



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN SISTEMAS – INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ESTRATEGIA DE REABASTECIMIENTO PARA COMPONENTES DE AERONAVES DE
ALA ROTATIVA OPERANDO EN ZONAS DE ALTO DESGASTE**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOHANS FRANCISCO LUNA PÉREZ

TUTOR
M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO, FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, CD. MX., ENERO, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Flores de la Mota Idalia
Secretario: Dr. Rivera Colmenero José Antonio
1 er. Vocal: M.I. Soler Anguiano Francisca Irene
2 do. Vocal: Dr. García Martínez Mariano Antonio
3 er. Vocal: Dr. Del Moral Dávila Manuel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

TUTOR DE TESIS:

M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO.

FIRMA

(Segunda hoja)

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente.

A la Coordinación General de Estudios de Posgrado por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría a través de su Programa de Becas de la CGEP.

A la M.I. Francis Soler Anguiano, quien dirigió la presente investigación y por ser un pilar en mi desarrollo académico y personal.

A los miembros del jurado Dra. Idalia Flores de la Mota, Dr. José Antonio Rivera Colmenero, Dr. Manuel del Moral y Dr. Mariano García por sus contribuciones en la mejora de la presente tesis.

A la M.I. Carmen García y M.I. Adrielly Ramos por su invaluable apoyo durante la maestría.

A mis compañeras Seleni, Brenda y Michaelle en el posgrado por nunca dejar que la motivación decayera y los grandes momentos que pasamos en las aulas.

Dedicatoria

A ti mamá, por siempre estar.

INDICE

Agradecimientos	III
Dedicatoria	IV
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas	VIII
Glosario.....	IX
Capítulo 1.- Aeronaves de ala rotativa.....	1
1.1.- Aeronave de ala rotativa.	2
1.2 Mantenimiento.	4
1.3 Mantenimiento aeronáutico.....	8
1.3.1 Mantenimiento de la aeronave.....	9
1.3.2 Componentes críticos.	12
Capítulo 2.- Corrosión.	13
2.1 Corrosión en las aeronaves.....	13
2.2 Corrosión en zonas costeras.	18
Capítulo 3.- Confiabilidad.	20
3.1 Definición Matemática de Confiabilidad.	23
3.1.1 Curva de la bañera.	26
3.2.-Elementos Integrantes de la Confiabilidad Operacional.....	27
3.3 Análisis de fallas.	31
3.4 Prueba HALT/HASS.....	37
3.5 Análisis RAM.....	38
Capítulo 4.- Metodología.	45
Capítulo 5.- Caso de Estudio	48
5.1 Descripción de la empresa y caso de estudio.	48

5.3 Recolección de datos.....	51
5.4 Datos obtenidos: Variables de análisis y estructura de datos.....	55
5.5 Análisis Estadístico.....	57
5.6 Análisis Cualitativo con base en RAM.....	61
5.7 Estrategia de reabastecimiento.....	62
5.7.1 Planeación de la Demanda de Vuelos.....	62
5.7.2 Disponibilidad de Componentes en el Almacén.....	66
5.7.3 Evaluación Financiera.....	67
5.7.4 Estrategia de Reabastecimiento.....	69
Conclusiones.....	70
Referencias.....	72
Anexos.....	77
Anexo 1.- Componentes con Tiempo de Vida Establecido por el Fabricante.....	77
Anexo 2.- Hoja de Registro de Datos.....	81

Índice de figuras

Figura 1.- Helicóptero.....	3
Figura 2.- Expectativas del Mantenimiento a través de los años.....	4
Figura 3.- Curva de la Bañera.....	26
Figura 4.- Diagrama de Confiabilidad Operacional y sus Elementos Integrantes.....	28
Figura 5.- Hoja general de un Análisis de Modo y Efecto de Fallas.....	32
Figura 6.- Diagrama de Flujo para el Análisis de un AMEF / FMEA.....	35
Figura 7.- Diagrama de la Metodología.....	45
Figura 8.- Sonda de Campeche.....	48
Figura 9.- Esquema de las instalaciones costa afuera: Sonda de Campeche.....	49
Figura 10.-Estructura de MRH.....	50
Figura 11.- Main Rotor Blade y su estructura interior.....	50
Figura 12.- Ejemplo de récord Histórico de Componente.....	52
Figura 13.- Ejemplo HSR de MRB.....	53
Figura 14.- Helicóptero.....	53
Figura 15.- Precio del Componente Nuevo con el Fabricante.....	54
Figura 16.- Recorrido Terrestre del Traslado del Componente.....	55

Índice de tablas

Tabla 1.- Modelos utilizados para transporte de personal.	1
Tabla 2.- Características de la aeronave	2
Tabla 3.- Capítulos de código ATA 100 en el manual	10
Tabla 4.- Intervalos de inspecciones programadas.	10
Tabla 5.- Tabla de confiabilidad y gravedad de fallas.	40
Tabla 6.- Clasificación de Gravedad de Fallas.	41
Tabla 7.- Hoja de Registro.	52
Tabla 8.- Porcentaje de Fallas.	56
Tabla 9.- Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste en Minitab	57
Tabla 10.- Tabla de Confiabilidad y Gravedad de Fallas.	61
Tabla 11.- Planeación de Horas de Vuelo por Aeronave periodo enero-junio 2023.	63
Tabla 12.- Semaforo de Alertas.	64
Tabla 13.- Proyección de MRB.	65
Tabla 14.- Existencias de MRB en Almacén.	66
Tabla 15.- Costo de las Opciones de Adquisición del Producto.	68
Tabla 16.- Estrategia de Reabastecimiento.	69

Glosario

Aeronavegabilidad: Condición legal y técnica de una aeronave que la habilita para volar de manera segura. Involucra cumplir con estándares y regulaciones establecidas por las autoridades aeronáuticas.

Ciclos de la aeronave: Hace referencia al número total de despegues y aterrizajes que una aeronave ha experimentado durante su vida operativa.

Crosstube: Tubo transversal, estructura que conecta o refuerza otras partes en forma de cruz, para este caso los skid tubes.

Delaminación: Separación de capas en un material compuesto, como en la estructura de un avión, donde las capas de material dejan de estar unidas.

Desvare: Acción de corregir la variación o desviación en la alineación de alguna parte o componente, especialmente en el contexto de la aviación.

Exchange: En el contexto de la aviación, se refiere a la práctica de cambiar o intercambiar componentes de aeronaves por unidad reparadas o revisadas, también conocido como intercambio estándar.

Fuselaje: La parte principal y central de una aeronave, que aloja la cabina de pasajeros, la carga, y en la que se montan las alas y la cola.

MRO (Maintenance, Repair and Overhaul): Mantenimiento, reparación y revisión general, es un término utilizado en la industria de la aviación para describir las actividades relacionadas con el mantenimiento y la reparación de las aeronaves.

Nomex: Fabricante del material que se elaboran las palas en su estructura interior de panal de abeja.

Palas: Se refiere generalmente a las aspas o hélices de una aeronave o de una máquina que gira.

Salitre: Se refiere al depósito de sales, especialmente en contextos marinos.

Skid tube: Tubo que forma parte de la estructura de aterrizaje de ciertos tipos de aeronaves, como helicópteros.

Tailboom: La sección alargada y delgada que conecta la cola de una aeronave con el fuselaje.

Capítulo 1.- Aeronaves de ala rotativa.

Un helicóptero es una aeronave que es sustentada y propulsada por uno o más rotores horizontales, cada uno formado por dos o más palas, pueden ser de rotor principal o de cola. El helicóptero surge en los años treinta del siglo pasado y su madurez la alcanza en la Segunda Guerra Mundial, su uso se extendió principalmente en el ámbito militar como un instrumento de apoyo en el campo de batalla gracias a su capacidad de despegar y aterrizar con pasajeros y carga en espacios reducidos y de difícil acceso, además de poder sobrevolar a bajas velocidades y distancias cercanas e incluso poder permanecer estático en un punto (Rottman, 2007), estas características volvieron al helicóptero un medio de transporte imprescindible para las operaciones logísticas. A medida que se modernizaba la tecnología de extracción de petróleo costa afuera, se volvió evidente la necesidad de contar en la industria con un medio de transporte rápido y eficaz, que no dependiera de las condiciones hidro meteorológicas que se presentan en la zona de perforación, de tal manera que el arribo y salida de las instalaciones fueran seguras, la aviación de ala rotativa se ha convertido en el transporte idóneo tanto para el transporte de personal como para la lucha contra derrames y/o accidentes ocasionados en la operación (Morandeira & Salomón , 2012).

El principal diferenciador entre los modelos utilizados por los proveedores de servicio de transporte en el área de estudio es la capacidad de pasajeros, el segundo criterio son las comodidades requeridas para el vuelo, entre los principales modelos utilizados para el traslado del personal en el área de estudio están los descritos en la Tabla 1.- Modelos utilizados para transporte de personal.

Tabla 1.- Modelos utilizados para transporte de personal.

It	Fabricante	Modelo	Pasajeros	Comodidades
1	Bell	412	13	Servicio de ambulancia.
2	Agustawestland	AW139	15	Servicio de ambulancia y capsula de vuelos COVID19.
3	Bell	429	7	Aire acondicionado.
4	Bell	206	6	Aire Acondicionado, servicio de ambulancia.
5	Eurocopter	EC-135	6	Aire acondicionado.
6	Bell	407	6	Línea ejecutiva y conectividad portátil.

Fuente: Elaboración propia con información del sitio web de las empresas de la zona.

Como se aprecia en la tabla anterior los modelos más utilizados en la zona son el Bell 412 y el AW139 gracias a la capacidad de pasajeros que permite su configuración, las empresas buscan maximizar el aprovechamiento de los traslados utilizando aeronaves con esta característica.

