ubicados al otro lado.

3.2.2 Avión de referencia

EL A320 es un avión disponible en cuatro tamaños (A318, A319; A320 y A321), que representa la familia de aviones más versátil y exitosa de la historia, ver Figura 7. Cuenta con una capacidad para 100 a 240 pasajeros y se puede encontrar en todas las partes del mundo, “un A320 despegue o aterriza cada 1,6 segundos” (AIRBUS, 2019).

“Como el avión de pasillo único de mayor alcance, tanto las aerolíneas como los pasajeros se han beneficiado de la eficiencia y calidad del A320 desde su introducción” (AIRBUS, 2019). El A320 fue el primer modelo de avión comercial que contaba con sistemas de control de vuelo con mandos electrónicos digitales “*fly-by-wire*” y con una configuración de cabina de vuelo novedosa al contar con palancas de control de vuelo laterales “*sidestick*”. Dentro de las novedades tecnológicas que introdujo el avión están su sistema de mantenimiento y diagnóstico centralizado, que permite a los mecánicos comprobar los diferentes sistemas del avión desde la cabina, una cantidad significativa de la estructura está hecha en fibra y materiales compuestos y fue el primer avión de fuselaje estrecho de su tipo que incluye un sistema de carga de contenedores.

Con relación a su desarrollo, para la década de 1960 y comienzos de 1970 la compañía Airbus diseñó su aeronave Airbus A300, contemplando una amplia familia de aeronaves que le permitieran ser competitivo con las compañías Boeing y McDonnell Douglas que para la época ya eran dos fabricantes aeroespaciales establecidos en el mercado (Wensveen, 2007). Antes de que los aviones de Airbus fueran introducidos al servicio los ingenieros ya habían identificado nueve variaciones posibles para el modelo A300 (Wagner & Norris, 2001). La décima versión entregada en 1973 era un avión pequeño de largo alcance con el

cual Airbus había centrado sus esfuerzos en el mercado de un solo pasillo, dominado en aquella época por el Boeing 737 y McDonnell Douglas DC-9.

Sin embargo, no fue hasta marzo de 1984 que se hizo público el lanzamiento del A320 y fue puesto a servicio por primera vez en marzo de 1988 para la aerolínea Air France. Posteriormente a su lanzamiento se comenzó con el desarrollo del A321, que entró a servicio en 1994; por otro lado, el A319 y A318 entraron a servicio en 1996 y 2003, respectivamente. El primero de diciembre del año 2010, Airbus hizo el lanzamiento oficial de la familia A320 denominada como A320neo, la cual podría ser configurada con motores LEAP-X de CFM International o PurePower PW1100G de Pratt & Whitney que, combinados con mejoras estructurales y el uso de dispositivos ahorradores de combustible para punta de ala grande llamados Sharklets, permiten un ahorro de combustible de hasta el 15% (AIRBUS, 2019).

Para finales de diciembre de 2011, cerca de 21 aerolíneas ya habían hecho pedidos que sumaban un total de 1196 aviones de la familia A320neo, lo que lo ha convertido en el avión comercial más rápidamente vendido. A finales de 2015, habían sido entregados un total de 4075 aviones del modelo A320 y quedaban pendientes 3558 unidades pendientes por ser entregadas (Airlinerlist & Marc-o-media, 2019). La familia A320 está clasificada como la familia de aviones comerciales de reacción más rápidamente vendida en el mundo según los datos de ventas entre 2005 y 2007 (Aviationexplorer, 2019).



Figura 7. Aeronave Airbus A320neo (AIRBUS, 2019).

3.2.3 Descripción del sistema neumático y de aire acondicionado

Para la descripción de los sistemas neumáticos de la aeronave comercial seleccionada, objeto de estudio e interés en el desarrollo del protocolo de inspección, se hace necesario realizar una contextualización teórica que permita familiarizar la terminología empleada, la estructuración y conformación de los sistemas y la documentación y manuales que rigen el mantenimiento de las aeronaves comerciales de la familia A320.

3.2.4 ATA Standard Numbering System (ISPEC 2200)

El listado ATA 100 es un estándar común para toda la documentación de las aeronaves comerciales, hace referencia a las distintas partes o tipos de sistema de cualquier aeronave (avión o helicóptero). Esta estructuración permite una mayor facilidad de aprendizaje y comprensión para los pilotos, ingenieros y técnicos de mantenimiento, ver Figura 7 (Freepng.es, 2019)

El sistema fue publicado por la ATA (por su singlas en ingles Air Transport Association) en el año 1956, y aunque es utilizado de forma muy amplia en el campo de la aviación, fue remplazado por el sistema ATA ISPEC 2200 desde el año 2000, cubriendo las necesidades de los nuevos sistemas que han implementado de las aeronaves (Aviación D, 2019).

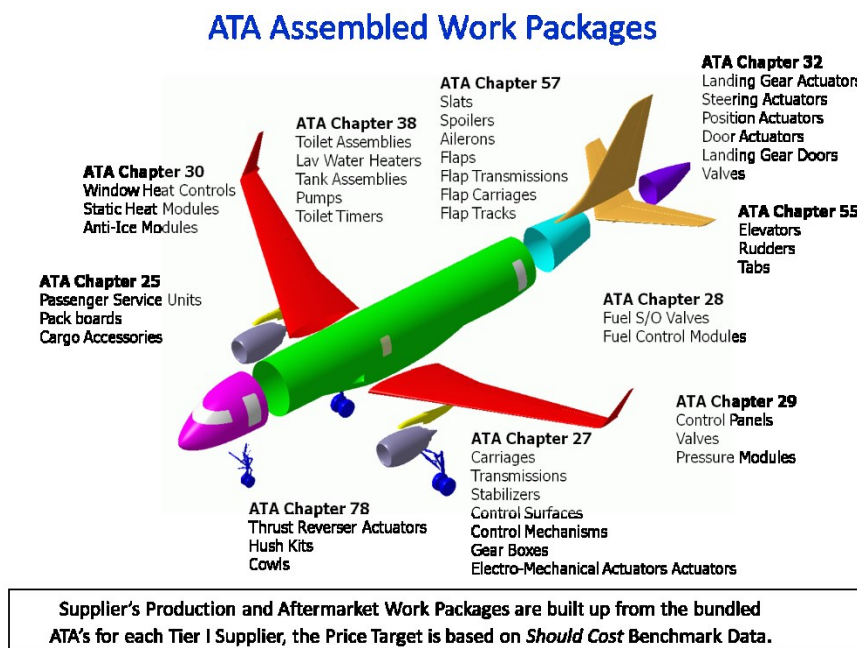


Figura 8. Estructuración de algunos de los sistemas de un avión de acuerdo con ATA 100 (Freepng.es, 2019).

El estándar ATA 100 establece un sistema de numeración que se divide en tres categorías:

- El sistema / Capítulo
- Subsistema / Sección
- Unidad / Sección

De esta forma en la Figura 8 se muestra un ejemplo del código numérico empleado en ATA 100 para el cual se tiene:

- Capítulo 79 (Sistema de aceite)
- Sección 21 (Refrigeración)
- Subsección 51 (Intercambiador de calor aire-aceite)
- Unidad 420 (Instalación de la unidad)

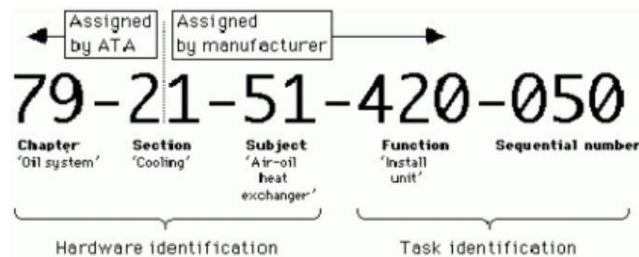


Figura 9. Subdivisiones del código numérico del sistema de referencia ATA 100 (Aviación D, 2019).

Además de las secciones mencionadas anteriormente, ATA emplea un código numérico de tres dígitos para designar la página a la que corresponde. De esta forma se tiene la correspondencia en páginas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Secciones y designación de número de página de acuerdo con ATA 100 (Aviación D, 2019).

Pág.	Sección
001-099	Descripción y funcionamiento
101-199	Solución de problemas
201-299	Prácticas de mantenimiento
301-399	Prestación de servicios
401-499	Desmontaje / Montaje
501-599	Ajuste / Prueba

601-699	Inspección / Chequeo
701-799	Limpieza / Pintura
801-899	Reparaciones aprobadas

En la Tabla 3 se enumeran los primeros 30 capítulos de la sección de Sistemas de fuselaje (Airframe Systems). Dentro de esta sección se encuentra el sistema de Aire acondicionado y presurización (ATA 21) que describe y expone la información relacionada con las unidades neumáticas y de aire acondicionado PACKS de la aeronave.

Tabla 3. Primeros 30 capítulos correspondientes a Airframe Systems de acuerdo con ATA 100 (Aviación D, 2019).

ATA Number	ATA Chapter Name
ATA 20	Standard Practices – Airframe
ATA 21	<i>Air Conditioning and Pressurization</i>
ATA 22	Auto Flight
ATA 23	Communications
ATA 24	Electrical Power
ATA 25	Equipment/Furnishings
ATA 26	Fire Protection
ATA 27	Flight Controls
ATA 28	Fuel
ATA 29	Hydraulic Power
ATA 30	Ice and Rain Protection

3.2.5 Manuales de mantenimiento

Para el mantenimiento y operación, las diferentes aeronaves cuentan con múltiples manuales que permiten identificar los elementos, las funciones que desempeñan en las aeronaves, los parámetros de operación normales de los sistemas y las actividades y tareas de reparación y mantenimiento predictivo o preventivo, como se muestran a continuación:

Tabla 4. Manuales de mantenimiento de aeronaves en los cuales se emplea ATA 100 (Aviación D, 2019).

AIRCRAFT MANUALS	
AMM	Aircraft Maintenance Manual
IPC	Illustrate Parts Catalog
ASM	Aircraft Schematic Manual

SRM	Structure Repair Manual
AWM	Aircraft Wiring Manual
CMM	Components Maintenance Manual
TEM	Illustrate Tool and Equipment
TSM	Troubleshooting Manual (Airbus)
FIM	Fault Insolation Manual (Boeing)

3.2.6 ATA 21 - Sistema de Aire Acondicionado (Air Conditioning and Pressurization)

DESCRIPCIÓN: La función principal del sistema de aire acondicionado es mantener el aire en los compartimientos del fuselaje presurizados a la presión y temperaturas correctas de forma detallada es encargado de funciones como:

- Control de la temperatura de la cabina
- Control y presurización
- Ventilación de los sistemas de aviónica (sistemas electrónicos de navegación aérea y espacial)
- Ventilación y calefacción de los compartimientos de carga

El aire sangrado, procedente de los motores, ingresa al sistema de aire acondicionado para su posterior proceso de regulación de temperatura. El aire con las condiciones de temperatura y humedad requeridas pasa al sistema de distribución y ventilación que lo lleva hasta las diferentes zonas de la aeronave donde es necesario y garantizar de esta forma la presurización correcta de la aeronave. El proceso anterior se puede ver en la Figura 9.

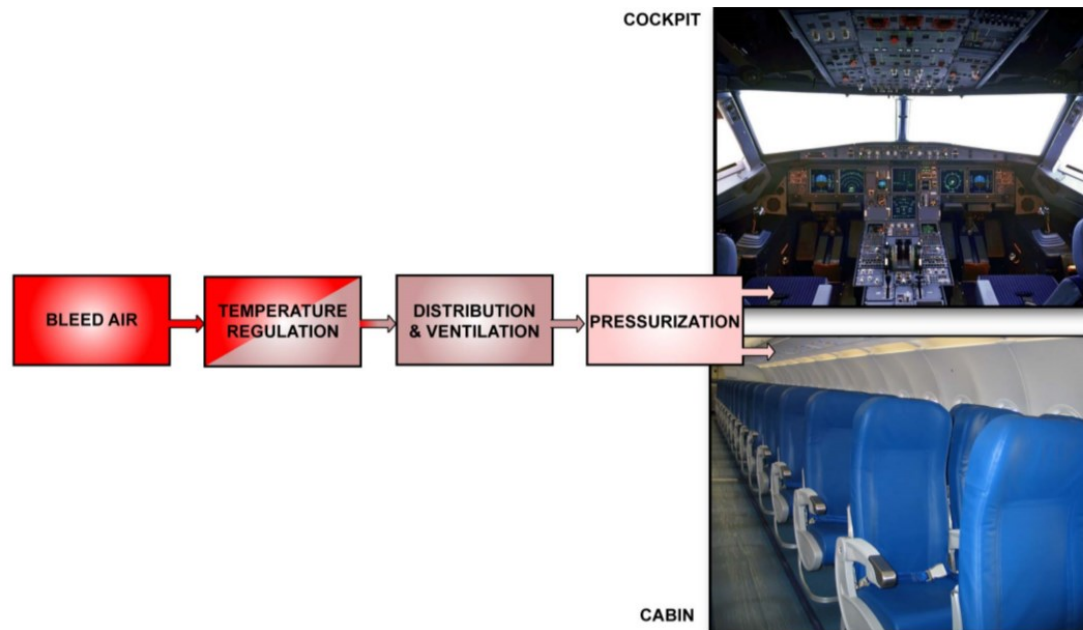


Figura 10. Diagrama de flujo, funcionamiento del sistema de aire acondicionado de una aeronave (AIRBUS, 2011).

CONTROL DE TEMPERATURA DE CABINA: La familia A320 de único pasillo cuenta con dos unidades de aire acondicionado PACKS, que se encuentran instalados en el área de la raíz del de las alas, delante de la bahía de del tren de aterrizaje. Los PACKS suministran aire acondicionado a la cabina para que se dé la climatización, ventilación y presurización. El componente principal de cada conjunto PACKS es la máquina de ciclo de aire.

El aire caliente procedente de sistema neumático, sangrado de los motores, es suministrado al sistema PACK a través de la válvula de control de flujo (FCV por sus siglas en ingles Flow Control Valve). La FCV ajusta el caudal de aire que llega al PACK y es la válvula de cierre de la misma unidad. En la operación normal del sistema, el sistema de control del aire acondicionado (ACSC por sus siglas en ingles Air Conditioning System Controller), calcula la demanda de masa de flujo de aire y establece la posición de referencia de apertura de la válvula de control de flujo. El sistema ACSC controla temperatura de salida del aire de la unidad de aire acondicionado y establece los límites máximos y mínimos permisibles. El sistema de acondicionamiento de aire cuenta con dos ACSC, uno para cada una de las unidades PACKS. Para poder controlar la temperatura del aire de salida de la unidad, el ACSC modula la válvula de desvío (Bypass) y las puertas de aire de impacto

(RAM-AIR). Los PACKS abastecen a la unidad de mezclado que suministra aire acondicionado a las tres zonas principales de la aeronave:

- Cabina de mando
- Cabina de proa (zona de pasajeros – asientos delanteros)
- Cabina de popa (zona de pasajeros – asientos traseros)

Se encuentran instalados dos ventiladores de recirculación de aire de la cabina para reducir la demanda de aire sangrado y, por lo tanto, ahorrar combustible. Los ventiladores establecen un flujo de recirculación de aire desde las zonas de cabina hacia la unidad mezcladora. En operación normal, no parecen indicaciones asociadas con los ventiladores de las cabinas en el monitor electrónico centralizado de aeronaves (ECAM por sus siglas en inglés Electronic Centralized Aircraft Monitor). El ACSC controla y monitorea el sistema de regulación de temperatura para las diferentes zonas de la cabina. En el panel AIR CON, la tripulación de vuelo configura y selecciona la temperatura deseada para un compartimiento específico ver figura 11. EL sistema de aire caliente que regula la temperatura de la cabina cuenta con una válvula reguladora de presión (PRV por sus siglas en inglés Pressure Regulating Valve) y válvulas de compensación de aire que son controladas por el ACSC (AIRBUS, 2011).

