



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

**APLICACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE RAYOS X AL FUSELAJE DE  
AERONAVES**

**Línea de investigación:**

**Física nuclear y ambiental**

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

**Autor:**

Barreda Sánchez-Pachas, Evzen Jacob

**Asesora:**

Neri Lujan, Lidia

(ORCID: 0000-0003-0608-7058)

**Jurado:**

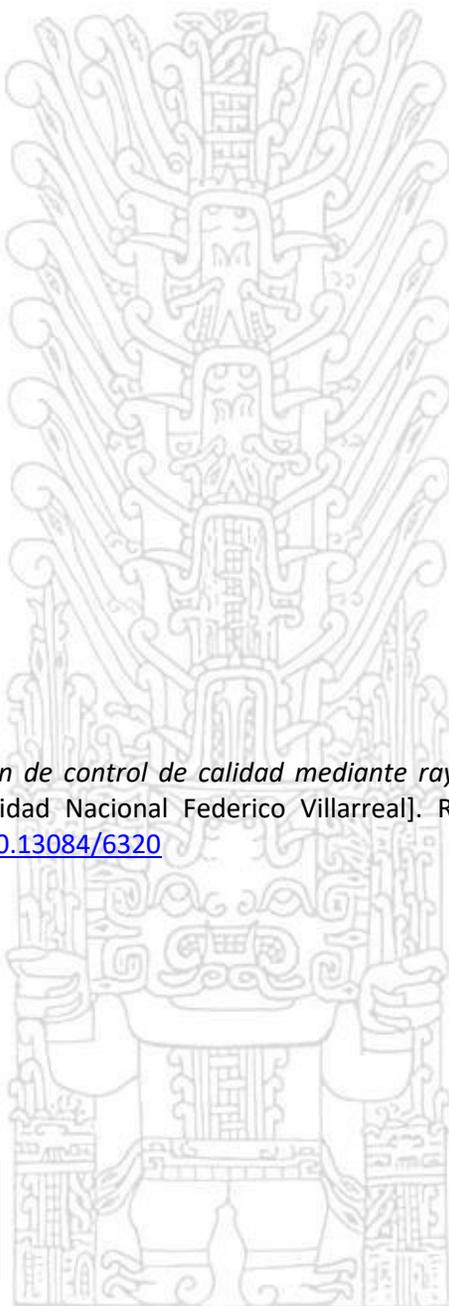
Aguilar Castro, Guillermo Santiago

Guzmán Calcina, Carmen Sandra

Mejía Cordero, Bernabé Alonso

**Lima - Perú**

**2021**



**Referencia:**

Barreda, E. (2021). *Aplicación de control de calidad mediante rayos X al fuselaje de aeronaves*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6320>



**Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)**

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

APLICACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE RAYOS X AL FUSELAJE  
DE AERONAVES

Línea de Investigación:

Física nuclear y ambiental

Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

Autor

Barreda Sánchez-Pachas, Evzen Jacob

Asesor(a)

Neri Luja Lidia

(ORCID: 0000-0003-0608-7058)

Jurado

Aguilar Castro, Guillermo Santiago

Guzmán Calcina, Carmen Sandra

Mejía Cordero, Bernabé Alonso

Lima – Perú

2022

A mi esposa Elizabeth por su enorme contribución, dedicación y  
paciencia en todo momento.

A mis hijos Álvaro y Paulo, que son el motivo por el cual sigo y  
seguiré esforzándome para ser un padre ejemplar y darles todo mi  
apoyo en las buenas y en las malas.

## **Agradecimientos**

A la universidad Federico Villarreal, la facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, y en especial mi asesora de tesis, la Dra. Lidia Neri Luja por su enorme interés y dedicación, que han sido imprescindibles para la realización de este trabajo.

A las autoridades de la Fuerza Aérea del Perú, quienes tuvieron la gentileza de brindarme el permiso para la realización de la presente investigación.

A toda persona que hizo posible la realización y culminación óptima de la investigación.

## Índice

Carátula.....	1
Dedicatoria .....	2
Agradecimientos .....	3
Índice.....	4
Índice de Tablas.....	7
Índice de Figuras .....	8
Resumen (palabras clave).....	11
Abstract ( <i>key words</i> ) .....	12
I. Introducción .....	13
1.1 Descripción y Formulación del Problema.....	15
1.1.1 Formulación del problema .....	17
1.2 Antecedentes .....	17
1.3 Objetivos .....	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
1.4. Justificación .....	20
1.5. Hipótesis .....	20
II. Marco Teórico.....	21
2.1 Fundamentación Teórica Sobre el Tema de Investigación .....	21
2.2 Métodos más Comunes de Pruebas No Destructivas .....	21
2.3 Generalidades Sobre los Rayos X .....	22
2.4 Interacción de los Rayos X con la Materia.....	27
2.5 Radiación de Frenado .....	28
2.6 Procesos que Contribuyen a la Pérdida de Energía Para Fotones que Interaccionan con un Medio Material .....	28

2.7 Principales Mecanismos de Interacción de los Fotones con la Materia.....	30
2.8 Uso del Aluminio en la Aeronáutica .....	33
2.9 Consideraciones Geométricas en la Radiografía .....	38
2.10 Factores de Exposición Radiográfica.....	40
2.11 Radiaciones Secundarias.....	45
2.12 Pantallas Radiográficas.....	48
2.13 Formación de Imágenes Radiográficas .....	49
2.14 Principios Básicos en la Radiografía.....	51
2.15 Causas de la Disminución de la Definición en una Radiografía.....	53
2.16 Procesado de la Película Radiográfica .....	53
2.17 Proceso de Revelado .....	53
2.18 Ventajas del Método Radiográfico .....	54
2.19 Desventajas del Método Radiográfico .....	54
III. Método .....	55
3.1 Tipo de Investigación.....	55
3.2 Ámbito Temporal y Espacial.....	55
3.3 Variables .....	55
3.4 Población y Muestra .....	55
3.5 Instrumentos .....	57
3.6 Procedimientos .....	64
3.7 Análisis de Datos .....	76
IV. Resultados.....	77
V. Discusión de resultados .....	91
VI. Conclusiones.....	93
VII. Recomendaciones.....	94
VIII. Referencias .....	95

IX. Anexos..... 97

## Índice de Tablas

### Tabla 1

Propiedades mecánicas del aluminio 2024-T3 ..... 34

### Tabla 2

Porcentajes de la composición aluminio 2024-T3 ..... 34

### Tabla 3

Grado de Densidad de la Radiografía ..... 74

### Tabla 4

Descripción de los tipos de Avión..... 77

### Tabla 5

Medidas descriptivas del control de Calidad en las aeronaves de servicios en el Perú... 78

### Tabla 6

Descripción de las placas del fuselaje de las aeronaves ..... 80

### Tabla 7

Descripción de la integración de los resultados de las placas aplicadas al fuselaje de aeronaves  
..... 85

## Índice de Figuras

### Figura 1

Ejemplo de nube electrónica ..... 24

### Figura 2

Ejemplo de efecto fotoeléctrico ..... 31

### Figura 3

Ejemplo de efecto Compton de un átomo ..... 31

### Figura 4

Sección eficaz diferencial Compton para distintas energías utilizando un diagrama polar  
..... 32

### Figura 5

Ejemplo de producción de pares ..... 33

### Figura 6

Construcción del fuselaje..... 37

### Figura 7

Distancia foco –película..... 40

### Figura 8

Equipo portátil de rayos-X ..... 58

### Figura 9

Densitómetro de placas ..... 59

### Figura 10

Equipo de revelado automático ..... 60

### Figura 11

Un tipo de placa radiográfica utilizada ..... 61

### Figura 12

Detector de radiación (Geiger -Muller ) ..... 62

<b>Figura 13</b>	
Dosímetro.....	63
<b>Figura 14</b>	
Placa de calibración.....	64
<b>Figura 15</b>	
Procedimientos para la obtención de la placa radiográfica .....	65
<b>Figura 16</b>	
Licencia otorgada por el IPEN.....	68
<b>Figura 17</b>	
Tabla de exposición para el acero .....	69
<b>Figura 18</b>	
Certificado de calibración de equipos de rayos x .....	70
<b>Figura 19</b>	
Guía de controles anuales aprobados por los equipos en el tiempo.....	71
<b>Figura 20</b>	
Vista de los largueros a radiografiar.....	72
<b>Figura 21</b>	
Imagen de los arcos y largueros de un Boeing 73.....	73
<b>Figura 22</b>	
Vista interna del fuselaje Boeing 737.4B.....	73
<b>Figura 23</b>	
Radiografía de marco de ventana objeto de este estudio .....	75
<b>Figura 24</b>	
Radiografía de la unión larguero- arco.....	76
<b>Figura 25</b>	
Distancia .....	79

<b>Figura 26</b>	
Grado de densidad de las aeronaves .....	82
<b>Figura 27</b>	
Número de Radiografías realizadas a la Aeronaves .....	83
<b>Figura 28</b>	
Tiempo en Exposición .....	84
<b>Figura 29</b>	
Radiografía de marco de ventana en la presente investigación.....	86
<b>Figura 30</b>	
Unión larguero y arco .....	87
<b>Figura 31</b>	
Informe Técnico de control de calidad mediante rayos-x avión Hércules.....	88
<b>Figura 32</b>	
Informe técnico de control de calidad Boeing 737-401.....	89
<b>Figura 33</b>	
Informe técnico de control de calidad CESSNA 402 .....	90

## Resumen

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo realizar un estudio de control de calidad mediante la aplicación de rayos X en los componentes estructurales del fuselaje de aeronaves situadas en las instalaciones de la Fuerza Aérea del Perú. Las aeronaves objeto de este estudio pertenecen a la Fuerza Aérea del Perú o a empresas particulares de aviación comercial que desean cumplir con sus controles periódicos de seguridad. Los aviones radiografiados fueron un avión Hércules de la Fuerza Aérea del Perú, un *Boeing 737-401*, un avión *Boeing B737-4B7* y un avión *CESSNA 402C*. Al aplicar la prueba no destructiva (NDT) sobre el fuselaje de estos tres aviones se cumplieron con los requerimiento de Control de Calidad exigidos por el fabricante y supervisados mediante la aplicación normas de la ASTM, especificadas en la norma técnica ASTM-E1742M. Luego de aplicar los rayos X sobre el fuselaje de los aviones antes mencionados, Se encontró que la aplicación del control de calidad permitió verificar el adecuado funcionamiento del fuselaje de las aeronaves que brindan servicio en el Perú.

**Palabras claves:** control de calidad, inspección NDT, rayos X.

### **Abstract**

The following work of thesis was created with the intention of doing a research about the quality control through the application of X-rays in the structural components of the fuselage of aircraft located in the installations of the Air Force of Peru. The Aircraft used in this study belong to the Air Force of Peru or private companies of commercial aviation, that wish to comply with their periodic security controls. The aircraft radiographed were an Hércules airplane from the Air Force of Peru, a Boeing 737-401, a Boeing B737-4B7 and an airplane CESSNA 402C. The requirements of Quality Control requested by the manufacturer and supervised by the application of ASTM standards, specified in the technical standard ASTM-E1742M, were met. After applying the X-rays on the fuselage of the aircraft mentioned before, high-quality radiographs were obtained for their adequate contrast and film density. What can be interpreted as an absence of faults, corrosion, cracks, pre-corrosion, pre-cracks, discontinuities or failures due to fatigue. After applying the X-rays on the fuselage of the aircraft previously mentioned, it was found that the application of quality control verified the proper functioning of the fuselage of the aircraft that run its service in Peru.

**Key words:** quality control, NDT inspection, X-rays.

## I. Introducción

En el escenario de la fuerza Militar Área del Perú, atiende a urgencias y emergencias con sus flotas de aviones comerciales validando el control de calidad periódicas con estándares técnicos internacionales y nacionales para resguardar la seguridad de las estructuras de los fuselajes en sus aeronaves mediante la aplicación de rayos X y establecer un servicio seguro y eficiente para las personas que toman el servicio de transporte aéreo.

Los aviones que llevan una revisión técnica con normas internacionales, como la ASTM-E1742M y con el uso de radiografías de rayos X no destructivas tienden a tener mejores condiciones para el funcionamiento aerodinámico, especialmente, en las partes cruciales como en los fuselajes en las aeronaves.

El presente estudio está constituido por los siguientes capítulos:

En el primer capítulo introducción, en donde se detalla la descripción y formulación del problema a investigar, los antecedentes, objetivos, justificaciones y el planteamiento de hipótesis.

En el segundo capítulo se detalla el marco teórico, en donde se describe la fundamentación teórica del tema a investigar, los métodos comunes, la exposición radiográfica, el proceso de revelado, las ventajas y desventajas del método radiográfico.

En el tercer capítulo se precisa el método, en donde se precisa el tipo de investigación, el ámbito temporal y espacial, las variables, la población con la muestra, los instrumentos utilizados, los procedimientos de desarrollo de la investigación y el análisis de los datos realizados.

En tanto, en el capítulo cuatro resultados, se conciben en tablas y figuras las características principales de los hallazgos encontrados de manera descriptiva.

Asimismo, en el capítulo de conclusiones se precisan la información obtenida a través de los resultados más relevantes.

En la parte de recomendaciones, se enfocó en las sugerencias más precisas acerca del estudio.

Y, por último, se anexo la información complementaria y que argumenta los datos de la investigación.

## 1.1. Descripción y Formulación del Problema

Hoy en día existen diversas técnicas para realizar control de calidad en los fuselajes, esto se debe a que, a lo largo de la historia, se han suscitado numerosos siniestros ocasionados por diversos factores, atribuyéndose gran parte al factor humano, errores del diseño, falta de mantenimiento, entre otros. Los factores ocasionales y aquellos que pueden prevenir éstos fatales accidentes no deben dejarse de lado en cuanto a su estudio e investigación. A lo largo de la historia y a nivel mundial desde 1972 a la actualidad, no han dejado de haber accidentes todos los años, llevando el mayor índice de accidentalidad el año 1999 con 24 accidentes. Los accidentes notables, condujeron a desarrollos útiles como la gestión de recursos de cabina (personal trabajando en todo momento como un equipo de verificación cruzada), detectores de humo y extintores automáticos en los baños y bodegas de carga, transportadores y materiales refractarios.

Las líneas aéreas les han exigido demasiado a las aeronaves, tal es el caso que el *Boeing 737* (hay 8000 construidos) vuelan durante todo el día. En abril de 1988, una parte del fuselaje de un Aloha 737 que volaba de Hilo a Honolulu se averió a 7300 metros. Un asistente de vuelo fue arrastrado por la borda y todos los demás pasajeros sobrevivieron. Se descubrió luego que el Boeing se había sometido a un total de 89 000 represurizaciones, mientras que los primeros *Comet* habían fracasado con entre 900 y 3060 represurizaciones. Como resultado, la Federal Aviation Administration (FAA, 2012) estableció su Programa Nacional de Investigación del Envejecimiento de Aeronaves, con un edificio para la evaluación de aviones a escala completa en Nueva Jersey. Esto permitió que se realizaran pruebas predictivas de la fatiga estructural, corrosión y muchos otros aspectos para aumentar la seguridad de los aviones no sólo en EE.UU. sino en todo el mundo (Glancey, 2014).

El Perú no es ajeno a esta realidad, son numerosos también los accidentes ocurridos a lo largo de nuestra historia, de los cuales seis accidentes corresponden a la Fuerza Aérea del Perú (FAP), suscitados en el año 1992. Un Hidroavión de la FAP se hundió en el río Algodón,

en el departamento de Loreto (selva), murieron nueve personas y se salvaron 24. En 1998 - El 29 de marzo - se estrelló un avión de la FAP en la ciudad de Piura (norte de Perú) dejó veintiocho muertos. En 2001 - 13 de marzo. Un cazabombardero MIG 29 de la Fuerza Aérea de Perú se estrella sin causar víctimas durante demostraciones de operatividad en la ciudad de Chiclayo. En 1998 - 6 de mayo-, un avión de FAP se estrella cerca del aeropuerto del campamento petrolero de Andoas con saldo 74 muertos y 13 sobrevivientes. En 1998 - 23 de agosto. Un avión de la FAP se estrella cerca de la ciudad de Iquitos (selva) deja cuatro heridos. Y en 2004- 18 de diciembre-. Se estrella avión de FAP con dos tripulantes en la zona de Lurín (Valenzuela, 2005).

A raíz de todos estos accidentes, se torna de vital importancia conocer el estado estructural exacto de las aeronaves, para ello es necesario realizar diferentes pruebas de esfuerzo, análisis por fatiga; esto, a fin de detectar fallas por el material en la unión entre componentes estructurales, anomalías, grietas en el fuselaje de la aeronave.

Entre las diversas técnicas que existente para realizar el control de calidad del fuselaje en los aviones, se tiene a las pruebas destructivas. Sin embargo, estas pruebas retardan el funcionamiento, por lo que no es conveniente en una industria donde el tiempo es muy importante. Es por ello que el manejo y conocimiento de los diversos métodos no destructivos son cada vez de mayor relevancia.

Por esta razón, se plantea el estudio de las diferentes técnicas, entre ellas el uso de los rayos X para producir radiografías de alta resolución y observar el estado de los materiales en un avión es muy requerido. Ya que mediante el uso de los rayos X se pueden detectar e identificar fracturas o fallas en las piezas del fuselaje. Siendo estas técnicas permanentemente mejoradas y modernizadas mediante el uso de computadores, con la finalidad de realizar un mejor control de calidad con respecto a la integridad de diversas estructuras. Esto permite que la aplicación de pruebas no destructivas, siguiendo los parámetros y normas internacionales, sea un método óptimo de control de calidad (Inspectioneering, 2017).

A nivel latinoamericano, el Perú cuenta con el servicio de mantenimiento de la Fuerza Aérea del Perú. Este servicio ubicado como uno de los siete primeros a nivel mundial (FAA SPUY 238K) cuenta con la infraestructura y capacidad para realizar un adecuado estudio de los aviones que ahí realizan su mantenimiento. Basado en estos métodos no invasivos o destructivos, el Servicio de Mantenimiento (SEMAN) logra óptimos controles de calidad.

El presente trabajo de tesis, presenta un estudio respecto a los diferentes métodos de la radiografía industrial, utilizando rayos X, que interactúan con la materia y su uso en la formación de imágenes industriales en las piezas del fuselaje de avión, obteniendo así, un adecuado control de calidad.

### **1.1.1 Formulación del problema**

¿Cómo se aplica el control de calidad mediante rayos X al fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú?

## **1.2. Antecedentes**

Ramírez (2012) en su tesis de maestría: *Análisis de confiabilidad de la flota de aeronaves de la escuela de aviación del pacífico*. El trabajo se realizó en una flota de 6 aeronaves, dos de ellas tipo Piper PA-28 y cuatro aeronaves tipo Cessna 152. En el análisis se realiza un proceso para la identificación de las fallas, análisis de riesgos en la operación, análisis causa-raíz y análisis de la disponibilidad y operación de las aeronaves. El trabajo de grado se desarrolló mediante el análisis de los reportes de fallos de sistemas y componentes de una flota de aeronaves. Todos estos reportes fueron registrados en bases de datos para poder proceder al análisis de estos y encontrar tendencias en los perfiles de funcionamiento de los componentes. Se identificaron riesgos generados por la operación y se desarrolló un análisis causa-raíz para identificar el origen de las desviaciones en los perfiles de funcionamiento de los diferentes componentes. Al identificar los fallos y sus posibles causas, se recomiendan diferentes tareas de mantenimiento para prevenir la ocurrencia de estos fallos. Según el autor concluye que: Se logró mejorar las fallas de los sistemas y componentes, el

análisis permitió identificar aquellos fallos que afectan la seguridad. Se recomendaron diferentes tareas de mantenimiento ajustadas a cada aeronave. Se realizó un análisis causa-raíz de los fallos presentados para establecer el origen de las fallas. Se realizó un análisis de los riesgos generados por la ocurrencia de las fallas y se evaluó su criticidad.

Burbano (2011) realizó un estudio sobre el Instructivo para realizar ensayos no destructivos con el método de radiografía industrial en la inspección de soldaduras de oleoductos de acero al carbono. Tuvo como objetivo realizar las actividades de Inspección Radiográfica de soldaduras en oleoductos de acero al carbono considerando todos los requerimientos técnicos, prácticos y de seguridad, para la correcta aplicación de los ensayos no destructivos y la obtención de resultados que garanticen la calidad, confiabilidad y cumplan con todo lo estipulado por los estándares internacionales reconocidos mundialmente como el caso de *API Standard 1104* o del *ASME B 31.4*. Previo a la actividad de inspección diaria, el Nivel II que es el técnico responsable del grupo, dictará una charla de seguridad al personal a su cargo, haciendo las observaciones respectivas del peligro que ocasiona la exposición.