1.1.- Aeronave de ala rotativa.

El modelo de aeronave a estudiar es un helicóptero utilitario bimotor construido a finales de los años setenta, se desarrolló a partir de un modelo que contaba con 2 palas en el rotor principal, el modelo de estudio cuenta con 4 palas siendo esta la principal diferencia entre ambos. Cada pala está construida con fibra de vidrio con estructura en panal de abeja tipo NOMEX, dispone de una banda de titanio resistente a la abrasión en el borde de ataque y una red pararrayos incluida en la estructura de acero y aleación ligera, dispone de cojinetes y amortiguadores elastoméricos. El prototipo de este modelo voló por primera vez en 1979 y fue certificado en el año 1981, con el paso de los años se han realizado modificaciones a la aeronave en cuestiones electrónicas, anteriormente los indicadores eran análogos y las versiones actuales están equipadas con sistemas de control automáticos digitales. La diferencia entre versiones se basa, al igual que en los vehículos terrestres, en las mejoras que requiera el comprador, se detallan las especificaciones de la aeronave en la Tabla 2.- Características de la aeronave:

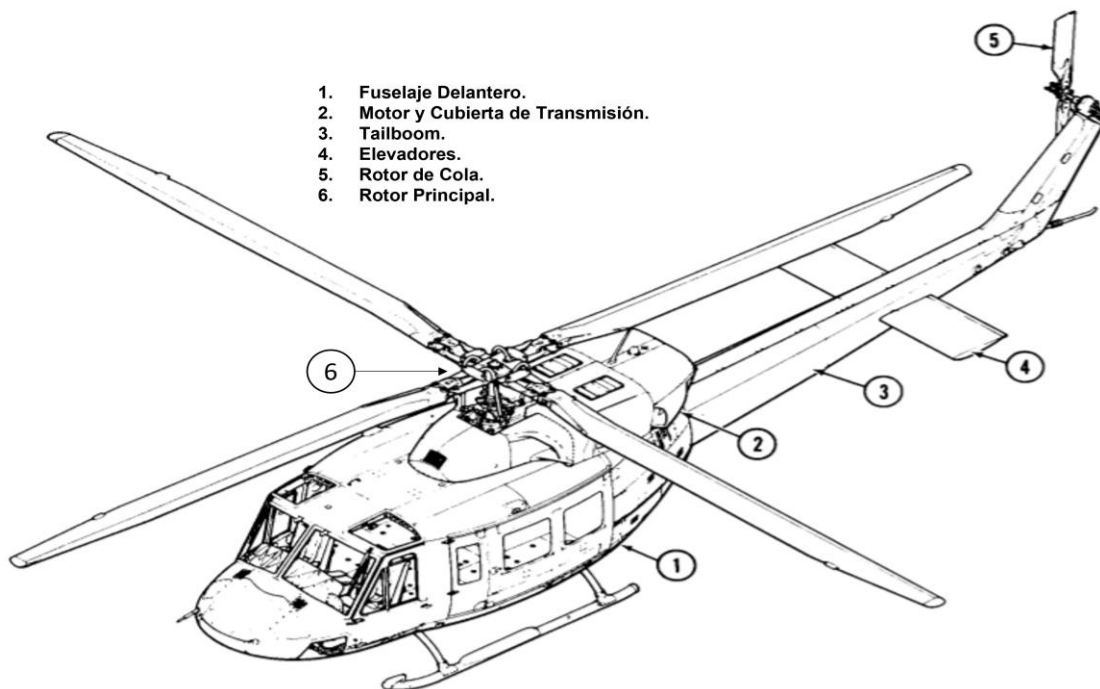
Tabla 2.- Características de la aeronave

Características Generales Aeronave	
Tripulación	2 pilotos
Capacidad	13 pasajeros
Longitud	17.1 metros
Diámetro (Rotor principal)	14 metros
Altura	4.6 metros
Área Circular	154.4 m ²
Peso vacío	3,079 kg
Peso Máximo al Despegue	5,397 kg
Planta Motriz	2 x turboeje Pratt & Whitney PT6T-3D
Potencia	932kW (1285 HP) cada motor.

Fuente: Manual del Fabricante (2013).

El helicóptero consta de dos ensambles principales: El fuselaje delantero y el Tailboom (Véase Figura 1.- Helicóptero.). El fuselaje delantero es de construcción de cáscara de semimonocasco y reforzada con mamparas transversales de metal y fibra de vidrio cubierta. Dos vigas principales longitudinales que proporcionan el soporte estructural, una puerta con bisagras a cada lado del área delantera las cuales permiten el acceso al área de tripulación y una gran puerta corrediza que permite el acceso a la zona de pasajeros y carga. También, tiene una puerta de carga con bisagras inmediatamente delante de la puerta corrediza, esta puerta aumenta el ancho de acceso al área de carga y pasajeros. En la parte delantera designada a la tripulación hay asientos para dos pilotos, en el área de carga y pasajeros se pueden instalar hasta 13 asientos. La plataforma del motor está ubicada arriba y delante del área de pasajeros, está diseñada para acomodar los motores, la caja de cambios de reducción, cortafuegos y sistemas de gestión del aire. El tailboom es de construcción semimonocasco y proporciona soporte a la aleta vertical, al rotor de cola y al sistema de accionamiento del rotor de cola, al patín de cola y en él se encuentra también el compartimiento para equipaje.

Figura 1.- Helicóptero.



Fuente: Manual del Fabricante (2013).

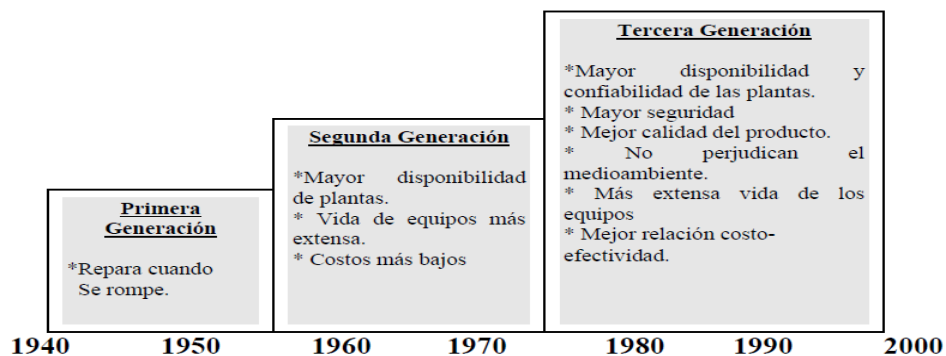
El motor de estos modelos es un Pratt & Whitney Canada PT6T-3 motor turboeje doble serie (Twin-Pac) ya que consta de dos turbinas libres idénticas. Una caja de cambios de reducción común montada en la popa extremo de las secciones de potencia, tiene un eje de salida del motor a la transmisión extendiéndose hacia adelante a lo largo de la línea central del motor para proporcionar energía a la transmisión. El sistema de rotor principal es un haz flexible en plano suave con cuatro palas intercambiables y el rotor de cola consta de dos palas intercambiables.

Estas aeronaves se ven afectadas por el uso constante, por lo cual presentan un desgaste de componentes por la degradación electroquímica u oxidación en alta temperatura por las condiciones de operación normales, sin embargo, en condiciones de altas concentraciones de salitre en el ambiente los componentes se ven afectados en mayor grado por la corrosión.

1.2 Mantenimiento.

La principal función del mantenimiento es sostener la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las máquinas para verse lo menos posible afectados por el factor del tiempo y sus implicaciones. El mantenimiento surge como parte fundamental de las empresas con la llegada de las máquinas para la producción de bienes y servicios (Mora Gutierrez, Mantenimiento. Planeación, ejecución y control, 2009), incrementando la confiabilidad de los sistemas productivos al realizar actividades de carácter de planeación, organización control y ejecución de métodos de conservación de los equipos (Mora, 2007). En la Figura 2.- Expectativas del Mantenimiento a través de los años. se pueden observar los cambios que han surgido a través de las tres generaciones que se determinaron para el mantenimiento.

Figura 2.- Expectativas del Mantenimiento a través de los años.



Fuente: (Moubray, 2004)

Existen 3 tipos de mantenimiento:

- i. **Mantenimiento Correctivo:** Consiste en la pronta reparación de la falla y se le considera de corto plazo. Las personas encargadas de levantar el reporte de la ocurrencia de las averías son los mismos operadores de las máquinas o equipos, para este caso particular, son los pilotos, y las reparaciones las realiza el personal de mantenimiento. La gran desventaja de esta categoría de mantenimiento consiste en que el usuario detecta la falla cuando el equipo se está utilizando, lo que implica que el equipo quede fuera de servicio y se pierda importante tiempo productivo.

Existen dos tipos de tareas no planeadas de orden correctivo:

- El desvare: Consiste en aplicar una reparación inmediata al equipo para devolverlo a la condición de trabajo u operación, pero no necesariamente al 100% de sus condiciones normales. Se aplica en casos de urgencia.
- Reparación correcta y definitiva: Por lo general, se tienen experiencias previas similares y se conoce la causa raíz de las fallas, por lo cual, se suele tener los repuestos, las herramientas y al personal capacitado para reparar y retornar la máquina al 100% de sus condiciones de operatividad.