Para las zonas en las que son necesarias temperaturas más cálidas, el ACSC envía una señal a la válvula de compensación de aire para que se abra y permita que una mayor cantidad de aire caliente sea descargado en la unidad de mezclado y de esta forma aumentando la temperatura del aire acondicionado dentro de los compartimientos de la aeronave, refierace a.

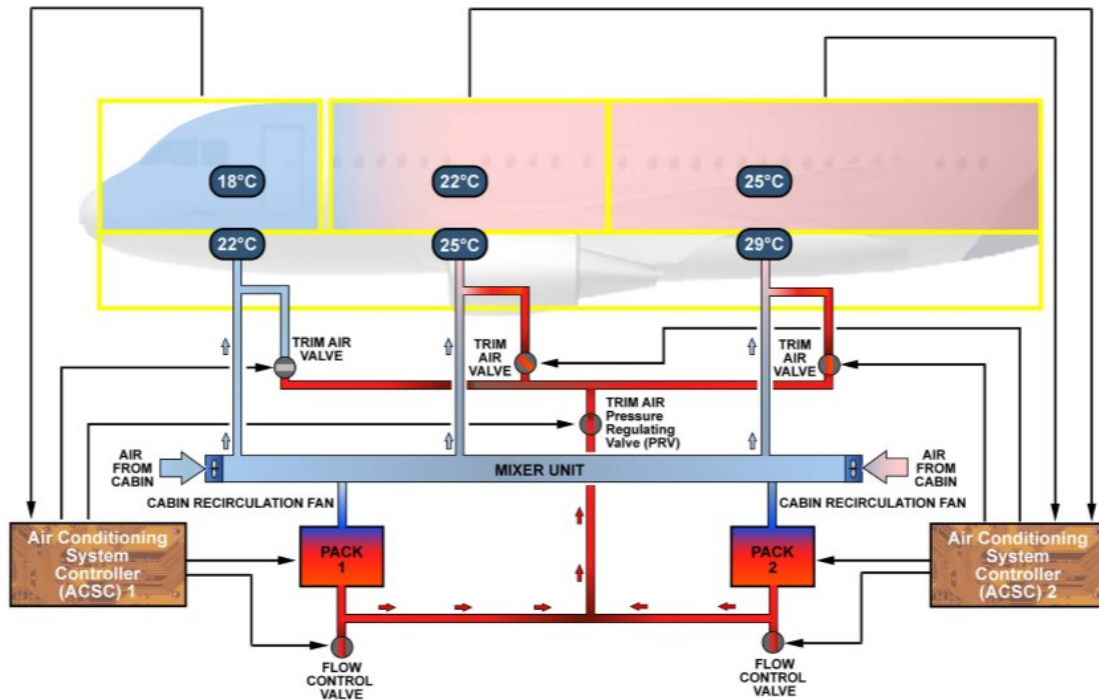


Figura 11. Mirada general del funcionamiento del sistema de control de temperatura de cabina para el A320 (AIRBUS, 2011).

Las unidades PACKS de aire acondicionado, izquierdo y derecho, se encuentran ubicados en la bahía de aire acondicionado. La bahía se encuentra en el carenado del abdomen del fuselaje del avión, delante del tren de aterrizaje principal. El carenado del vientre del fuselaje cuenta con entradas para enfriar los PACKS y el compartimento. Los PACKS se encargan de suministrar aire a la unidad mezcladora que se encuentra instalada en la parte trasera del compartimento de carga delantero, ver Figura 11 y Figura 12. La mezcla de aire de los PACKS y el aire recirculado desde la cabina se distribuye posteriormente a cada una de las zonas.

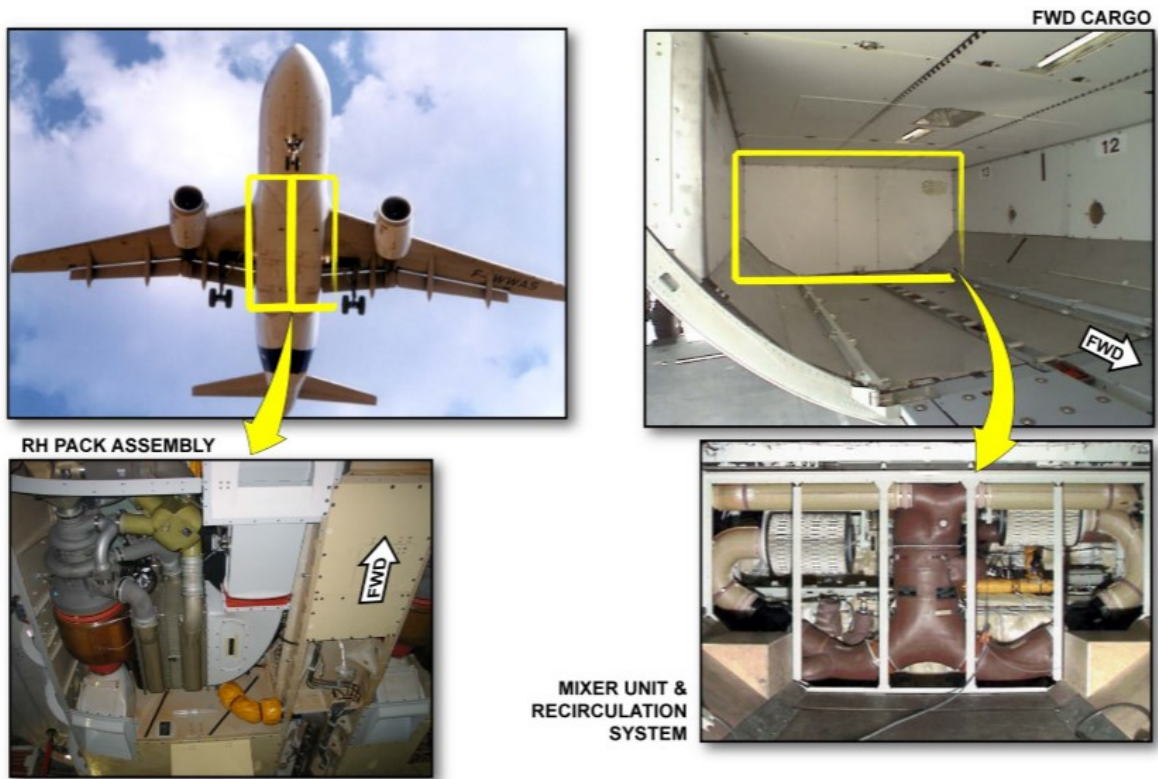


Figura 12. Ubicación de los componentes principales del sistema de aire acondicionado de la aeronave A320 (AIRBUS, 2011).

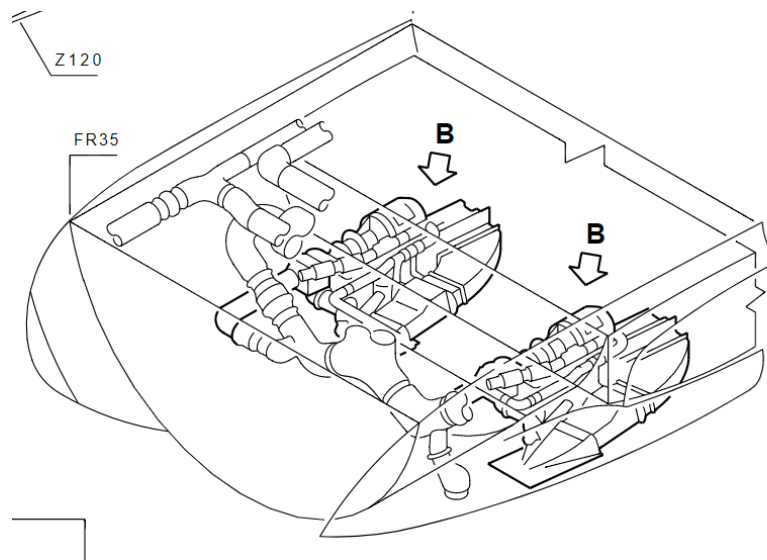


Figura 13. Vista esquemática de la conexión de PACKS con la unidad mezcladora (AIRBUS, 2006).

CONTROL DE PRESURIZACIÓN: El sistema de presurización de la familia de un único pasillo funciona de forma automática para ajustar la altitud de la cabina y la velocidad de ascenso de forma que se garantice la máxima comodidad y seguridad de los pasajeros. Las áreas de presurización son:

- La cabina de mando
- La bahía de instrumentación de aviónica
- La cabina de pasajeros
- Los compartimientos de carga

El concepto del sistema es simple. El aire se suministra desde los paquetes de aire acondicionado a las áreas presurizadas. Se utiliza una válvula de salida para ajustar la cantidad de aire que se libera de la cabina presurizada. El control automático de la válvula de salida es proporcionado por dos controladores de presión de la cabina (CPC por sus siglas en inglés Cabin Pressure Controller). Cada CPC controla un motor eléctrico en el conjunto de la válvula de salida e interactúan con otras computadoras de la aeronave para optimizar el programa de presurización/despresurización.

Hay dos sistemas automáticos de presurización. Cada CPC y su motor eléctrico conforman un sistema. Solo un sistema funciona a la vez y el otro sistema actúa como respaldo en caso de una falla. El sistema al mando se alterna en cada vuelo durante el ascenso, tránsito y descenso de la aeronave. Se encuentra instalado un tercer motor que permite la operación manual de la válvula de salida en caso de que ambos sistemas automáticos fallen.

Para proteger el fuselaje contra la presión diferencial excesiva de la cabina, se instala válvulas de seguridad en el mamparo de presión trasero, ver Figura 14. Las válvulas de seguridad también protegen contra la presión diferencial negativa. La unidad de control de presión residual (RPCU por sus siglas en inglés Residual Pressure Control Unit) evita la residual en la cabina y asume el control de la válvula de salida automáticamente, suministrando energía directamente al motor manual de la válvula de salida (AIRBUS, 2011).

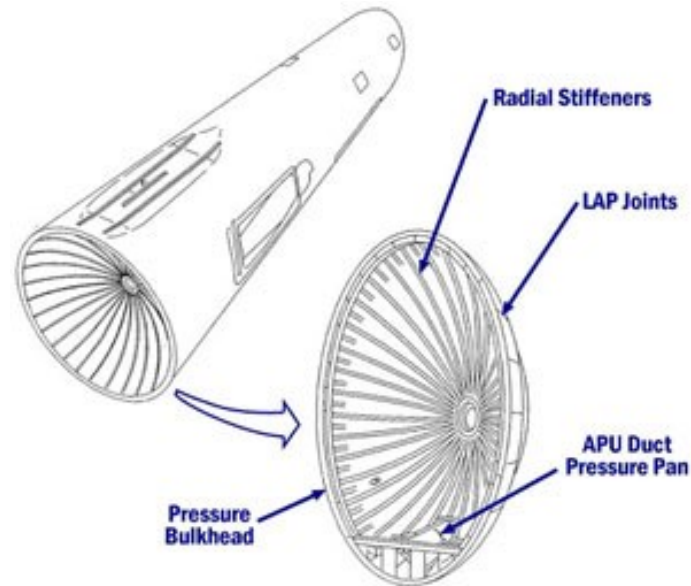


Figura 14. Ubicación del mamparo de presión trasero (Pressure Bulkhead) de una aeronave (FAA, 2019).

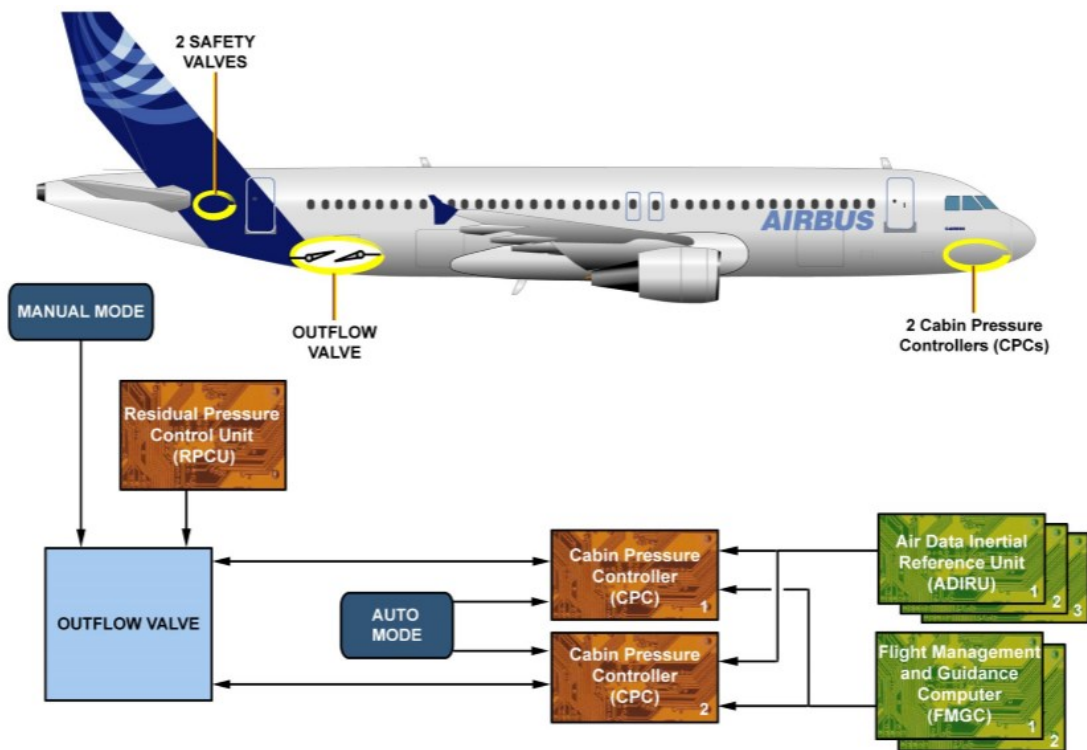


Figura 15. Mirada general del funcionamiento del sistema presurización de cabina para el A320 (AIRBUS, 2011).

La presurización se realiza mediante una válvula de salida de tipo puerta doble. La válvula de salida es operada por tres motores eléctricos: dos para el modo automático y uno para el modo manual, refiérase a la figura 15. Se cuentan con dos válvulas de seguridad en el mamparo de presión ubicadas en la parte trasera del mamparo de presión de la parte trasera de la cabina. La RCPU está instalada en la parte inferior derecha del compartimiento de instrumentación de aviónica, ver Figura 16 y Figura 17.

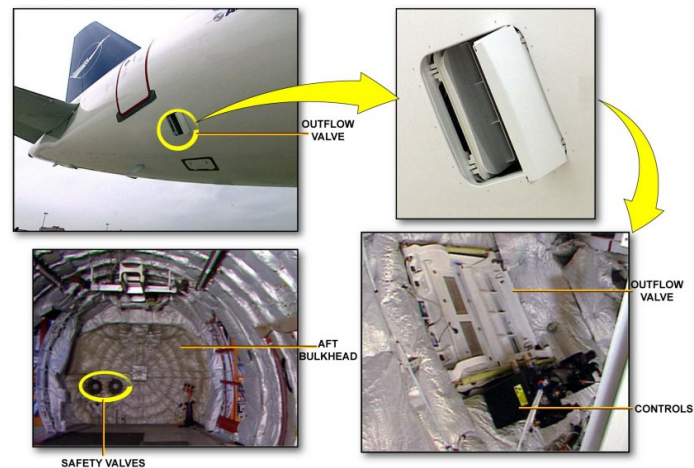


Figura 16. Ubicación de los componentes del sistema de ventilación (AIRBUS, 2011).