Conclusiones: Los ensayos no destructivos con el método de Radiografía Industrial, utilizados para la inspección de soldaduras de tuberías de acero al carbono en la construcción de oleoductos se pueden concluir en lo siguiente:

1. Son aplicables en la inspección de soldaduras de tuberías de acero al carbono en la construcción de oleoductos. Se utiliza el acero al carbono por sus innumerables ventajas.
2. La inversión que demanda su aplicación en la inspección de las soldaduras de oleoductos, no se debe considerar como un gasto, es una inversión.
3. Los informes radiográficos se convierten en documentos habilitantes que dan confianza de garantía de calidad al proyecto y para que el oleoducto construido pueda ser sujeto de aseguramiento por parte de las compañías de seguros.

4. El cumplimiento de la actividad de inspección de las soldaduras de tuberías de acero al carbono, en la construcción de un oleoducto, hace que la obra sea respaldada y homologada constructivamente, por entidades internacionales.

Gonzales (1995) realizó un estudio sobre la Aplicación de los rayos x en la industria como prueba no destructiva. Tuvo como objetivo la aplicación de Ensayos no Destructivos que ayudan a detectar aquellas discontinuidades superficiales o subsuperficiales que afectan la calidad o la operación de un equipo o servicio. Debido a la gran diversidad en el campo de trabajo, los Ensayos no Destructivos se han dividido en Sistemas de Inspección Volumétrica, Superficial, y de Hermeticidad. Los Ensayos no Destructivos no sustituyen a los Ensayos Destructivos, sino que los complementan. La confiabilidad de estos sistemas de inspección depende de su selección correcta, ya que cada una de estas tiene sus ventajas y desventajas, por lo que una mala elección traerá como consecuencia resultados poco confiables, así como pérdidas de tiempo y recursos. Es importante mencionar que para lograr que los Ensayos no Destructivos sean confiables, los equipos, así como los sistemas de inspección deben ser verificados semestralmente, además que existen normas y códigos de uso internacional exigiendo que el equipo sea calibrado y revisado en sus partes electrónicas al menos una vez al año por un taller autorizado por el fabricante. El factor humano es otro elemento importante a considerar en los Ensayos no Destructivos ya que los inspectores deben ser capacitados y calificados, también deberán tener una experiencia que permita asegurar que sus resultados sean lo más confiable posible. En México se está empezando a laborar para crear un organismo, el cual esté facultado y cuente con autoridad a nivel nacional para realizar actividades de certificación del personal que realiza los Ensayos no Destructivos.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

- Aplicar el control de calidad mediante rayos X al fuselaje de aeronaves que brindan

servicios en el Perú.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Aplicar el protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.
- Evaluar las placas obtenidas mediante el protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.
- Integrar los resultados de las placas aplicadas al fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.

### **1.4 Justificación**

El trabajo se justifica teóricamente ya que el propósito del estudio es profundizar en los principios y fundamentos teóricos de los diferentes métodos de pruebas no destructivas, como son inspección radiográfica a través de Rayos X, que tienen una radiación electromagnética de alta energía, y propiedad de poder atravesar la materia. Estos rayos son atenuados por el espesor de un material (Bermúdez, 1967). Este método cumple una función muy importante ya que permite conocer el estado, de las diferentes piezas.

En la actualidad existen varios métodos de control de calidad para el fuselaje de un avión, en gran medida basados en métodos o técnicas invasivas que inhabilitan al avión o retardan su reingreso a servicio. Dichos métodos tienen además la desventaja que no dejan constancia del diagnóstico realizado. En este contexto, el uso de los rayos X en el control de calidad mediante la obtención y el análisis de placas radiográficas, cobra cada vez mayor importancia a nivel mundial.

### **1.5 Hipótesis**

#### **1.5.1 Hipótesis general**

- La aplicación del control de calidad mediante rayos X permite verificar el adecuado funcionamiento del fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú.

## II. Marco Teórico

### 2.1 Fundamentación Teórica Sobre el Tema de Investigación

#### 2.1.1 *Pruebas no destructivas*

El objetivo de la inspección no destructiva de un componente o estructura es conocer el estado de este, de una manera que no se perjudicara su futura utilidad. Se busca en la inspección descubrir defectos, medir características geométricas, determinar la estructura o la composición, o se puede caracterizar propiedades físicas, eléctricas o térmicas sin causar cualquier cambio en la parte a inspeccionar. La inspección no destructiva hace referencia al uso de la ciencia y tecnología la cual permite examinar los materiales, de modo tal que la integridad de ellos pueda ser determinada sin comprometer su condición actual (Fuerza Aérea del Peru [FAP], 2014).

Las Pruebas no Destructivas (NDT) son frecuentemente aplicadas en cualquier estado del ciclo de producción o vida útil de un artículo para:

- Asistir en el desarrollo de la producción.
- Determinar la composición de un material.
- Monitorear, mejorar o controlar los procesos de fabricación.
- Verificar apropiadamente los procesos tales como tratamiento térmico.
- Verificar el ensamblaje apropiado.
- Inspeccionar el material para detectar la presencia de posibles discontinuidades por fatiga.

#### 2.2. Métodos más Comunes de Pruebas No Destructivas

Existen varios métodos de pruebas no destructivas que proporcionan información acerca del estado superficial de los materiales inspeccionados. Los métodos de NDT superficiales son:

- Inspección Visual
- Líquidos Penetrantes
- Partículas magnéticas
- Eddy Current
- Ultrasonido
- Rayos X

La aplicación de cada uno de estos métodos de NDT está normado por las especificaciones técnicas descritas en las prácticas estándares internacionales correspondientes.

### **2.3. Generalidades Sobre los Rayos X**

Los rayos X fueron descubiertos por Wilhem Roentgen en 1895. Durante su trabajo con un tubo de gas para la producción de rayos catódicos observó fluorescencia en una pantalla metálica de platino-cianuro de bario (Gautreau & Savin, 2001). Este fenómeno tenía su origen en tipo de radiación desconocida hasta entonces, y que provenía del choque de los electrones con las paredes del tubo.

Los rayos X son originados por la interacción de electrones suficientemente acelerados que al interactuar con la materia emite radiación electromagnética la cual puede ser de dos tipos. Que se describirán a continuación:

#### **2.3.1 Radiación característica**

Es el producto del choque de un electrón acelerado con un electrón de un nivel interno del átomo y lo desplaza ionizando al átomo, un electrón de un nivel externo cae en el lugar dejado vacante por el electrón expulsado con el resultado de la emisión de un cuanto de energía cuya frecuencia es característica del átomo excitado.

### **2.3.2 Radiación continua o de frenado**

Cuando un electrón acelerado es frenado al atravesar el fuerte campo eléctrico existente alrededor del núcleo, la pérdida de energía aparece en forma de un cuanto de rayo x, pero cuya frecuencia es independiente de la naturaleza del átomo causante del fenómeno. La radiación emitida en esta forma, aparece como una banda de longitud de onda que varían en forma continua (Attix, 1986).

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de naturaleza igual a la luz ordinaria, pero de longitud de onda más pequeña. En el espectro de las radiaciones electromagnéticas (ver Figura 1) están comprendidos entre los rayos gamma y los rayos ultravioleta. Los rayos X al igual que las radiaciones visibles, infrarrojas y ultravioletas al ser estudiado debe suponerse la dualidad de su naturaleza para poder explicar los fenómenos a que dan lugar, unas veces hay que considerarlo como ondas y otras como partículas.

El uso de los rayos X en la investigación científica y en la técnica industrial es una poderosa técnica en el conocimiento de la materia y posee un extenso campo de aplicación como en la radiografía, fluoroscopia, radiografía de alto voltaje y micro radiografía. El presente trabajo se avoca a los equipos de Rayos-X para radiografía industrial.

### **2.3.3 Producción de los rayos x**

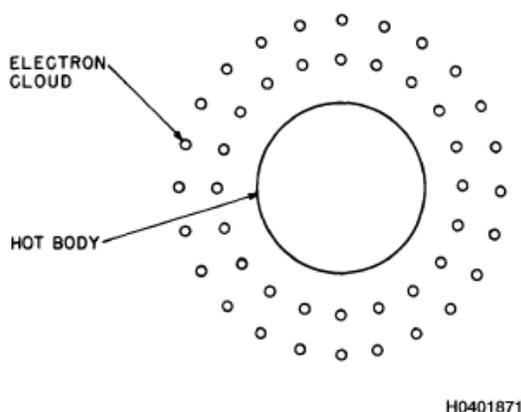
Un equipo generador de rayos x es el conjunto de elementos que convenientemente acoplados permite la producción y utilización de los rayos x dependiendo de su campo de acción el equipo tendrá diferentes características, las cuales son:

Tubos de rayos x, equipo transformador o generador de alta tensión. Existen tres requisitos que se deben cumplir para la producción de rayos x los cuales son:

- Suministro de electrones.
- Electrones en movimiento.
- Electrones que afecten adecuadamente al blanco.

## Figura 1

*Ejemplo de nube electrónica*



*Nota.* Tomado de Fuerza Aérea del Perú, 2014.

### 2.3.4 Suministro de electrones

Si se considera que la materia está compuesta por átomos y estos a su vez por electrones, los electrones son fáciles de conseguir. Una de las formas de conseguir electrones es elevando la temperatura de un material convenientemente, con el fin de excitar la corteza electrónica, ya que debido al aumento de temperatura los electrones adquieren cada vez mayor movimiento hasta que finalmente escapan de su posición dentro del átomo. Dichos electrones que se escapan rodearán al material formando una nube electrónica alrededor de éste. Esto es lo que se conoce como emisión termiónica.

Este proceso dentro de un tubo de rayos-X ocurre en el filamento, el cual es el material que va a elevar su temperatura como una primera parte en la producción de los rayos-X. Este fenómeno de emisión termiónica ocurre de igual manera en el filamento de una bombilla eléctrica en el cual el filamento es calentado mediante el uso de una corriente eléctrica que atraviesa el filamento. La nube electrónica anteriormente mencionada envuelve al filamento y vuelve a él, a no ser que una fuerza externa los separe. Por tanto, el filamento ubicado en el cátodo es el que provee los electrones esta primera etapa de Producción de rayos-X (Gautreu & Savin, 2001).

### **2.3.5 Electrones en movimiento**

El alto voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo produce la emisión de electrones en forma continua los cuales fluyen hacia el ánodo. Este movimiento es causado por las fuerzas de repulsión y atracción que aparecen en el circuito del tubo generador de rayos x. Lo cual es una aplicación del principio fundamental de la electrostática "cargas iguales se repelen y cargas diferentes se atraen". Como en el cátodo todos los electrones son negativos, todos se repelen; pero como se necesitan electrones con mayor aceleración. Una fuerza externa mayor es necesaria; esta fuerza es obtenida del kilovoltaje el cual expulsa a los electrones del cátodo al ánodo.

En ese proceso es muy importante el vacío por que como se necesitan electrones con gran movimiento, no se puede permitir que los electrones pierdan energía al chocar con las partículas del aire como efecto de la ionización y dispersión. En un tubo de rayos-X el ánodo o blanco donde impactan los electrones tiene una carga positiva con respecto al filamento, el cual es parte del ánodo mediante una capsula de enfoque que dirige la corriente de electrones hacia el ánodo u objetivo. De todo lo expuesto, se desprende que el miliamperaje otorga la cantidad de electrones y el kilovoltaje les da fuerza a dichos electrones lo cual dará la energía necesaria a los fotones de rayos-X (Burbano, 2006).

### **2.3.6 Electrones que afecten adecuadamente al blanco**

Al volteje entre el cátodo y el ánodo existente en un tubo generador de rayos x se le denomina voltaje del tubo. Cuando los electrones que poseen gran energía cinética impactan contra el blanco o ánodo una pequeña parte de su energía, alrededor del 1% es transformada en rayos X el resto de la energía cinética de los electrones se transforma en calor esta es la razón por la cual el ánodo es de un material que tenga un alto punto de fusión como el tungsteno y el tubo tenga un sistema para eliminar el exceso de calor producido.

La cantidad de electrones generados por el filamento, así como el número final de fotones emitidos pueden cambiarse tan solo modificando la cantidad de mili amperaje en el

filamento. Entonces, si se aumenta el mili amperaje se aumentará también el número de fotones y por consiguiente el número de fotones emitidos. De otro lado, si se aumenta el kilovoltaje se aumentará también la velocidad de los electrones, así como la energía cinética de éstos, produciendo fotones con más energía y por lo tanto con mayor poder de penetración sobre la materia (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

### **2.3.7 Tubo de rayos X**

Se les puede clasificar por el método que utilizan para producir electrones acelerados.

**2.3.7.1 Tubos de gas.** Los electrones se producen por el bombardeo de iones positivos de gas sobre el cátodo frío (puede ser una superficie plana de aluminio). Cuando la presión del gas en un tubo es una fracción de milímetro de mercurio y se aplica a los electrones una diferencia de potencial apropiada, el gas residual se ioniza produciendo electrones e iones, los cuales debido a la diferencia de potencial chocan contra el cátodo que emite electrones los cuales son proyectados desde este perpendicularmente y en trayectorias rectilíneas; cuando estos electrones acelerados por la diferencia de potencial chocan contra las paredes del tubo o contra el ánodo se emiten rayos X. Este tipo de sistema desarrolla una gran pureza espectral y por eso es muy usado en difracción por rayos X (Cember, 2009).

**2.3.7.2 Tubos de alto vacío.** Aquí los electrones provienen del cátodo, desde donde se emiten por acción del calor o por el empleo de un gradiente de potencial elevado que permita la emisión de electrones. El ánodo se fabrica normalmente de un material con alto punto de fusión y elevado peso atómico para que resista el calor generado por la colisión de los electrones en el bombardeo electrónico (Cember, 2009). Debe poseer también buena conductividad eléctrica. Los tubos de rayos X de cátodo caliente aprovechan el efecto termoeléctrico. Entre las ventajas que presenta este sistema podemos ver:

- Son variables y en forma independiente el voltaje y la corriente.
- El volumen de un tubo puede ser mucho menor al de un tubo de gas.
- El equipo se simplifica al funcionar directamente con un transformador.

- Este sistema es de mayor duración.
- Es más fácil reproducir los resultados ya que los parámetros de voltaje y corriente son fáciles de modificar.

#### 2.4. Interacción de los Rayos X con la Materia

La propiedad más utilizada que poseen los rayos X es su capacidad para atravesar los cuerpos opacos. Sin embargo, la radiación es absorbida en mayor o menor grado en función del espesor de la materia atravesada; si dicho espesor aumenta la intensidad decrecerá en forma fraccionaria conforme aumenta el espesor.

En un medio homogéneo donde se produce un decrecimiento fraccional de la intensidad de radiación monocromática, dicho decrecimiento es proporcional al espesor del absorbente  $dx$ .

$$\frac{-dI}{I} = \mu dx \dots \dots \dots (2.1)$$

La constante de proporcionalidad  $\mu$ , se denomina coeficiente de absorción lineal, definido por la fracción de energía de radiación absorbida por  $1 \text{ cm}^3$  de sustancia cuando el haz incidente tiene una sección de  $1 \text{ cm}^2$ . La dimensión de este coeficiente es por lo tanto,  $\text{cm}^{-1}$ . La intensidad absorbida por todo el espesor  $x$  será:

$$\ln I = -\mu x + c$$

Para  $x=0$ ,  $C = \ln I_0$ , siendo  $I_0$  la intensidad del haz de radiación incidente:

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x$$

De donde se deduce

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

La expresión es idéntica a la ley de Lambert-Bert para la absorción de la luz en un medio no transparente, e indica la atenuación que experimenta un haz de rayos x al atravesar una lámina de sustancia y espesor  $X$ .

El coeficiente de atenuación es proporcional a la densidad por lo que su valor para una determinada radiación varía según el estado físico o químico del absorbente

Por esta razón es más fácil expresar la absorción del haz de sección unidad por unidad de masa de absorbente. De aquí surge el llamado coeficiente de absorción másica, que expresa la absorción por unidad de masa de sustancia atravesada:

$$\mu_0 = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (2.2)$$

Siendo  $\rho$  la densidad del absorbente. Las dimensiones del coeficiente de absorción másico son  $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$  (Attix, 1986).

## 2.5 Radiación de Frenado

Cuando una partícula incidente de masa  $m$  y carga  $Ze$  (siendo  $e$  la carga elemental) penetra en un campo eléctrico de un núcleo atómico con carga  $Ze$ , experimenta la acción de una fuerza eléctrica y por lo tanto una aceleración que resulta ser proporcional al producto del valor de las cargas e inversamente proporcional a la masa de la partícula incidente. De acuerdo a las leyes de la electrodinámica clásica, una partícula al ser acelerada, emite radiación electromagnética, cuya intensidad es proporcional al cuadrado de la aceleración, esto es:

$$I = c \cdot \frac{z^2 Z^2}{m^2} \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde  $I$  es la intensidad de la radiación electromagnética y  $c$  es una constante de proporcionalidad que depende del medio material. Este fenómeno también es conocido como Bremsstrahlung (Burbano, 2006).

## 2.6 Procesos que Contribuyen a la Pérdida de energía para Fotones o Neutrones que Interaccionan con un Medio Material

Entre los principales factores tenemos los siguientes:

### 2.6.1 Coeficiente de atenuación másico referente a un material

Esta magnitud está referida a un material en particular, depende del tipo de radiación y de la energía de ésta, se expresa mediante el cociente entre la variación del número de partículas neutras que han atravesado un medio material y el número de partículas neutras

iniciales que van interaccionar al atravesar un medio material de espesor  $dl$  y densidad matemáticamente hablando:

$$\mu/\rho = 1/\rho (dN/N)(1/dl) \dots \dots \dots (2.4)$$

La unidad de esta magnitud esta expresado por  $m^2.Kg^{-1}$

### **2.6.2 Coeficiente de transferencia de energía de un material**

Esta magnitud está definida para fotones o neutrones y está referida para un material en particular, se expresa como el cociente entre la variación de la energía de transferencia de las partículas neutras y la cantidad de energía  $E$  de cada una de las mismas partículas que interaccionan al atravesaran espesor  $dl$ , en un material de densidad  $\rho$ , matemáticamente hablando:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho E} \frac{dE_{tr}}{N} \frac{1}{dl} \dots \dots \dots (2.5.)$$

La unidad de esta magnitud esta expresado por  $m^2.Kg^{-1}$ . Cabe resaltar que el coeficiente másico de transferencia de energía indica la cantidad de energía que las partículas incidentes transfieren a las partículas cargadas del medio material como energía cinética por unidad de masa superficial (Attix, 1986).

La ecuación 2.5 se puede expresar también de la siguiente manera:

$$\frac{\Psi \mu_{tr}}{\rho} = \frac{dE_{tr}}{dm} \dots \dots \dots (2.6)$$

La ecuación anterior expresa que el producto de la fluencia de energía por el cociente másico de transferencia de energía es igual a la energía transferida por unidad de masa.

### 2.6.3 Coeficiente másico de absorción de energía de un material

El coeficiente másico de absorción de energía de un material determinado sobre el que inciden las partículas ionizantes no cargadas, es el producto del coeficiente másico de

transferencia de energía  $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$  y de (1 - g), donde g es la fracción de energía cinética que se

disipa en el material por efecto de la radiación de frenado, producida por las partículas

cargadas secundarias:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{d\mu_{tr}}{d\rho}(1-g) \dots \dots \dots (2.7)$$

Su unidad es  $m^2.Kg^{-1}$ .

## 2.7 Principales Mecanismos de Interacción de los Fotones con la Materia

Entre los más importantes tenemos:

### 2.7.1 Efecto fotoeléctrico

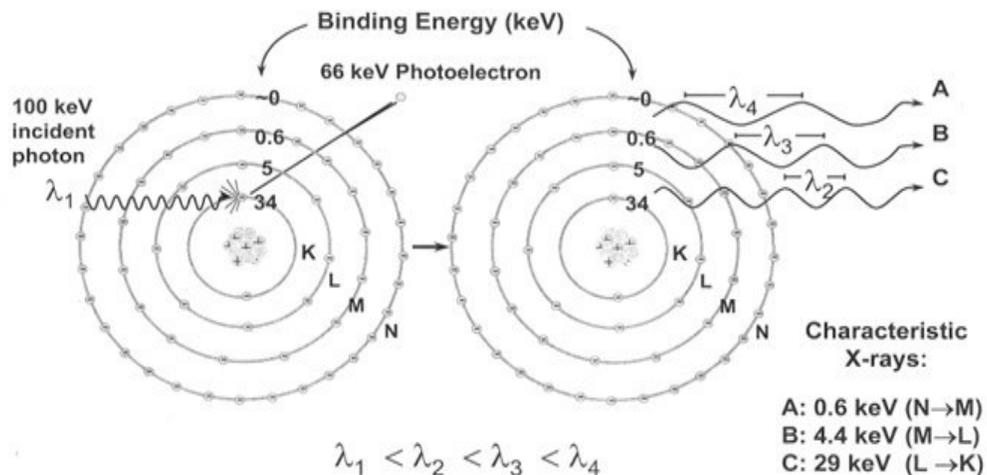
El efecto fotoeléctrico consiste en la absorción de un fotón por un átomo. En consecuencia un electrón atómico, llamado fotoelectrón, sale del mismo con una energía cinética igual a la energía del fotón incidente menos la energía de enlace del electrón, lo dicho lo podemos expresar:

$$E = h\nu - \Phi \dots \dots \dots (2.8)$$

Como deben cumplirse las leyes de conservación de energía y de momento, este proceso solo ocurre con electrones ligados, puesto que el núcleo experimenta un movimiento de retroceso para conservar el momento. Tras la expulsión del fotoelectrón, el átomo queda frecuentemente en un estado excitado (ver Figura 2). Para des excitarse, se produce emisión de rayos X o electrones (Attix, 1986).