Este incluye reparaciones, chequeos, pruebas y ajustes menores, de elementos de la aeronave que han sido removidos y normalmente reinstalados después de la terminación del trabajo. Las tareas de mantenimiento correctivo son las que se realizan con intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función, una tarea de mantenimiento correctivo ordinario consta de las siguientes actividades (Knezevic, 1996):

- Detección de la falla.
- Localización de la falla.
- Desmontaje.
- Recuperación o sustitución.
- Montaje.
- Pruebas.
- Verificación.

ii. **Mantenimiento Preventivo:** Es la ejecución de un sistema de inspecciones periódicas programadas racionalmente sobre el activo fijo de la planta y sus equipos. Tiene como objetivo detectar condiciones o estados inadecuados de esos elementos, que podrían ocasionar paros en la producción o deterioro grave de las máquinas, equipos o instalaciones, y realizar en forma permanente el cuidado de mantenimiento de la planta para evitar tales condiciones, mediante la ejecución de ajustes o reparaciones, mientras las fallas potenciales están aún en estado inicial de desarrollo (Patton, 1995). Este mantenimiento busca conocer el estado actual de los equipos, mediante registros de control llevados en cada uno de los equipos o maquinas en coordinación con el departamento de programación, para realizar la tarea preventiva en el momento más oportuno. Consta de actividades sistemáticas en las cuales desmontan las máquinas y revisan, para reparar o sustituir los elementos sometidos al desgaste. A su vez, el mantenimiento preventivo puede clasificarse en dos versiones, la primera basada en el tiempo y la segunda en la condición de desgaste encontrada en la última inspección; en ambas versiones se propone fijar con tiempo de tolerancia la siguiente inspección. El primer método lleva al mantenimiento preventivo sistemático, el cual consiste en realizar las actividades o tareas necesarias cada determinado periodo de tiempo (Ballester , Olmeda , Macián , & Tormos, 2002); y el segundo método busca maximizar la utilidad del elemento retirándolo hasta que pierde sus condiciones y finaliza su vida útil, ambas metodologías se basan en la inspección y análisis crítico de las condiciones. Dentro de las ventajas encontramos las siguientes:

- Evita descomposturas mayores como consecuencia de pequeñas fallas.
- Prepara las herramientas y refacciones.
- Aprovecha realizar las reparaciones en el momento más oportuno, tanto de producción como para mantenimiento.
- Distribuye el trabajo de mantenimiento optimizando la cuadrilla de mecánicos.
- Disminuye la frecuencia de los paros, pero las aprovecha para realizar varias reparaciones diferentes al mismo tiempo.

Las inspecciones siempre se realizan previas al ciclo de vida útil del elemento, y la sustitución o ajuste se realiza con el tiempo previo a la entrada en situación fuera del estándar o de la falla

real. Estas acciones se basan en analizar periódicamente el estado de los elementos de las máquinas para planear las tareas, esta capacidad de planeación permite la máxima optimización de recursos. Reparaciones menores o simples de mantenimiento y remplazo de piezas menores estándar a intervalos fijos determinados, ya sea con base en recomendaciones del fabricante de la aeronave o por estadísticas extraídas de los historiales, este tipo de mantenimiento no involucra operaciones complejas de ensamblaje.

- iii. **Mantenimiento Predictivo:** Estudia la evolución temporal de ciertos parámetros para asociarlos a la ocurrencia de fallas, para determinar en qué periodo de tiempo esa situación va a generar escenarios fuera de los estándares, para planificar todas las tareas proactivas con tiempo suficiente, para que esa avería no cause consecuencias graves ni genere paradas imprevistas de las máquinas. Estas predicciones se hacen a través de las ciencias matemáticas, estadísticas, proyectivas, prospectivas, correlacionales, aleatorias, univariantes o multivariantes, entre otros. La característica más importante es que no debe alterar el funcionamiento o la naturalidad de los procesos operativos mientras se efectúa. La inspección y evaluación de los parámetros se puede realizar en forma periódica o en forma continua, dependiendo de los factores y las condiciones de los elementos como el tipo de planta, los tipos de fallas por diagnosticar y la inversión que se planea realizar.

Algunas de las ventajas del mantenimiento predictivo son:

- La velocidad de detección de las descomposturas, mientras que en otros casos solo puede determinarse la frecuencia.
- Reduce el tiempo de ocio de las máquinas al conocerse con precisión el componente que falla.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Realiza la verificación de la condición de estado y monitoreo en tiempo real de la maquinaria.
- Maneja y analiza un registro de información histórica vital al momento de toma de decisiones técnicas en equipos de trabajo.
- Facilita el análisis de descomposturas.
- Aplica el análisis estadístico del sistema.

La mayor desventaja del mantenimiento predictivo se aprecia en el aspecto económico, por su requerimiento de datos se deben colocar equipos de medición de parámetros. Se enfoca a los síntomas de falla que se identifican utilizando las distintas técnicas tales como análisis de lubricantes, boroscopio, y ensayos no destructivos como: inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnetizables, corrientes inducidas, radiografías, ultrasonido. Estos permiten detectar los síntomas de inicio de fallas en la aeronave.

Para este punto, vale la pena mencionar que las acciones de mantenimiento sean planeadas o no, no son ni buenas ni malas, solo llegan a ser más adecuadas unas que otras en la medida en que se realicen a partir de una táctica dada.

1.3 Mantenimiento aeronáutico.

El mantenimiento aeronáutico, también conocido como MRO (Maintenance, Repair and Overhaul, por sus siglas en inglés) ha sido uno de los puntos más delicados en la aviación puesto que las aeronaves presentan altos costos fijos de operación cuando se encuentran operando y si se encuentra fuera de servicio genera de igual manera grandes costos para su puesta en operación. Los intervalos de tiempo estipulados entre las diferentes inspecciones de mantenimiento dependen tanto del fabricante de la aeronave como del operador de esta, estas revisiones están directamente relacionadas con el número total de horas de vuelo de la aeronave y del número de ciclos de la aeronave (número de aterrizajes). Se puede definir el MRO como “todas aquellas acciones que tienen como objetivo mantener o restaurar un equipo o ponerlo en un estado en el que pueda llevar a cabo las funciones para las cuales fue diseñado, estas acciones incluyen la combinación de técnicas, material, equipo y herramientas, actividades administrativas y de supervisión” (EFNMS, 2013), su importancia radica en el hecho de que tiende a representar del 12% al 15% de los costos de operaciones de las aerolíneas (IATA, 2009), con gastos estimados anuales de \$50 mil millones de dólares en el año de 2013 (AW&ST, 2013) y sustenta el empleo principal de 480,000 personas en el mundo. McFadden y Worrells afirman que el MRO en todo el mundo ha crecido como consecuencia de la demanda continua y creciente en un segmento viable de la industria de la aviación (McFadden & Worrells, 2012); y lo que lo vuelve realmente rentable es la durabilidad de las aeronaves, de acuerdo con datos de CIMData (2002) las aeronaves pueden durar hasta más de 30 años si los mantenimientos son realizados en tiempo y forma. El mercado del Mantenimiento,

Reparación y Overhaul de aeronaves conlleva un proceso complejo que conforma los más estrictos y precisos requisitos para garantizar la seguridad de los pasajeros y la tripulación, en esta industria todos los componentes son rastreables, así como las tareas realizadas en la aeronave y los individuos involucrados.

El mantenimiento aplicado a los helicópteros es un mantenimiento preventivo y consta de un seguimiento de pasos que marca el manual del fabricante el cual se debe acatar de forma correcta y precisa, ya que marca específica y detalladamente como debe ser el mantenimiento para que no sufra ningún daño la aeronave.

1.3.1 Mantenimiento de la aeronave.

El mantenimiento de la aeronave se efectúa de acuerdo con el documento BHT-412-MM-1 el cual consta de un volumen creado el 23 de junio de 1994, con el paso de los años los manuales tienen revisiones siendo la última la revisión 31 el 30 de abril del 2021. De igual manera, cualquier mejora, modificación o actualización se notifica a los propietarios y a las autoridades aeronáuticas a través de boletines de servicio, estos pueden ser de carácter obligatorio u opcionales, para el caso de los obligatorios tiene una fecha de cumplimiento en la que si la aeronave no ha cumplido con los requisitos no podrá volar.

Los manuales aeronáuticos son elaborados de acuerdo con el estándar de referencia ATA 100 (Air Transport Association of America), que es un estándar común para la documentación de aeronaves comerciales. Este aspecto permite una mayor facilidad de aprendizaje y comprensión para los pilotos, técnicos de mantenimiento de aeronaves e ingenieros. Los capítulos del código se pueden dividir en cuatro categorías:

- Generales de la Aeronave.
 - I. Sistema de Fuselaje.
 - II. Estructura.
 - III. Hélice y Rotores.
 - IV. Planta Motriz.

Los capítulos utilizados en el Manual se muestran en la Tabla 3.- Capítulos de código ATA 100 en el manual:

Tabla 3.- Capítulos de código ATA 100 en el manual

Lista de Capítulos					
Cap	Título	Cap	Título	Cap	Título
1	Introducción	21	Aire Acondicionado y Ventilación	64	Rotor de Cola
4	Limitaciones de Aeronavegabilidad	25	Equipamiento y Accesorios.	65	Sistema de Accionamiento de Rotor de Cola
5	Inspecciones	26	Sistemas Contra Fuego.	67	Controles de Vuelo
6	Dimensiones y Superficies	28	Sistema de Combustible.	71	Planta Motora.
7	Levantamiento, Apuntalamiento y Soporte	29	Sistema Hidráulico.	76	Control del Motor.
8	Nivelaje y Pesaje	30	Protección Contra Hielo y Lluvia.	79	Sistema de Aceite del Motor.
9	Remolque y Rodaje	32	Tren de Aterrizaje.	95	Sistema de Instrumentos.
10	Aparcamiento y Amarre.	52	Puertas	96	Sistema Eléctrico.
11	Letreros y Señales	53	Fuselaje.	97	Avionica.
12	Servicios Rutinarios	62	Rotor Principal	98	Diagramas de Cableado.
18	Análisis de Vibraciones y Sonidos.	63	Sistema de Accionamiento de Rotor Principal	99	Kits

Fuente: Elaboración propia con información del Manual.