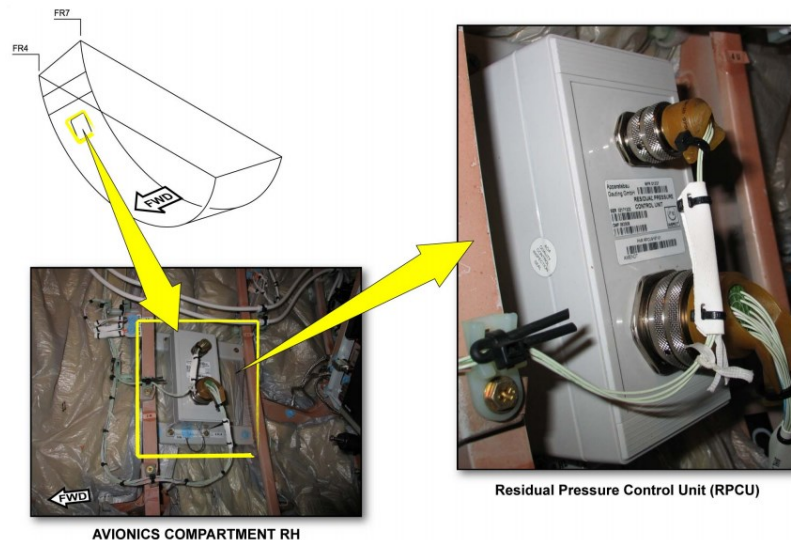


Figura 17. Ubicación de la RCPU del sistema de presurización (AIRBUS, 2011).

VENTILACIÓN DEL SISTEMA DE AVIÓNICA: El sistema de ventilación de aviónica suministra aire de refrigeración a todos los equipos electrónicos encargados de la navegación aérea de la aeronave. Esto incluye el compartimiento de aviónica, los

elementos de la cabina de vuelo y los paneles de interruptores automáticos. Se cuenta con un ventilador de admisión y otro de extracción para el suministro de aire.

Los ventiladores funcionan de forma continua mientras se alimentan del sistema eléctrico de la aeronave. La computadora de ventilación del equipo de aviónica (AEVC por sus siglas en inglés Avionics Equipment Ventilation Computer) se encarga de controlar la configuración de las válvulas del fuselaje según la lógica de vuelo/tierra y la temperatura del fuselaje. Existen 3 configuraciones para las válvulas de entrada y salida del fuselaje, ver Figura 18.

- *Circuito abierto:* Las dos válvulas están abiertas (sólo en tierra)
- *Circuito cerrado:* Las dos válvulas están cerradas (en vuelo o si hay baja temperatura del aire externo en tierra).
- *Circuito intermedio:* La entrada está cerrada y la salida abierta, pero no completamente (AIRBUS, 2011).

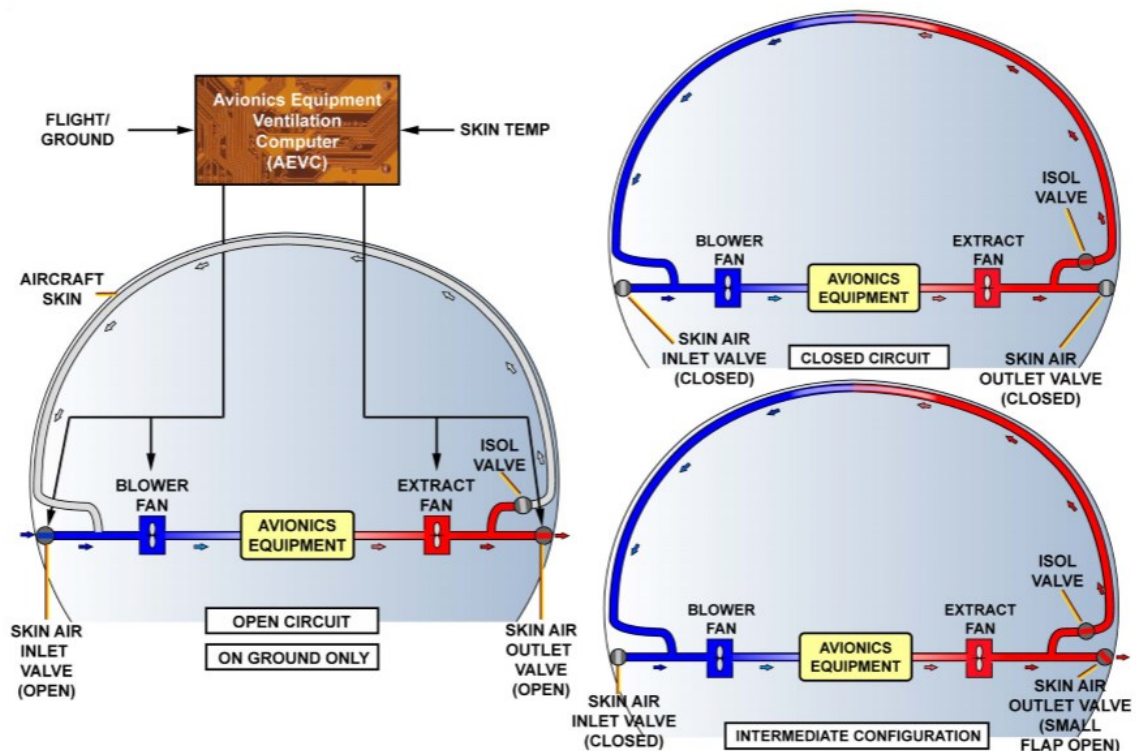


Figura 18. Configuraciones del sistema de ventilación de aviónica de la aeronave A320 (AIRBUS, 2011).

La válvula de entrada de aire del fuselaje se encuentra ubicada en el lado izquierdo de la aeronave. La válvula de salida de aire del fuselaje se encuentra en el lado derecho, ver Figura 19. Se abrirá una pequeña aleta auxiliar para la configuración del circuito intermedio (en la posición no totalmente abierta) y para la eliminación de humo en el vuelo. Las válvulas de entrada y salida cuentan con un dispositivo de anulación y desactivación manual.

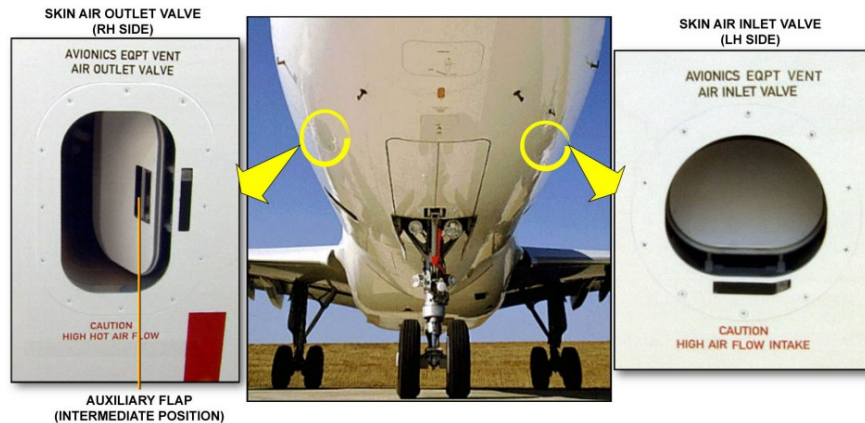


Figura 19. Ubicación de la válvula de fuselaje de entrada y salida del sistema de ventilación (AIRBUS, 2011).

VENTILACIÓN Y CALEFACCIÓN DE LOS COMPARTIMIENTOS DE CARGA: La versión de único pasillo cuenta con compartimientos de carga adelante y atrás que pueden contar con sistemas de calefacción en los dos o únicamente en uno de ellos. Los sistemas de calefacción se instalan únicamente en cabinas que cuenten con un sistema de ventilación. La operación es equivalente para ambos compartimientos. El aire de la cabina principal se suministra a los compartimientos de carga mediante un ventilador de extracción o por presión diferencial en el vuelo. Después de la circulación a través del compartimiento, el aire se descarga por la borda. El funcionamiento de las válvulas de aislamiento y el ventilador de extracción se realiza de forma automática mediante un controlador de ventilación de carga (VC por sus siglas en inglés Ventilation Controller). Un VC puede controlar un compartimiento de carga o los dos. Para calentar el compartimiento de carga, los pilotos seleccionan la temperatura deseada para el compartimiento y el aire caliente de la purga de los motores se mezcla con el aire que sale de la cabina principal hasta alcanzar la temperatura necesaria, ver Figura 20. El suministro de aire caliente está controlado por el controlador de calefacción de carga. Cada compartimiento calentado tiene un controlador de calefacción propio. No hay un suministro directo de aire acondicionado a los

compartimientos de carga, de forma que los pilotos no pueden agregar aire de menor temperatura a los compartimientos (AIRBUS, 2011).

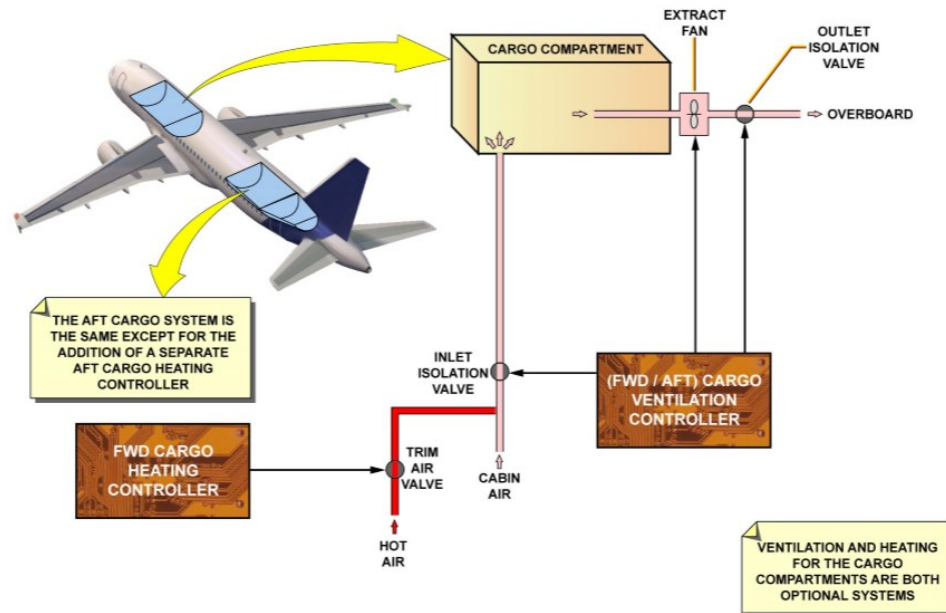


Figura 20. Funcionamiento del sistema de ventilación y calefacción de los compartimientos de carga de la aeronave A320 (AIRBUS, 2011).

Las válvulas de aislamiento y el ventilador de extracción del sistema de ventilación del compartimiento de carga delantero están detrás de los paneles laterales de la bodega de carga. Las entradas y salidas de aire cuentan con rejillas de protección, ver Figura 21.

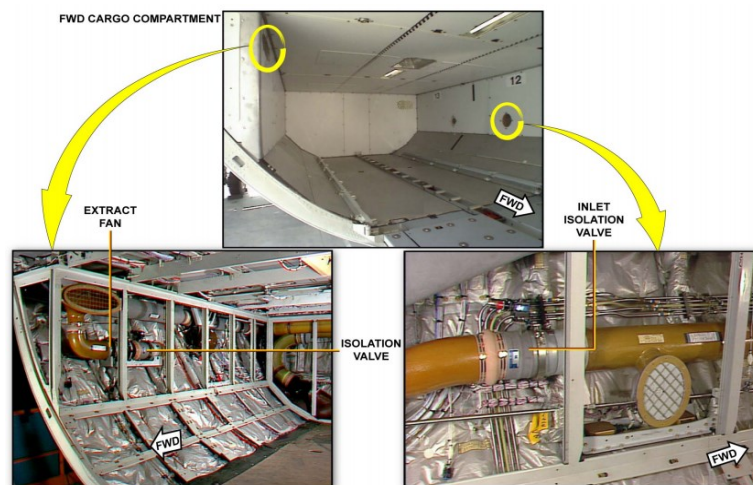


Figura 21. Ubicación de las entradas y salidas de aire del sistema de ventilación y calefacción de compartimiento de carga delantero (AIRBUS, 2011).

En el compartimiento de carga trasero, se instala una válvula de aislamiento y un ventilador de extracción detrás de la pared posterior del compartimiento y el aislamiento de la válvula de entrada se encuentra detrás del revestimiento de la pared lateral izquierda, Figura 22.

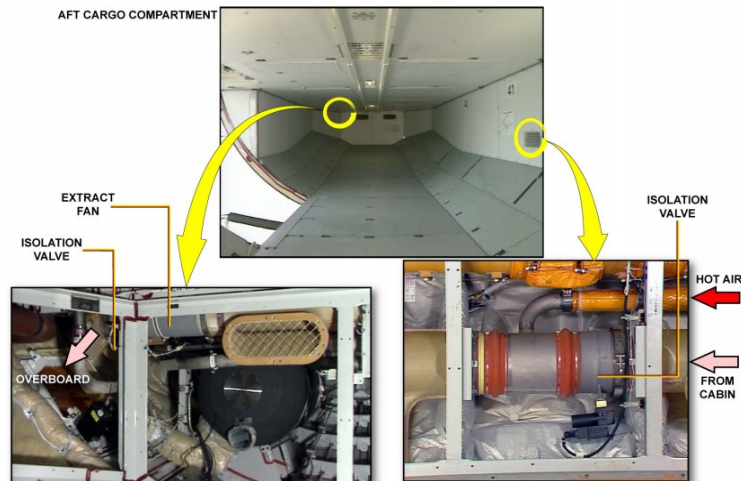


Figura 22. Ubicación de las entradas y salidas de aire del sistema de ventilación y calefacción del compartimiento de carga trasero (AIRBUS, 2011).

UNIDADES PACKS

Las aeronaves de la familia AIRBUS A320 cuentan con dos unidades de suministro de aire PACKS, la vista general de los componentes y ductos de una de estas unidades se muestran en la Figura 23.

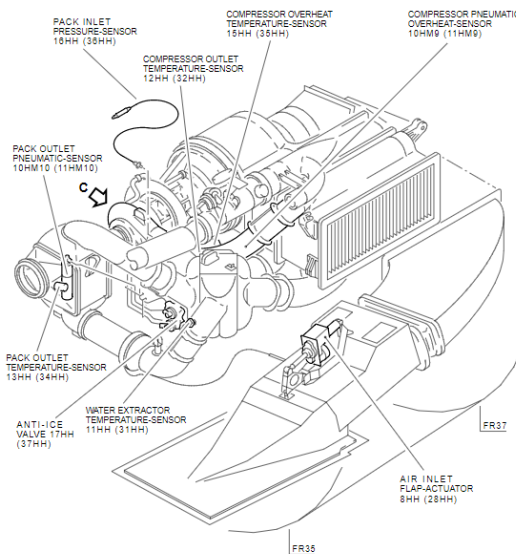


Figura 23. Vista esquemática de componentes y conexiones de las unidades PACKS (AIRBUS, 2006).