Figura 2

Ejemplo de efecto fotoeléctrico



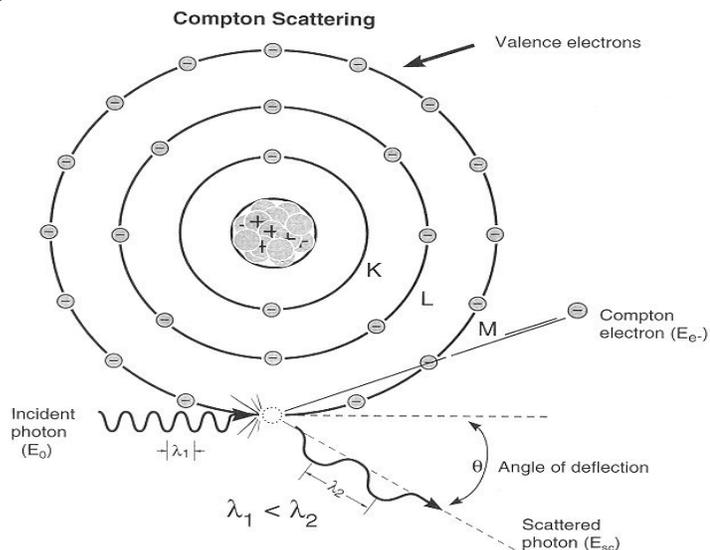
Nota. Tomado de Attix, 1986.

### 2.7.2 Efecto Compton

El efecto Compton consiste en la colisión elástica entre un fotón y un electrón libre. En la materia, los electrones están ligados; sin embargo, si la energía del fotón incidente es alta respecto a la energía de enlace del electrón, podemos considerarlo libre. El fotón incidente colisiona con el electrón cediendo parte de su energía y cambiando de dirección (ver Figura 3).

Figura 3

Ejemplo de efecto Compton en un átomo



Nota. Tomado de Attix, 1986

Aplicando las leyes de conservación del momento y la energía, obtenemos las siguientes relaciones:

La energía del fotón tras la interacción es:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \dots\dots\dots(2.9)$$

La energía cinética del electrón es:

$$h = T\nu - h\nu' = \frac{h\nu(1 - \cos\theta)\gamma}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \dots\dots\dots(2.10)$$

Los ángulos con los que salen dispersados el fotón y el electrón son respectivamente:

$$\cos\theta = 1 - \frac{2}{(1 + \gamma)^2 \tan^2\phi + 1} \dots\dots\dots(2.11)$$

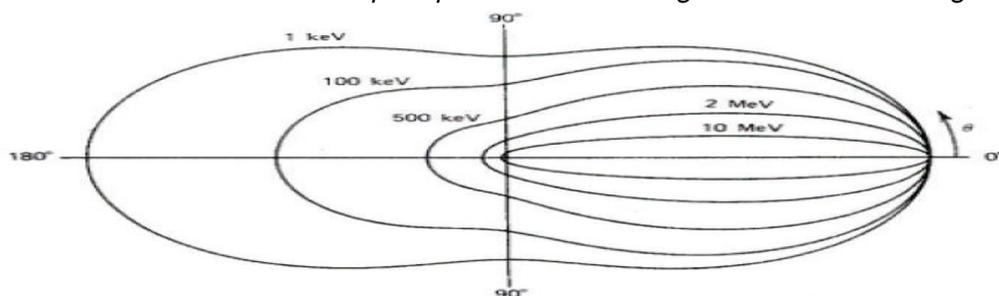
$$\cot\phi = (1 + \gamma)\tan\theta/2 \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2} \dots\dots\dots(2.13)$$

Cuanto menor es la energía del fotón incidente, mayor es la probabilidad de que el fotón salga retro dispersado. Por el contrario, para fotones de alta energía, la probabilidad de que el electrón salga hacia delante con un ángulo de dispersión bajo, es muy elevada y hacia atrás, casi nula (ver Figura 4).

#### **Figura 4**

*Sección eficaz diferencial Compton para distintas energías utilizando un diagrama polar*



*Nota.* Tomado de Attix, 1986.

### 2.7.3 Producción de pares

El proceso de creación de pares consiste en la transformación de un fotón en un par electrón - positrón. Para que se cumpla la conservación del momento, esto sólo puede ocurrir en presencia de un tercer cuerpo, generalmente un núcleo (ver Figura 5). Además, el fotón debe tener una energía de al menos 1.022 MeV. El balance energético del proceso de creación de pares es:

$$h\nu - 1.02\text{MeV} = E_{+e} + E_{-e} \dots \dots \dots (2.14)$$

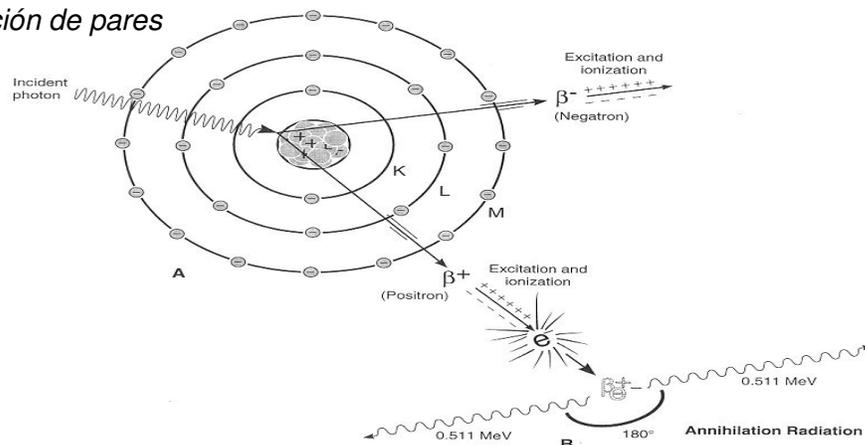
El electrón y el positrón pierden sus energías cinéticas a través de excitaciones e ionizaciones. Finalmente, el positrón se recombina con un electrón y se desintegran emitiendo dos fotones de 0.511 MeV cada uno (ver Figura 5).

### 2.8 Uso del Aluminio en Aeronáutica

El uso del aluminio y de sus aleaciones conocidas como duraluminio son muy comunes. En este campo no sólo en el fuselaje que es de nuestro interés, sino también en piezas como las hélices, estructura y revestimiento de un avión, cabinas del avión etc. Otra de las ventajas de usar aluminio en la construcción de fuselaje es que los rayos X trabajan en este material de mejor forma como lo haría con el acero u otros materiales para su control de calidad (Grupo Pechiney, 1967).

### Figura 5

*Ejemplo de producción de pares*



*Nota.* Tomado de Fuerza Aérea del Perú, 2014.

El aluminio utilizado para la construcción de los fuselajes de las aeronaves estudiados que se muestran en la Figura 10 y representadas en el esquema de la Figura 11 es el duraluminio 2024-T3, que es una aleación de aluminio y cobre según la Norma Técnica Americana de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, 2018). La composición química y sus propiedades físicas y mecánicas son descritas en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1**

*Propiedades mecánicas del aluminio 2024-T3*

Resistencia a la tensión	Dureza	Conductividad eléctrica	Resistividad	densidad
483MPa	69HB	30 %IACS	57nΩm	2,78g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 2**

*Porcentajes de la composición aluminio 2024-T3*

Aluminio	Cobre	Mn	Mg	otros
93%	4,5%	0,5%	0,5%	0,5%

Debido a los elementos aleantes (Cu, Mn, Mg) se trata de una aleación tratable térmicamente y susceptible de endurecerse por envejecimiento, característica que se denota por la letra T. Los números que siguen indican el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos especiales del procesado de la aleación.

En la industria aeronáutica el duraluminio 2024 es ampliamente utilizado debido a las propiedades descritas en la Tabla N°1, que le dan características especiales como por ejemplo:

**Densidad.** El duraluminio ocupando un mismo volumen es incluso tres veces más ligero que el acero; este es el factor por el que se utiliza en el fuselaje del avión ya que se necesita el menor peso posible para que el vuelo de una aeronave sea posible (Herengel, 1969).

**Resistencia mecánica.** El duraluminio alcanza resistencias similares al acero, lo que sumado a su gran ligereza lo hace insuperable para la construcción de fuselajes.

**Elasticidad.** Esta aleación es mucho más simple de trabajar que el acero ya que su módulo de elasticidad es tres veces menor que el acero, lo cual permite que con tensiones más bajas pueda ser conformada a las formas requeridas para la fabricación del fuselaje.

**Resistencia a los agentes atmosféricos y químicos.** La formación superficial que podríamos llamar película de alúmina protege al aluminio de ataques externos, incluso dicha formación puede ser mejorada.

### **2.8.1 El fuselaje**

Se define al fuselaje de un avión como la estructura que sirve de base de la nave. Esta estructura determina la forma del avión según las necesidades que éste presente. Sobre el fuselaje se acoplan otras partes como las superficies aerodinámicas, el tren de aterrizaje, motores, cabina del piloto, soportes, alas, estabilizadores. Las características del fuselaje de un avión son determinadas por diversos factores de diseño, aerodinámica, cargas y funciones de la aeronave.

En los inicios de la aviación los fuselajes eran fabricados de madera o de un entramado de varillas metálicas las cuales luego eran cubiertas por planchas de madera o lona.

Conforme fue avanzando la tecnología en aeronáutica, se hizo necesario que los aviones soporten mayores esfuerzos, cargas y ciclos de trabajo, lo que demandó un fuselaje construido con materiales mucho más resistentes. Es aquí que se utiliza materiales como el acero; pero este material presentó un peso mayor, incrementando la dificultad en el vuelo del avión. De este modo se recurrió al aluminio y sus aleaciones en la fabricación de aviones y en especial en los fuselajes, ya que su gran resistencia y tolerancia a la corrosión lo hacen un material óptimo en la industria aeronáutica. Sumado a esto, su menor peso ha hecho del aluminio uno de los materiales más importantes en construcción de fuselajes (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

Previamente es importante comprender algunos términos que se consideran en las funciones que realiza el fuselaje.

**Esfuerzos.** Se denomina esfuerzo a las tres fuerzas que están sometidas las partes del fuselaje.

**Tracción.** Ocurre cuando dos fuerzas de sentido opuesto tratan de estirar el material y deformarlo tratando de aumentar su longitud.

**Compresión.** Ocurre cuando dos fuerzas de sentido contrarias tratan de deformar una pieza en contras de sus propias partículas.

**Fuerzas de corte.** Son fuerzas que actúan en forma tangencial a la estructura separando dos piezas o doblando una sola pieza; este esfuerzo afecta en forma particular las uniones, ya sea por remaches o por tornillos (Federación Aviation Administration [FAA], 2012). Esto es lo buscaremos mediante el método radiográfico.

**Ciclo.** Cada avión dependiendo de su función tiene en cada parte un número de ciclos útiles antes que el avión o la pieza del avión sean retirados, pasen a mantenimiento o a una inspección no destructivas (NDT). Entonces entendemos por ciclo, al inicio y fin de un proceso o un trabajo realizado en el avión o por el avión. Tomemos por ejemplo el proceso de presurización en el avión; cuando el avión se presuriza y despresuriza se considera un ciclo, y llegado un número de estos ciclos el avión debe someterse a las pruebas adecuadas (Federal Aviation Administration [FAA], 2012).

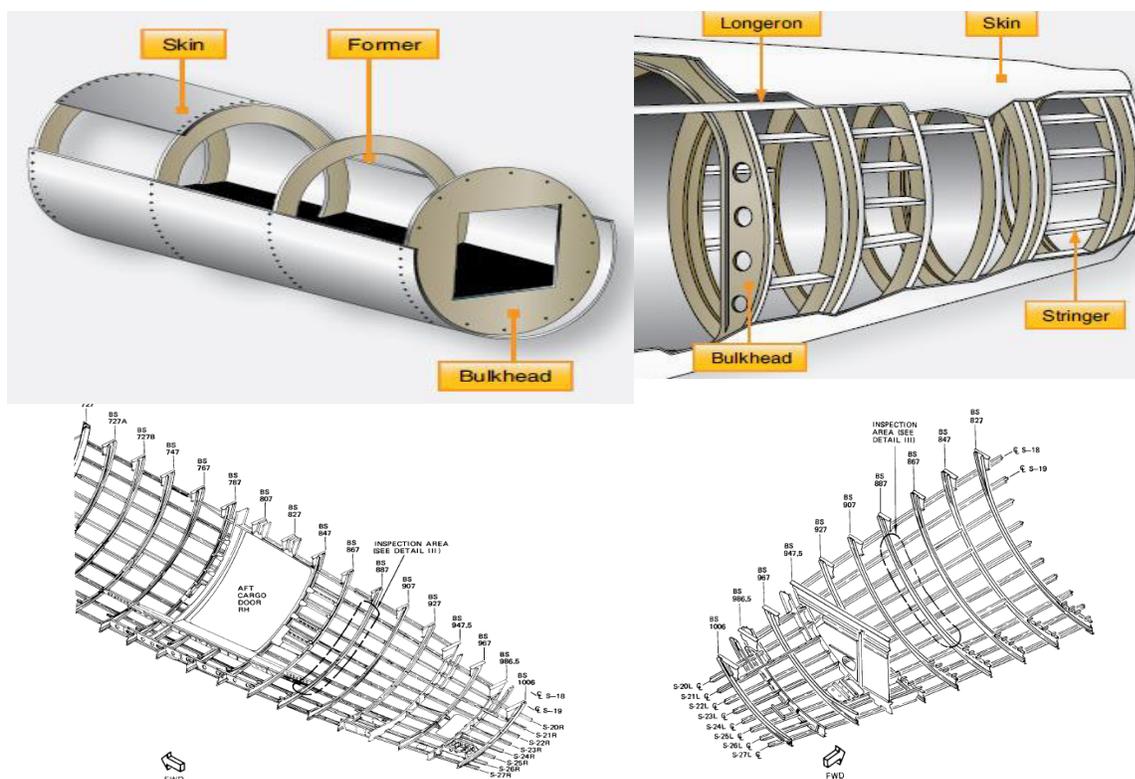
**Cargas.** Se denomina carga a las diferentes fuerzas que aparecen cuando, debido al aceleración del avión, aparecen fuerzas que estando el avión en reposo no existen; las cargas son efectos directos de la segunda ley de Newton; las cargas se expresan como múltiplos de la aceleración de la gravedad  $g=9,8\text{m/s}^2$  o las llamadas fuerzas "g". Podemos entender que si una fuerza de carga es de 3g es tres veces su peso. El efecto de las cargas en el fuselaje es de mucha consideración ya que pueden llegar a formar discontinuidades o fractures en él. Por ejemplo, durante el despegue, la carga producida por el peso del avión es mayor debido a que se suma a las fuerzas "g" el peso (Federal Aviation Administration [FAA], 2012).

## 2.8.2 Construcción del fuselaje

El método de fuselaje semi monocasco es el más difundido en la fabricación de fuselajes; para su aplicación, utilizan *cuadernas* que son aros de aluminio separados entre sí por la misma distancia y unidos por largueros longitudinales los cuales le dan forma al fuselaje. Dichos largueros son ubicados a la misma distancia, unos entre otros, guiándose por ángulos de separación como de muestra en la Figura 6 (Federal Aviation Administration [FAA], 2012; Castro et al., 2013; Mora & Ramírez, 2015).

**Figura 6**

*Construcción del fuselaje*



Nota. Tomado de Federal Aviation Administration [FAA], 2012.

## 2.9 Consideraciones Geométricas en Radiografía

Ya que la radiación-X al igual que la luz visible se propaga en línea recta, deducimos que en cualquier método radiográfico la calidad de una imagen queda determinada por factores geométricos. La formación de imágenes radiográficas es consecuencia de la proyección de sombras de diferente intensidad y diferente nitidez, como consecuencia del paso de radiación al atravesar cuerpos con diferente opacidad y forma, éstas generan distintas proyecciones y por lo tanto distintas imágenes.

Es necesario advertir que el método radiográfico presenta en la calidad de la formación de sus imágenes un problema con la radiación secundaria que es una radiación diferente en su origen a la radiación aprovechable.

Para obtener una imagen radiográfica se debe contar con un foco o fuente puntual de rayos-X, si entre este foco y una placa radiográfica colocamos un objeto y aplicamos un disparo, en la placa quedará la impresión de la sombra del objeto y esta sombra es lo que llamamos imagen radiográfica (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

Observando la figura anterior podemos notar los tres elementos el foco o fuente puntual de rayos-X, el objeto y la placa radiográfica. Es apreciable que la sombra o imagen es más parecida al objeto y más semejante en sus dimensiones cuanto más cercanos están entre si y cuanto más lejanos están los dos del foco emisor. Podemos deducir que la calidad de una imagen radiográfica se puede determinar como una relación de las magnitudes distancia foco-película y distancia foco-objeto.

Es importante que el foco sea puntual con relación al objeto, de lo contrario aparecerá un área de penumbra o difusión en el contorno. Esta penumbra puede aumentar en el caso que mayor sea el foco y más próximo esté el objeto al foco y cuanto mayor es la distancia foco pelícua.

El método radiográfico requiere que el haz sea perpendicular al objeto, y que la película y el objeto se encuentren en planos paralelos uno con respecto al otro, de lo contrario en ambos casos lo que se obtiene es una imagen distorsionada.

Podemos notar que una de las dificultades existentes en el método radiográfico además de las determinadas por la distancia foco objeto, foco película y tamaño del foco, proviene los diferentes espesores que presentan los distintos materiales porque en algunos casos dichos espesores son tan grandes que afectan el resultado del estudio, ya que algunas partes se encuentran considerablemente más cerca o más lejos del foco. Es posible reducir la distorsión en la imagen cuando no ocurre el alineamiento perpendicular entre los defectos o irregularidades y el foco de rayos-X. Aunque no del todo, puede ser realizada si colocamos lo máximo permisible el foco y colocando en paralelo y más cercano posible el objeto de la película. Describiremos a continuación las pautas que deben tenerse en cuenta desde un punto de vista geométrico en el método radiográfico (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

### **2.9.1 Fuente puntual de rayos-x**

Con la finalidad que los rayos-X sean perpendiculares, el foco debe ser lo más puntual posible respecto a las dimensiones del objeto y la película. Es común que cuando esto no ocurre, la distancia foco película sea aumentada (Bermúdez, 1967).

### **2.9.2 La distancia foco-película**

Cuando los espesores de los materiales son considerablemente grandes debemos ubicar el foco de rayos-X a la mayor distancia posible de la placa radiográfica (ver Figura 7). Con el fin de obtener una imagen con la mejor definición posible y de tamaño real respecto al objeto radiografiado (Bermúdez, 1967).