El presente proyecto se enfocará en el capítulo 4 “Limitaciones de Aeronavegabilidad” que se refiere a los componentes que deben ser reemplazados al término de su tiempo de vida útil.

El helicóptero debe ser inspeccionado periódicamente para verificar que se encuentra en óptimas condiciones de aeronavegabilidad (Ver Tabla 4.- Intervalos de inspecciones programadas.). Los tipos de inspecciones estipulados en el manual son: a) Inspecciones programadas, b) inspecciones especiales, c) inspecciones condicionales, d) inspecciones internas de componentes y e) inspecciones de overhaul de componentes.

a.- Los intervalos de tiempo para las inspecciones programadas pueden ser seleccionadas por el propietario del helicóptero entre dos tipos A y B.

Tabla 4.- Intervalos de inspecciones programadas.

Intervalos de Inspecciones Programadas.	
Tipo A	Tipo B
Inspección Diaria	25 hrs / 30 días
100 hrs / 12 meses	300 hrs / 12 meses
1000 hrs	600 hrs / 12 meses
5000 hrs / 60 meses	5000 hrs / 60 meses

Fuente: Elaboración propia con información del Manual (2013).

b.- Las inspecciones especiales son de carácter temporal o de un intervalo especial que no es consistente con las inspecciones programadas.

c.- Las inspecciones condicionales no ocurren en un tiempo específico, esta es el resultado de la sospecha o conocimiento de un evento inusual, reconocido por la sospecha de un malfuncionamiento o defecto.

d.- Esta inspección se efectúa en las partes internas de un componente reacondicionado (overhauled).

e.- Esta inspección se realiza de acuerdo con los requerimientos de overhaul de los componentes que así lo indiquen en el capítulo 4, deben ser removidos y examinados para verificar la factibilidad del overhaul.

Las fugas de líquidos, la decoloración, las abolladuras, los rayones, las muescas, las grietas, el desgaste, el rozamiento, el desgaste y la corrosión justifican una investigación más profunda. Los artículos no aptos para el servicio deben ser reemplazados o reparados según lo permitido por los inspectores de calidad y el fabricante. El fuselaje completo, incluyendo sistemas de rotor, sistema de accionamiento, sistema de control y fuselaje, debe ser revisado según instrucciones del fabricante cuando ocurra cualquiera de las siguientes situaciones: Cuando el helicóptero ha sido operado durante 2200 horas desde la última revisión o cuando una inspección del helicóptero indica una corrosión subsuperficial extensa en la estructura primaria, el sistema de accionamiento o el sistema de control. Para realizar mantenimiento a la estructura del helicóptero se desmonta parte por parte inspeccionando el área dañada, para instalar material nuevo o en el caso de no encontrar daños reinstalar lo que se pueda, de igual manera, es posible rescatar piezas dañadas reparándolas en el taller.

Dado que el presente proyecto se enfocará en componentes que sufren de corrosión es importante mencionar que algunas áreas de la aeronave son más susceptibles a la corrosión que otras y son aquellas que se encuentran en continua interacción con agentes oxidantes y contaminantes. Las aeronaves que se encuentran en servicio poseen un gran conjunto de ensamblajes de diversos tipos de materiales con formas geométricas caprichosas entre los cuales se pueden encontrar barrenos, pernos, remaches, los cuales se encuentran sometidos a diferentes y muy variantes condiciones climáticas al estar en contacto con el exterior de la aeronave, lo que supone problemas complejos de corrosión (Posadas, 2009), de igual manera es común encontrar daño corrosivo en los pliegues de los fuselajes. Las inspecciones visuales se deben realizar cada 100 horas de vuelo o 90 días, lo que ocurra primero y en lugares de ambientes altamente corrosivos la inspección debe realizarse

día con día, conforme se gane experiencia se podrán reprogramar las inspecciones semanal o mensualmente. De acuerdo con la literatura y el manual del fabricante las partes más propensas a sufrir daños y que deben ser cambiadas con regularidad volando en condiciones ambientales normales son las siguientes:

1. Las pieles de la aeronave, estas son los diferentes tipos de láminas utilizadas para recubrir la estructura metálica del helicóptero.
2. Los remaches utilizados para fijar las pieles a la estructura.
3. Las palas de rotor principal.
4. Las palas de rotor de cola.
5. El rotor principal y el rotor de cola.
6. Las puertas y bisagras.
7. El tren de aterrizaje, conformado por los skidtubes y crosstubes (patines de aterrizaje).

1.3.2 Componentes críticos.

Extraído del capítulo 4 del manual de mantenimiento de la Aeronave los siguientes componentes y ensambles tienen un tiempo de vida determinado por el fabricante (Ver Anexo 1).

Capítulo 2.- Corrosión.

Un requerimiento fundamental para el proceso de corrosión electroquímico es la presencia de un medio electrolítico, cuando se tienen superficies metálicas expuestas a condiciones atmosféricas, se crea una delgada capa invisible de electrolitos al alcanzar un nivel crítico de humedad, a temperaturas por debajo del punto de congelación del agua la oxidación es despreciable, ya que el hielo es un mal conductor (Bilurbina, Liesa , & Iribarren, 2003). De acuerdo con Tomashov (1966) más del 50% de las pérdidas por corrosión se deben a la corrosión ambiental. La magnitud de la corrosión dependerá del tiempo que permanezca húmedo el producto, en el cual intervienen factores como la lluvia, la humedad relativa, la temperatura, las condiciones de exposición, la contaminación atmosférica, características del metal, entre otros. La contaminación atmosférica es ocasionada por las altas temperaturas ambientales, la humedad y los agentes contaminantes agresivos de origen natural o antropogénico del medio al que se expongan los materiales (Tres, Arriaga , Malo, & Uruchurtu, 2001).

Cuando un material por su exposición al ambiente forma una delgada película invisible de electrolitos se da paso a la corrosión atmosférica por medio del balanceo de reacciones anódicas y catódicas. La reacción de oxidación anódica envuelve la parte disuelta del material, por otro lado, la reacción catódica es una reacción de oxi-reducción. La formación de las capas de oxido sobre la superficie del metal es el comienzo de la destrucción de los elementos estructurales fabricados con materiales metálicos, se intensifica y acelera cuando el elemento es sometido a la acción directa o indirecta de una sollicitación mecánica (Avila, Rodriguez , & Lias, 2005).

2.1 Corrosión en las aeronaves.

El control de la corrosión en la industria aeronáutica es uno de los principales temas de interés para el desarrollo de proyectos de investigación, innovación y soporte tecnológico, ya que la corrosión se encuentra directamente relacionada en función al tiempo de vida de la aeronave, pudiendo ocasionar la no disponibilidad de esta y en un caso extraordinario propiciar una falla catastrófica. Actualmente, las aeronaves son construidas con una gran variedad de materiales que deben trabajar bajo medios atmosféricos cambiantes, estos medios son los principales factores que hacen que el control de la corrosión en aeronaves sea una tarea difícil, aunque en las aeronaves modernas casi no se presenten efectos de corrosión con el paso de los años y las horas de vuelo van propiciando

la aparición de esta. El principal problema radica en que prácticamente toda la aeronave es susceptible a un ataque por corrosión, desde un remache hasta componentes mayores y varían de acuerdo con la zona geográfica y la severidad del medio ambiente (Posadas, 2009).

La mayoría de los metales que se usan en la industria aeronáutica están sujetos a corrosión. El ataque puede tener lugar sobre una superficie metálica entera, o puede ser penetrante en los resquicios de los ensambles, ocasionando un ataque localizado y generando picaduras profundas, o bien pueden los agentes corrosivos difundir en los límites de grano y provocar un ataque intergranular. Los esfuerzos externos en conjunto con el ambiente atmosférico, puede acelerar o disminuir la velocidad de los mecanismos de degradación, también existen otros materiales que pueden ayudar a iniciar un proceso de corrosión y son aquellos que la promueven por contacto con el metal, por ejemplo, la madera, esponja, goma, la suciedad, entre otros.

La corrosión se puede manifestar de muchas maneras y en este tipo de industria se clasifican de tipo general o localizada y se divide la siguiente forma (Tiburcio, Zambrano, Martinez , & Almeraya , 2013):

- Corrosión uniforme o general se caracteriza por un ataque corrosivo producido justo sobre la superficie entera de un área o una alta proporción de esta. Un adelgazamiento del material toma lugar antes de la falla. Es relativamente fácil de manejar, predecir y medir, haciendo que las fallas desastrosas causadas por ésta sean realmente inusuales. La descomposición del revestimiento protector de los sistemas o de las estructuras frecuentemente ceden a este tipo de corrosión destacándose por su apariencia de deterioro. Es el tipo más común, se presenta en la superficie de las aeronaves y surge de la reacción directa de la superficie de metal con el oxígeno en el aire, si la aeronave no se protege adecuadamente el acero inoxidable, el aluminio, el magnesio y el titanio, por mencionar algunos, se oxidan y forman productos de corrosión, y el ataque puede ser acelerado dependiendo del tipo de atmosfera en la que circule la aeronave.
- Picado (Pitting), es una forma localizada de deterioro por marcas como cavidades o huecos producidos en el material, el picado es considerado ser más peligroso que el daño por corrosión uniforme, debido a que es más difícil de detectar, predecir y diseñar en contra de sus efectos.