El sistema de aire acondicionado de servicio se encuentra ubicado en el lado izquierdo del carenado de la aeronave, cerca de la unidad PACK N°1 (unidad del lado izquierdo), como se ve en la Figura 24.

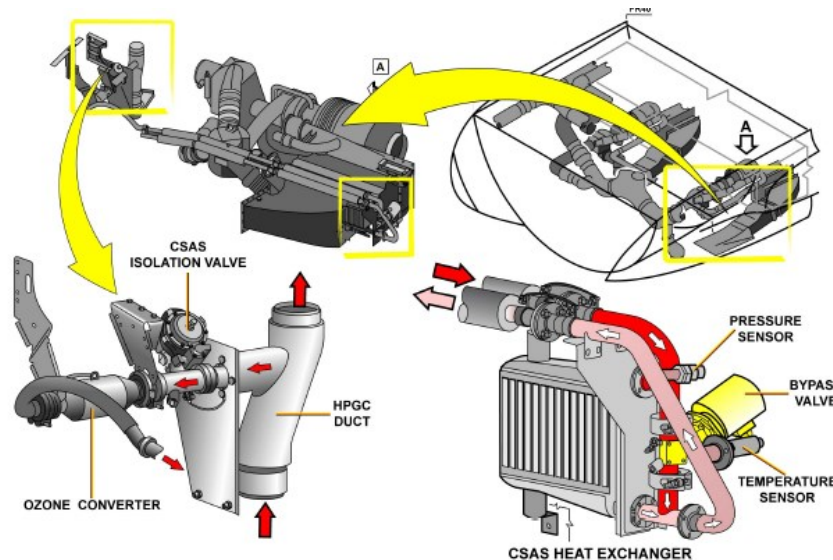


Figura 24. Ubicación del sistema de aire acondicionado de servicio (AIRBUS, 2006).

Con el ánimo de entender el funcionamiento de los diferentes elementos que conforman una unidad de suministro de aire acondicionado PACK se hace necesario identificar los diferentes elementos y las funciones que desempeñan dentro del sistema en general. A continuación, se identifican y describen las funciones de los componentes.

- **Pack FCV**

Cada válvula de control de flujo de unidad (FCV por sus siglas en inglés Flow Control Valve) se acciona neumáticamente y se controla eléctricamente. La regulación del flujo se realiza mediante un motor de par bajo el mando del controlador del sistema de aire acondicionado (ACSC). Si la temperatura de salida del compresor del PACK es superior a 215°C, el FVC comienza a reducir el flujo. Una temperatura de salida del compresor mayor a 260° produce una advertencia de sobrecalentamiento del PACK.

Nota: Parte del aire caliente, aguas abajo del FCV, se envía a la válvula reguladora de presión (PRV) del aire de compensación. Cada FCV se cierra automáticamente durante una secuencia de arranque del motor del mismo lado o una secuencia de

arranque del motor del lado opuesto, si la válvula de sangrado cruzado se detecta abierta. Se vuelve abrir 30 segundos después del final de cualquier secuencia del arranque del motor, ver Figura 25.

- **Intercambiadores – Compresor**

El aire de purga se canaliza al intercambiador de calor primario, luego al compresor. El aire se enfría en el intercambiador de calor principal. Luego pasa a través del recalentador, el condensador y el extractor de agua para eliminar las partículas del aire que ingresa a la turbina, ver Figura 25.

- **Turbina**

El aire se expande en la sección de la turbina, lo que resulta en una temperatura muy baja del aire de descarga. La turbina acciona el compresor y el ventilador de aire, ver Figura 25.

- **Válvula de entrada de aire de impacto RAM y válvula de bypass**

La válvula bypass y la aleta de entrada de aire del pistón son controladas simultáneamente por el controlador del sistema del aire acondicionado. La válvula BYP es operada por un actuador electromecánico para modular la temperatura de descarga del PACK agregando aire caliente. La aleta de entrada de aire del ariete modula el flujo de aire a través de los intercambiadores. Para aumentar el enfriamiento, la aleta de entrada de aire del pistón se abre más y la válvula BYP se cierra más. Para aumentar el calentamiento, la aleta de entrada de aire del pistón se cierra más y la válvula BYP se abre más. Durante el despegue y aterrizaje, la aleta de entrada de aire del ariete se cierra para evitar la entrada de objetos extraños, ver Figura 25.

- **Convertidor de ozono**

El aire de alta presión y temperatura del sistema de purga se suministra a la unidad de control de flujo (FCU por sus siglas en inglés Flow Control Unit) del PACK a través del convertidor de ozono, que se utiliza para la eliminación catalítica del ozono del aire sangrado caliente que se suministra al PACK, ver Figura 25.

- **Unidad de control de flujo general**

La FCU incluye la válvula de control de flujo FCV. El FCV es una válvula de mariposa electroneumática que realiza las funciones principales que se detallan a continuación:

- Control del flujo másico de aire sangrado que entra al PACK
- Aislamiento del suministro de aire sangrado del PACK (selección de la tripulación, incendio del motor, abandono o arranque del motor)
- Protección contra sobrecalentamiento y baja presión de arranque de la máquina de ciclo de aire (ACM por sus siglas en inglés Air Cycle Machine) controlada por el ACSC. Cada uno de los PACKS tiene un ACSC encargado de controlar el FCU de la unidad.

Cada FCU incluye el FCV, 2 solenoides, motor de torque, un sensor de posición y 2 sensores de presión.

La FCU funciona en modo Principal o de Respaldo, controlada por el ACSC a través de los solenoides. Las funciones principales de los componentes son:

- El solenoide 1 controla la función On/Off (aislamiento). Cuando este solenoide se energiza, el FCV está abierto y regula cuando la presión de aire sangrado está disponible.
- El solenoide 2 controla la operación Principal o de Respaldo. Cuando este solenoide se desactiva, el FCV funciona en modo Principal. El solenoide está energizado para la operación de Respaldo .

- **Intercambiador y compresor de calor primario**

Para evitar una temperatura demasiado alta, el intercambiador de calor primario se usa para disminuir la temperatura del aire sangrado caliente antes de que ingrese al compresor ACM. El intercambiador de calor primario es un tipo de intercambiador aire-aire y el medio de enfriamiento es aire de impacto externo.

El compresor aumenta la presión del aire y, por lo tanto, aumenta la energía del aire. Al mismo tiempo, la temperatura del aire aumenta nuevamente, ver Figura 25.

- **Condensador**

El condensador es un tipo de intercambiador de calor aire-aire y se usa para disminuir la temperatura del aire por debajo del punto de rocío. La humedad contenida en el aire se condensará y formará gotas de agua. Esto es necesario para extraer la humedad del aire, ver Figura 25.

- **Extractor de agua e inyector**

El aire del condensador se envía a través del extractor de agua. Las paletas guías suministrarán este aire a alta velocidad y las fuerzas centrífugas extraerán el agua del flujo de aire. El agua extraída se inyecta en el conducto de aire del ariete a través del inyector de agua. Esto aumenta la eficiencia de enfriamiento de los intercambiadores de calor principales. Esto generalmente se hace solo en el suelo y a altitudes bajas, ver Figura 25.

- **Recalentador**

El aire, que casi no contiene agua, va al calentador. El recalentador utiliza aire caliente de la salida principal del intercambiador de calor para aumentar nuevamente la temperatura del aire frío que proviene del extractor de agua. Esto es necesario para vaporizar las últimas gotitas de agua restantes antes de enviar el aire a la turbina ACM y evitar daños a la turbina, ver Figura 25.

- **Turbina de ciclos de aire**

La turbina ACM convierte el aire a alta presión en rotación y, por lo tanto, opera el ACM con su compresor y ventilador ACM. El resultado es una disminución rápida de la presión de aire y la temperatura del aire por debajo de 0°C, ver Figura 25.

- **Sensor de temperatura de descarga de pack y válvula de retención**

El aire frío fluye a través del condensador nuevamente. Este flujo de aire frío se usa para disminuir la temperatura del aire caliente por debajo del punto de rocío antes de que el aire ingrese al extractor de agua. Abajo del condensador, el ACSC utiliza el sensor de temperatura de descarga del PACK para controlar la temperatura de salida de la unidad.

La válvula de verificación del PACK, que está aguas abajo del condensador, detiene la fuga de aire del sistema de distribución cuando la FCV está cerrada. La válvula de retención está unida al mamparo de presión del fuselaje delantero, ver Figura 25.

- **Sensor de temperatura del extractor de agua**

El ACSC monitorea el calor del sensor de temperatura del extractor de agua para modular la temperatura de salida del PACK, ver Figura 25.

- **Actuador de aire RAM**

Para el control de la temperatura del paquete a largo plazo, el ACSC modula el flujo de enfriamiento del aire de ariete a través de los intercambiadores de calor. Para hacer esto, controla la posición de la aleta de entrada de aire del ariete que es monitoreada por el sensor de velocidad y dirección conectado al actuador, ver Figura 25.

- **Ventilador ACM**

Durante la operación de la aeronave en tierra, el ventilador ACM se utiliza para suministrar aire de refrigeración alrededor de los intercambiadores de calor primario y principal. En vuelo con aire de impacto RAM disponibles, se evitará el ventilador para evitar un efecto negativo en la operación ACM, ver Figura 25.

- **Sensor de presión de descarga del PACK**

El ACSC utiliza el sensor de presión de descarga del PACK para comparar la presión de la cabina con la presión de salida de la turbina. Si la diferencia de los dos valores es mayor a un límite especificado, entonces puede haber hielo en el condensador. Esto hace que el ACSC ordene a la válvula de derivación (BYP VLV) a una posición más abierta y el aire caliente fluya directamente en el flujo de aire de salida de la turbina.

Este aire caliente derretirá el hielo en el condensador, lo que hará que la presión de descarga del PACK vuelva a su valor normal. Cuando los valores de presión están por debajo del umbral de activación, la válvula de derivación vuelve a la posición de regulación de temperatura normal, ver Figura 25.

Los diferentes componentes y elementos citados en la sección anterior se pueden identificar en el diagrama de la Figura 30. Los diferentes sensores presentes en la unidad de suministro de aire se identifican mediante los círculos de color amarillo.

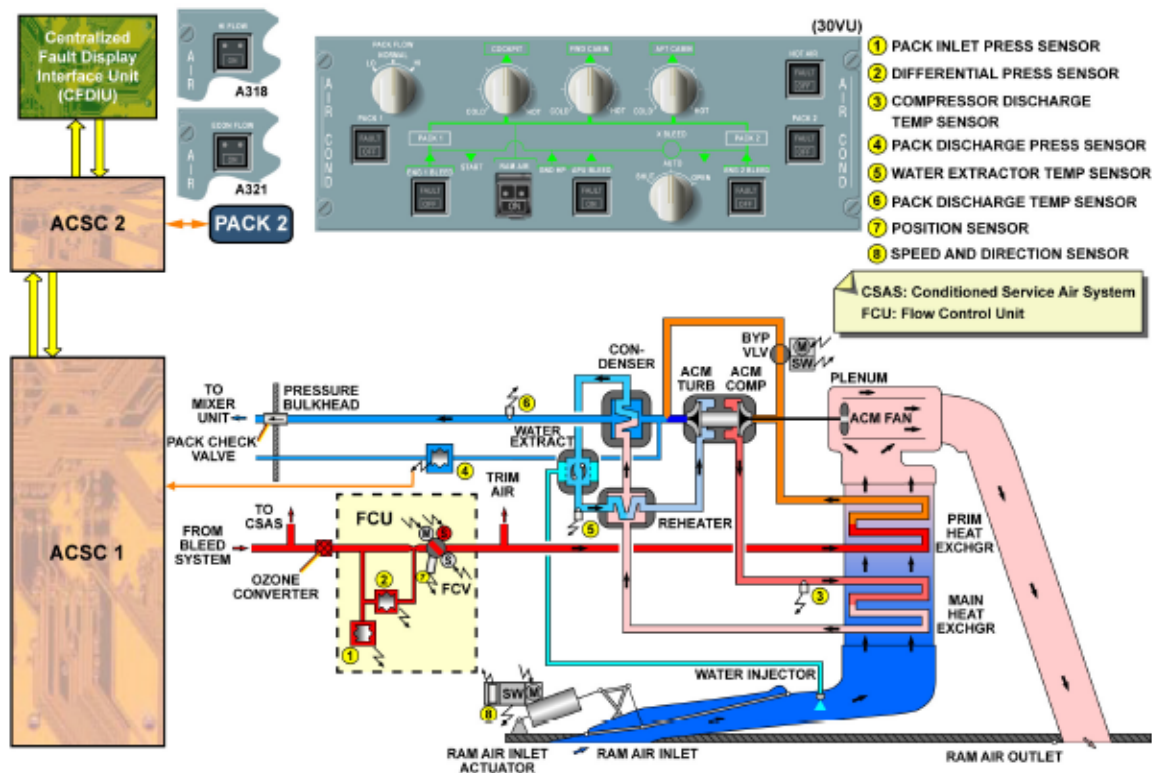


Figura 25. Elementos y componentes de una unidad PACK (AIRBUS, 2006).

3.2.7 Termografía

La termografía es una técnica que permite medir y determinar a distancia, la distribución de temperaturas en un cuerpo a través de la detección y cuantización de radiación infrarroja que se emite. La termografía está basada en la medición de la distribución de energía térmica radiante emitida desde una superficie objetivo y convertida a un mapa de diferencias de intensidad de radiación o termograma. Es por lo anterior que la termografía requiere la comprensión de calor, temperatura y las diferentes formas de transferencia de calor (Aldana, 2017).

La energía térmica se encuentra presente en el funcionamiento de todas las máquinas, por lo tanto, la temperatura se puede considerar un parámetro clave con el cual controlar el rendimiento, conocer la condición de los equipos y realizar un diagnóstico en problemas de la maquinaria. La termografía infrarroja es ideal para aplicaciones de monitoreo de temperatura, ya que proporciona imágenes térmicas completas de un sistema o elemento sin necesidad de contacto físico, proporciona los resultados en muy corto tiempo y requiere poca configuración de la instrumentación. Para el uso de este tipo de técnica es importante determinar qué puede ser visualizado con las cámaras termográficas, teniendo en cuenta que la radiación de energía de los materiales depende de la emisividad del material y la temperatura a la que se encuentren (Aldana, 2017).

Los ensayos mediante termografía constituyen una actividad compleja en relación con la física misma empleada para la medición, la existencia de transferencia de calor entre el componente observado y el medio en el que se encuentra, la complejidad que el elemento de interés puede presentar y la existencia de fuentes de calor externas o focos calientes ajenos al sistema (Balageas, 2007). El proceso de medición termográfico es la sinergia entre tres aspectos:

- El operador y el equipo de medición para realizar la termografía (Personal calificado y certificado junto a las características metroológicas de la cámara)
- Naturaleza del sistema observado y del medio ambiente circundante (Materiales, propiedades térmicas y mecánicas, formas, tamaños, estructuras, parámetros operacionales, temperatura del ambiente, humedad y características de medio circundante)

- Modelamiento térmico de los procesos de transferencia de calor (Procesos de transferencia por radiación, convección, conducción y fuentes de calor presentes en el medio o que interactúan con el sistema objeto de estudio.