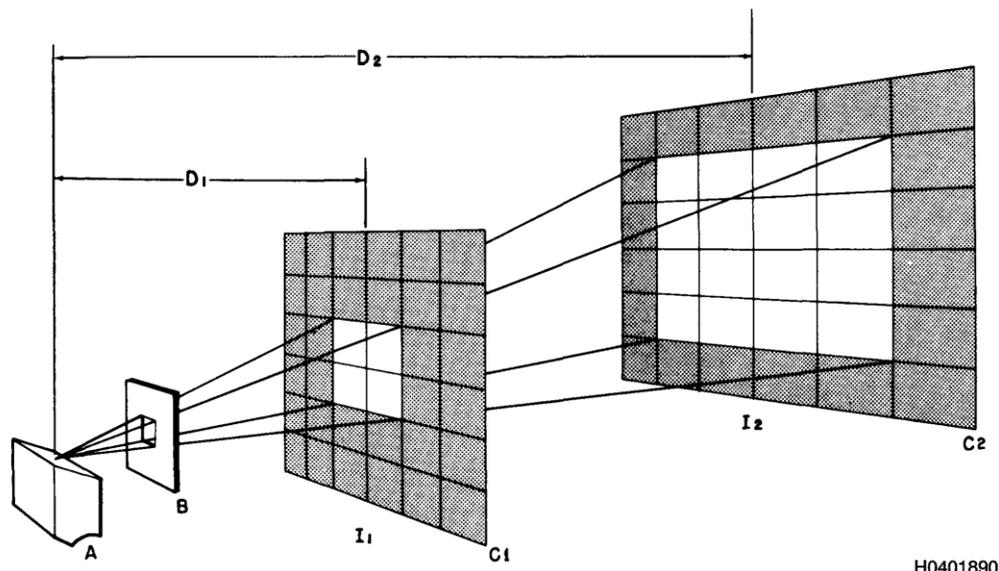
### **2.9.3 La distancia objeto-película**

Cuando las superficies a radiografiar son curvas, se deben utilizar placas flexibles que se ciernan al contorno de la superficie del objeto o de lo contrario la definición y el tamaño de la imagen serán negativamente afectados. La distancia objeto película debe ser siempre la menor

posible; si la placa sigue el contorno curvo de un objeto se cumplirá la mínima distancia objeto película (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

### Figura 7

*Distancia foco –película*



H0401890

*Nota.* Tomado de Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014.

### 2.9.4 Perpendicularidad del haz respecto al objeto

El objeto y el foco deben permanecer perpendicularmente entre sí, además el objeto y la película deberán permanecer paralelos entre sí y el sistema deberá permanecer inmóvil.

## 2.10 Factores de Exposición Radiográfica

### 2.10.1 Cantidad de radiación

Es uno de los factores que se debe tener en cuenta para poder obtener las densidades radiográficas adecuadas a fin de lograr una correcta interpretación de la radiografía. Como sabemos la imagen radiográfica es la impresión que dejan los fotones de rayos x sobre la película mediante procesos fotoquímicos luego de atravesar un material que deseamos estudiar.

En el método radiográfico utilizamos la radiación que proviene directamente del foco de rayos x a la que se le denomina radiación primaria, la cual es aprovechada en la formación de imágenes. Pero existe una radiación a la cual llamaremos secundaria y que proviene de la interacción de los fotones de rayos x con la materia que compone el sistema radiográfico o la estructura a la cual se desea investigar. Esta radiación secundaria que se origina en procesos físicos anteriormente descritos es la que siempre se debe evitar ya que perjudica la calidad de la imagen radiográfica.

El kilovoltaje, miliamperaje y el tiempo de exposición son los factores que determinan cuantitativamente y cualitativamente a la energía que sale del ánodo, si entendemos que la densidad radiográfica es el grado de ennegrecimiento que adquiere una placa radiográfica, cuando ésta ha recibido los fotones de rayos x. De lo expuesto se evidencia lo importante que es controlar la calidad y cantidad de energía que llega a la placa radiográfica. Si se mantienen invariables otros parámetros como distancia o posición determinaremos que la cantidad de radiación viene dada en forma proporcional por la intensidad de radiación y el tiempo de exposición en la práctica; esto queda expresado mediante la ecuación (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014):

$$Q = I.t.....(2.15)$$

Donde:

Q = Cantidad de radiación

I = Intensidad de radiación (cantidad de energía en la unidad de superficie en la unidad de tiempo)

t = tiempo de exposición

### **2.10.2 Intensidad de radiación**

Los factores que determinan el tipo de intensidad que se obtiene son el miliamperaje, el kilovoltaje y el material del cual está constituido el ánodo especialmente el número atómico de éste. La relación miliamperaje-intensidad se aprecia si al mantener los otros parámetros

constantes sólo modificamos el miliamperaje y se observará un aumento en las longitudes de onda obtenidas al aumentar también el mili amperaje (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

Es posible también aumentar el valor de la intensidad al aumentar el kilovoltaje existente en el tubo de rayos-X esto es observable en el cambio de las longitudes de ondas que aparecen en el ánodo, se observa variaciones en el espectro de las longitudes de onda que aparecen. Este proceso sólo es posible si logramos mantener los otros factores invariables (Fuerza Aérea del Perú [2014], 2014)

De lo expuesto entendemos que los factores miliamperaje y kilovoltaje son determinantes para los valores que se desean obtener de la radiación ya que un aumento del miliamperaje producirá un aumento en la cantidad de la radiación y un aumento en el kilovoltaje producirá un aumento en la cantidad y calidad de la radiación, notándose en cada caso un aumento en la intensidad y una proporción de longitudes de onda más cortas.

El concepto de intensidad de la radiación se hace importante debido a que si consideramos despreciable la absorción del aire sobre los rayos x y mantenemos constantes los parámetros de kilovoltaje y miliamperaje, la cantidad de radiación que reciben varios planos paralelos al foco es la misma sin importar la distancia a la cual se encuentren del foco, pero la intensidad sí va cambiando ya que el haz de rayos-x cada vez diverge más de su punto de origen y la energía queda esparcida sobre una superficie mayor . Esta relación de cambio de intensidad con el cambio de distancia se puede expresar mediante la fórmula que se muestra a continuación (United State Air Force [USAF], 2014).

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \dots \dots \dots (2.16)$$

$I_1$  es la intensidad al distancia  $d_1$

$I_2$  es la intensidad al distancia  $d_2$

La capacidad de un material para absorber fotones de rayos x depende del número atómico de éste así como su densidad y espesor, por ello es importante conocer el tipo de material y sus características

Como se ha indicado anteriormente, la calidad y cantidad de radiación se controla mediante el kilovoltaje, miliamperaje y el tiempo de exposición, donde la calidad de penetración viene determinada por el kilovoltaje, que da la energía o fuerza a los fotones para atravesar la materia.

Debido a que el haz de rayos x diverge, la energía de los rayos x no es uniforme sobre una misma superficie ya que no todos los rayos llegan con el mismo ángulo a la misma superficie. La intensidad de los rayos está determinada por el ángulo que existe entre la vertical que forma el foco con la superficie receptora. Cuando la intensidad de un haz es debilitada por la variación del ángulo decimos que ocurre el efecto talón.

Como se ha indicado líneas arriba, existe una clara relación de proporción entre la cantidad de radiación y la relación intensidad-tiempo de exposición. También se puede decir que si se mantiene constante el kilovoltaje la intensidad es igual al producto del miliamperaje por el tiempo de exposición. Además, se debe considerar la siguiente relación:

$$E=M.t \dots\dots\dots(2.17)$$

Donde:

E=Exposición

M=miliamperaje

t= tiempo de exposición

Mediante esta relación es posible determinar la cantidad de radiación que sale del foco o ánodo del tubo, especialmente mediante los últimos dos factores.

Si se trabaja usando radiografía, uno de los factores que debemos alcanzar es la correcta densidad radiográfica; que como ya se mencionó, viene a ser el grado de ennegrecimiento que se obtiene en una placa radiográfica. Si se considera que dicho grado de ennegrecimiento es consecuencia de la exposición recibida por la placa, se puede decir que, si

se mantienen los demás parámetros constantes, la densidad radiográfica es proporcional o susceptible de variar si variamos el miliamperaje o el tiempo de exposición. Como en un estudio se requiere alcanzar grados de exposición determinados y operacionalmente es mejor modificar miliamperaje o tiempo de exposición, la exposición la mantenemos como un valor fijo y se puede alterar los otros dos factores para que la exposición permanezca como un parámetro fijo y predeterminado de trabajo. Lo anterior se puede expresar mediante la siguiente relación.

$$E=M_1t_1=M_2t_2 \dots\dots\dots(2.18)$$

Esta relación es llamada Ley de la Reciprocidad, en donde:

- M<sub>1</sub> = mili amperaje (1)
- M<sub>2</sub>= mili amperaje (2)
- t<sub>1</sub> =tiempo de exposición (1)
- t<sub>2</sub> =tiempo de exposición (2)

Nótese que los valores de la exposición permanecen constantes, pero los otros cuatro factores pueden variar, manteniéndose constante el producto de ellos. Esta relación reduce el tema de la densidad radiográfica simplemente a diferentes tiempos de exposición para alcanzar los valores que se requieran en un estudio.

Teniendo en cuenta que la intensidad de la radiación que recibe un objeto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia foco película, es posible obtener en dicha película una exposición que nos permita trabajar con la debida densidad radiográfica utilizando la siguiente relación:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \dots\dots\dots(2.19)$$

Siendo E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub> la exposición y de las distancias.

En lagunas ocasiones y dependiendo del tipo de trabajo, es necesario el uso de pantallas amplificadoras; en estos casos no se podrá usar las relaciones indicadas.

Existen tablas que permiten variar los valores de la exposición y la energía en función del espesor de un determinado material. Estas tablas tienen diferentes valores para diferentes kilovoltajes; dichos valores para un mismo material y un mismo espesor cambian cuando el kilovoltaje es mayor debido a que la energía de los fotones que salen del ánodo es mayor para voltajes más altos (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

### **2.11 Radiaciones Secundarias**

Existen tres situaciones que pueden ocurrir cuando un haz de radiación primaria impacta en el material a radiografiar. Puede ser absorbido por el material; puede pasar sin ser desviado, es decir, sigue su camino sin difusión alguna; o puede pasar a través del material, pero ser desviado de la trayectoria del haz primario, lo que se denomina difusión. Estos rayos que se difunden, es decir, no siguen el camino de los rayos primarios, salen en todas direcciones y al llegar a la película interfieren en la formación de la imagen, ya que al no seguir la geometría del haz primario llegan a la película desde distintas direcciones ocasionando la llamada imagen difusa (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

Como se ha indicado, el proceso de absorción de los rayos x por la materia también va a generar radiaciones modificadas, producidas por la pérdida de energía que ocurre en los fotones incidentes primarios. También ocurre el fenómeno de fluorescencia y la emisión de rayos x por el propio objeto como consecuencia del impacto de los rayos x primarios. Estas emisiones son producto de la absorción y son modificadas en su longitud de onda. También se dirigen en todas direcciones al igual que la radiación no modificada y son perjudiciales en la formación de la imagen radiográfica. A este conjunto de radiación secundaria se le denomina también radiación difusa. Estas radiaciones deben ser tratadas de manera de poder atenuar o eliminar sus efectos sobre la radiografía utilizando los medios técnicos adecuados (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

Si la radiación secundaria alcanza la placa radiográfica puede producir un llamado velo, el cual se manifiesta en una pérdida de contraste en la parte incidente o en la totalidad de la placa. La fracción de radiación secundaria que incide en la placa depende del espesor y el tipo de material con el que se trabaja y suele ser bastante importante. Se debe entender que esta radiación secundaria puede proceder de distintos medios que haya sido impactada por el haz primario, pueden ser soportes auxiliares, suelo, paredes o algún tipo de chasis entre otros. En la práctica se aprecia que las partes más afectadas por la radiación secundaria son las de menor densidad o las más cercanas a los bordes de la parte o pieza de estudio (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

Se puede atenuar los efectos negativos de la radiación difusa mediante el uso de los siguientes métodos:

#### **2.11.1 *Pantallas de plomo***

Se utiliza mediante un chasis en el cual la película radiográfica se ubica entre dos hojas de plomo cuyo espesor es de 0.1 y 0.2 mm se consigue que durante el tiempo de exposición llegue a la película una menor cantidad de radiación difusa, esto es gracias al efecto absorbente del plomo las cuales poseen menores longitudes de onda. Aunque el plomo absorba también radiación primaria podemos evitar esto aumentando el kilovoltaje o el tiempo de exposición.

#### **2.11.2 *Protección contra la protección difusa de retroceso***

Esto es necesario cuando la radiación primaria impacta sobre objetos que se encuentran detrás o debajo del objeto a radiografiar. Este efecto se puede evitar colocando detrás del objeto hojas de plomo; la cantidad de la radiación de retroceso depende en gran forma del espesor o variación de espesores, así como la forma del objeto a radiografiar.

### **2.11.3 Enmascaramiento y diafragmas**

La radiación difusa originada por el impacto de los rayos x en partes solidas diferentes del objeto que se está estudiando, pueden ser muy perjudiciales para la calidad de la imagen del objeto, sobre todo si el objeto es muy absorbente. Para evitar esto es necesario limitar el tamaño del haz colocando campos o diafragmas limitadores que reducirán el tamaño del éste o cubriendo el objeto con cuerpos que no permitan el paso de la radiación secundaria; a estos objetos se les denomina máscaras.

Cuando la pieza es irregular en contornos o formas se puede lograr un buen enmascaramiento colocando en estos bordes pastas de plastilina que contengan limadura de plomo, se puede lograr el mismo efecto colocando perdigones metálicos de plomo, acero o cobre que se adaptan a la irregularidad de la pieza rellenando cavidades donde la exposición calculada para partes gruesas es demasiado para partes delgadas (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

### **2.11.4 Filtración**

Una plancha metálica interpuesta en la trayectoria del haz realiza una acción filtrante al dejar pasar con mayor facilidad algunas longitudes de onda; la ubicación conveniente para estos filtros es entre el objeto y la película para conseguir el filtrado de la radiación secundaria. También puede ser usado un filtro a la salida del tubo de rayos x para moderar la radiación primaria con el fin de atenuarla. El filtro no elimina ni absorbe por completo la radiación difusa, si no que actúa como un artificio para que ésta se produzca en menor cantidad; también es necesario el uso de filtros en piezas en las cuales aparecen grandes diferencias de espesor, lo que se consigue también variando el tiempo de exposición para zonas delgadas de la pieza con zonas de mayor espesor (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

El espesor y el material con que se fabrique el filtro determinarán la cantidad de radiación filtrada. Si la radiografía es de un material de acero, el filtro puede ser de material de plomo con un espesor igual al 3% del espesor de la sección más gruesa o de cobre, pero con

un espesor del 20% del espesor de la sección más gruesa de la pieza. Cuando la pieza o sección es de aluminio, se puede usar filtros de cobre que tengan un espesor igual al 4% del espesor de la sección más gruesa (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

## **2.12 Pantallas Radiográficas**

Considerando que el porcentaje de absorción por parte de la película radiográfica respecto al total de la energía que llega a ella es solo el 1%, se debe usar medios o artificios que refuercen la acción de los rayos x durante el proceso de formación de la imagen; entre estos medios tenemos las pantallas radiográficas, las cuales pueden ser de dos tipos y pasamos a describir:

### **2.12.1 Pantallas metálicas**

Son hojas muy delgadas, generalmente de metales pesados sobre soportes de cartulina. Las pantallas de plomo son las más utilizadas y deben tener un espesor de 0.1mm a 0.2mm. El uso de estas pantallas consiste en colocar dos pantallas entre las cuales se coloca la película. Dichas pantallas están en contacto muy cercano con la película, lo que permite lograr los siguientes efectos.

- Reforzar la acción de los rayos-x primarios.
- Intensificar el efecto fotográfico al ser mayor para la radiación primaria y menor para la radiación secundaria.
- Absorber mucho mejor la radiación secundaria que la primaria.

### **2.12.2 Pantallas salinas o también llamadas pantallas Fluorescentes**

Estas pantallas absorben la energía de los rayos x, y la transforman en luz visible o ultravioleta, a las cuales es más sensible la emulsión fotográfica. Estas pantallas están constituidas por una cartulina en la que sólo una de sus caras está recubierta por una sustancia fluorescente cubierta a su vez, de plástico y protegida por capas contra la abrasión. La sustancia fluorescente comúnmente usada es el volframato cálcico o el sulfato de bario y

plomo. Las pantallas fluorescentes también se usan en parejas en contacto con la emulsión de la película.

### **2.13. Formación de Imágenes Radiográficas**

Estos factores son de gran importancia al igual que los mencionados anteriormente. Podemos citar los siguientes puntos en la obtención una correcta radiografía.

#### **2.13.1 Películas radiográficas**

Las imágenes radiográficas se registran en forma permanente en la emulsión fotográfica cuando el medio de soporte es adecuado. Este conjunto de emulsión y soporte es llamado película radiográfica. Llamamos soporte a un material plástico comúnmente de celulosa y la emulsión generalmente son compuestos de plata, los cuales son sensibles a la energía de los rayos x, entre los compuestos de plata más comunes ha sido usado el halogenuro de plata, que es depositado en las dos caras del soporte el bromuro de plata, usado en estos casos debido a su alta sensibilidad a la reacción fotoquímica. Al incidir un haz de rayos x, gamma, luz visible o electrones sobre la emulsión, ocurre una reacción que libera electrones procedentes de los aniones del halogenuro, que son captados por los iones de plata, originándose plata metálica y quedando por efecto de esta reacción una imagen de forma latente que se puede hacer visible usando métodos de revelado, los cuales incluyen una solución reductora que actúa rápidamente en los halogenuros más expuestos que en los no expuestos, de manera que hay concordancia con la reacción química que es intensa con la reacción fotoquímica (United State Air Force [USAF], 2014).

#### **2.13.2 Clases de películas radiográficas**

Podemos dividir las películas radiográficas en:

**Clase uno.** Películas de grano extrafino y elevado contraste usadas para obtener máxima calidad radiográfica. Es común usar este tipo de película cuando el kilovoltaje es elevado o cuando el material a radiografiar es de una aleación ligera; este tipo de película es usada para radiografías muy críticas y pueden ser usadas con pantallas de plomo o solas.

**Clase dos.** Películas de grano fino y elevado contraste, apropiadas para radiografías de aleaciones y materiales ligeros a bajos kilo voltajes y para radiografías de kilo voltajes muy altos es necesario que la sección sea de acero grueso para el uso de estas películas. Al ser películas de acción rápida su uso es muy generalizado puede ser usado directamente o con pantallas de plomo.

**Clase tres.** De los tipos de película existente son las más rápidas cuando se trabaja con altos kilo voltajes pueden usarse solas o con pantallas de plomo.

**Clase cuatro.** Si se utilizan pantallas fluorescentes son las de mayor rapidez y mayor contraste. Son usadas en acero, latón etc., que son materiales de considerable densidad y espesor. El voltaje debe ser limitado al usar este tipo de película; el contraste que presentan es bajo usándolas solas o con pantallas de plomo (United State Air Force [USAF], 2014).

### 2.13.3 Densidad radiográfica

Es la medida del grado de ennegrecimiento que adquiere una película radiográfica, producto de la acción de la radiación, la cual reduce los iones de plata debido a la acción fotoquímica de la radiación. La densidad es incrementada posteriormente mediante el proceso de revelado. La densidad es consecuencia de la luz transmitida a través de la zona de radiografía y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$D = \log \frac{I_0}{I} \dots \dots \dots (2.20)$$

Donde:

- D: Densidad radiográfica
- $I_0$ : Intensidad de la radiación incidente.
- I: Intensidad de la radiación transmitida.

Si se analiza esta ecuación de la densidad se entiende que la luz transmitida aumenta cuando la densidad radiográfica disminuye. Deben entenderse los conceptos de transmitancia, opacidad y densidad.

Los ennegrecimientos de la película radiográfica producidos por la reducción de los iones de plata provenientes de la acción fotoquímica de la radiación y del posterior revelado se miden en términos de densidad radiográfica (United State Air Force [USAF], 2014).

## **2.14 Principios Básicos en la Radiografía**

El resultado mostrado en la radiografía solamente es apreciable cuando los parámetros siguientes están en los rangos adecuados para su análisis y observación.

### **2.14.1 Densidad de Película**

En términos fotográficos, la densidad es una medida del grado de ennegrecimiento u oscurecimiento de producido sobre la radiografía, causada por la exposición a la radiación y siendo resultado de los depósitos metálicos de plata que permanecen sobre la película después de la exposición y el tratamiento. La densidad es medida en términos de transmisión visible ligera con tiras de prueba. La escala aceptada de medida de densidad de película es el logaritmo del recíproco de la fracción de la luz de incidente a la luz transmitida, como es dado por la ecuación siguiente (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

$$D = \log \frac{I_0}{I_t} \dots \dots \dots (2.21)$$

Donde:

D = densidad de imagen.

$I_0$  = el original alumbra la intensidad que se cae sobre una superficie de película.

$I_t$  = alumbra la intensidad transmitida por la película.

### **2.14.2 Definición radiográfica**

Se presenta en el cambio drástico de ir de una zona de densidad radiográfica dada a otra; la definición nos permite igual que el contraste radiográfico, ver características más importantes y necesarias más fácilmente.

### **2.14.3 Contraste radiográfico**

Es la diferencia de densidad de dos aéreas en una radiografía. El contraste hace distinguir características de interés del área circundante (defectos). Depende de la energía de

radiación (calidad de penetración), características de contraste de la película, cantidad de exposición (intensidad de radiación y tiempo de exposición), pantallas intensificadoras, procesado de la película, radiación dispersa.

El contraste radiográfico resulta de una combinación de contraste del objeto y contraste de la película.