- Hendedura (Crevice) es una forma localizada de corrosión asociada con una solución estancada (inactiva) en un microambiente, se da por la formación de áreas tapadas como a manera de filtraciones bajo juntas, arandelas, materiales aislantes, sujetadores, roscas, dobleces, laminas superpuestas, entre otros. Como la difusión del oxígeno dentro de la grieta tapada está restringida se crea una celda de aeración diferencial que tiende a localizarse entre la grieta tapada “Crevice” y la superficie externa.
- Corrosión galvánica se presenta cuando diferentes tipos de materiales metálicos entran en contacto entre sí con la ayuda de un medio electrolítico, puede ocurrir también entre metales y aleaciones y otros materiales conductivos como el carbón o el grafito. En este caso, el material con el potencial de corrosión más noble se convierte en el cátodo de la celda de corrosión, mientras que el material menos noble es consumido por una solución anódica. El grado de ataque dependerá de la actividad relativa de las dos superficies, entre mayor sea la actividad, más grave será el ataque.
- Corrosión por erosión, es un daño acumulativo inducido por reacciones corrosivas electroquímicas y los efectos mecánicos del movimiento relativo del electrodo y la superficie corroída. La corrosión por erosión está definida como la acelerada degradación en presencia de un movimiento relativo de alta velocidad, con desgaste mecánico y efectos abrasivos.
- Corrosión por frotamiento (fretting), es el deterioro producido por el roce de las asperezas de las superficies en contacto, se incluye como un tipo de corrosión erosiva. El daño es inducido bajo carga y en presencia de movimientos relativos con respecto a una superficie, provocados por ejemplo por vibración. Picaduras o ranuras y desechos óxidos también caracterizan este fenómeno típicamente encontrado en ensamble con pernos.
- Corrosión intergranular, es un ataque selectivo a lo largo de los límites de grano de aleaciones metálicas, y es el resultado de la falta de uniformidad en la estructura de la aleación. Este tipo de corrosión es particular de las aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación y de algunos aceros inoxidable. Las aleaciones de aluminio que contienen cantidades significantes de cobre y zinc respectivamente son muy vulnerables a este tipo de ataques si no se realiza el tratamiento térmico adecuado.
- Corrosión asistida por esfuerzo (SCC por sus siglas en inglés), es un proceso de corrosión caracterizado por el inicio y propagación de grietas que crecen lentamente bajo la acción

simultánea de esfuerzos de tensión sostenidos y un ambiente corrosivo específico. Es una forma peligrosa de corrosión debido a que la falla del material se da de manera súbita e inesperada, resulta del efecto combinado de las tensiones de tracción estática o aplicada a una superficie durante un periodo de tiempo bajo condiciones corrosivas.

La corrosión es ocasionada por diversas variables y el tipo dependerá de la caracterización de la corrosión encontrada. La corrosión atmosférica puede ser definida como el desgaste sufrido por los diferentes materiales al estar expuestos al aire y sus contaminantes, este tipo de corrosión se puede clasificar en: Seca, húmeda y mojada, siendo las dos últimas las asociadas a la corrosión con presencia de una película electrolítica microscópica, además de otras capas electrolíticas visibles sobre las superficies; la capa húmeda crea un cierto nivel crítico de humedad a lo largo de toda su extensión debido a la absorción de moléculas de agua, mientras que, la película mojada es asociada con el punto de condensación (rocío), salpicaduras del agua del océano, agua de lluvia y otras formas de contacto con el agua. La severidad de la corrosión atmosférica tiende a variar significativamente a lo largo de las diferentes localidades geográficas en las que se desarrollen los vuelos, e históricamente se han clasificado los ambientes como rural, urbano, industrial y marino, o en su defecto podría surgir una clasificación con la combinación de estos.

La corrosión rural, es la menos corrosiva y normalmente no tiene poluciones químicas, pero contiene partículas orgánicas e inorgánicas que actúan como agentes corrosivos. Los principales agentes corrosivos que se pueden encontrar en este ambiente son la humedad, el oxígeno y el dióxido de carbono, los ambientes áridos y tropicales son casos extremos y especiales de esta categoría y la corrosión urbana es similar a la rural en cuanto a que hay pequeña actividad industrial, los agentes corrosivos que se encuentran en ésta son los contaminantes producidos por emisiones de motores vehiculares y emisiones domésticas.

En cuanto a la corrosión industrial debido a que esta atmósfera es la más pesada por su alta contaminación, asociada directamente a los grandes procesos industriales y su complejidad, sus emisiones presentan altas concentraciones de dióxidos sulfúricos, cloruros, fosfatos y nitratos.

Y finalmente la corrosión marina, la cual se caracteriza por la deposición sobre las superficies de finas partículas cloradas de humedad que llevan los vientos marinos (brisa del mar). Es usualmente alta corrosiva y el desgaste que genera en las aeronaves tiende a ser significativo y a su vez,

dependerá de la dirección y velocidad del viento, además de la distancia de la que se encuentre el material de la costa (Serna, 2007).

Con lo cual es posible identificar entonces las siguientes variables principales que propician la corrosión:

- **Humedad:** La velocidad de corrosión aumenta al crecer la humedad relativa a partir del 60 – 70%; particularmente si la atmosfera se encuentra contaminada, el incremento es relevante. Se le conoce como humedad crítica al punto a partir del cual la corrosión experimenta un aumento importante y puede variar de acuerdo con los niveles de contaminación y las características del metal, y la difusión de oxígeno a través de la capa acuosa es por lo general, el factor que controla la velocidad de la corrosión.
- **Contaminación:** Los contaminantes que más pueden influir sobre la corrosión atmosférica son el dióxido de azufre y el cloro, se creía que el dióxido de carbono tenía un fuerte impacto en el desarrollo de corrosión en los metales, pero se demostró que en realidad disminuía la corrosión, ya que propiciaba la formación de una película de óxido más estable. El componente contaminante más corrosivo es el dióxido de azufre, pero su acción dependerá del contenido de humedad que presente el metal, los productos de corrosión sobre la superficie metálica favorecen la captación de agua y de contaminantes acelerando el proceso de corrosión, por ello el dióxido de azufre se logra acumular sobre el metal en periodos secos y afectar en el momento que la humedad incrementa. El otro contaminante importante son los cloruros y se aborda en el último punto.
- **Temperatura:** Este tipo de corrosión se regula por la difusión del oxígeno, Vernon (1951) encontró que la velocidad aproximadamente se duplica por cada aumento de 30°C en la temperatura (Salazar-Jiménez, 2015).
- **Salitre:** Esta demostrado que el NaCl y el SO₂ son los principales corrosivos de la atmósfera, el cloruro de sodio o salitre se presenta desde el mar y en ocasiones, desde suelos salinos. Cuanto mayor es la concentración atmosférica, mayor es la velocidad de corrosión. El cloruro sódico es un electrólito fuerte que eleva considerablemente la conductividad de la película acuosa sobre el metal, en el caso del agua de mar de las atmósferas marinas, es mucho más agresiva que cualquier otra debido a los valores de salinidad que fluctúan entre 4-5%, la mayor parte de estas sales son cloruros de sodio y magnesio, pero pueden también

encontrarse sulfatos y bicarbonatos (Avila, Rodriguez , & Lias, 2005). El valor de la humedad relativa a partir de la cual la sal empieza a absorber agua de la atmósfera parece que es el valor crítico desde el punto de vista de la corrosión y se encuentra entre 70 y 75%.

Por lo cual, para prevenir mayores afectaciones en las aeronaves por volar en condiciones no normales se realizan mantenimientos constantes, con los cuales se busca disminuir el tiempo que los helicópteros se encuentran fuera de servicio, los cuales se explican a continuación.

2.2 Corrosión en zonas costeras.

El hecho de que la velocidad de desgaste de un material en la atmosfera varíe decenas y hasta centenares de veces mayor en unos puntos geográficos que en otros indica el interés práctico de las estimaciones de agresividad del medio atmosférico en lugares diferentes, que propician las diferentes condiciones atmosféricas (E, 1988). En el caso particular de los metales, la corrosión atmosférica se ve fuertemente influida por las condiciones meteorológicas de la zona de operación o ubicación de este, la naturaleza electroquímica del proceso requiere que la superficie de un metal se encuentre húmeda, de lo contrario es imposible que actúe la diminuta pila local de corrosión. Por lo tanto, la magnitud del proceso corrosivo se encuentra en función de, entre otros factores, el tiempo durante el cual la superficie del metal ha permanecido húmeda y el proceso global será la suma de los procesos parciales de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma una capa de electrólito acuoso sobre el metal. Dicho lo anterior, las precipitaciones acuosas, sea lluvia, nieve o niebla y la condensación de humedad debido a los cambios de temperatura deben considerarse también como propiciadores de la corrosión atmosférica, dicha composición será quien determine el sufrimiento de la superficie metálica.

En las zonas marítimas costeras el agente corrosivo habitual en combinación con la humedad del ambiente es el ion cloruro, cuyo origen se encuentra en el mar y como destino final queda depositado en la superficie de materiales, equipos, herramientas, medios de transporte, humanos, edificios y todo aquello que se encuentre cercano a esta condición ambiental. En las zonas costeras industriales, además del contaminante citado se cuenta también con la presencia de dióxido de azufre en la atmosfera, procedente de la combustión de los carburantes que contienen azufre, la concentración es alta cerca de la fuente de emisión (quemadores de las plataformas petroleras)

decreciendo a medida que la distancia de la fuente aumenta, a pesar del decrecimiento la dispersión del contaminante genera un microclima agresivo que puede potenciar la acción corrosiva del principal agente que es el cloruro.

Tener conocimiento de la concentración de cloruros presentes en una atmósfera marina-industrial, es de gran interés y justifica los estudios al respecto ya que permitirá conocer el impacto de las condiciones en cuanto a la durabilidad y tiempo de vida de construcciones, medios de transporte, herramientas, equipos, entre otros. Es importante para el diseño de los sistemas de protección conocer con exactitud las características del medio (Avila, Rodriguez , & Lias, 2005) y determinar los impactos de deterioro para implementar estrategias que permitan la correcta operación y disponibilidad.