Dependiendo de las necesidades y alcance que tenga la inspección se puede emplear diferentes métodos para la aplicación de termografía infrarroja. Se puede clasificar en dos tipos principales, cuantitativa o cualitativa y activa o pasiva.

Termografía Cuantitativa: Este tipo de técnica requiere determinar un valor de la temperatura con el cual se pueda evaluar la gravedad de la condición de un componente para una condición determinada. El valor de temperatura se determina mediante la comparación del objetivo con la de equipos en un servicio de operación similar o datos de referencia de operación. Se tiene que, para superficies con alta emisividad, los valores de temperatura y diferenciales de temperatura tienen una alta fiabilidad. Mientras que el análisis de objetivos con baja emisividad no asegura la fiabilidad de los valores de temperatura y diferenciales de temperatura.

La termografía comparativa cuantitativa es un método poderoso para determinar las temperaturas aproximadas de máquinas, sistemas y componentes. Como efecto de la naturaleza de la física de la termografía infrarroja, en la que se involucra la emisividad, reflectividad y transmisividad del objeto como del medio, es muy difícil determinar con precisión las temperaturas reales de un componente en el campo, razón por la cual las estimaciones de los diferentes parámetros del fenómeno se pueden realizar fácilmente y obtener la temperatura aproximada de un componente o sistema de estudio, que en muchos casos es más que suficiente para determinar la gravedad de una condición adversa que se esté presentando.

Para este tipo de mediciones se pueden emplear estimaciones rápidas de parámetros como emisividad (obtenida por experiencia y/o literatura), temperatura aparente reflejada y distancia, los cuales son introducidos en la cámara de termografía por infrarrojos y de esta forma hallar un valor de temperatura muy cercano al real.

Termografía cualitativa: En esta técnica de medición se compara el patrón térmico de un componente de estudio, con la de un componente idéntico o similar bajo las mismas condiciones de funcionamiento sin valores de temperatura específicos para cada uno de

los patrones. Es una técnica sumamente rápida y fácil de aplicar, no requiere de ajustes adicionales a la cámara de testeo para compensar los efectos de las condiciones ambientales, atmosféricas o la emisividad de las superficies. Sin embargo, aunque el método permite identificar las diferencias de temperaturas y los patrones térmicos, no proporciona un nivel de gravedad de una condición de operación adversa del componente.

Es la técnica más utilizada en diferentes industrias, pues es eficaz en la identificación de anomalías, conexiones eléctricas calientes indeseables, puntos calientes en aparatos eléctricos y electrónicos, fugas y bloqueos en equipos de intercambio de calor y fugas de líquidos y fluidos en recipientes a presión, tuberías y válvulas.

Termografía Activa: En las aplicaciones de termología activa se estimula la superficie del material con una fuente de calor externa, como resistencias calefactoras, lámparas halógenas, rayos UV, corriente eléctrica o cualquier otro estímulo externo. Se emplea cuando los elementos no producen calor por sí mismos, se encuentran en reposo o hacen parte de un mecanismo sin transferencia de calor asociado.

Termografía Pasiva: En los casos donde se aplica termografía pasiva, la radiación captada por la cámara es producida o emitida de manera autónoma por el objeto bajo inspección sin la necesidad de un estímulo externo. La radiación emitida, generalmente es producto de procesos de transferencia de calor por conducción, convección o radiación fruto de rozamiento mecánico, movimiento mecánico continuo, fluidos en movimiento, corriente eléctrica, o cualquier otro procesos eléctrico o mecánico que se encuentre presente o relacionado con el componente de análisis.

La elección de una de las técnicas depende de la aplicación, el alcance establecido para la inspección y los resultados que se esperan obtener, al igual que la precisión requerida por la aplicación. La termografía pasiva tiene un mayor campo de acción en el monitoreo de condición de procesos metalúrgicos, eléctricos, neumáticos, mecánicos, diagnóstico médico y construcciones civiles. Mientras que, la termografía activa es mayormente utilizada en la caracterización y determinación de espesores de materiales, análisis de defectos superficiales y subsuperficiales como grietas, poros, delaminaciones y cuantificación precisa de daños.

Tipos de inspecciones – Directas e Indirectas: Dependiendo de la presencia de aislantes térmicos entre los puntos calientes se puede considerar emplear mediciones directas o indirectas. De esta forma cuando no hay aislamiento térmico o es muy pequeño entre el punto caliente y el punto de toma, en la termografía infrarroja se emplea la medida directa; mientras que en cuando la medida indirecta se presenta cuando hay un significativo aislante térmico entre el punto de adquisición de datos de la termografía roja y el punto caliente.

Aspectos importantes en la toma de datos para termografía infrarroja: Para la toma de datos de forma adecuada, precisa y eficaz que permita un análisis adecuado de la información recolectada por termografía infrarroja se deben tener en cuenta algunos aspectos técnicos básicos como los siguientes:

- *Selección de la paleta de color:* La paleta de colores suministra un color superpuesto a la imagen real del sistema analizado de forma que se pueden identificar la isotermas y los diferentes gradientes de temperatura. Existen diferentes paletas de colores para la termografía infrarroja, ver Figura 26, y entre ellas se destacan tres citadas a continuación:
 - *Paleta hierro (Iron):* Comúnmente la más empleada por presentar ventajas como una buena relación entre la definición espacial (capacidad de distinguir y reconocer los objetos de la escena) y la sensibilidad termal (capacidad de identificar los gradientes de temperatura presentes).
 - *Paleta arcoíris (Rainbow):* Otorga una muy buena definición y sensibilidad en la identificación de temperaturas en relación con otras paletas, pero se pierden detalles y definición espacial de la escena, en otras palabras, la facilidad de reconocer los elementos y encontrar pequeños detalles se encuentra reducida. Además, es mucho más complejo enfocar la escena para que se puedan observar patrones de temperatura legibles.
 - *Paleta en escala de grises (Black & White):* Las imágenes que se pueden captar mediante esta paleta no son estéticamente llamativas, sin embargo, es sumamente útil para observar detalles espaciales en una imagen y distinguir sin mayor dificultad los objetos de la escena.



Figura 26. Paletas de colores disponible en cámaras termográficas (Outdoors-Bay, 2019).

- **Enfoque:** Obtener buenas imágenes durante el proceso de adquisición de datos mediante termografía, se requiere que la cámara realice un enfoque térmico sobre el objeto de estudio, esto con el fin de obtener buenos resultados ya que las imágenes fuera de foco presentan temperaturas incorrectas. En la Figura 27 se observa una diferencia de $12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el punto más caliente del objeto examinado como efecto del problema de enfoque al momento de efectuar la captura.

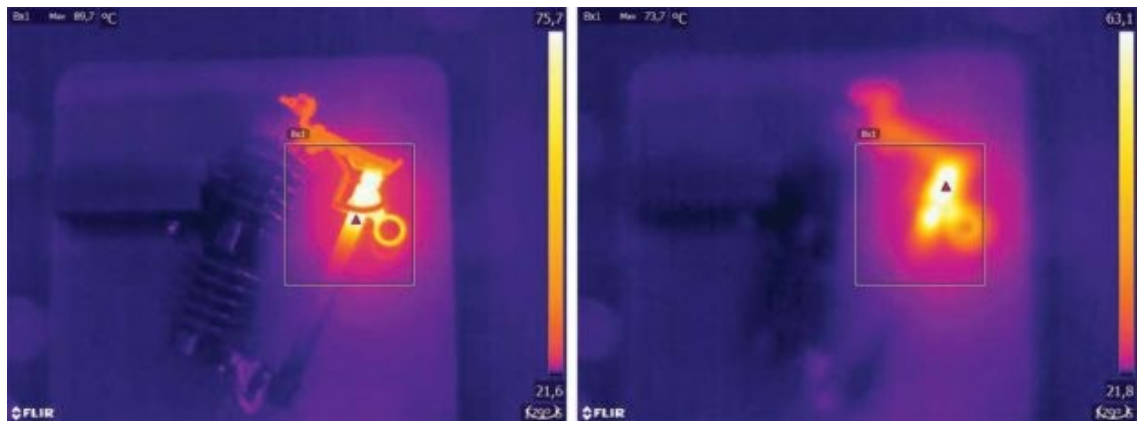


Figura 27. Captura termográfica con enfoque y desenfoque (Heymans, 2019).

- **Resolución térmica:** La importancia de la resolución radica en que contar con un mayor número de píxeles permitirá distinguir más detalles en las capturas efectuadas y facilitar la identificación de problemas y discrepancias en los objetos de estudio al momento de analizar los datos. Una resolución mayor permite medir objetivos más pequeños, distinguir detalles a mayores distancias que de otra forma podrían pasar desapercibidos, ver Figura 28.



Figura 28. Comparación de imágenes del mismo sistema a diferentes resoluciones (FLIR, test-meter.co.uk, 2019).

- *Rango de temperatura:* En las cámaras portátiles no es posible elegir cuanto tiempo y, por lo tanto, la cantidad de radiación que llega al sensor de la cámara. Por esta razón, se debe seleccionar un rango de temperatura apropiado que coincida con la cantidad de radiación incidente. Al seleccionar un rango de temperatura que es demasiado bajo para la radiación emitida, la imagen se sobresaturará, ya que los objetos con temperaturas más altas emiten más radiación infrarroja. Si al contrario se selecciona un rango que es demasiado alto, la imagen térmica se verá subexpuesta, ver Figura 29.



Figura 29. Imágenes termográficas con rangos de temperatura de -20 a +120°C (izquierda), 0 a 650 °C (centro) y +250 a +1200°C(derecha). Las demás configuraciones de la cámara no cambian (Heymans, 2019).

- *Temperatura aparente reflejada:* Es la temperatura no compensada que es leída por la cámara de los objetos alrededor que reflejan la radiación hacia el elemento de interés. Este tipo de temperatura comprende las emisiones de radiación del objeto más la reflejada por el ambiente alrededor y es importante tener presente el concepto al momento de tomar el termograma porque puede incurrir en la toma de medidas incorrectas, generalmente mayores que las reales.
- *Emisividad del material:* Los materiales que tienen un alto valor de emisividad son mucho más fáciles de interpretar y medir, mientras que los materiales con valores de emisividad de menor valor pueden reflejar en mayor medida la radiación procedente del medio y no permiten garantizar que el diagnostico corresponda a la naturaleza real del fenómeno que compromete el objeto de análisis y el termograma no sea fiable. En la Figura 30 se observa cómo la cinta que se encuentra a la misma temperatura que la lata, aparenta estar a una temperatura mayor al emitir una mayor cantidad de radiación como efecto de la emisividad del material del cual se encuentra hecha.

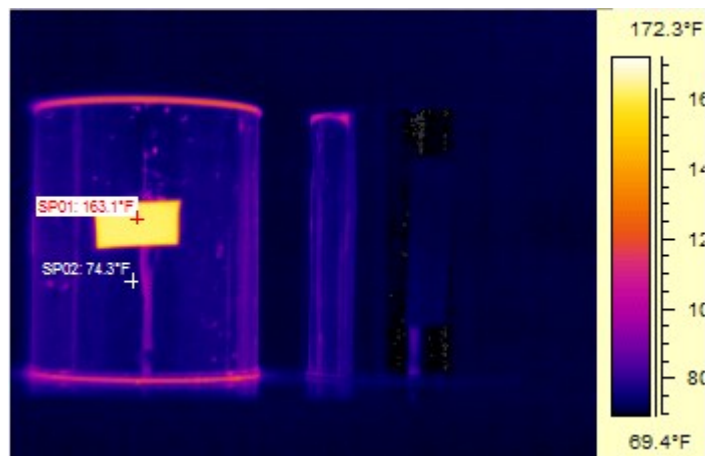


Figura 30. Influencia de la emisividad de los materiales en el diagnostico mediante termografía infrarroja (FLIR, FLIR, 2019).

- *Efectos de distancia y tamaño:* Las cámaras termográficas permiten encontrar puntos calientes a grandes distancias, pero no siempre es posible medir su temperatura con precisión, y es necesario acercarse lo suficiente al elemento para medir su temperatura. En la Figura 30 se comparan dos termogramas para un mismo sistema

tomado desde una distancia de 1 metro y 3 metros, se evidencia que hay un cambio en los rangos de temperatura de los dos puntos de interés, siendo los valores de temperatura reales los tomados a menor distancia que corresponden a la imagen de la izquierda.

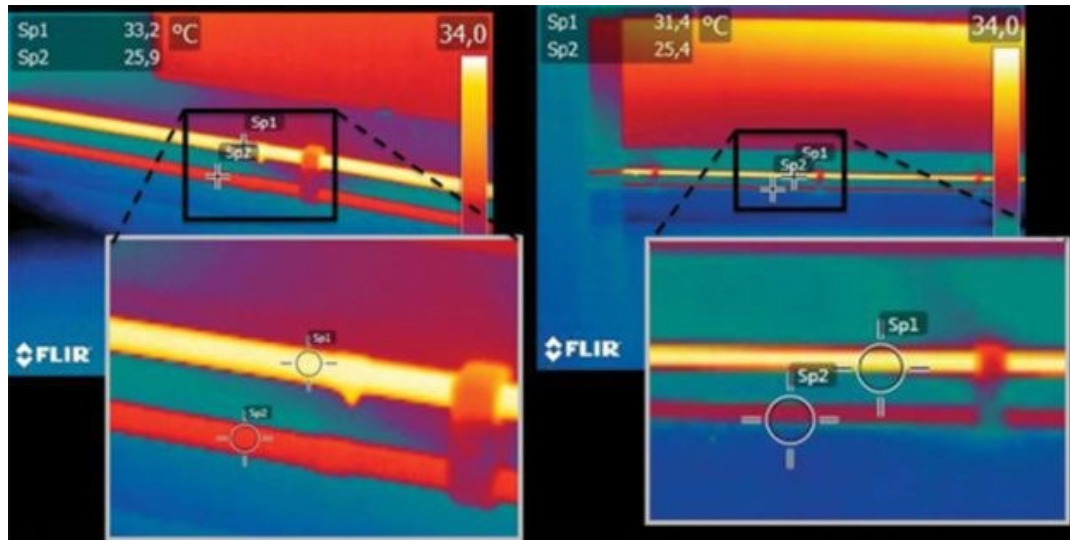


Figura 31. Cambios en la temperatura media debido a la distancia desde el punto de medición y el objeto de interés (Heymans, 2019).

3.2.8 Marco legal

El trabajo de investigación se soporta en las regulaciones establecidas por diferentes entes regulatorios involucrados tanto en los ensayos no destructivos como en regulaciones aeronáuticas que aplican a nivel internacional y nacional. En la Tabla 5, se encuentra listada la normatividad ASNT (American Society for Nondestructive Testing), ASTM (American Society for Testing Materials, FAA (Federal Aviation Administration), ISO (International Organization for Standardization), además se detallan la reglamentación militar y la Unidad administrativa de la aeronáutica civil (UAEAC), aplicable al protocolo diseñado.

Tabla 5. Normatividad aplicable al protocolo de inspección.

Entidad	Norma	Descripción
ASNT	ASNT SNTTC 1A	Práctica recomendada - Calificación y Certificación de Personal en Pruebas No Destructivas

Tabla 5. Normatividad aplicable al protocolo de inspección.