#### **2.14.4 Contraste del objeto**

Es la intensidad de la radiación relativa que pasa a través de dos porciones seleccionadas de material. Depende de los siguientes factores:

- Tipo y forma del objeto de ensayo.
- Energía de la radiación aplicada (longitud de onda tipo de fuente).
- Radiación dispersa.

El contraste del objeto disminuye cuando la longitud de onda de la radiación disminuye.

Por su parte, el contraste del objeto aumenta:

- Cuando hay una variación de espesores grandes
- Con el uso de diferentes energías de rayos X.
- Con máscaras, diagramas, filtros o pantallas.

#### **2.14.5 Contraste de la película**

Es la capacidad de una película de registrar diferentes densidades en función de la radiación recibida. La relación entre la cantidad de exposición y la densidad resultante de una película se expresa mediante la curva característica y es determinado por los siguientes factores:

- Tamaño del grano de la película
- Concentración de los químicos del proceso.
- Tiempo de revelado.
- Agitación en la solución reveladora

## 2.15 Causas de la Disminución de la Definición en una Radiografía

La definición en una radiografía se refiere a la obtención de una buena delineación de los contornos de una imagen radiográfica. Algunas causas de su disminución son:

**Calor.** Este factor sólo aparece con equipos de rayos-X ya que, de toda la energía cinética de los electrones que impactan en el ánodo, el 99% se transforma en calor.

**Absorción.** Debido a los mecanismos de ionización (Fotoeléctrico, Compton, Producción de pares).

**Dispersión.** Debido a los mecanismos de ionización (Compton y creación de pares). La radiación dispersa es reflejada por los materiales que rodean la película, penetrando en ésta y nublan la imagen radiográfica.

## 2.16 Procesado de la Película Radiográfica

Actualmente existen máquinas automáticas de revelado que permiten ahorrar tiempo para este proceso. También es posible realizarlo manualmente mediante un proceso químico que debe desarrollarse en un cuarto oscuro, usando una luz de seguridad. Se describen los siguientes pasos a continuación.

### 2.17 Proceso de Revelado

#### 2.17.1 Revelado

La forma selectiva de actuar que tiene el revelador sobre los cristales de bromuro de plata que han sido expuestos a la radiación consigue reducir la plata iónica en plata metálica, y como los cristales no expuestos son reducidos más lentamente, se debe tener cuidado con el tiempo y temperatura del revelado pues estos factores afectan directamente la calidad de la imagen.

#### 2.17.2 Primer lavado

Esta etapa puede realizarse usando agua corriente; el uso del agua tiene dos objetivos evitar la contaminación del fijador y detiene la acción del revelador. El tiempo adecuado para este proceso es un promedio de diez segundos.

### **2.17.3. Fijado**

En esta etapa es donde se consigue el contraste final de película. El fijador logra retirar de la emulsión los cristales no expuestos de bromuro de plata y se hace notoria la diferencia entre las partes expuestas y las no expuestas a la radiación de la película.

### **2.17.4 Ultimo lavado y secado**

Esta fase se realiza mediante chorro de agua o depósitos donde puedan enjuagarse correctamente las películas. El objetivo de esta parte es eliminar las sales solubles no expuestas y las sales residuales de la película, con lo que se deja al secado libre de contaminación de agentes externos como el polvo.

## **2.18 Ventajas del Método Radiográfico**

- Puede ser usada en muchos materiales.
- Suministra un registro permanente del objeto de ensayo.
- Revela discontinuidades internas en los materiales.
- Descubre errores de fabricación y con frecuencia indica el requerimiento de la acción correctiva.

## **2.19 Desventajas del Método Radiográfico**

- Se debe tener acceso por los dos lados del objeto de ensayo.
- Discontinuidades planas no paralelas al haz de radiación son difíciles de detectar.
- Es un método de ensayo costoso.
- El proceso radiográfico de la película consume tiempo.
- Algunas discontinuidades superficiales o poco profundas pueden ser difíciles si no imposibles de detectar.

### III. Método

#### 3.1 Tipo de Investigación

El tipo de estudio es descriptivo de acuerdo con Hernández et al, (2000), con diseño analítico y prospectivo; luego de realizar el estudio físico del proceso de interacción de los rayos X con la materia y conociendo los parámetros a evaluar, se llevó a la práctica en las instalaciones del servicio de mantenimiento SEMAN de la Fuerza Aérea del Perú.

#### 3.2 Ámbito Temporal y Espacial

El estudio se realizó durante los años de 2016 al 2018 en las instalaciones de la base área de la Fuerza Aérea del Perú.

#### 3.3 Variables

**VI:** Control de Calidad

**VD:** Rayos X al fuselaje de aeronaves

#### 3.4 Población y Muestra

La población estuvo constituida por las aeronaves que pasan por el Servicio de Mantenimiento de la Fuerza Aérea del Perú (SEMAN – FAP). LA muestra de este trabajo de investigación está basado en el estudio de cuatro aeronaves las cuales requerían control de calidad por el método de rayos X. El primero un avión Hércules de la FAP, el segundo es un Boeing 737-401, el tercero Boeing 737-4B7 y el cuarto, un avión CESSNA 402C, todos pertenecientes a la empresa SWIFT AIR. Estos se describen a continuación.

##### 3.4.1 *El avión Hércules de la fuerza aérea del Perú*

La aeronave ingresa a los servicios del SEMAN para un control correspondiente a la zona del fuselaje bajo la norma técnica S/B 382-53-61 R3, la cual es emitida por la empresa fabricante del avión *LOCKED*. Dichas normas están bajo la regulación de las Normas Técnicas ASTM.

La norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, 2018) S/B 382-53-61 R3 indica que al avión le corresponde un control a la zona de la unión del fuselaje con las

alas tanto derecha como izquierda, la cual corresponde la estación 477 y 517 derecho, con una densidad radiográfica de 2.0 e izquierdo, siendo necesario para esta prueba no destructiva 8 radiografías repartidas: 4 en cada lado, con el fin de determinar el estado de las uniones del ala con el fuselaje.

### **3.4.2 *Avión Boeing 737-401***

Ingresa a los servicios de pruebas no destructivas del SEMAN para un control correspondiente a la zona del fuselaje bajo la norma técnica S53-09-A, la cual es emitida por la empresa fabricante del avión BOEING. Dichas normas están bajo la regulación de la Norma Técnica ASTM. El motivo de la inspección es detectar grietas en el marco de la ventana del fuselaje consecutiva a la puerta del avión. Se utilizó como datos técnicos 120Kv, 5mA, con un tiempo de exposición de cuatro (04) minutos. La distancia foco película utilizada fue 42 pulgadas y las películas radiográficas fueron en todos los casos ASTM clase I kodak de 5x7 pulgadas y una densidad de película de 1.5 a 3.0.

### **3.4.3 *Avión Boeing B737-4B7***

Ingresa a los servicios de pruebas no destructivas del SEMAN para un control correspondiente a la zona del fuselaje bajo la norma técnica S53-27-A, la cual es emitida por la empresa fabricante del avión BOEING. Dichas normas están bajo la regulación de la ASTM. Este avión solicita un mayor número de placas: 12 en total, a los arcos y largueros que dan resistencia al fuselaje. El área de estudio tiene por código es AREA S-6L TO 6R correspondientes a los largueros y arcos de la parte central del avión, con las especificaciones técnicas siguientes: 150 kilovoltios; 5 miliamperios; tiempo de exposición de 4.30 minutos; distancia foco película 74 pulgadas y una densidad entre 1.5 y 3.0. El tipo de película utilizada fue ASTM clase I kodak de 14x17 pulgadas. En el control de calidad no destructivo de las aeronaves antes mencionadas, mediante la técnica de RX se siguieron, seis (06) pasos para la obtención de la placa radiográfica que se indica a continuación en el diagrama de procesos.

### 3.4.4 *Avión CESSNA 402C*

Ingresa a los servicios de pruebas no destructivas del SEMAN para un control correspondiente a la zona del fuselaje bajo la norma técnica AD 2015-07-03, la cual es emitida por la empresa fabricante del avión. Dichas normas están bajo la regulación de la ASTM. Este avión solicita ocho placas en la parte delantera, específicamente en los largueros que soportan al motor y los esfuerzos que el motor demanda. Para obtener las radiografías se trabajó las siguientes especificaciones técnicas: un kilovoltaje de 120Kv, 5miliampereios, un tiempo de exposición de 1.1 minutos, distancia foco película de 14 pulgadas, la película Kodak de tipo ASTM clase I de 5x7 pulgadas y una densidad de película en un rango de 1.8 a 3.5.

## 3.5. Instrumentos

### 3.5.1 *Equipos de rayos x portátiles*

El trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos (NDT) del Servicio de Mantenimiento de la Fuerza Aérea del Perú (SEMAN - FAP), los equipos que se utilizaron se observan en la Figura 8 y se describen a continuación:

#### **Características técnicas del equipo:**

Tipo:	Tubo de rayos-x portátil
Marca:	Baltospot-Baltea
Modelo:	GFC-165
País de origen:	Bélgica
Año de fabricación:	1984
Kilovoltaje:	60kV-160kV
Miliamperaje:	3mA-5Ma

## Figura 8

*Equipo portátil de rayos-X*



*Nota.* Equipo portátil de rayos x usado para la presente investigación. Elaboración propia.

### **3.5.2 Densitómetro o medidor de densidad**

Este aparato permite medir el grado de ennegrecimiento u oscuridad en la película radiográfica, este artefacto es muy útil ya que en diferentes procedimientos radiográficos se requiere de diferentes densidades y mediante este medidor podemos comprobar que se está utilizando los niveles adecuados de densidad (ver Figura 9).

#### **Características técnicas del equipo:**

Tipo:	Medidor de densidad de película Densitómetro
Marca:	World Head quarters
Modelo:	X-Rite 301
País de origen:	Estados Unidos
Año de fabricación:	1984

## Figura 9

### *Densitómetro de placas*



*Nota.* Investigador midiendo el grado de ennegrecimiento de la placa. Elaboración propia.

### **3.5.3 Equipo de revelado automático**

Este equipo permite el revelado automático de las películas radiográficas realizándolo con gran precisión y calidad. Es un mecanismo que permite que la película pase rápidamente por los procesos de revelado, fijación y secado en poco tiempo obteniéndose así una radiografía lista para su análisis e interpretación (ver Figura 10).

#### **Características técnicas del equipo:**

Tipo:	Equipo de revelado automático
Marca:	AFPIMAGING
Modelo:	12191
País de origen:	Estados Unidos

Año de fabricación: 1997

### Figura 10

*Equipo de revelado automático*



*Nota.* Equipo de revelado automático usado en la presente investigación. Elaboración propia.

#### **3.5.4 Película radiográfica**

Las películas radiográficas utilizadas en este trabajo cumplen los requerimientos de la ASTM –E1742M las películas debían diferir solo en sus dimensiones, ya que fueron utilizadas para diferentes tipos de avión y distintas partes de avión. Mencionaremos que se utilizaron películas de la marca kodak clase I de 7x17, 5x17 y 14x17 pulgadas (ver Figura 11).

## Figura 11

*Un tipo placa radiográfica utilizada*



*Nota.* Se muestra una de las placas radiográficas utilizadas en la presente investigación.

Elaboración propia.

### 3.5.5 Equipo detector de radiación

A continuación se describe el equipo de detección de radiación utilizado en el presente trabajo (ver Figura 12).

#### Características técnicas del equipo:

Tipo:	Detector de radiación
Marca:	Victoreen
Modelo:	492
País de origen:	Estados Unidos
Año de fabricación:	2013

**Figura 12**

*Detector de radiación (Geiger -Muller )*



*Nota.* Se muestra el detector de radiación (Geiger -Muller) utilizado en la presente investigación. Elaboración propia.

### **3.5.6 Dosímetro**

A continuación se describe el dosímetro utilizado en el presente trabajo (ver Figura 13).

#### **Características técnicas del equipo:**

Tipo:	Dosímetro
Marca:	InLight Systems
Modelo:	TLD-XA009339174
País de origen:	Estados Unidos
Año de fabricación:	2018

**Figura 13***Dosímetro*

*Nota.* Se muestra el dosímetro utilizado en el presente trabajo de investigación.

Elaboración propia.

### **3.5.7 Placa de calibración**

A continuación se describe la placa de calibración utilizada en el presente trabajo (ver Figura 14).

#### **Características técnicas del equipo:**

Tipo: Placa de calibración

Marca: Kodak

Modelo: CAT 184 2137

País de origen: Estados Unidos

Año de fabricación: 2016

### **Figura 14**

*Placa de calibración*



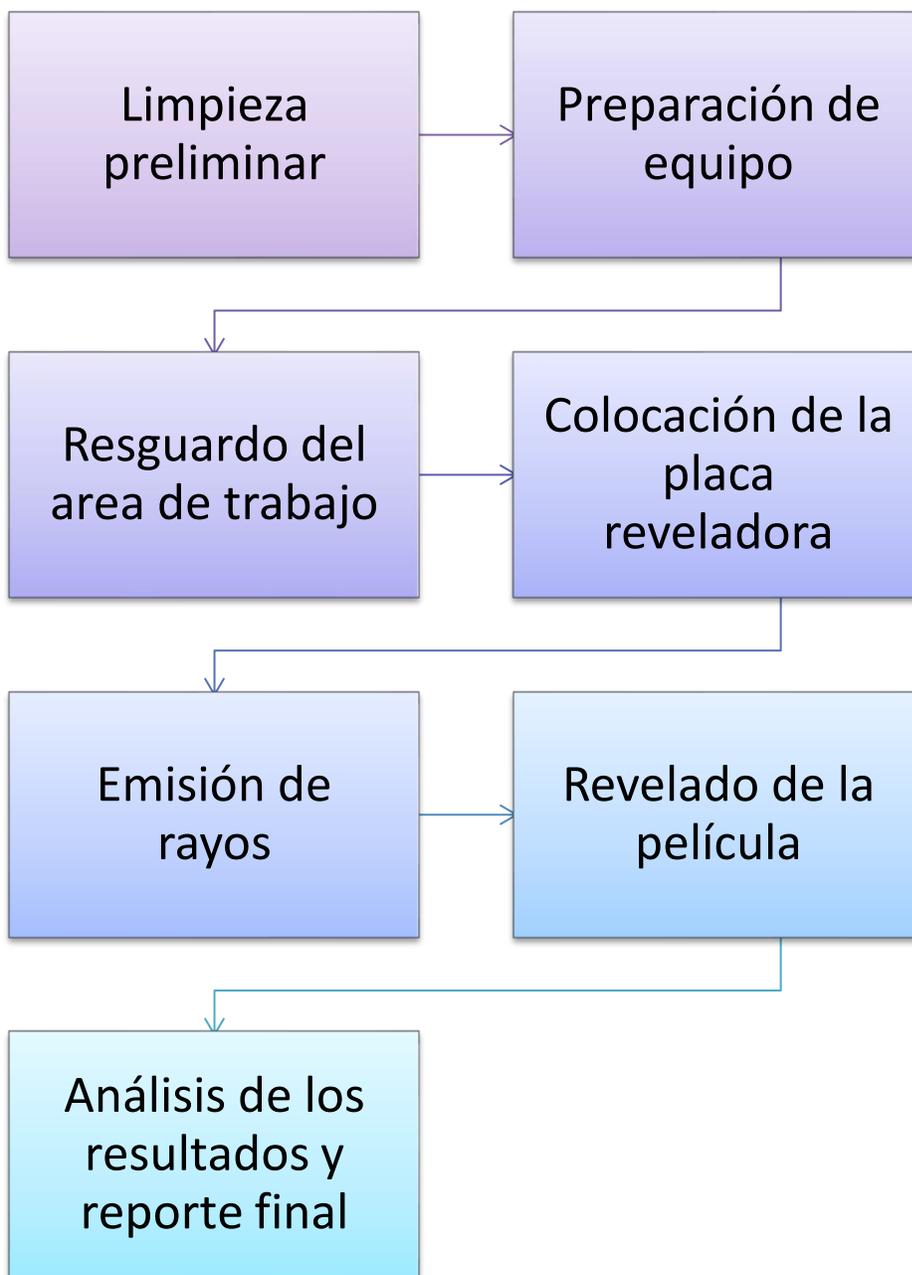
Nota. Se muestra la placa de calibración de la presente investigación. Elaboración propia.

### **3.6 Procedimientos**

En el control de calidad no destructivo de las aeronaves antes mencionadas, mediante la técnica de RX se siguieron, seis pasos para la obtención de la placa radiográfica que se indica a continuación en la Figura 15 del diagrama de procesos.

**Figura 15**

*Procedimientos para la obtención de la placa radiográfica*



*Nota.* Flujograma que indica el proceso para la obtención de la placa radiográfica. Elaboración propia.

### 3.6.1 *Control de calidad*

**Primer paso: limpieza preliminar.** En este caso fue necesario remover los accesorios dentro del fuselaje tales como asientos, capas de aislamiento plástico, alfombras etc. Es decir, elementos ajenos al fuselaje. Fue posible retirarlos porque son partes móviles que se unen al fuselaje mediante unos sujetadores previamente ubicados en lugares fijos.

Luego de remover y despejar la zona indicada, se procedió a la limpieza; en esta etapa era importante considerar las condiciones de trabajo del avión que presentan pintura en su exterior y en el interior, un inhibidor de humedad para protegerlo de la corrosión, por lo que, se limpió la parte de estudio únicamente usando trapo de uso industrial en el interior y en el exterior, brochas que hacían la función de cepillos y agua a presión para eliminar toda la suciedad que puede acumular el avión, con lo cual se consiguió despejar el área de estudio .

**Segundo Paso: Preparación de Equipo.** Como se requerían radiografías del fuselaje, se colocó el tubo de rayos X en el interior del avión, para ubicarnos en el centro del pasadizo y dirigimos la salida de los rayos hacia el centro de la placa, la cual se ubicaba fuera del avión, ya que la unión externa donde va sujeta tiene una contraparte, también observable desde la parte interior del avión. Para fijar el centro del foco con el centro de la placa se utilizó el puntero laser ubicado en la parte superior de la salida del tubo de rayos X, apuntando a la contraparte de la estructura donde está la placa radiográfica. Gracias a los trípodes se pudo ubicar en la forma más conveniente los tubos de rayos X. Como se trata de la estructura que sujeta la unión al fuselaje, el tubo de rayos X se ubicó a una distancia de 60 pulgadas con 120kV y 5mA y un tiempo de exposición de 3 minutos. Se pudo graduar la distancia foco película con cinta métrica.

**Tercer Paso: Resguardo del área de trabajo y Protocolo de seguridad.** Al ser un trabajo con radiaciones ionizantes, se debía usar un criterio de protección radiológica; en este caso se utilizó el de distancia a la fuente. Una ventaja en este método, es que los tubos pueden ser disparados a gran distancia por medio de cables eléctricos de más de 50m de longitud, lo

que proporciona una adecuada distancia de protección. En cuanto al resguardo del área de trabajo, se utilizó luces de seguridad que van acompañadas de sirenas, lo cual permite avisar a todo el personal acerca del uso de radiación, evitando así que se acerquen al área de trabajo. Otro elemento con el que se puede contar es el círculo de 50m de radio en el cual se coloca el avión; en dicho círculo ningún personal puede permanecer durante los disparos de rayos X. La efectividad de la distancia como medida de radioprotección es comprobada por medio de detectores de radiación los cuales cuentan con sus respectivos certificados de calibración como se muestra en la Figura 16, en la que se observa todo un protocolo de seguridad establecido para este tipo de trabajo cada vez que se realizó uno de estos estudios, esto es garantizado por el personal debidamente preparado y acreditado como la oficial de radioprotección Sandra Luz Félix Inga.

**Cuarto Paso: Colocación de la placa reveladora.** Se colocó la placa radiográfica fuera del avión y el tubo de rayos X dentro y en la parte central del avión, así el fuselaje quedó entre ambos; en este caso la película radiográfica que se utilizó fue la ASTM clase-I Kodak de 7x17 pulgadas, en las ocho tomas que se requerían estas placas. Fueron pegadas con *masking tape* de 2.0. En esta etapa es muy importante hacer coincidir la parte central de la placa con la parte central de la fuente de rayos X; esto es posible gracias al puntero laser ubicado en la parte superior de la salida de los rayos X. La placa fue pegada fuertemente por las cuatro esquinas con la finalidad de evitar el ingreso del aire con partículas ajenas al fuselaje. Este trabajo fue complejo y laborioso porque debe coincidir el centro de la placa con el centro de la parte a estudiar, y también debe coincidir con el centro del tubo de rayos X. Dada la complejidad de esta fase del proceso, debe realizarse en equipo. Por las dimensiones de la aeronave y lugar a estudiar, fue necesario el uso escaleras y bancos de trabajo, los cuales son unas grandes estructuras metálicas. En este paso se debe determinar dónde colocar las placas y marcar donde va el tubo de rayos X en cada caso con respecto a la placa radiográfica. Se marca cada placa numerada en su posición y la posición del tubo de rayos X. En cada caso se

marca en el piso un código que corresponde al mismo número de placa que se va a utilizar lo cual es sumamente importante en la siguiente etapa del trabajo.