Capítulo 3.- Confiabilidad.

El mundo competitivo en el que se desarrollan las empresas ha propiciado la búsqueda del aseguramiento y mejoramiento de su competitividad a través de esfuerzos, acciones y decisiones que guíen a garantizar sistemas y activos operando de manera eficiente y eficaz, para tener clientes y usuarios satisfechos, riesgos reducidos, minimizar incidentes ambientales y costos óptimos (Pérez, 2003). De esta forma se brinda un entorno “confiable” para los clientes, empleados, comunidad, propietarios y medio ambiente; además es una modalidad que ha implicado grandes beneficios para quienes la han aplicado (Latino, 2003). Los cambios de las condiciones económicas, el desarrollo de la transparencia en la competencia empresarial, la presión para la reducción y eliminación del desperdicio de recursos, instalaciones e infraestructuras más complejas, el impacto de los paros y las reparaciones de las unidades productivas y de servicios han generado una mayor exigencia para el concepto de “ser confiable” y la mejora de la confiabilidad toma un papel protagónico en las empresas.

Las fallas en equipos han causado grandes tragedias en el mundo y la tendencia a optimizar recursos han producido el desarrollo de nuevas metodologías de mantenimiento para instalaciones industriales, equipos y herramientas, una de estas es la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés) (Poveda, 2011). En épocas anteriores el mantenimiento era administrado para dar soluciones de manera reactiva a daños en equipos o instalaciones, como consecuencia de estas respuestas de mantenimiento se generó el pánico y la presión ya que implicaba detener la operación o el servicio para realizar las acciones e impactaba en los ingresos de la empresa, se inicia entonces a buscar un mantenimiento adecuado a las necesidades de las empresas. Hoy en día el mantenimiento se relaciona íntimamente con los objetivos empresariales, se logra construyendo un esquema paso a paso para lograr superar etapas definidas y verificables. En los últimos años, se han realizado esfuerzos con el objetivo de lograr la reducción organizacional, conceptos como aplanamiento, reestructuración y globalización han formado parte del entorno llevando cambios importantes en las organizaciones desarrollando así el concepto de confiabilidad; para que una organización pueda demostrar que es competitiva y exitosa se requiere la medición de factores claves como la calidad, la productividad, la rentabilidad, la imagen, la seguridad y un punto que ha tomado fuerza, la integridad ambiental, en su conjunto

estos indicadores expresan el desempeño general de una empresa, aunado con la confiabilidad (Pérez, 2003).

Definiciones de confiabilidad.

El autor García Oliveiro (2012) define la confiabilidad operacional como la capacidad de un sistema formado por equipos, procesos, tecnologías y personas para cumplir las funciones para las cuales ha sido concebido, dentro de ciertos límites y para un contexto operacional dado. Por otra parte, el autor Huerta (2006) la define como el resultado de la integración sinérgica de sus cuatro elementos componentes: confiabilidad del equipamiento, confiabilidad de los procesos y sistemas, confiabilidad humana y mantenibilidad, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial; En términos más objetivos, Huerta (2004) la define como la probabilidad de que un sistema o activo pueda operar durante un determinado lapso de tiempo sin pérdida aparente de su función. De acuerdo con los conceptos expuestos se puede asumir que los autores concuerdan en que un proceso de mejora de la confiabilidad debe estar basado en el análisis de diferentes elementos como el equipamiento, los procesos, el mantenimiento y los recursos humanos.

Como elemento fundamental es necesario definir confiabilidad de la siguiente manera $R(t)$ (R de Reliability = Confiabilidad), la confiabilidad es la probabilidad de que una unidad de producto se desempeñe satisfactoriamente cumpliendo con su función durante un periodo de tiempo para el cual fue diseñado y bajo condiciones previamente especificadas (Acuña, 2003), siendo entonces una probabilidad entre 0 y 1. En esta definición se encuentran conceptos que vale la pena esclarecer:

- **Probabilidad:** Es un resultado numérico de un evento aleatorio, para el cual se conocen o no se conocen sus causas y que debe ser una magnitud comprendida entre cero y uno.
- **Periodo diseñado:** El funcionamiento del producto no es para siempre, sino hasta que se logre un nivel de satisfacción adecuado en el cliente.

- **Condiciones previamente especificadas:** El proceso no se desarrolla bajo cualquier condición, sino bajo aquellas establecidas en el diseño y descritas muy claramente en los instructivos de uso y vida útil de producto.

Estas tres condiciones varían de acuerdo con el impacto del medio ambiente sobre el producto, relacionado con cantidades físicas como presión, temperatura, humedad, viento, tensión o acciones humanas que imponen al producto un reto durante su funcionamiento y una probabilidad de disminuir la vida útil.

La confiabilidad de un producto o proceso se puede estimar por medio de 4 fases:

- i. Definición de objetivos y requerimientos de confiabilidad del sistema.
- ii. Desagregación del sistema en componentes y estimación de confiabilidad para cada uno de los componentes.
- iii. Predicción de la confiabilidad del producto con base en la confiabilidad de sus componentes.
- iv. Análisis del sistema con el fin de determinar fortalezas y debilidades y aprovechar nuevas oportunidades de mejoramiento.

El comportamiento histórico de un equipo se puede analizar a través de herramientas como la función de Weibull, Poisson, entre otras, para predecir fallas futuras (Palencia , y otros, 2006). Los modelos tradicionales de predicción de fallas evalúan el total de estas para conformar una tendencia y pronosticar el número de fallas en un tiempo determinado o aproximar el tiempo en el que se producirá una siguiente falla (Palencia, Metodología de análisis de compresores recíprocos a través del modelaje de confiabilidad y cálculo de ciclo de vida., 2002). Se debe tomar en cuenta que las decisiones tomadas por los analistas se ven influenciadas por factores como el software utilizado, factores humanos o de operación, factores ambientales e incluso la edad del equipo, de los cuales solo el primer factor se puede mejorar con entrenamiento, los últimos son difíciles de evaluar debido a su origen subjetivo.

Para determinar la confiabilidad se han desarrollado ecuaciones matemáticas, las cuales se describen a continuación.

3.1 Definición Matemática de Confiabilidad.

Desde el punto de vista de ingeniería, la confiabilidad es la probabilidad de que un aparato o dispositivo o una persona desarrolle una determinada función bajo condiciones fijadas durante un periodo de tiempo determinado, es decir, entre 0 y t. Se ha mencionado anteriormente que la confiabilidad está dada matemáticamente por R(t), en donde R es confiabilidad (R por su inicial en inglés Reliability) y una t entre paréntesis que es el tiempo, resulta R (0) = 1, es decir, al inicio de su periodo de vida útil el dispositivo funciona con seguridad y R (∞) = 0, ya que en un tiempo muy largo es seguro que el equipo falle. Las relaciones entre la confiabilidad y los componentes son:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N(0)} = \frac{N(0) - N_f(t)}{N(0)} = 1 - \frac{N_f(t)}{N(0)} \quad (1)$$

En donde:

R(t) = Confiabilidad del Componente.

N_s(t) = Número de componentes que continúan funcionando al terminar un periodo t.

N_f(t) = Número de componentes que han fallado al terminar un periodo t.

N(0) = Número total de componentes que existen al inicio del ensayo.

Derivando a la ecuación se obtiene

$$\frac{dR(t)}{dt} = - \frac{1}{N(0)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} \quad (2)$$

En donde si dt se hace muy pequeño la expresión anterior indicará la probabilidad instantánea de NO falla en el instante t, resultando en la función de densidad de probabilidad de no falla:

$$f(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (3)$$

Si el equipo no cumple con su función en determinado tiempo t , falla entre 0 y t se tiene la probabilidad de falla que está dada por:

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (4)$$

Esta probabilidad debe ser especificada pues puede ser una falla en operación, en operación bajo demanda, en operación previa a la demanda o en operación posterior a la demanda. La función de densidad de fallas, partiendo de la ecuación **Error! Reference source not found.** es la derivada de la probabilidad de falla respecto al tiempo:

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

De la ecuación (2) se deduce:

$$\frac{dN_f(t)}{dt} = -N(0) \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (6)$$

Y dividiendo por $N_s(t)$ resulta:

$$\frac{1}{N_s(t)} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} = -\frac{N(0)}{N_s(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = \lambda(t) \quad (7)$$

$\lambda(t)$ es la tasa instantánea de fallas o probabilidad de falla del componente en un tiempo infinitamente pequeño dt cuando en el tiempo t estaba operativo. Al sustituir $N_s(t)/N(0)$ por $R(t)$ resulta:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (8)$$

Indicando de esta manera que $\lambda(t)$ es también el cociente entre la función de densidad de fallas y confiabilidad, reordenando la ecuación **Error! Reference source not found.** se obtiene:

$$\lambda(t) \cdot dt = -\frac{dR(t)}{R(t)} \quad (9)$$

Que integrando entre 0 y t resulta:

$$\int_0^t \lambda(t) dt \quad (10)$$

Y como para $t=0$, $R(t) = 1$, se obtiene:

$$-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt = \ln R(t) - \ln 1 = \ln R(t) \quad (11)$$

Surgiendo así:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (12)$$

Que es la expresión general matemática de confiabilidad en función de la distribución de fallas específica, para el caso especial en el que la tasa de fallas sea constante (independiente del tiempo) se obtiene la expresión general:

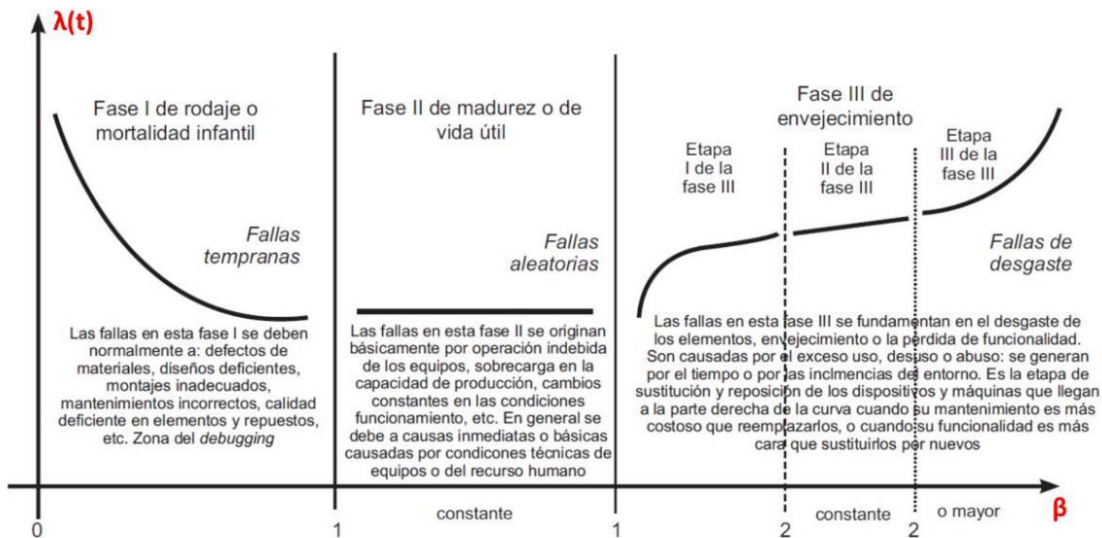
$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (13)$$

Que es una función exponencial, de este modo λ es la frecuencia con la que se presentan los fallas en los componentes, normalmente se expresa en fallas/hora es decir $1/\lambda$ o Tiempo Medio Entre Fallas (como se muestra en la ecuación 17). Como la tasa instantánea de fallas varía respecto al tiempo, su representación típica tiene forma de bañera, con tres etapas perfectamente diferenciadas: Fallas iniciales, operación normal y envejecimiento.

3.1.1 Curva de la bañera.

La curva de la bañera es un gráfico que permite representar la tasa de fallas durante la vida útil de un determinado sistema o máquina (Eda, 2013). El nombre se le asigna por la figura que se forma en el gráfico y su semejanza con una bañera, se puede observar en la Figura 3.- Curva de la Bañera.

Figura 3.- Curva de la Bañera.



Fuente: (Mora Gutierrez, Mantenimiento. Planeación, ejecución y control, 2009)

La primera etapa de mortalidad infantil corresponde generalmente a la existencia de equipos defectuosos con una tasa de falla superior a la normal, que están incluidos dentro de los dispositivos normales, con el paso del tiempo esta tasa de fallas elevada disminuye hasta alcanzar un valor constante que es cuando se entra a la fase II de vida útil. LA fase II se debe usualmente a las operaciones con solicitudes superiores a las proyectadas encontrando de esta manera las fallas aleatorias, pues ocurren de manera inesperada. Por último, se encuentra la fase III denominada fase de envejecimiento la cual se debe a la superación de la vida prevista del componente y empiezan a aparecer las fallas como consecuencia del desgaste, se caracteriza particularmente por el aumento en la tasa de fallas, entre más se eleva mayor es el tiempo transcurrido desde el final de la fase II. De acuerdo con el autor Creus (1992) la aparición de la

tercera etapa puede posponerse gracias al cambio de los componentes del equipo que permitan posponer indefinidamente el desgaste de este.

La vida media de un componente se encuentra definida por la integral del producto del tiempo por la densidad de fallas:

$$v.m. = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (14)$$

O bien

$$v.m. = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{R(t)}{dt} \cdot dt = -[t \cdot R(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (15)$$

En el caso de que la distribución de fallas sea exponencial:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \text{ resulta en } v.m. = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot t} dt = 1/\lambda \quad (16)$$

Es importante mencionar que la confiabilidad desde el punto de vista operacional se divide en cuatro elementos, los cuales deben ser considerados al momento de su análisis.

3.2.-Elementos Integrantes de la Confiabilidad Operacional.

En la Figura 4.- Diagrama de Confiabilidad Operacional y sus Elementos Integrantes. se encuentran los 4 elementos de la confiabilidad operacional: la confiabilidad del proceso, la confiabilidad humana, la confiabilidad de equipos y el mantenimiento de los equipos.

Figura 4.- Diagrama de Confiabilidad Operacional y sus Elementos Integrantes.



Fuente: (García Palencia, 2012)

1.- Confiabilidad del Proceso.

Se considera que la confiabilidad de procesos es la capacidad que tiene el sistema de procesos de garantizar la calidad del producto y la confiabilidad inherente por un periodo de tiempo, bajo ciertas condiciones dadas (Guan, Jie, & Guangyan , 2017). Dentro de la comprensión del proceso se encuentra la estandarización de actividades, organización de trabajo, calidad, logística, gerencia visual; desde el punto de vista de la ingeniería, la confiabilidad de procesos es la probabilidad de que un conjunto de actividades o eventos que se realizan o suceden bajo ciertas circunstancias con un objetivo (García O. , 2012).

2.- Confiabilidad Humana.

Se puede considerar el elemento humano como la parte más flexible, adaptable y valiosa de un sistema, siendo también la más vulnerable a influencias que impacten negativamente en el comportamiento de la persona. Es común en las empresas no aprovechar el 100% de las capacidades de su recurso humano por no propiciar un clima positivo en el ambiente laboral, o no proporcionar las herramientas adecuadas en óptimas condiciones. El factor humano impacta en los sistemas industriales, la comprensión de sus capacidades, limitaciones predecibles y tratamiento

permiten aumentar la capacidad de gestión y colaborar de manera permanente en el logro de los objetivos empresariales (Pons , Villa , & Bermúdez, 2013).

La confiabilidad humana se define como la probabilidad de la NO ocurrencia de una acción humana que influya en el origen y desarrollo de un efecto no deseado. Una de las metodologías más usadas para estimar la confiabilidad humana son la Técnica para la predicción de la tasa de error humana (THERP por sus siglas en ingles) y la Técnica de reducción y evaluación del error humano (HEART por sus siglas en ingles) (Bayout & Alves, 2007), el THERP predice las probabilidades de error humano y evalúa el deterioro de un sistema individuo-máquina causado por los errores humanos, ya sean aislados o en relación con el funcionamiento de los equipos, el procedimiento o la práctica de la ejecución; la segunda evalúa las interacciones entre humanos, sus tareas específicas y el desempeño de la organización, factores humanos o las condiciones que provocan el error (Swain, 1964).

3.- Confiabilidad de los equipos.

Es la probabilidad de que un equipo o sistema cumpla con sus funciones en un periodo de tiempo determinado y en un contexto determinado. La confiabilidad se relaciona con la tasa de fallas (cantidad de fallas en un periodo de tiempo) y con el Tiempo Medio Entre Fallas (TMEF). Mientras el número de fallas de un activo aumente, o el TMEF del activo disminuya el indicador de confiabilidad de este será menor (Arata, 2009).

El tiempo medio entre fallas es utilizado en sistemas cuya funcionalidad puede ser recuperada y se establece como el valor medio entre fallas, luego de fallas consecutivas durante un periodo determinado (Véase ecuación (17)).

$$TMEF = \frac{\sum_{i=1}^n TEF_i}{\sum F} \quad (17)$$

Donde:

TEFi: Tiempo entre fallas del elemento i.

F: Número de fallas del elemento i.

4.- Mantenimiento de los Equipos.

La mantenibilidad es una característica inherente de un sistema o elemento, se asocia a su capacidad de recuperación para el servicio cuando se le aplica una tarea de mantenimiento necesaria bajo condiciones preestablecidas, con procedimientos y herramientas adecuados, con lo que se restablece su operatividad. La definición desde el punto de vista de ingeniería se definiría como la probabilidad de que un activo sea devuelto a su estado de cumplimiento de funciones, después de ocurrir una intervención, en un periodo de tiempo determinado y en un contexto determinado (Mesa , Ortiz, & Pinzón , 2006). Es necesario cuantificar los mantenimientos realizados para poder aplicar correctamente la mantenibilidad, en la práctica el enfoque basado en el tiempo empleado en las tareas de mantenimiento es el más utilizado ya que con él se logra medir la capacidad de recuperación del sistema para su función. Los indicadores que pueden describir la mantenibilidad se relacionan con el tiempo de recuperación (TTR, Time To Recovery) y con el tiempo medio para reparación (TMPR) que es la medida de la distribución de los tiempos de reparación del equipo o sistema, mide la efectividad al restituir la unidad a las condiciones requeridas de operación desde el momento de la inoperatividad por falla, dentro de un periodo determinado (Véase ecuación (18)).

$$TMPR = \sum_{T=1}^n \frac{TTRi}{N} \quad (18)$$

Donde:

TTRi: Tiempo necesario para completar cada una de las tareas de mantenimiento.

N: Número de tareas de mantenimiento realizadas durante el tiempo de análisis del equipo.

En los últimos 30 años se han desarrollado diversos modelos, métodos y técnicas que permiten cuantificar o valorar el impacto de las diferentes acciones de mantenimiento que se realizan sobre los sistemas.