Entidad	Norma	Descripción
ASTM	ASTM E1934-99a	Prácticas estándar para medida y compensación de emisividad usando radiómetros infrarrojos
	ASTM C1934-99a	Guía estándar para examinar equipos eléctricos y mecánicos con termografía infrarroja
	ASTM E11316-16a	Terminología estándar para pruebas no destructivas NDT
FAA	14 CFR Part 145	Asegura que los programas, sistemas y métodos de cumplimiento previstos sean revisados, evaluados y probados a fondo
ISO	ISO 13372:2004	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas Vocabulario
	ISO 133741:2003	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Procesamiento de datos, la comunicación y presentación - Parte 1: Reglas generales
	ISO 133742:2007	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Procesamiento de datos, la comunicación y presentación - Parte 2: Procesamiento de datos
	ISO 13379:2003	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Directrices generales para la interpretación de datos y las técnicas de diagnóstico
	ISO 13380:2002	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Directrices generales sobre el uso de los parámetros de rendimiento.
	ISO 133811:2004	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Pronósticos - Parte 1: Reglas generales
	ISO 17359:2003	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Directrices generales
	ISO 184341:2008	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Termografía - Parte 1: Procedimientos generales
	ISO 184363:2008	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Requisitos para la calificación y evaluación de personal - Parte 3: Requisitos para los organismos de formación y el proceso de formación
	ISO 184361:2004	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de las máquinas - Requisitos para la formación y titulación del personal - Parte 1: Requisitos para los organismos de certificación y el proceso de certificación
ISO 184367:2008	Condiciones de vigilancia y diagnóstico de máquinas - Requisitos para la calificación y evaluación de personal - Parte 7: Termografía.	

Tabla 5. Normatividad aplicable al protocolo de inspección.

	ISO/DIS 10878	Ensayos no destructivos - Termografía infrarroja - Vocabulario
	ISO 9712:2012	Ensayos no destructivos – Calificación y certificación de personal para END.
UAEAC	CI-5103-082-11 (Review 2010)	Requisitos que cumplir y los procedimientos que deberán seguir los Talleres Aeronáuticos para obtener su Certificado de Funcionamiento de Taller Aeronáutico de Reparaciones (TAR) / Taller Aeronáutico de Reparaciones en el Extranjero (TARE), y las categorías relacionadas

Fuente: Elaboración propia.

4. Metodología

Le modelo de ejecución planteado para el desarrollo y ejecución del proyecto, como estrategia de ejecución y orientado con los objetivos planteados en la anterior sección, consta de diferentes pasos que se muestran a continuación.

En primer lugar, se realizó una descripción detallada de los sistemas neumáticos de interés, es decir, las unidades neumáticas y de aire acondicionado PACKS haciendo énfasis en las juntas y uniones de las diferentes conexiones. Con la finalidad de garantizar fuentes fiables y datos técnicos correctos de los sistemas de la aeronave A320 se opta por tomar como referencia el manual de mantenimiento de la aeronave AMM (por sus siglas en inglés Aircraft Maintenance Manual). En este documento se encuentra la descripción de los sistemas como las diferentes tareas de mantenimiento que se deben efectuar bajo una condición dada y es entregado por el fabricante, en este caso Airbus. De igual forma se encuentra aprobado bajo las auditorias de las diferentes autoridades aeronáuticas que regulan las operaciones de las diferentes aeronaves.

Del manual anteriormente citado se extrajo información del capítulo 21, dedicado al sistema de aire acondicionado y presurización de la aeronave. El capítulo cuenta con diagramas del sistema y los componentes que lo conforman, la descripción y funcionamiento de los elementos listados, al igual que los parámetros de operación correspondientes. Es entonces que partiendo de la información disponible en el manual de mantenimiento se realiza una recopilación de descripciones que sean de utilidad para el conocimiento del sistema y la formulación del protocolo de inspección mediante termografía infrarroja.

Los conceptos e información referente a la aplicación de termografía se extraerán de recursos físicos y digitales referentes a implementación de inspecciones mediante

termografía infrarroja relacionada con la industria aeronáutica y aeroespacial, protocolos de inspección en mantenimiento predictivo de sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos y neumáticos, inspección termográfica y ensayos no destructivos.

Por último, se plantea y desarrolla el protocolo de inspección enfocado en la identificación de fugas, considerando los parámetros propios de una inspección aeronáutica y los relacionados con la ejecución correcta y adecuada de termografía, garantizando de esta forma el cumplimiento de la normatividad aeronáutica que aplican a las aeronaves como la adquisición correcta de datos y gradientes de temperatura presentes en los sistemas de interés. De igual forma se consignan los requerimientos con relación al personal encargado de la realización de las inspecciones como los parámetros y características a considerar en la adquisición de datos con la cámara termográfica.

Ya con el procedimiento planteado se procederá a mostrar la efectividad de este en el campo, realizando una prueba de inspección de fugas en las unidades de aire acondicionado. La prueba del protocolo se ejecutará a la par con el procedimiento actual de inspección pues a pesar de ser una actividad crítica dentro del plan de mantenimiento del sistema de presurización y aire acondicionado no se cuenta con una gran disponibilidad de aeronaves en servicios de mantenimiento, que, para el momento de desarrollo del proyecto, tengan planteado un proceso de inspección de fugas de dicho sistema.

A partir de la prueba del protocolo de inspección se plantean realizar las anotaciones y cambios que permitan mejorar la propuesta y permita la consecución de una herramienta de inspección fiable en la detección de fugas de las unidades de aire acondicionado PACKS de la aeronave de transporte comercial Airbus A320.

5.Resultados

5.1 Procedimiento de inspección para el sistema neumático de las unidades PACKS mediante termografía infrarroja

El procedimiento se desarrolla bajo los lineamientos y guías de ASTM para la inspección mediante termografía infrarroja.

5.1.1 Título

Inspección del sistema neumático de las unidades PACKS de la aeronave Airbus A320 mediante termografía infrarroja

5.1.2 Objetivo

Identificar las fugas de las conexiones, juntas y componentes que componen las unidades de suministro de aire acondicionado PACKS de la aeronave Airbus A320 de forma ágil, rápida y segura, teniendo como base los lineamientos de ASTM para la ejecución de procedimientos de inspección mediante termografía.

5.1.3 Alcance

Con base en el análisis del sistema neumático, la criticidad de los sistemas y los riesgos presentes para el personal de mantenimiento en la ejecución de los procedimientos de inspección actuales se centran en el procedimiento:

- Unidades de suministro de aire PACKS

5.1.4 Documentos técnicos de referencia

- **Estándar ASTM C1934-99a Guía estándar para el examen de equipos eléctricos y mecánicos mediante termografía infrarroja**

El propósito de una inspección mediante termografía infrarroja es identificar los hallazgos y/o anomalías en un equipo mecánico y/o eléctrico. Esta guía puede ser usada para especificar los parámetros de la inspección de dispositivo eléctrico y mecánico, así mismo puede ser usado por un termógrafo para el desarrollo de dichas inspecciones.

Esta guía involucra el uso del equipo y los materiales en presencia de calor, equipo en movimiento y/o que se encuentre eléctricamente energizado. También se especifica el tipo de contenido cualitativo y cuantitativo que debe tener el documento desarrollado para la evaluación de los equipos. Provee algunas hipótesis de las causas de las anomalías encontradas.

- **Estándar ASTM E19933-99^a Prácticas estándar para la medida y compensación para la emisividad usando radiómetros de imagen infrarroja**

Esta práctica cubre los procedimientos de medida y compensación de emisividad para la medida de la temperatura de la superficie de su objeto cuando se emplean medidores de radiación infrarroja en presencia de calor.

- **Estándar ASTM E1316-16^a Terminología estándar para pruebas no destructivas NDT**

Los términos que se describen en este estándar tienen como objeto usar de forma uniforme y consistente los diferentes términos que se emplean en la inspección no destructivas que aseguren un claro entendimiento e interpretación de todo el estándar, incluyendo la termografía infrarroja.

5.1.5 Responsabilidades y calificación del personal

Ejecutar la inspección de los ductos, juntas y componentes de las unidades PACKS de las aeronaves mediante técnica de termografía. Verificar las imágenes registradas, analizarlas y diligenciar los formatos de inspección pertinentes.

Calificación: Ingeniero NDT en termografía Nivel I

5.1.6 Materiales de los componentes

Los diferentes componentes y elementos que constituyen las unidades PACKS de las aeronaves A320 abarcan una variedad de materiales considerable. Es por lo anterior que se listan los rangos de emisividad en los cuales se encuentran dichos materiales y que son de utilidad en el análisis de las imágenes termográficas obtenidas durante la puesta en marcha e inspección del sistema, ver Tabla 6.

Tabla 6. Lista de emisividades de los materiales de las unidades PACKS. (Abderrahmane, D., & Ali, D. (2016).

Superficie medida	Emisividad	Superficie medida	Emisividad
METALES		Hierro	
Aluminio		Oxidado	0,5 - 0,9
Oxidado	0,2 - 0,4	Herrumbrado	0,5 - 0,7
Aleación A3003		Hierro fundido	
Oxidada	0,3	Oxidado	0,6 - 0,95
Rugosa	0,1 - 0,3	No oxidado	0,2
Bronce		Fundido	0,2 - 0,3
Bruñido	0,3	Hierro forjado	
Oxidado	0,5	Mate	0,9
Cobre		Plomo	
Oxidado	0,4 - 0,8	Áspero	0,4
Tablero de conexiones eléctricas	0,6	Oxidado	0,2 - 0,6
Haynes		Molibdeno	
Aleación	0,3 - 0,8	Oxidado	0,2 - 0,6
Inconel		Niquel	
Oxidado	0,7 - 0,95	Oxidado	0,2 - 0,5
Pulido con chorro de arena	0,3 - 0,6	Platino	
Electropulido	0,15	Negro	0,9

5.1.7 Técnica usada

Inspección mediante termografía directa (posterior remoción de los paneles del fuselaje), pasiva (con las unidades en funcionamiento) y cualitativa y cuantitativa.

5.1.8 Equipo

Cámara termográfica FLIR T530 con MSX, UltraMax, lente 24, resolución de 320 x 240, rango de temperatura de -20°C a 650°C, ver Figura 32.



Figura 32. Cámara termográfica FLIR T530. Fuente propia.

5.1.9 Descripción del ensayo

Para el desarrollo del ensayo e inspección de las unidades PACKS se hace necesario contar con una etapa PREOPERACIONAL y OPERACIONAL. En la primera se lista de forma ordenada los pasos de la preparación de la zona de muestreo, los requerimientos aeronáuticos necesarios por regulación. Mientras que en la segunda etapa se listan los pasos para la ejecutar la toma de los termogramas de los elementos de interés de acuerdo con los requerimientos de los documentos técnicos de referencia de ASTM.

PREOPERACIONAL

- **Paso 1:** Revisión de elementos de protección personal EPP.
- **Paso 2:** Revisión de la orden de trabajo programada y asignación al usuario que ejecutará el ensayo en el sistema de gestión de actividades de mantenimiento.
- **Paso 3:** Revisión de los registros de tendencia térmica de los elementos a inspeccionar.
- **Paso 4:** Acceso a manuales y documentos de la aeronave que sean requeridos para el desarrollo de la inspección, acordes a la regulación de la empresa.
- **Paso 5:** Acceso al formato estandarizado para el desarrollo de la inspección de fugas en los ductos, juntas y componentes de las unidades de suministro de aire PACKS de la aeronave Airbus A320.

- **Paso 6:** Acceso a cámara termográfica y demás herramientas necesarias para el desarrollo del ensayo
- **Paso 7:** Verificación de fechas de calibración de equipos de inspección (cámara termográficas), que serán empleados en la ejecución de la inspección.

OPERACIONAL

- **Paso 8:** Remoción de paneles de fuselaje, con base a las directrices de la orden de trabajo y manuales de mantenimiento.
- **Paso 9:** Inspección visual por condición general de la unidad
- **Paso 10:** Toma de termogramas y adquisición de imágenes infrarrojas:
 - Establecer el rango de temperaturas de acuerdo con la recomendación de los históricos de inspección.
 - Comprobar los reflejos para garantizar la posición idónea de muestreo.
 - Comprobar la resolución del puntero de cámara, tamaño y detalle de zona a inspeccionar.
 - Enfocar imagen de elemento.
 - Medir y compensar los parámetros de la cámara empleada (emisividad y temperatura reflejada) de acuerdo con las recomendaciones de ASTM.
 - Guardar registros de imágenes visibles y térmicas.
- **Paso 11:** Analizar registros en búsqueda de fallas y/o hallazgos en el sitio y/o *en oficinas móviles* y con el uso de computador (garantizar brillo y contraste de pantalla acordes a las necesidades visuales del inspector)
 - **No hay presencia de fallas**
 - Ejecutar acciones de cierre de documento de acuerdo con los requerimientos de orden de trabajo de inspección y manuales de la aeronave
 - Legalización de trabajo
 - Limpieza de área de trabajo, entrega de equipos y herramientas

- **Hallazgo de fallas**

- Generar orden de trabajo para ejecución de correcciones y reparaciones de la unidad
 - Acceso a los manuales de la aeronave que sean pertinentes para la corrección de fallas
 - Análisis de razón de falla
 - Corrección de fallas
 - Ejecutar nuevamente pasos de etapa operacional hasta conseguir condición de no presencia de fallas
-
- **Paso 12:** Generar los reportes requeridos para la legalización de la inspección

5.1.10 Interpretación de imágenes e indicadores

Para hacer la interpretación de los resultados se realiza una inspección visual de los termogramas en búsqueda de patrones anómalos en juntas y superficies de los ductos, componentes y juntas que no correspondan a la presencia de un tipo de material diferente que pueda presentar una emisividad diferente y por ende emita una temperatura diferente a la de la zona y alrededores.

Se considera la presencia de fallas cuando en las imágenes termográficas se encuentre una de las dos situaciones:

- **Filtración de agua:** Se evidencia un patrón anómalo de menor temperatura con forma no definida, ver Figura 32.

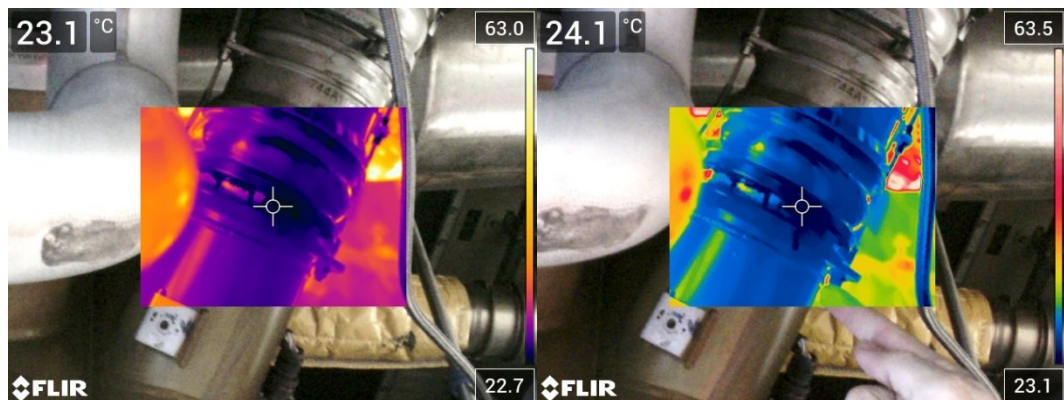


Figura 33. Identificación de fugas de agua en ductos de la unidad PACK. Fuente propia.

- **Fuga de aire:** Se evidencia un patrón anómalo de menor temperatura con una forma definida como perforación o separación de superficies de contacto de las juntas de los ductos, ver Figura 34.