### Figura 16

*Licencia otorgada por el IPEN*

Oficina Técnica de la Autoridad Nacional

**IPEN**  
INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR

**OTAN**  
ORGANISMO TECNICO DE LA AUTORIDAD NACIONAL

### Licencia de Operación

Licencia N° 4328-08  
Experiencia N° 0004-19-OTAN  
Resolución N° 0020-14-IPEN/OTAN  
Vencimiento 29/11/2021

Titular de la Licencia **FUERZA AEREA DEL PERU  
SERVICIO DE MANTENIMIENTO**

Dirección Legal **AV. LA PERUANIDAD S/N  
JESUS MARIA, LIMA, LIMA**

Práctica **RADIOGRAFIA INDUSTRIAL PORTÁTIL**

Fuente de Radiación **EQUIPOS DE RAYOS X**

Ubicación de la Instalación **AV. EDMUNDO AGUILAR PASTOR S/N,  
SANTIAGO DE SURCO, LIMA, LIMA**

La Licencia es otorgada, conforme a lo establecido en el Artículo 12° del Reglamento de la Ley N° 29021, aprobado por Decreto Supremo N° 039-2008-EM, bajo las Condiciones y Límites de la Licencia, que integran la misma y que son de cumplimiento obligatorio del Titular.

Exhibir la presente autorización en lugar visible al público.

Lima, 26 de Noviembre de 2018.

Cristian Paul Talag  
Director

*Nota.* Licencia otorgada por el IPEN para la realización de la presente investigación.

Elaboración propia

**Quinto Paso: Emisión de rayos.** Luego de revisar que las etapas anteriores estuvieran correctamente realizadas, se procedió a realizar los disparos; para esto fue muy importante cerciorarse y revisar los pasos antes descritos. Como se trataba de diferentes posiciones a radiografiar en el fuselaje, fue necesario cambiar la ubicación del tubo de rayos-X. Ya que no se hacen todos los disparos a la vez, porque se necesitarían más tubos de rayos de los que se tienen, se recurre a disparar una vez y luego se regresa a la aeronave y se coloca el tubo de rayos-X en la posición indicada por la marca (código) en el piso. Se repitió el proceso hasta completar las placas requeridas. A pesar de que se considera laborioso haber tenido que predeterminar posiciones tanto de placas como del tubo, representó un ahorro de tiempo para esta etapa. Al igual que las etapas anteriores, lo descrito requiere de trabajo en equipo. Dichos equipos de rayos-X cuentan con sus respectivos certificados de calibración como se muestra en las Figuras 17 y 18, para garantizar la calidad del trabajo.

### Figura 17

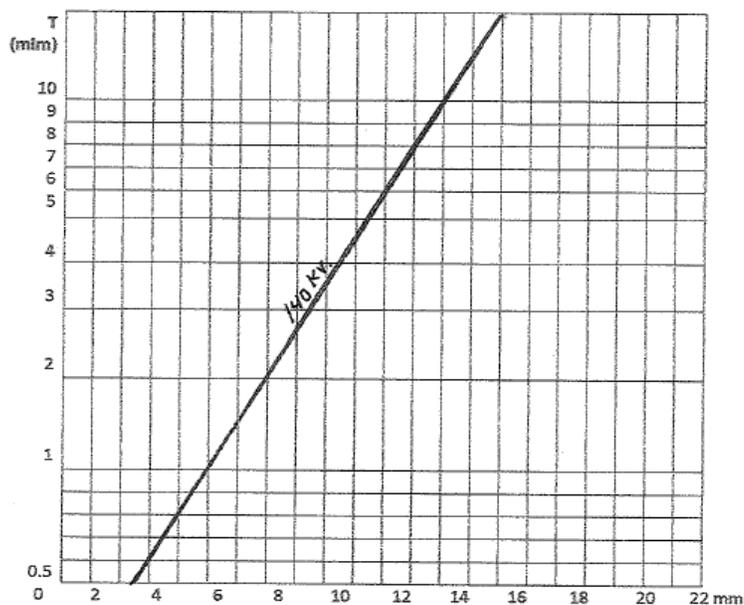
*Tabla de exposición para el acero*

 <b>BALTEAU NDT</b>			
Département Contrôle			
<b>EXPOSURE CHART FOR STEEL</b>			
<b>BALTO SPOT</b>			
<b>GFD 165</b>			
Instrument	BALTEAU GFD 165	Serial Number	112935/01 - 112698/02
Film	ASTM I		
Focal spot	1,5 x 1,5 mm <sup>2</sup>		
Material	Steel SM 550003SMDI		
Processor	Automatic		
SFD	700mm - 27.5 in		
Density	2.0		
Milliampere Minutes	5Ma	NDT Technician:	
DATE	SEP 29 2016	DUE DATE	SEP 29 2019

*Nota.* Se muestra la tabla de exposición para el acero que permitió la realización de la presente investigación. Elaboración propia

**Figura 18**

*Certificado de calibración de equipos de rayos x*



AE/5807938/1910	FILMS		FOCUS		TUBE OUTPUT	
		(T) x		(T) x	5mA	3mA
	AGFA	D7	350mm	14 in	(T) x .25	
	AGFA	D4	500mm	20in	(T) x .5	
	DUPONT	NDT 75	1000mm	40in	(T) x .2	
	DUPONT	NDT 55	1400mm	55in	(T) x .4	
	KODAK	MX			(T) x .2	

Nota. Se muestra el certificado de calibración del equipo portátil de rayos-x. Elaboración propia.

**Sexto Paso: Proceso de revelado.** El proceso de revelado es realizado eficientemente y en un tiempo relativamente corto mediante la máquina de revelado automático descrita en el capítulo de materiales y métodos. En el presente caso inició y terminó con el secado de la placa.

**Control de calidad.** Para realizar el control de calidad al fuselaje de las aeronaves, se procesaron un total de 32 radiografías, de las cuales ocho se realizaron en el avión Hércules de la fuerza aérea del Perú, cuatro se realizaron en el Boeing 737-401 y doce (12) placas en el Boeing 737-4B7. En la aeronave Cessna 402 necesitaron ocho radiografías. Todas estas

radiografías se procesaron teniendo en cuenta las normas ASTM-E1742M *standard practice* la cual regula trabajos realizados con rayos-X (ver Figura 19).

**Figura 19**

*Guía de controles anuales aprobados por los equipos en el tiempo*

ISSUE DATE 31 MAY 2016

CALIBRATION RECORD OF EACH EQUIPMENT, TOOL AND INSTRUMENT				
NUMBER: MANAGEMENT DPTO DE CONTROL DE CALIDAD		SHOP-SECTION: NDT LABORATORY		CODE: 0424
NOMENCLATURE: X RAY UNIT				
MANUFACTURER: BALTEAU BELGIQUE				
P/N: GFD-165		S/N: 112935/01-112698/02		FIXED ACTIVE CODE(CAF) 1540490004
RANGE		ACCURACY	UNIT OF MEASUREMENT	
LOW	HIGH			
75	160	1	kv	
3	5	1	mA	
CALIBRATION FREQUENCY: 12 MESES				
CERTIFICATION OF CALIBRATION				
CALIBRATION		CALIBRATION ENTITY	CONDITION	REMARKS
CALIBRATION DATE	CALIBRATION DUE DATE			
29-SEP-15	29-SEP-16	NDT-LAB SEMAN	OPERATIVO	
-	-	SEMAM	Proc. calib	
29-SEP-16	29-SEP-17	SEMAM	operativo	
-	-	SEMAM	proceso de calibración	
sep 29-17	sep-27-18	SEMAM	Operativo	
-	-	SEMAM	proc. calib	
29-SEP-17	29-SEP-19	SEMAM	operativo	
SMN-FORM 15				
				Rev.: 0 18/NOV/08

Nota. Se muestran la guía de controles anuales. Elaboración propia.

Dichas radiografías fueron tomadas en piezas del fuselaje como largueros y arcos que son los que dan forma y resistencia al fuselaje del avión, a la unión del fuselaje y al marco de ventana ubicadas cerca a la puerta de salida, así como los largueros del fuselaje que soportan al motor tal como se muestran en las Figuras 20, 21 y 22.

### **Figura 20**

*Vista de los largueros a radiografiar*



*Nota.* Se muestran los largueros a radiografiar en la presente investigación. Elaboración propia.

**Figura 21**

*Imagen de los arcos y largueros de un Boeing 73*



*Nota.* Imagen de los arcos y largueros descubiertos para la toma de las placas radiográficas de un Boeing 73. Elaboración propia.

**Figura 22**

*Vista interna del fuselaje Boeing 737.4B*



*Nota.* Vista interna del fuselaje Boeing 737.4B. Elaboración propia.

**Contraste y densidad de las placas radiográficas obtenidas.** Se pudo constatar que la calidad de las radiografías obtenidas era óptima; esto fue posible de realizar midiendo dos parámetros muy importantes en las placas radiográficas: densidad y contraste, tal como se indica en la Figura 23 y 24. Lo primero que se midió fue la densidad o grado de ennegrecimiento de las placas radiográficas. Pese a que se realizaron varios disparos a diferentes aviones y a diferentes partes del fuselaje fue posible medir la densidad de película por medio del densitómetro de placas; el procedimiento consiste en utilizar el potente foco luminoso del densitómetro y colocar la placa detrás del foco luminoso y comparar el tono obtenido con el grado patrón del densitómetro.

Aunque la radiografía tenga la densidad requerida esto no indica que la placa radiográfica presente una buena calidad, ya que si toda la placa está totalmente oscura no se apreciara la imagen que necesitamos del objeto. Si la placa está demasiado clara no se apreciará la imagen debido a que la imagen será bastante borrosa. Esto hace necesario que todas las placas que se obtuvieron sean evaluadas en otro criterio, el de contraste radiográfico (ver Tabla 3).

**Tabla 3**

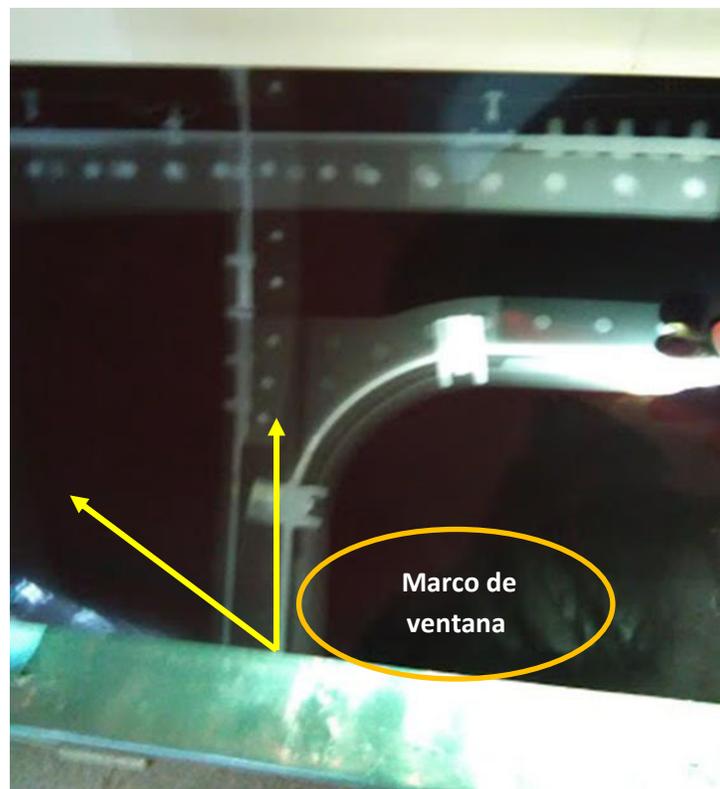
*Grado de Densidad de la Radiografía*

<b>Niveles</b>	<b>Diagnóstico</b>
<1.5	No adecuado
1.5	Adecuado
2.0	Adecuado
3.5	Adecuado
4.0	Adecuado
4.0>	No adecuado

Si el grado de oscuridad que nos da el densitómetro esta entre los valores de 1.5 y 3.5 o de 2.0 y 4.0, tendremos una radiografía con una densidad de película adecuada.

**Figura 23**

*Radiografía de marco de ventana objeto de este estudio*



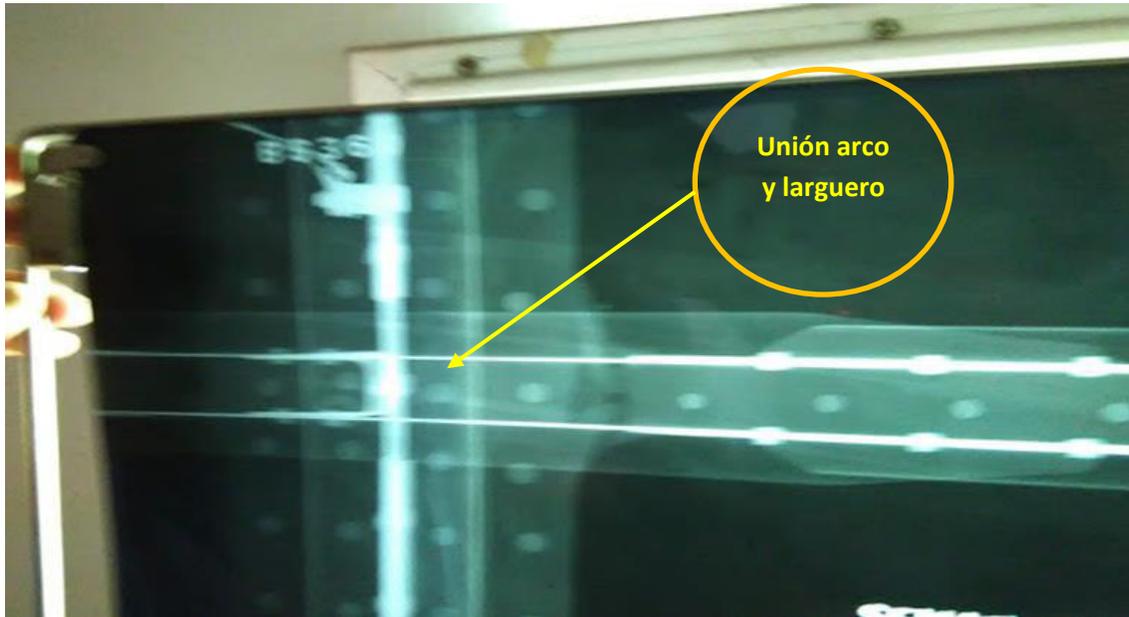
*Nota.* Radiografía de marco de ventana objeto de este estudio. Elaboración propia.

Todas las placas se obtuvieron guardaban la relación entre un tono oscuro y claro adecuado al trabajo, pese a que la parte clara de la placa corresponde a la parte que recibió menos radiación y la oscura a la parte que recibió más radiación.

Los valores de tiempo, distancia, kilovoltaje y miliamperaje empleados permitieron que, en los límites entre partes oscuras y claras, el contraste, es decir, la diferencia entre ambos, fuera bastante notoria. Obteniendo así una radiografía de adecuada calidad.

## Figura 24

*Radiografía de la unión larguero- arco*



*Nota.* Se muestra la radiografía de la unión larguero- arco. Elaboración propia

### 3.7 Análisis de Datos

Los datos se procesaron en el programa matemático Excel y se analizaron en el software estadístico SPSS 24. Es necesario también precisar que el software estadístico en mención para la técnica estadística.

En el nivel descriptivo se presentan los resultados en las medidas de tendencia central, media, mediana y moda, asimismo, las medidas de dispersión varianza y desviación estándar, luego mediante frecuencias, porcentajes y figuras.

## IV. Resultados

### 4.1 Descripción de Resultados

En el estudio se realizó las radiografías (placas) a las cuatro diversas aeronaves que brindan servicio en el territorio peruano. Habiendo mediciones de las características de evaluación de las placas al fuselaje como proceso de control de calidad, que se describen a continuación.

En la Tabla 4 de descripción de los tipos de aviones se puede observar la categorización de los 4 tipos de aviones, presentan características diferentes dependiendo del modelo, siendo parte de la muestra representativa del estudio. Se demuestra 1 avión modelo Hércules, seguidamente 1 avión modelo CESSNA 402c, en una mayor cantidad dos aviones modelo Boeing con serie 737-401 y B737-4B7.

**Tabla 4**

*Descripción de los tipos de Avión*

<b>Resúmenes de Casos</b>	<b>Tipo de Avión</b>
1	Hércules
2	Boeing 737-401
3	CESSNA 402c
4	Boeing B737-4B7
Total	N

a. Limitado a los primeros casos.

### 4.2 Hipótesis

#### 4.2.1 Hipótesis general

La aplicación del control de calidad mediante rayos X permite verificar el adecuado funcionamiento del fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú.

Con la finalidad de verificar el adecuado funcionamiento del fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú, se describen a continuación los resultados de la comprobación de la hipótesis.

**Objetivo 1:**

Aplicación del protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.

En la Tabla 5 se puede observar que la aplicación del protocolo de calidad para los fuselajes de aeronaves que brindan servicio en el territorio peruano. Habiendo sido registrado en los cuatro aviones en fecha de ley desde octubre del 1998 a agosto del 2015. Asimismo, la distancia que se aplicaron en la evaluación de las radiografías fue de 24 a 42, con un promedio entre las naves  $X=37$ , con una dispersión de  $DS=8.7178$  que indica que la distancia se puede alejar en el tiempo de 28 a 45 puntos. El Film usado se mantiene a 1.0 estándar. Las pulgadas que se registran desde 5x7 y 5x8 a una amplitud de 14x17 y 17x17. Las medidas eléctricas se mantienen en los Kilovoltios a 120 y en Miliamperios a 5.0.

**Tabla 5**

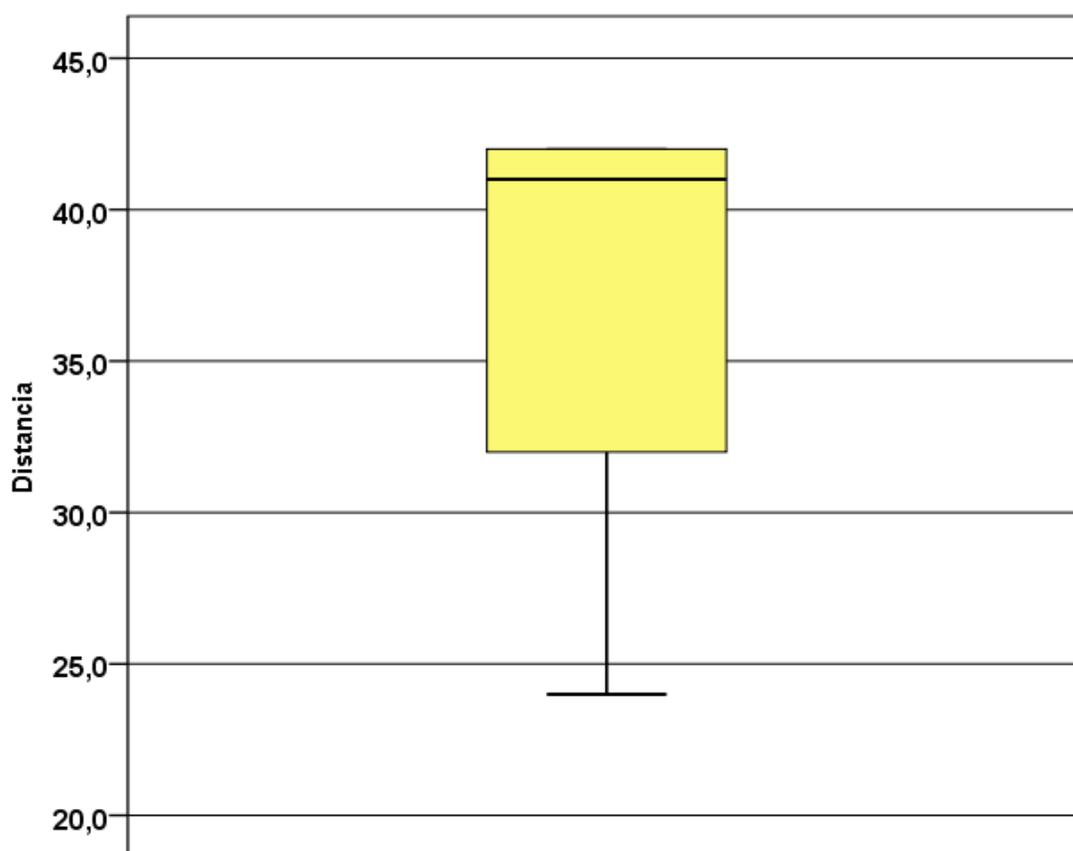
*Medidas descriptivas del control de Calidad en las aeronaves de servicios en el Perú*

		<b>Film</b>				
	<b>Fecha de Ley</b>	<b>Distancia</b>	<b>Used</b>	<b>Pulgadas</b>	<b>Kilovoltios</b>	<b>MiliAmperios</b>
1	Agos. 04-2015	40.0	1.0	17x17	120.0	5.0
2	Agos. 01-2006	42.0	1.0	5x7	120.0	5.0
3	Abr. 24-2015	24.0	1.0	5x8	120.0	5.0
4	Oct. 01-1998	42.0	1.0	14x17	120.0	5.0
	Media	37.000				
	Desviación estándar	8.7178				

La Figura 25 trata acerca de la distancia como medida en los fuselajes de los aviones, se observa que los rangos se mantienen de 24.0 hasta 42.0, siendo el valor central de 33.0 y el valor predecible de 41.0.