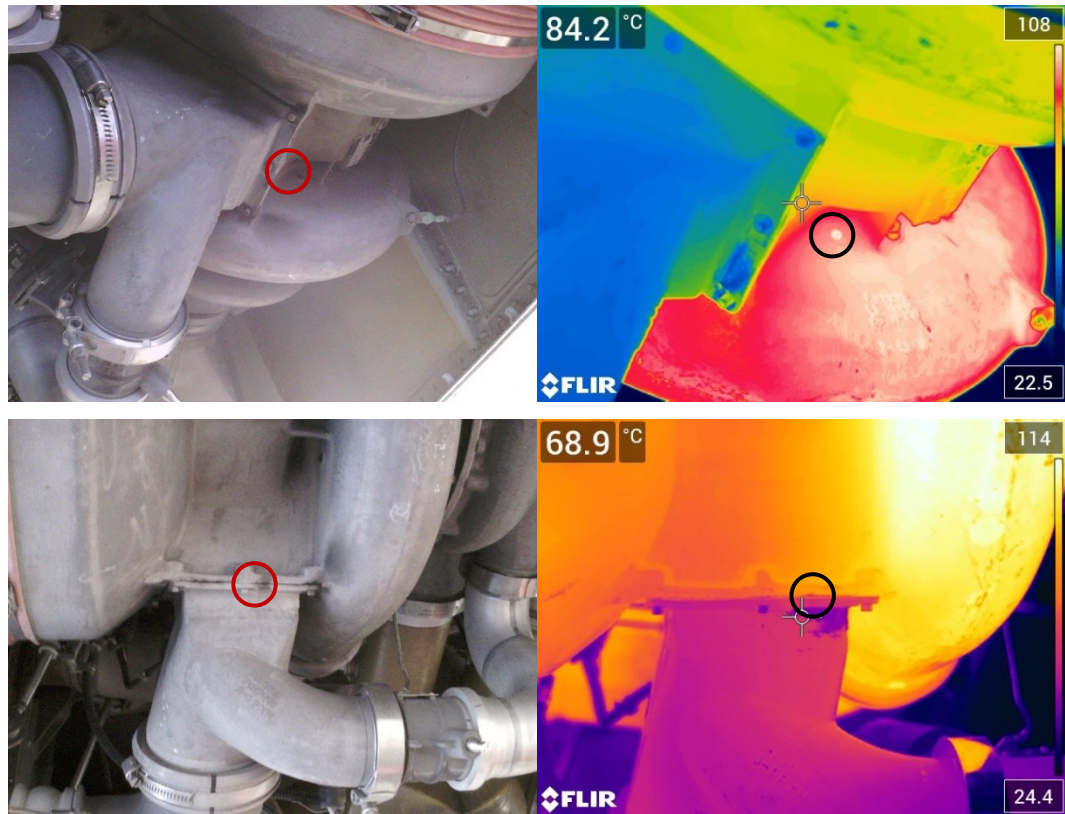


Figura 34. Identificación de fugas de aire en componente (imagen superior) y juntas (imagen inferior) de la unidad PACK. Fuente propia.

De no evidenciar ninguno de los patrones anteriormente mencionados se puede concluir que no existe una falla por fuga de aire o agua en los elementos, componentes o juntas de las unidades PACKS de la aeronave en inspección.

5.1.11 Normas de seguridad

Para la ejecución del ensayo se debe hacer uso de los elementos de protección personal y deberá cumplir con las normas de seguridad estipuladas por la empresa de aviación en la que se ejecutan las tareas de mantenimiento.

- El inspector utilizara los EPP adecuados para la ejecución de las tareas de mantenimiento (botas de seguridad, protección auditiva y gafas)
- El inspector se ubicará a una distancia prudente de la unidad PACK teniendo en cuenta el espacio, la geometría y la ubicación en la que se encuentran las unidades de suministro de aire.

5.1.12 Formato de inspección propuesto

Revisar **Anexo A** en la sección final del documento.

5.2 Prueba: Inspección de unidades PACKS empleando el procedimiento propuesto

A continuación, se muestran uno de los resultados obtenidos en la ejecución de una inspección en busca de anomalías del ducto de la unidad PACK 1 de la aeronave A320 asignada a verificación de fugas en juntas, ver Figura 34 y Figura 35.

Se concluye que la herramienta facilita la detección de fugas al lograr detectar una en una de las juntas, se evidencia la presencia de agua y se corrobora por el personal de mantenimiento que ejecuta su inspección con el procedimiento actual que tiene la empresa para la ejecución de la tarea de mantenimiento.

Se encuentra la necesidad de contar con un mecanismo de diligenciamiento del formato más ágil y rápido.

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DE LAS UNIDADES DE SUMINISTRO DE AIRE ACONDICIONADO PACK DE LA AERONAVE AIRBUS A320							
Departamento de ingeniería y mantenimiento							
INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA NDT						WO: Confidencial	
Fecha	07	Nov	2019	Equipo		FLIR T530	
Técnico	M. Gómez, C.Hoyos.			Expiración de calibración		15	Ene 2020
Licencia	Confidencial			S/N		E07661193	
Matricula aeronave	CC-CPF		Modelo	Airbus A320			
Motor	CFM		Modelo	56-5B4	S/N	N/A	
Temperatura ambiental	20°C			Material		Aleación Aluminio	
Humedad relativa	75%			Emisividad		0.2	
Distancia	1 m			Temperatura reflejada		24,1°C	
Ubicación	Zona	Estación	Observaciones ubicación				
	MRO	MDE	Bahía de PACKS – Carenado del vientre del fuselaje				
Elemento	PACK 1	P/N	N/A	S/N	N/A		
Observaciones: Se evidencia la presencia de suciedad y rugosidad en algunos de los ductos pertenecientes a la unidad. Se hace necesario evaluar cuales de los patrones anómalos son resultado de fugas o anomalías diferentes a la presencia de suciedad o rugosidad del elemento.							
Parámetros de calibración Intervalo de temperatura de 20 a 150°C Emisividad de 0,2							
Temperatura censada	24.1 °C			Hora	15:00		
Diferencia Temperatura	2°C			Firma	-		
Resultados		Fuga de agua		Orden de trabajo		Confidencial	
Clasificación	Anomalía	Nivel	1	Manual	Confidencial	Horas H	30 min
Manual de referencia Confidencial							
Diagnostico Se evidencia la presencia de una fuga de agua en la junta entre los ductos de la unidad. Se procede a verificar y comparar la caída den el caudal dentro de la unidad.							
Autoridad	_ UAEAC _ FAA _ EASA		BASE	Revisión 001	Fecha de revisión: 07 Nov 2019		

Figura 35. Formato de detección de anomalías por fugas de agua del ducto de la unidad PACK 1 (página 1). Fuente propia.


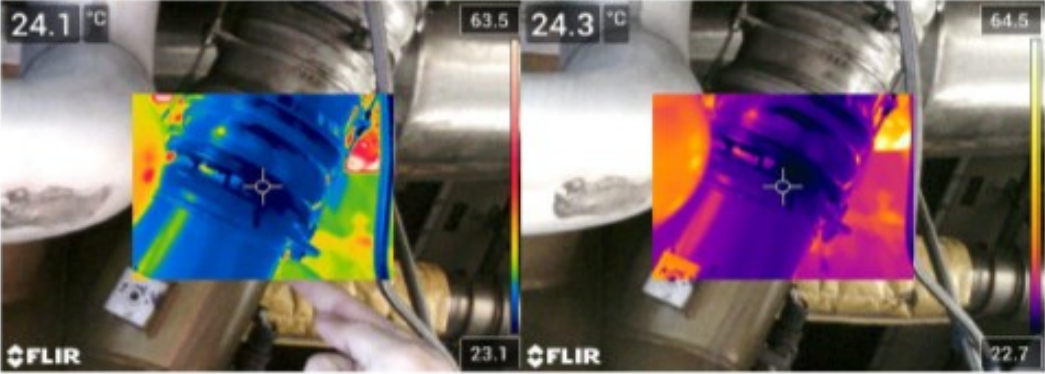
<p>ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DE LAS UNIDADES DE SUMINISTRO DE AIRE ACONDICIONADO PACK DE LA AERONAVE AIRBUS A320</p>
<p>Departamento de ingeniería y mantenimiento</p>
<p>Imagen elemento inspeccionado</p> 
<p>Imagen IR elemento inspeccionado</p> 
<p>Observaciones Presencia de anomalía debida a una fuga de agua en la junta del ducto, se procede a verificar reducción del caudal de la unidad en general.</p>
<p>Diagnostico Anomalía 1 – Fuga de agua</p>

Figura 36. Formato de detección de anomalías por fugas de agua del ducto de la unidad PACK 1 (página 2). Fuente propia.

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DE LAS UNIDADES DE SUMINISTRO DE AIRE ACONDICIONADO PACK DE LA AERONAVE AIRBUS A320							
Departamento de ingeniería y mantenimiento							
INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA NDT						WO: Confidencial	
Fecha	07	Nov	2019	Equipo		FLIR T530	
Técnico	M. Gómez, C.Hoyos.			Expiración de calibración		15	Ene 2020
Licencia	Confidencial			S/N		E07661193	
Matricula aeronave	CC-CPF	Modelo	Airbus A320				
Motor	CFM	Modelo	56-5B4	S/N	N/A		
Temperatura ambiental	20°C			Material		Aleación Aluminio	
Humedad relativa	75%			Emisividad		0.2	
Distancia	0.5 m			Temperatura reflejada		84°C	
Ubicación	Zona	Estación	Observaciones ubicación				
	MRO	MDE	Bahía de PACKS – Carenado del vientre del fuselaje				
Elemento	PACK 1	P/N	N/A	S/N	N/A		
Observaciones: Se evidencia la presencia de suciedad y rugosidad en algunos de los ductos pertenecientes a la unidad. Se hace necesario evaluar cuales de los patrones anómalos son resultado de fugas o anomalías diferentes a la presencia de suciedad o rugosidad del elemento.							
Parámetros de calibración Intervalo de temperatura de 20°C a 150°C Emisividad de 0,2							
Temperatura censada	84 °C			Hora	15:30		
Diferencia Temperatura	±10°C			Firma	-		
Resultados		Fuga de agua		Orden de trabajo		Confidencial	
Clasificación	Anomalía	Nivel	1	Manual	Confidencial	Horas H	30 min
Manual de referencia Confidencial							
Diagnostico Se evidencia la presencia de un patrón anómalo de menor temperatura entre la junta del ducto de salida del ventilador de la unidad. Se confirma la presencia de una fuga de aire a causa de separación de las superficies de contacto del ducto.							
Autoridad	UAEAC	FAA	EASA	BASE	Revisión 001	Fecha de revisión: 07 Nov 2019	

Figura 37. Resultados positivos en detección de anomalía por fuga de aire del ducto de la unidad PACK 1 (pagina 1). Fuente propia.

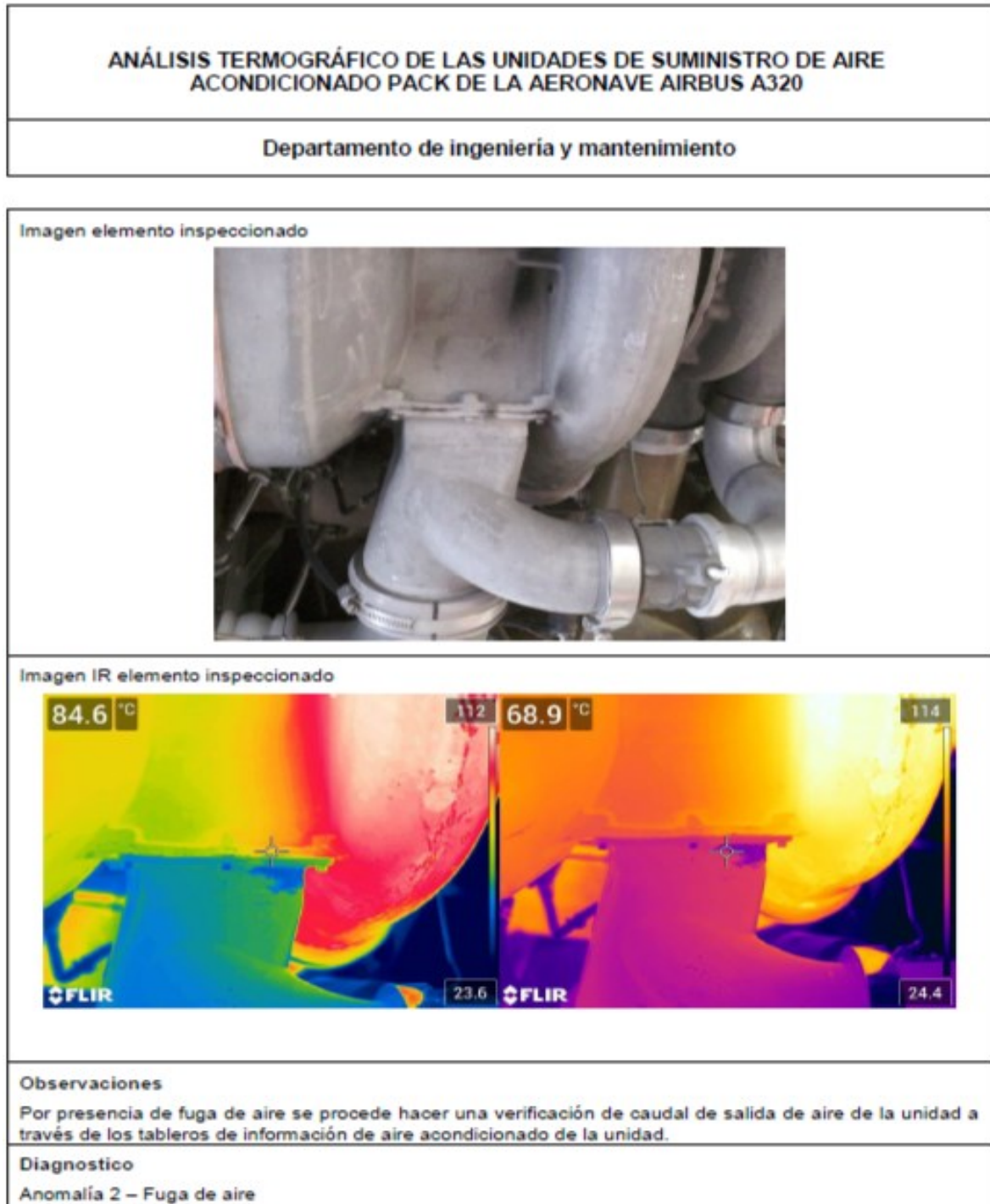


Figura 38. Resultados positivos en detección de anomalía por fuga de aire del ducto de la unidad PACK 1 (pagina 2). Fuente propia.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- En la actualidad no se presentan muchos estudios o análisis en relación con la inspección de sistemas neumáticos o aire acondicionado mediante el uso de termografía infrarroja. No obstante, casas fabricantes de equipos para desarrollo de termografía ofrecen equipos y planes de monitoreo de fugas de vapor o químicos en ductos de plantas de procesamiento industrial.
- Las unidades PACKS son parte importante de los sistemas de aire acondicionado de las aeronaves, de ahí radica la existencia de redundancia de unidades de generación de aire.
- La presencia de fugas y obstrucciones de las unidades PACKS conllevan a pérdidas de potencia y reducción de la eficiencia de los motores al aumentar el caudal de aire sangrado para mantener la temperatura de los compartimientos de cabina. De igual modo, un mal funcionamiento de las unidades pone en riesgo la integridad de las personas y la carga que se transporta en la aeronave.
- El procedimiento planteado facilita la identificación de fugas y anomalías en la estructura e integridad de las unidades y elementos que conforman una unidad de distribución de aire PACK, pues los patrones anómalos son mucho más fáciles de detectar en el espectro de luz que el equipo de inspección censa.
- El procedimiento planteado cumple con los requerimientos de trazabilidad de las entidades regulatorias de la aviación al presentar los pasos de forma lógica, ordenada y siguiendo las recomendaciones y lineamientos de entes como ASTM, esto facilita a los inspectores el trabajo de identificación de averías del sistema de aire acondicionado de la unidad.
- En relación con el desarrollo de un proceso de inspección mediante termografía infrarroja se puede concluir que se requiere experiencia para la identificación de anomalías, pues se puede cometer errores en la identificación de la causa de patrones anómalos de temperatura que el equipo termográfico entrega. Sin embargo, seguir las recomendaciones y pasos del procedimiento diseñado facilita la adquisición de termogramas de calidad en los cuales se pueda discernir

adecuadamente entre los efectos de cambios de material y emisividad de las anomalías debidas a fugas de aire y agua en los ductos y elementos de la unidad.