**Figura 25**

*Distancia*



*Nota.* Se muestra la distancia como medida en los fuselajes. Elaboración propia.

Para precisar las medidas de las placas que se obtuvieron a través del control de calidad realizado a las aeronaves de servicio en territorio peruano, se utilizó el protocolo que registra las características estándar operativa para el fuselaje.

**Objetivo 2:**

Evaluación de las placas obtenidas mediante el protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.

En la Tabla 6 de la descripción de las placas del fuselaje de las aeronaves que brindan servicio en el Perú, se observa que los cuatro aviones de diversos modelos han tenido una exposición de radiografías entre 1.10 a 4 minutos, la diferencia se evidenció en el avión de modelo Hércules de 3 minutos.

**Tabla 6**

*Descripción de las placas del fuselaje de las aeronaves*

	<b>Tipo de Avión</b>	<b>Tiempo de Exposición</b>	<b>Grado de densidad</b>	<b>Tipo de Film</b>	<b>N° de Radiografías</b>
1	Hércules	3	2	I	8,0
2	Boeing 737-401	4	1.5-3.0	II	4,0
3	CESSNA 402c	1.10	1.8-3.5	I	8,0
4	Boeing B737-4B7	4	1.5-3.0	I	12,0
Mínimo	Boeing 737-401	1.10	1.5-3.0	II	4,0
Máximo	Hércules	4	2	I	12,0
Media					8,000
Mediana					8,000
Rango					8,0
Desviación estándar					3,2660
Varianza					10,667

Los rangos de densidad que verifica el grado de oscuridad de los densitómetros se registraron valores en menor grado en los dos modelos de aviones Boeing 737-401 y Boeing B737-4B7 con un rango de 1.5 a 3.0 ubicándolo en un nivel entre no adecuado a adecuado; seguidamente el modelo CESSNA 402c con un rango de 1.8 a 3.5 que lo ubica en un nivel adecuado de densidad de película; y el modelo Hércules obtuvo un rango de 2 que lo ubica en una categoría diagnóstica adecuada en la densidad de la película. El tipo de Film se mantiene entre I y II. Y el número de radiografías realizadas a los cuatro aviones fueron en rango de 4 a 12 ocasiones, siendo el menor número el Boeing 737-401 en 4 repeticiones, luego el Hércules y Boeing B737-4B7 con 8 repeticiones, y con mayor cantidad el Boeing B737-4B7 con 12 radiografías. En promedio de los cuatro aviones fueron 8 radiografías, y una dispersión  $DS=3.2660$  y varianza  $S=10.667$ , que indica que las tomas de radiografías pueden darse de 5 a 10 ocasiones para cada avión.

En la Figura 26 del grado de densidad de las aeronaves se puede visualizar que el 50% se encuentran en un grado de densidad no adecuado a adecuado de la película de 1.5 a 3.0. Mientras que el 25% se ubica en el rango de 2.0 adecuado y otro 25% de 1.8 a 3.5 en un nivel de densidad de adecuado de la película.

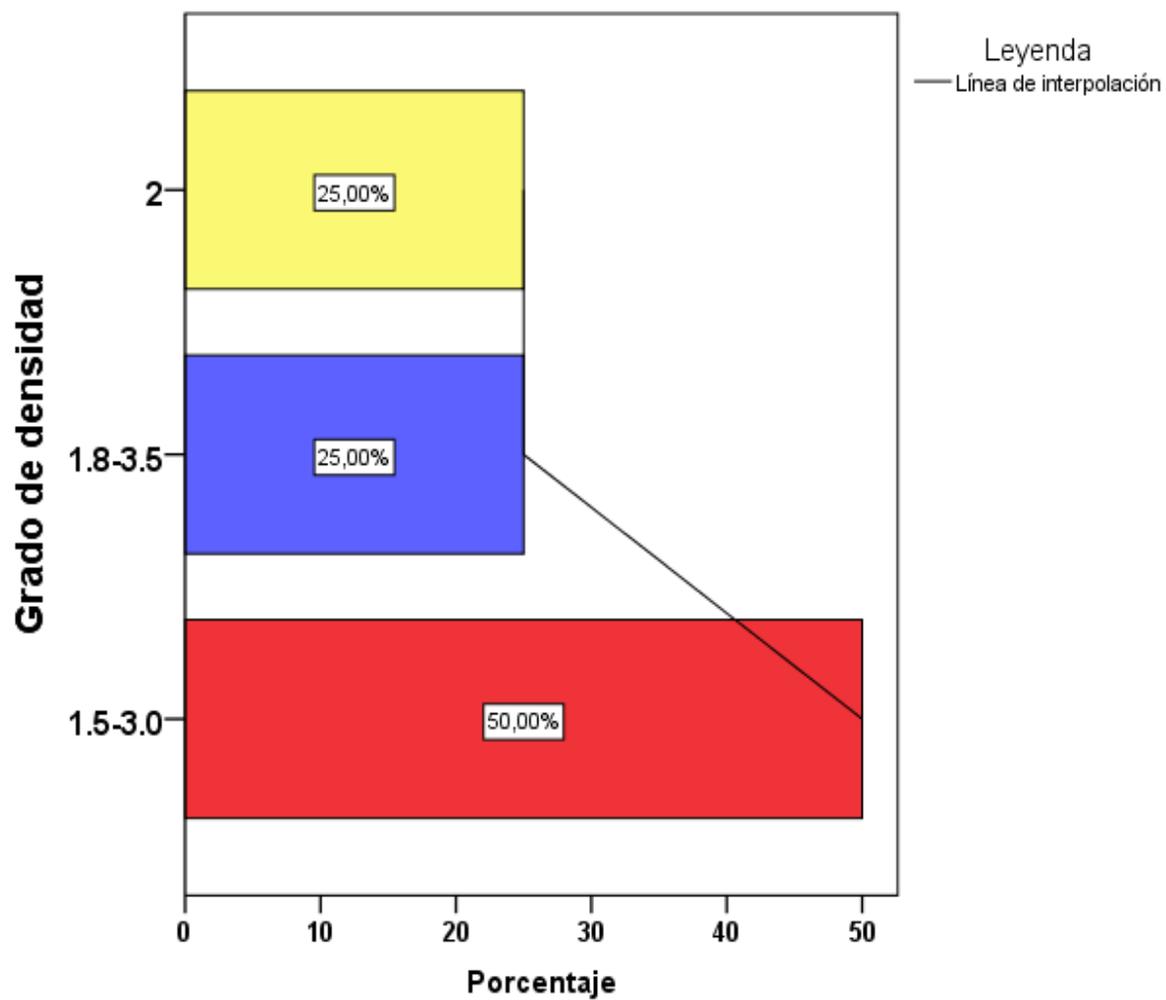
En la Figura 27 acerca de los números de radiografías realizadas a las aeronaves se puede visualizar que el 50% de las tomas de radiografías se encuentran en un promedio de 8; mientras que el 25% se ubican de 4 a 12 tomas de radiografías en los cuatro aviones.

En la Figura 28 e tiempo de exposición de las placas radiográficas se observa que el 50% se produce durante los 4 minutos, mientras que el 25% se desarrolla dentro de 1.1 a 3 minutos.

Para integrar los resultados de las placas radiográficas realizadas a los fuselajes de las aeronaves tomadas como muestra, se tomaron en cuenta datos del protocolo estándar de evaluación de las características de las naves, el tipo de avión, la norma técnica, exposición y la fecha de término como proceso de control de calidad.

Figura 26

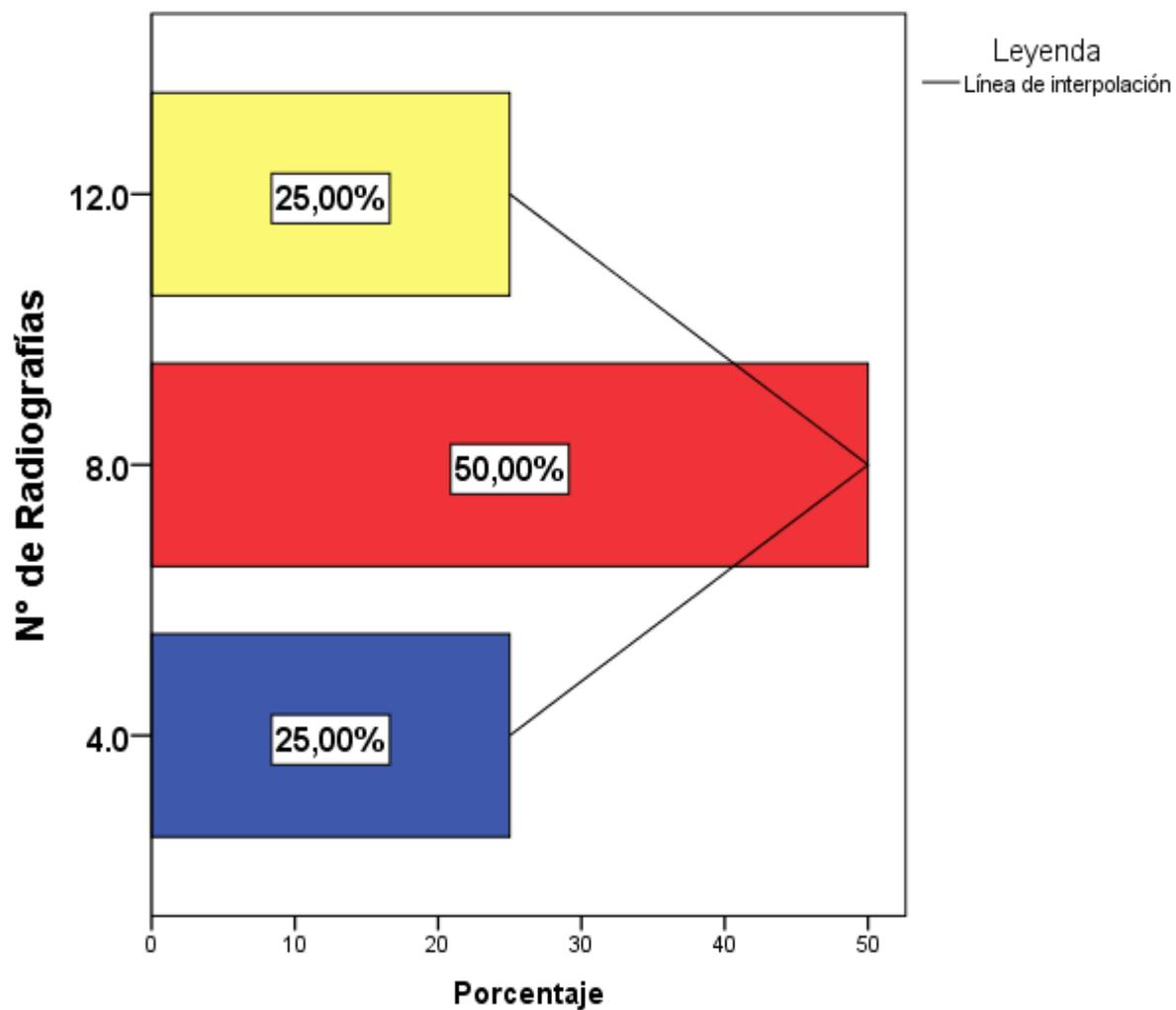
Grado de densidad de las aeronaves



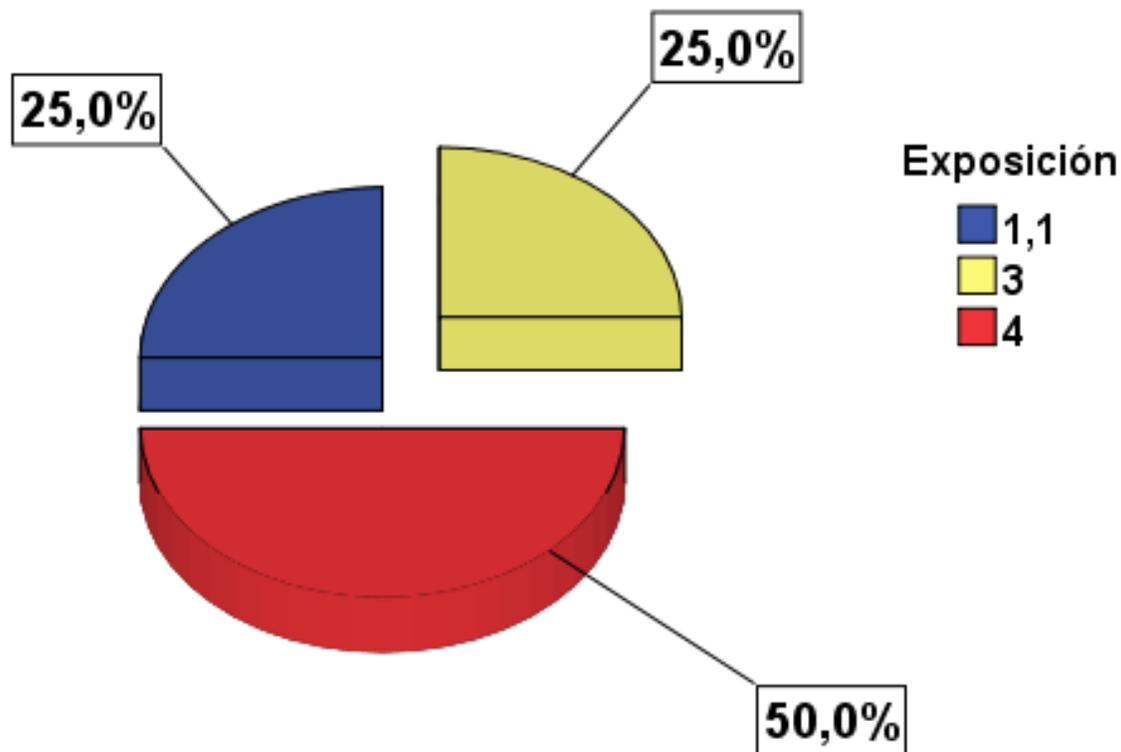
*Nota.* Se muestra el grado de densidad de las aeronaves del presente estudio. Elaboración propia.

Figura 27

Número de Radiografías realizadas a la Aeronaves



*Nota.* Se muestra el número de radiografías realizadas a las aeronaves evaluadas en la presente investigación. Elaboración propia.

**Figura 28***Tiempo en Exposición*

*Nota.* Se muestra el tiempo de exposición al realizar la investigación. Elaboración propia.

**Objetivo 3:**

Integrar los resultados de las placas aplicadas al fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.

En la tabla 7 de la descripción de los resultados de las placas administradas al fuselaje de las cuatro aeronaves, se determina que la información registrada en el protocolo de evaluación se ha tenido una exposición de las placas radiográficas de 1.10 a 4, considerándose los criterios de las normas técnicas y la aprobación en la fecha de término del proceso de control de calidad.

**Tabla 7**

*Descripción de la integración de los resultados de las placas aplicadas al fuselaje de aeronaves*

	<b>Tipo de Avión</b>	<b>Norma Técnica</b>	<b>Exposición</b>	<b>Fecha de término</b>
1	Hércules	S/B 382-53-61R3	3	Sep. 19-2016
2	Boeing 737-401	S53-09-A	4	Sep. 23-2016
3	CESSNA 402c	AD 2015-07-03	1.10	Marz. 10-2017
4	Boeing B737-4B7	S53-27-A	4	Sep. 23-2016

#### **4.2.2 Análisis de las radiografías obtenidas**

El análisis de las placas radiográficas se realiza en el negatoscopio. Al realizar la toma radiográfica siguiendo los valores técnicos del fabricante, se obtiene una placa radiográfica con un adecuado valor de densidad y contraste de película. Es posible detectar discontinuidades en el fuselaje ya que aparecen líneas o manchas negras sobre un fondo blanco en la radiografía, lo cual me permite identificar las fallas, si es que existieran.

En la radiografía que se muestra en la Figura 29, se puede observar claramente el marco de una ventana el cual por los continuos procesos de presurización y despresurización es una zona muy susceptible a la influencia de tensiones que pueden acelerar al envejecimiento del material con el posterior alteración de las propiedades mecánicas permitiendo la nucleación de micro fisuras, corrosión y a otros defectos que pueden llevar a la fractura final del componente, por eso es muy importante realizar un adecuado control del fuselaje.



**Figura 29**

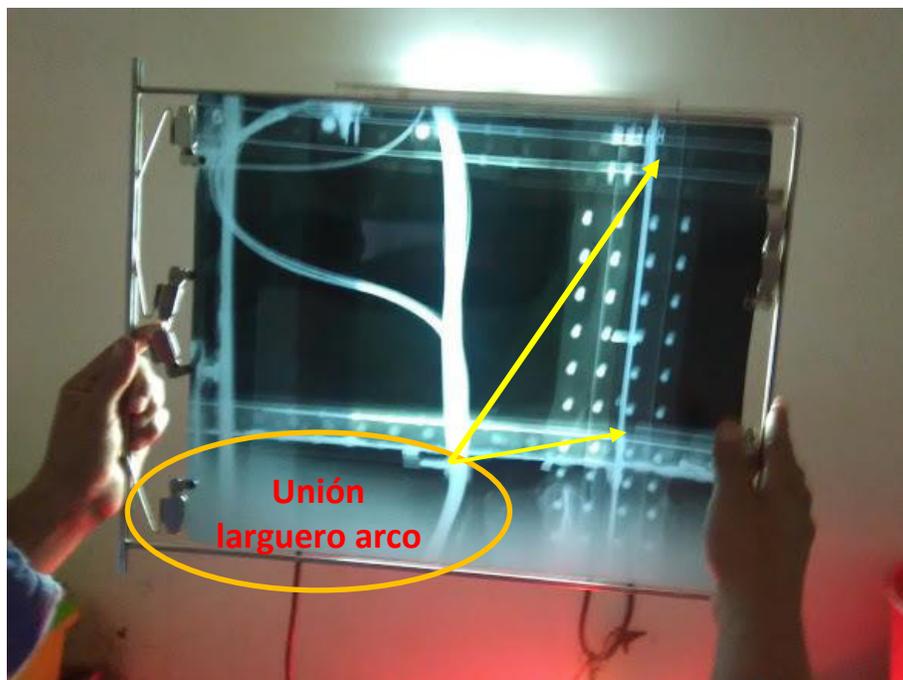
*Radiografía de marco de ventana en la presente investigación*



*Nota.* Se muestra una radiografía de marco de ventana evaluada en la presente investigación.

Elaboración propia.

Asimismo, la radiografía tomada a la unión del larguero y arco no muestran defectos estructurales en el material, tal como se observa en la Figura 30.

**Figura 30***Unión larguero y arco*

*Nota.* Se indica la unión larguero y arco evaluada en la presente investigación. Elaboración propia.

Luego de haber evaluado todas placas radiográficas se evidencia que en ningún caso se encontró discontinuidades o discrepancias en los fuselajes estudiados. Dichos fuselajes se encuentran operativos y el control de calidad se realiza por motivos de seguridad, siendo un control rutinario como lo especifican las normas técnicas aeronáuticas ASTM. Finalizado la inspección de las placas en el laboratorio, los resultados fueron emitidos en un informe técnico de ensayos no destructivos (NDT), según se detalla en las Figuras 31, 32 y 33. En los que se informa que en ninguna de las aeronaves inspeccionadas se encontraron discontinuidades que reportar.

Figura 31

Informe Técnico de control de calidad mediante rayos-x avión Hércules

 <b>NON DESTRUCTIVE INSPECTION REPORT</b> (X RAY INSPECTION) <b>3919</b>		
1.- WORK ORDER M/C 6806-051210 SET 2016	2.- CUSTOMER GRUPO AEREO N° 8	3.- TYPE L-100 20 A/C FAP 382
4.- NOMENCLATURE INSPECTION OF WING TO FUSELAGE ATTACH ANGLE FITTING	5.- SOURCE DOCUMENT S/B 382-53-61 R3	6.- ISSUE DATE AUG 04 2015
7.- HIGH ASSEMBLY NAME FUSELAGE	8.- NDT INSPECTOR NAME SEM AN	
9.- DESCRIPTION OF CONDITION OR REASON FOR INSPECTION IN ORDER TO DETECT CRACKS ON THE WING TO FUSELAGE ATTACH ANGLE FITTING STATION 477 TO 517 LH AND RH SIDE.		
10.- PART <input checked="" type="checkbox"/> INSTALLED <input type="checkbox"/> REMOVED	11.- PART PREPARATION-CLEANING REMOVE ACCESS <input checked="" type="checkbox"/> REMOVE FASTENERS <input type="checkbox"/> CLEAN ON SURFACE <input checked="" type="checkbox"/>	
INSPECTION TECHNIQUES		
12.- EQUIPMENT USED MANUFACTURER NAME BALTEAU		13.- TECHNICAL DATA FFD TUBE AIMING POINT 60 INCHES
MODEL GFD 165		S/N 11293501 11269802
FILM USED KODAK <input checked="" type="checkbox"/> AGFA <input type="checkbox"/> FILM TYPE ASTM CLASS I <input checked="" type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/>	FILM USED 14x17 <input type="checkbox"/> 8 x 10 <input type="checkbox"/> OTHERS. N° OF SHEETS 8	KILOVOLT 7 <input checked="" type="checkbox"/> 120 MILLIAMPERES 3 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> EXPOSURE TIME 8 MIN
14.- DEVELOPMENT PROCESS TYPE <input type="checkbox"/> HANDS PROCESS <input checked="" type="checkbox"/> AUTOMATIC PROCESS		AREA OF INTEREST INSPECTIONS OF WING TO FUSELAGE ATTACH ANGLE FITTING STATION 477 TO 517 LH AND RH.
15.- INSPECTION PROCEDURES IN ACCORDANCE WITH S/B 382-53-61 R3 STEP 2 ACCOMPLISHMENT INSTRUCTIONS ITEM B PROCEDURE N°1, RADIOGRAPHY.		
16.- DISCREPANCY NO DISCREPANCY FOUND <input checked="" type="checkbox"/> DISCREPANCY FOUND <input type="checkbox"/>		
17.- INITIAL DATE SEP-19-2016	TERMINATE DATE SEP-20-2016	18.- NDT INSPECTOR SIGNATURE- STAMP

Nota. Se muestra el Informe Técnico de control de calidad mediante rayos-x avión Hércules utilizado en la presente investigación. Elaboración propia.

Figura 32

Informe técnico de control de calidad Boeing 737-401

		<b>NON DESTRUCTIVE INSPECTION REPORT</b> (X RAY INSPECTION)		1014
1.- ORDEN DE TRABAJO (WORK ORDER) 7010-0006-2016		2.- CUSTOMER (CLIENTE) SWIFT AIR		3.- TYPE B737-401 A/C N418US
4.- NOMENCLATURA MARCO DE VENTANA		5.- DOCUMENTO FUENTE S53-09-A		6.- FECHA DE PUBLICACION AUG-01-2006
7.- NOMBRE DE LA ZONA (HIGH ASSEMBLY NAME) LH / RH FUSELAGE		8.- NOMBRE DEL INSPECTOR (NDT INSPECTOR NAME) SEMAM		
9.- DESCRIPCION DE LA INSPECCION O RAZON DE LA INSPECCION PARA DESCUBRIR GRIETAS SOBRE EL MARCO DE LA VENTANA DEL FUSELAJE				
10.- PART <input checked="" type="checkbox"/> INSTALLED <input type="checkbox"/> REMOVED		11.- PART PREPARATION-CLEANING REMOVE ACCESS <input checked="" type="checkbox"/> REMOVE FASTENERS <input type="checkbox"/> CLEAN ON SURFACE <input checked="" type="checkbox"/>		
INSPECTION TECHNIQUES				
12.- EQUIPMENT USED MANUFACTURER NAME BALTEAU			13.- TECHNICAL DATA FFD TUBE AIMING POINT 42 INCHES	
MODEL GFD 165		S/N 112935.01 112698.02		
FILM USED KODAK <input checked="" type="checkbox"/> AGFA <input type="checkbox"/>		FILM USED 14x17 <input type="checkbox"/> 7x17 <input type="checkbox"/> 5 x 7 <input checked="" type="checkbox"/> 5x10 <input type="checkbox"/>		KILOVOLTS MILLIAMPERES 120 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 EXPOSURE TIME 4.00 MIN
FILM TYPE ASTM CLASS I <input checked="" type="checkbox"/> II <input checked="" type="checkbox"/>		OTHERS. N° OF PLACAS 04		
DENSITY 1.5 TO 3.0		AREA OF INTEREST WINDOW FRAME PILOT COMPARTMENT		
14.- DEVELOPMENT PROCESS TYPE <input type="checkbox"/> PROCESADOR MANUAL (HANDS PROCESS) <input checked="" type="checkbox"/> PROCESADOR AUTOMATICO (AUTOMATIC PROCESS)				
15.- PROCEDIMIENTO DE INSPECCION (INSPECTION PROCEDURES) IN ACCORDANCE WITH S53-09-A AND B737 NDT MANUAL PART 2 SUBJECT 53-10-13 :				
16.- DISCREPANCY NO SE ENCONTRÓ DISCREPANCIAS <input checked="" type="checkbox"/> (NO DISCREPANCY FOUND) <input type="checkbox"/>				
17.- FECHA DE INICIO SEP-23-2016		FECHA DE TERMINO SEP-23-2016		18.- NDT INSPECTOR SIGNATURE - STAMP
SMI-FORM 242-1				Rev.: 0

Nota. Se muestra el Informe técnico de control de calidad Boeing 737-401 utilizado en la presente investigación. Elaboración propia.

Figura 33

Informe técnico de control de calidad CESSNA 402

		<b>NON DESTRUCTIVE INSPECTION REPORT</b>		0723
(X RAY INSPECTION)				
1.- WORK ORDER 0410-0004-2017	2.-CUSTOMER AIR MAJORO	3.- TYPE CESSNA 402C A/C OB-1921P		
4.-NOMENCLATURE ENGINE BEAM		5.- SOURCE DOCUMENT AD 2015-07-03	6.- ISSUE DATE APR 24,2015	
7.-HIGH ASSEMBLY NAME PILONES O SOPORTES DEL FUSELAGE		8.- NDT INSPECTOR NAME SEMAN		
9.- DESCRIPTION OF CONDITION OR REASON FOR INSPECTION IN ORDER TO DETECT CRACKS ON THE LH NACELLES / PYLONS (INSTALLED MODEL TCM TSI0-520 V8 S/N 1000172)				
10.- PART <input checked="" type="checkbox"/> INSTALLED <input type="checkbox"/> REMOVED	11.- PART PREPARATION-CLEANING REMOVE ACCESS <input checked="" type="checkbox"/> REMOVE FASTENERS <input type="checkbox"/> CLEAN ON SURFACE <input checked="" type="checkbox"/>			
INSPECTION TECHNIQUES				
12.-EQUIPMENT USED MANUFACTURER NAME BALTEAU		MODEL GFD 165	S/N 112935/01 112698/02	13.- TECHNICAL DATA FFD TUBE AMING POINT 24 INCHES
FILM USED KODAK <input checked="" type="checkbox"/> AGFA <input type="checkbox"/>	FILM USED 5x7 <input checked="" type="checkbox"/> 8x10 <input type="checkbox"/>	7x17 <input type="checkbox"/> 5x10 <input type="checkbox"/>	KILOVOLTS 120	MILLIAMPERES 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> EXPOSURE TIME 1.10 MIN
FILM TYPE ASTM CLASS <input type="checkbox"/>	OTHERS. Nº OF SHEETS 08	DENSITY 1.8 TO 3.5	AREA OF INTEREST NACELLES/PYLONS ENGINE	
14.- DEVELOPMENT PROCESS TYPE <input type="checkbox"/> HANDS PROCESS <input checked="" type="checkbox"/> AUTOMATIC PROCESS				
15.-INSPECTION PROCEDURES IN ACCORDANCE WITH AD 2015-07-03, SERVICE LETTER MEL-54-01 ACCOMPLISHMENT INTRUCTIONS STEP 1 TO 7 FIGURE 1				
16.- DISCREPANCY NO DISCREPANCY FOUND <input checked="" type="checkbox"/> DISCREPANCY FOUND <input type="checkbox"/>				
17.-INITIAL DATE MAR-10-2017	TERMINATED DATE MAR-10-2017	18.- NDT INSPECTOR SIGNATURE - STAMP		

Nota. Se muestra el informe técnico de control de calidad CESSNA 402 utilizado en la presente investigación. Elaboración propia.

## V Discusión de Resultados

En el estudio se propuso como objetivo general aplicar el control de calidad mediante rayos X al fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú. En este sentido, se logró desarrollar un adecuado control de calidad basado en las radiografías de las placas hechas a los fuselajes. En tanto, la *Inspectioneering* en el año 2017 considera que el uso de los rayos X como técnica, permite una mejor resolución para detectar las fallas, fracturas, dimensiones y también para evaluar el estado de maquinarias industriales, que se consignan en las piezas del fuselaje en una aeronave, considerando el control de calidad como un medio continuo de mejora respecto a la inspección de las diversas estructuras de acero, aluminio y cobre, consiguiendo un nivel estandarizado y óptimo de la técnica para las aeronaves modernas.

A nivel específico se propuso la aplicación del protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú. Al respecto, muchos de los estudios se han preocupado por la seguridad de las aeronaves, por lo que han incurrido en numerosos estudios para determinar las fallas, análisis de disponibilidad y riesgo de operación entre otras muchas causas pudieran poner en peligro tanto a la aeronave como la vida del tripulante, en este sentido, Ramírez (2012) en su estudio precisó los riesgos en la disponibilidad de las aeronaves y en sus sistemas, estos se deben a un inadecuado funcionamiento y mantenimiento de las flotas para prevenir los fallos que generarían la identificación y seguridad de las naves, siendo importante su mantenimiento y ajuste a las aeronaves, además de un análisis de los riesgos que puedan ocurrir mediante la criticidad evaluada. De igual manera, Gonzales (1995) explica la aplicación de rayos x industrial en ensayos no destructivos, detectando las discontinuidades que perjudican la calidad de los equipos y maquinarias en una obra, siendo un sistema de inspección confiable, en tanto, el factor humano interviene en su efectividad y certificación de calidad en el uso de las aeronaves.

Asimismo, se planteó como objetivo específico evaluar las placas obtenidas mediante el protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú. En este sentido, Burbano (2011) elaboró un instructivo que tuvo la finalidad de ensayos no destructivos, siendo un procedimiento a nivel radiográfico industrial que permite la evaluación de las soldaduras de los oleoductos de material de acero, siendo una gran ventaja de inspección que cumple con estándares mundiales para una obra de construcción.

De acuerdo al tercer objetivo específico se integraron los resultados de las placas aplicadas al fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú. Cabe indicar que los rayos x cumplen una función importante en el mantenimiento de las piezas en una obra industrial (Bermúdez, 1967). Los datos confirman que la placa radiográfica tiene ventajas en su uso, aunque produce un gran nivel de radiación ambiental, es en la actualidad la técnica más eficaz en la detección de fracturas en los fuselajes o piezas de material de acero de las aeronaves (Fuerza Aérea del Perú [FAP], 2014).

## VI. Conclusiones

- Se encontró que la aplicación del control de calidad permitió verificar el adecuado funcionamiento del fuselaje de las aeronaves que brindan servicio en el Perú.
- Se halló que la aplicación del protocolo de control de calidad permitió determinar el correcto estado del fuselaje.
- La evaluación de las placas en el protocolo de control de calidad se obtuvo un correcto valor de densidad, implicando la fiabilidad de las placas del fuselaje de las aeronaves

## VII Recomendaciones

- Se recomienda repetir el estudio ampliando la muestra en número de aeronaves y periodo de aplicación de controles, con el fin de confirmar la consistencia de los resultados mediante el mismo método.
  
- Del mismo modo, se sugiere ahondar los estudios acerca de las políticas, y estándares de control y seguimiento en la aplicación de pruebas no destructivas que, en aeronaves, identificando los criterios que restrinjan la postergación de una inspección por motivos comerciales o de otra índole.
  
- Por último, dado que este estudio permite la certificación no sólo de la aeronave si no de la empresa que presta servicios en ella, se recomienda que las autoridades exijan de forma estandarizada siempre este tipo de evaluación y soliciten los resultados emitidos por la entidad correspondiente.

## VIII. Referencias

- Attix, F. (1986). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons.
- Bermúdez, J. (1967). *Teoría y Práctica de la Espectroscopia Electrónica de Rayos X*. Alambra SAB.
- Burbano, S. (2006). *Electromagnetismo* (27ª ed.). Tebar Flores.
- Burbano, N. (2011). *Instructivo para realizar ensayos no destructivos con el método de radiografía industrial en la inspección de soldaduras de oleoductos de acero al carbono*. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica Equinoccioal]. Repositorio de la Universidad Tecnológica Equinoccioal.  
[http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5994/1/44721\\_1.pdf](http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5994/1/44721_1.pdf)
- Castro, N. J., Coronado, W. D., & Pérez, L. E. (2013). *Diseño estructural del fuselaje, ala central y unión alafuselaje para la aeronave no tripulada (uav) experimental skycruiser x-1*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Buenaventura]. Repositorio institucional de la Universidad de San Buenaventura.  
<http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/79561.pdf>
- Cember, H. (2009). *Introduction to health physics*. Mc Graw Hill.
- Federal Aviation Administration [FAA]. (11 de febrero de 2012). *Aviation maintenance technician handbook-airframe* (Volumen 1). Federal Aviation Administration.
- Fuerza Aérea del Perú [FAP]. (20 de enero de 2014). *Manual técnico: métodos de inspección no destructiva, teoría básica*. Secretaría de la Fuerza Aérea del Perú.
- Gautreu, R. & Savin, W. (2001). *Física Moderna* (2ª ed.). McGraw-Hill.
- Glancey, J. (21 de abril de 2014). *Los accidentes aéreos que revolucionaron el diseño de los aviones*. BBC  
[http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/04/140421\\_accidentes\\_avion\\_seguridad\\_vert\\_fut\\_rg](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/04/140421_accidentes_avion_seguridad_vert_fut_rg)

- Gonzales, A. (1995). *Aplicación de los rayos X en la industria como prueba no-destructiva* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nueva León]. Repositorio institucional de la Universidad Autónoma de Nueva León. <http://eprints.uanl.mx/6850/1/1080072463.PDF>
- Grupo Pechiney. (1967). *Enciclopedia del Aluminio* (1ª ed.). Urmo.
- Herengel, J. (1969). *Metalurgia Especial* (1ª Ed., Tomo I). Urmo.
- Hernández, R., Fernandez Collado, C. y Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación* (5ª Ed.). McGraw-Hill.
- Inspectioneering. (23 de setiembre de 2017). *Visión general de la Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos (ASNT)*. <https://inspectioneering.com/tag/asnt>
- Mora, J. & Ramírez, R. (2015). *Aplicación de las herramientas cad-cae en el diseño y análisis de la unión ala-fuselaje para determinar la durabilidad*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica]. Repositorio institucional de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/15884/2083%202015%281%29.pdf?sequence=1>
- Ramírez, Y. (2012). *Análisis de Confiabilidad de la flota de aeronaves de la Escuela de Aviación del Pacífico*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Buenaventura]. Repositorio institucional de la Universidad de San Buenaventura. <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/69049.pdf>
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales [ASTM]. (2018). *ASTM E1742 / E1742M. Práctica estándar para el examen radiográfico*. ASTM.
- United State Air Force [USAF]. (2014). *Technical Manual Nondestructive Inspection Methods, Basic Theory*. USAF.
- Valenzuela, C. (23 de agosto de 2005). Accidentes aéreos ocurridos en el Perú desde 1976. *Perú 21*. <http://archivo.peru21.pe/noticia/65665/accidentes-aereos-ocurridos-peru-desde-1976>

## **IX. Anexos**

**Anexo 1. Matriz de Consistencia**

**Anexo 2. Fotos**

**Anexo 3. Requisitos de Seguridad Radiológica en Radiografía Industrial.**

**Anexo 4. Normas Legales**

**Anexo 5. Reglamento de Seguridad Radiológica**

## Anexo A. Matriz de Consistencia

### Título: APLICACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE RAYOS X AL FUSELAJE DE AERONAVES

Autor: EVZEN JACOB BARREDA SÁNCHEZ - PACHAS

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	POBLACIÓN MUESTRA	DISEÑO TIPO
Problema General	Objetivo General:	Hipótesis General				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicar el control de calidad mediante rayos X al fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú.</li> </ul>		Control de calidad	<ol style="list-style-type: none"> <li>Protocolo de control de calidad.</li> <li>Evaluación de las placas.</li> <li>Resultados de las placas</li> </ol>	Cuatro aeronaves las cuales requerían control de calidad por el método de rayos-X.	<p>Descriptivo, analítico y prospectivo.</p> <p>Nivel de investigación</p> <p>Descriptivo</p>
	<p><b>Objetivos Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación del protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.</li> <li>Evaluación de las placas obtenidas mediante el protocolo de control de calidad en el fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.</li> <li>Integrar los resultados de las placas aplicadas al fuselaje de aeronaves que brindan servicio en el Perú.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La aplicación del control de calidad mediante rayos X permite verificar el adecuado funcionamiento del fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú.</li> </ul>	Rayos X al fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú.	<p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tipo de Avión</li> <li>Fecha de Ley</li> <li>Distancia</li> <li>Film Used</li> <li>Pulgadas</li> <li>Kilovoltios</li> <li>Miliamperios.</li> <li>Tiempo Exposición.</li> <li>Grado de densidad</li> <li>Tipo de Film</li> <li>N° de radiografía</li> <li>Norma técnica</li> <li>Fecha de termino</li> </ul>	<p>El primero un avión Hércules de la fuerza aérea del Perú, el segundo es un Boeing 737-401, el tercero Boeing737-4B7 y el cuarto, un avión CESSNA 402C, todos pertenecientes a la empresa SWIFT AIR.</p>	<p><b>METODO</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>TECNICA</b></p> <p>Observación de las placas de rayos X</p> <p><b>INSTRUMENTO</b></p> <p>Ficha del Informe Técnico del Control de Calidad de los aviones (Placas de Rayos X)</p>
¿Cómo se aplica el control de calidad mediante rayos X al fuselaje de aeronaves que brindan servicios en el Perú?						

## Anexo B. Fotos

**Figura 34**

*Aeronave modelo Boeing 737, estacionado para su inspección en el SEMAN*



**Figura 35**

*Proceso de desmantelación de piezas ajenas al fuselaje*



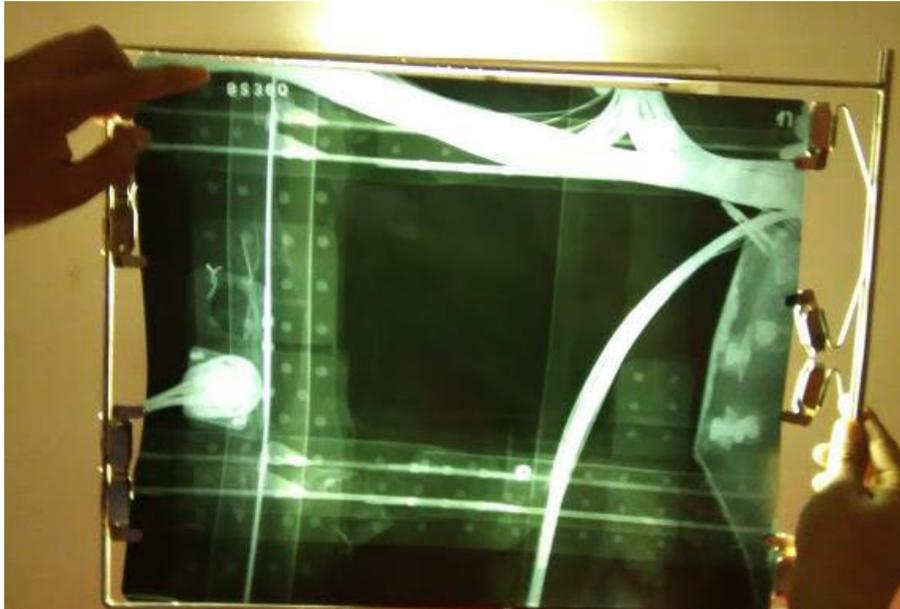
**Figura 36**

*Vistas externas del avión objeto del estudio*



**Figura 37**

*Radiografía del fuselaje, en la que no se encuentran discontinuidades*

**Figura 38**

*Proceso de interpretación de la radiografía al fuselaje*