- A partir del análisis de los termogramas de la unidad se puede concluir que las fugas de agua presentan como una discontinuidad con patrón de temperatura inferior a la de sus alrededores. Por otro lado, las fugas de aire pueden presentar como discontinuidades con un patrón de temperatura mayor o menor, dependiendo de si es una perforación de un elemento o una separación de las bridas entre ductos.
- Con el uso de la termografía infrarroja y el procedimiento diseñado se reduce el riesgo de lesiones por quemadura en el personal técnico de mantenimiento. Esto pues, en la actualidad la búsqueda de fugas requiere la inserción de las manos en zonas con elementos a altas temperaturas para su localización mediante tacto, mientras que con el uso del procedimiento la distancia entre superficies calientes e inspector es mucho mayor y no se requiere la inserción de miembros o extremidades dentro de los ductos de la unidad para identificar anomalías en los componentes.
- El procedimiento desarrollado es novedoso en el medio que se desarrolló, pues a pesar de que la termografía ya ha sido empleada en la industria aeronáutica y aeroespacial hasta el momento no se ha empleado en la inspección de ductos, unidades neumáticas y de aire acondicionado. El procedimiento diseñado muestra un panorama favorable para la implementación de termografía en la inspección de este tipo de elementos en la industria de transporte aéreo como en otras industrias relacionadas con procesos de transporte de masa y energía en fluidos.

6.2 Recomendaciones

Para el desarrollo de inspecciones empleando el procedimiento diseñado se recomienda llevar un orden en la adquisición de los termogramas que facilite su análisis posterior y que recorra en totalidad la extensión de la unidad PACK inspeccionada.

Los patrones anómalos o discontinuidades pueden ser originados por fugas o daños en los elementos de la unidad y como efectos del cambio de emisividad de los materiales de los componentes de la unidad, presencia de agentes externos y corrosión. Es por lo anterior que se hace necesario que de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM E 1933 – 99a se cuenten con una base de datos de emisividad más robusta.

Durante la adquisición y análisis de termogramas se recomienda el uso de termografía cualitativa, eso pues para llevar a cabo un proceso de inspección mediante termografía cuantitativa se requiere de mediciones de temperaturas muy precisas y diferentes factores pueden llevar a la incurrencia de fallas y veracidad de los datos.

No es recomendado el uso de termografía activa en el proceso de inspección de la unidad PACK, esto pues los elementos emiten radiación como efecto de los procesos de transferencia de calor que se dan de forma natural por la circulación de aire sangrado a alta temperatura procedente de los motores o la unidad APU.

Se recomienda a las empresas que deseen implementar el procedimiento dentro de la inspección de sus aeronaves, llevar a cabo el registro y análisis estadístico de las anomalías que permita evaluar la criticidad de las fallas y facilite el análisis de causalidad para el mantenimiento de las aeronaves.

Como no fue posible llevar a cabo una gran cantidad de pruebas de inspección empleando el procedimiento diseñado, se recomienda realizar más inspecciones conjuntas que permitan aumentar los registros fotográficos y bases de datos que permitan que el personal de mantenimiento encargado de las inspecciones gane más experiencia en la identificación de fugas y de igual modo valide la efectividad del procedimiento.

7. Bibliografía

- Abderrahmane, D., & Ali, D. (2016). Detection of Electrical Faults with Infrared Thermography. *Journal of New Technology and Materials*.
- Aerocivil. (10 de Septiembre de 2019). *Mantenimiento RAC 43*. Obtenido de <http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/VERSION%20OCT%2031%202016/RAC%20%2043%20-%20Mantenimiento.pdf>
- AIRBUS. (01 de Noviembre de 2006). IPC, Illustrated Parts Catalog. Blagnac, Francia.
- AIRBUS. (11 de Febrero de 2011). Technical Training Manual M35 Line Mechanics (CFM 56) (Lvl 2&3) Air Conditioning. Blagnac, Francia.
- AIRBUS. (26 de Septiembre de 2019). *AIRBUS S.A.S*. Obtenido de <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family.html>
- Airlinerlist, & Marc-o-media. (26 de Septiembre de 2019). *Airlinerlist.com*. Obtenido de <https://www.planelist.net/types.html#a-320>
- Aldana, D. (2017). *Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC*. Bogotá: Departamento de Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia.
- Avdelidis, N., Hawtin, B., & Almond, D. (2003). Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. *NDT & E International*, 433-439.
- Aviación D*. (30 de Septiembre de 2019). Obtenido de <http://aviaciond.com/sistema-de-capitulos-ata100/>
- Aviationexplorer. (27 de Septiembre de 2019). *AviationExplorer.com*. Obtenido de http://www.aviationexplorer.com/a320_facts.htm

- Balageas, D. (2007). Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). *IV Conferencias Panamericana de END*, (pág. Buenos Aires). Buenos Aires.
- Capka, A., Vavilov, V., Rusnáková, S., Fojtl, L., Zaludek, M., & Mañas, L. (2017). Detecting Water in Composite Sandwich Panels by Using Infrared Thermography. *Materials Science Forum*, 516-521.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Fundamentos de transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill.
- Corigliano, P., Crupi, V., Epasto, G., E Guglielmino, & Risitan, E. (2015). Fatigue assessment by thermal analysis during tensile test on steel. *Procedia Engineering*, 210-218.
- Deane, S., Avdelidis, N., Ibarra, C., Zhang, H., Nezhad, H., Williamson, A., . . . Tsourdos, A. (2019). Application of NDT thermographic imaging of aerospace structures. *Infrared Physics & Technology*, 456 - 466.
- EcuRed*. (27 de Septiembre de 2019). Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Ondas_electromagn%C3%A9ticas
- FAA. (30 de Septiembre de 2019). *Stack Exchange Inc*. Obtenido de <https://aviation.stackexchange.com/questions/31292/why-do-airliners-have-pressure-bulkheads>
- FLIR. (24 de Septiembre de 2019). Obtenido de GF320 de FLIR utilizada para detectar fugas en instalaciones de biogás: <https://www.flir.com/es/discover/instruments/gas-detection/biogas-facilities/>
- FLIR. (29 de Septiembre de 2019). *FLIR*. Obtenido de <https://www.flir.com/discover/rd-science/use-low-cost-materials-to-increase-target-emissivity/>
- FLIR. (29 de Septiembre de 2019). *test-meter.co.uk*. Obtenido de <https://www.test-meter.co.uk/flir-e4-thermal-imaging-camera/>
- Freepng.es*. (30 de Septiembre de 2019). Obtenido de <https://www.freepng.es/png-jjomc5/download.html>
- GmbH, G. U. (28 de Septiembre de 2019). *Grüne Umwelt Technologien GmbH, innovations to save our planet*. Obtenido de <http://gut-systems.com/es/es-calefaccion-de-fotones-sector-inmobiliario.html>
- GmbH, I. (25 de Septiembre de 2019). *InfraTec*. Obtenido de <https://www.infratec-infrared.com/thermography/industries-applications/aerospace-industry/>

- Heymans, R. (29 de Septiembre de 2019). *EE Publishers* . Obtenido de <https://www.ee.co.za/article/the-secret-to-a-good-thermal-image-2.html>
- ITAérea. (10 de Septiembre de 2019). *ITAérea*. Obtenido de <https://www.itaarea.es/mantenimiento-aeronautico>
- Jaffery, Z., & Dubey, A. (2014). Design of early fault detection technique for electrical assets using infrared thermograms. *Electrical Power and ENERGY Systems*, 753-759.
- Meneses, W. (27 de Septiembre de 2019). *SlideShare*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/wameneses/ecuaciones-de-maxwell-91159352>
- Namkung, M., & Wincheski, B. (2016). NDT in the Aircraft and Space Industries. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.
- Oliviera, M., Cabrera, P., Bermúdez, W., & Hernández, A. (2011). *El impacto del transporte aéreo en la economía colombiana y las políticas públicas*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Outdoors-Bay. (29 de Septiembre de 2019). *OutdoorsBay.com*. Obtenido de <https://www.outdoorsbay.com/guides/new-flir-a-series-thermography-camera-affordable-and-compact-infrared-camera/>
- Ringegni, P. (2017). *Sistemas Neumáticos y sus aplicaciones en Aeronáutica*.
- Sarfels, J., Liebelt, F., Brockmann, M., & Gierlings, S. (2015). Thermal imaging ensures aircraft turbine quality . *Optik & Photonik*, 57-69.
- Teras Aviación*. (30 de Septiembre de 2019). Obtenido de <http://www.teras-lma.com/index.php/otra-info/sistema-ata-100>
- Wagner, M., & Norris, G. (2001). *Airbus A340 and A330*. St Paul, Minnesota: Zenith Press.
- Wensveen, J. (2007). *Air Transportation Management Perspective*. Burlington: Ashgate Publishing Company.
- Young, H., & Freedman, R. (2008). *Física Univeritaria Sears. Zemasnsky - Decimo segunda edición*. México: Pearson Education, Inc.

A. Anexo A: Formato de inspección para el protocolo de inspección de las unidades PACK

El formato de inspección desarrollado cuenta con las casillas necesarias para la redacción de la información pertinente al desarrollo de la inspección con el protocolo desarrollado. Además, permite registrar las anomalías y conclusiones del análisis visual desarrollado por el inspector encargado del desarrollo de la tarea de mantenimiento.

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DE LAS UNIDADES DE SUMINISTRO DE AIRE ACONDICIONADO PACK DE LA AERONAVE AIRBUS A320										
Departamento de ingeniería y mantenimiento										
INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA NDT								WO:		
Fecha	1	MM	AAAA	Equipo				4	5	
Técnico	2			Expiración de calibración				D	6	
Licencia	3	S/N				7				
Matricula aeronave	8		Modelo		10	S/N		12		
Motor	9		Modelo		11		S/N		13	
Temperatura ambiental	14				Material		17			
Humedad relativa			15		Emisividad		18			
Distancia			16		Temperatura reflejada		19			
Ubicación	Zona		Estación		Observaciones ubicación					
20		21		22		23		24		
Elemento			P/N				S/N		25	
Observaciones:										
26										
Parámetros de calibración										
27										
Temperatura censada				28		Hora				30
Diferencia Temperatura				29		Firma				31
Resultados				32		Orden de trabajo				33
Clasificación	34	Nivel		35	Manual		36	Horas H		37
Manual de referencia										
38										
Diagnostico										
39										
Autoridad	UAEAC FAA EASA		BASE		Revisión 001		Fecha de revisión: 07 Nov 2019			

**ANÁLISIS TERMOGRÁFICO DE LAS UNIDADES DE SUMINISTRO DE AIRE
ACONDICIONADO PACK DE LA AERONAVE AIRBUS A320**

Departamento de ingeniería y mantenimiento

Imagen elemento inspeccionado

40

Imagen IR elemento inspeccionado

41

Observaciones

42

Diagnostico

43

1. Fecha en la cual inicia el trabajo
2. Nombre del técnico que ejecuta el trabajo
3. Número de licencia otorgado al personal técnico por la Aerocivil
4. Orden de trabajo para la inspección
5. Nombre del equipo a ser usado
6. Fecha de vencimiento de calibración del equipo usado
7. Serie número del equipo usado
8. Número de matrícula de la aeronave ej: HK-XXX
9. Tipo de motor de la aeronave ej: V25XX
10. Modelo de la aeronave (esta información puede ser consultada en la página de la Federal Aviation Administration)
11. Modelo de los motores de la aeronave (esta información puede ser consultada en la página de la Federal Aviation Administration).
12. Serie número del avión (esta información puede ser consultada en la página de la Federal Aviation Administration).
13. Serie número de los motores de la aeronave (esta información puede ser consultada en la página de la Federal Aviation Administration).
14. Registro de temperatura ambiente
15. Registro de humedad relativa
16. Registro de distancia con el objeto a inspeccionar
17. Material a ser inspeccionado
18. Emisividad del material
19. Temperatura reflejada del material
20. Lugar donde se realiza la inspección ej: MRO (Maintenance Repair Operator)
21. Componente al cual se realizará la inspección ej: Pack 1
22. Estación donde se llevará a cabo la inspección ej: Medellín, Bogotá, Cali
23. Ubicación exacta en el avión donde se encuentra el elemento a inspeccionar
24. Parte número del elemento a inspeccionar
25. Serie número del elemento a inspeccionar
26. Registro de observaciones durante la inspección
27. Registro de parámetros del equipo durante la inspección
28. Temperatura censada por el equipo durante la inspección
29. Diferencial de temperatura durante la inspección
30. Hora exacta en la cual fue realizada la inspección
31. Registro de firma de la persona que realiza la inspección (Técnico)
32. Se debe registrar el resultado obtenido de la inspección
33. Orden de trabajo para realizar la inspección
34. Se debe registrar la condición encontrada ej: Anomalía, normal
35. Se registra el nivel de la anomalía ej: nivel1, nivel2, nivel3, siendo el nivel 1 el menos restrictivo.

36. Registrar el manual de mantenimiento usado en la inspección ej: AMM 25-XX-XX-XXX
37. Registrar el número de horas usadas en la ejecución de la inspección
38. En caso de presentarse anomalía en la inspección, debe relacionarse la referencia del manual para dicha corrección
39. Registrar la condición encontrada durante la inspección, siendo lo más concreto posible
40. Anexar imagen del componente a ser inspeccionado
41. Anexar imagen térmica del componente inspeccionado
42. Campo asignado para las recomendaciones según lo observado en la inspección
43. Campo asignado para de definición final de la anomalía ej: anomalía nivel2 fuga de aire.

B. Anexo B: Registro fotográfico de pruebas en búsqueda anomalías de la unidad de PACK 1

En las siguientes gráficas se da una descripción cualitativa de las termografías realizadas en el sistema de aire acondicionado de la aeronave; para ello, se realiza una comparación de la termografía con la imagen RGB. la columna # 1 muestra el termograma de los packs de la aeronave y la columna #2 su correspondiente imagen RGB. Las cuales no dan ningún indicio de anomalías en el sistema; Se evidencia en cada uno de los componentes del pack, valores continuos de temperatura los cuales se corresponden a distribuciones continuas en los colores, en estas figuras no se evidencia una transición abrupta entre los colores de los elementos del pack que indiquen una posible fuga. las imágenes que presentaron fugas fueron anexas en el formato de fugas.

Columna # 1

Columna # 2