3.3 Análisis de fallas.

Las personas u organizaciones adquieren bienes porque pretenden que cumplan una determinada función, y se espera que dichas funciones se realicen a un nivel de desempeño (Moubray, 2004), las fallas suelen estar asociadas con el diseño, la manufactura, la instalación, el uso y el mantenimiento (Medrano, González, & Díaz, 2017). Al comprar una licuadora se espera que esta cumpla con la función principal de licuar y además si fue diseñada con distintas velocidades de rotación se esperaría que cumpliera dicha función a los diferentes niveles de velocidad; se espera también que cumpla con un tiempo de vida a pesar del desgaste en relación con el uso que se le dé al equipo; si en algún momento la licuadora es incapaz de cumplir con la función se considera que existe una falla.

Mencionado lo anterior, es posible definir el término falla como “la incapacidad de un bien para cumplir con las funciones para las que fue diseñado”. Aunque la definición antes mencionada queda ambigua al referirse a un sistema completo, ya que no distingue entre el estado de falla (falla funcional) y los eventos que causan el estado de falla (modos de falla), desde una perspectiva sistémica, los equipos o bienes son un sistema conformado por varios componentes que a su vez tienen funciones distintas con frecuencias distintas (Moubray, 2004).

No todas las fallas pueden ser clasificadas como fallas funcionales, no todas las fallas tienen un efecto directo en la pérdida de la función (Aguilar, Torres , & Magaña , 2010), por lo cual, se debe primero que nada identificar las funciones principales de la sección o sistema que se va a evaluar para determinarlas y poder segmentar las funciones secundarias, que no por ello son menos importantes. Dentro de las fallas funcionales se encuentran las siguientes clasificaciones:

- Falla Total: Pérdida total del funcionamiento.
- Falla Parcial: Causadas por motivos diferentes que las fallas totales, por ende, tiene consecuencias diferentes que no impactan en el funcionamiento del equipo, pero si en el desempeño de este.

Se debe cumplir con el registro de todas las fallas y mencionar en que segmento o parte del equipo se perciben las consecuencias. La definición precisa de “falla” en cualquier equipo depende del

contexto operativo, por lo tanto, no es posible generalizar las funciones de equipos, aunque parezcan idénticos.

Debido a que una falla se puede originar por diferentes situaciones se han desarrollado métodos para su caracterización, como el análisis de modo de falla y efecto. El análisis de modo de falla y efectos (FMEA, por sus siglas en inglés) es un método que permite cuantificar el impacto de las fallas de los componentes de un sistema y la frecuencia con que se presentan con el fin de establecer tareas de mantenimiento en las áreas que presentan mayor repercusión en la funcionalidad, confiabilidad, mantenibilidad, riesgos y costos totales para cumplir con su reducción y de ser posible su completa eliminación (Medrano, González, & Díaz, 2017), se puede observar el formato de AMEF en la Figura 5.- Hoja general de un Análisis de Modo y Efecto de Fallas. Establecer este análisis dentro de la empresa contribuye a la organización de planes y programas de mantenimiento de manera eficiente, así como a establecer un seguimiento y control que garantice el monitoreo de las acciones emprendidas y el cumplimiento de las recomendaciones del análisis.

Figura 5.- Hoja general de un Análisis de Modo y Efecto de Fallas.

Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)

SISTEMA: _____ PAGINA: _____ / _____
 PLANTA: _____ REFERENCIA: _____
 ELABORADO POR: _____ FECHA: _____

Item	Tipo de Folio	Causas	Efectos	Acciones a tomar

Fuente: (Creus, 1992)

Un modo de falla puede ser definido como un evento que causa que un bien pueda fallar, cualquier suceso que causa una falla funcional. Los análisis de modos de fallas se deben realizar porque un equipo o máquina podría fallar por una gran variedad de razones, este proceso detalla la falla propiciando una recomendación específica para evitar esta falla en un futuro desarrollando una política de manejo de fallas apropiada. Lamentablemente, se caracterizan estos análisis por llevarse a cabo después de una falla, siendo entonces un método reactivo y no proactivo, sin embargo, se concluye en un modelo proactivo después del primer suceso. Los puntos más importantes para tomar en cuenta para empezar a hacer los modos de fallas son (Krohn, 2000):

- Los aportes de las personas involucradas en la producción y mantenimiento pues tienen la experiencia práctica y son quienes se encuentran más cercanos a los equipos, cuentan también con los manuales de los equipos.
- La historia de los equipos.
- El fabricante o especialista de los equipos.

Los efectos de las fallas son diversos y describen que sucede cuando se presenta un modo de falla. Dichos efectos no son lo mismo que las consecuencias de las fallas, una manera objetiva para evitar confundirlas es la siguiente: La pregunta ¿Qué sucede? Hace referencia a un efecto de falla; por otra parte, la pregunta ¿Cómo afecta? Hace referencia a un modo de falla.

La descripción del efecto de la falla debe incluir toda la información necesaria para respaldar la evaluación de las consecuencias de la falla. Se debe de registrar lo siguiente:

- Que evidencias hay de que la falla sucedió.
- En qué medida representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- De qué manera afecta la producción u operaciones.
- Que daño físico es causado por la falla.
- Que debe hacerse para repararla.

Es importante notar que la amenaza al medio ambiente tiene una mayor importancia que las afectaciones a la producción u operaciones.

De igual forma, las consecuencias de las fallas determinarán la importancia que los propietarios o usuarios den a la discrepancia. Se enlistan las consecuencias en la siguiente clasificación:

- Consecuencias medioambientales y de seguridad: Una falla tiene consecuencias de seguridad si puede dañar o terminar con una vida, tiene consecuencias medioambientales si pudiera llevar a una violación de cualquier norma medioambiental.
- Consecuencias operativas: Una falla tiene consecuencias operativas si afecta la producción o las operaciones.
- Consecuencias no operativas: Las fallas evidentes en esta categoría afectan únicamente el costo directo de la reparación.

Con la información previamente mencionada respecto a las consecuencias y modos de falla es posible realizar los pasos del AMEF, el cual coloca las consecuencias en un orden de importancia rescatando como primer punto la integridad del ser humano, posteriormente las implicaciones ambientales y en tercer punto las cuestiones operativas. Es vital resaltar que con el análisis AMEF se consideran todos los aspectos posibles, se usa fundamentalmente en los equipos, analiza las consecuencias en el sistema de todas las posibles fallas que pueden afectar a un componente del sistema, identifica los tipos de fallas que tienen consecuencias importantes y determina los medios de detección para cada tipo de falla (Creus, 1992), a comparación de un árbol de fallas el AMEF es más detallado.

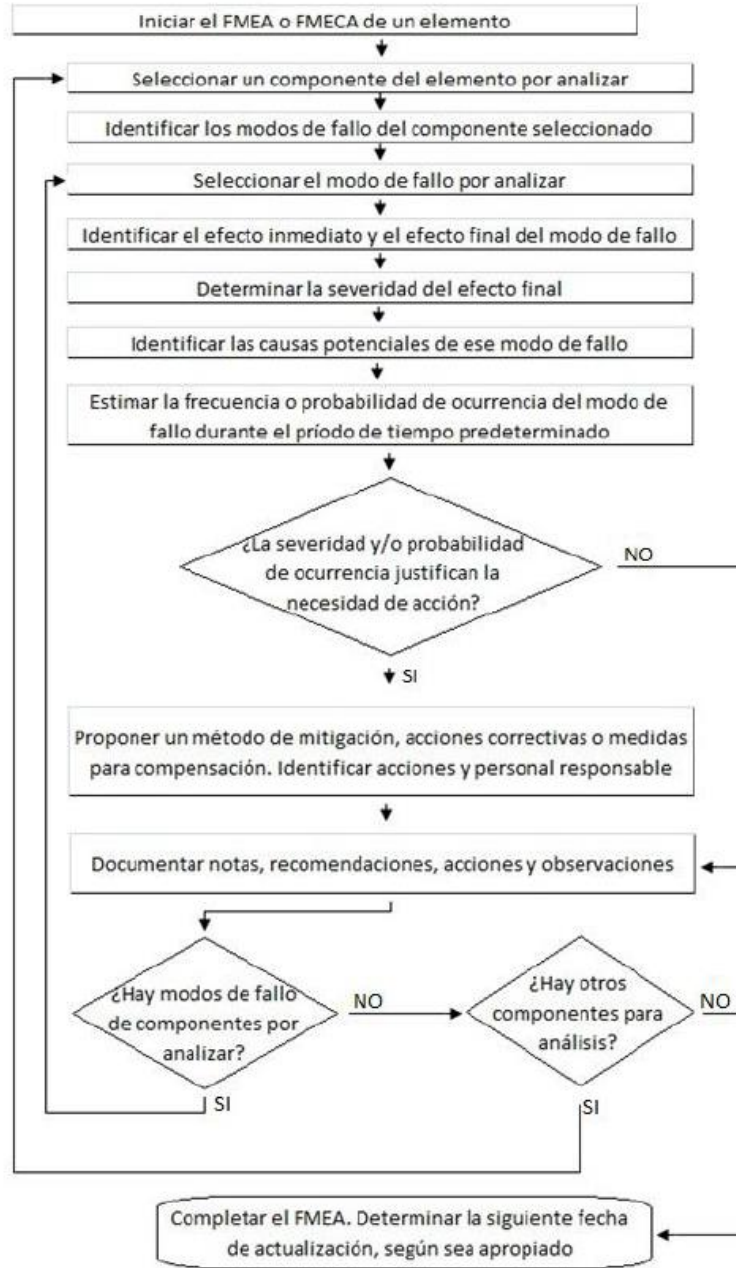
Como se mostró en la Figura 5.- Hoja general de un Análisis de Modo y Efecto de Fallas., para la realización del AMEF es necesario llenar toda la información que el formato solicita, es importante definir el tipo de AMEF, ya que puede ser de sistema, subsistema y producto. Los pasos básicos para llevar a cabo el proceso de Modo de Falla y Análisis de Efecto se enlistan a continuación:

1. Identificar las funciones del proceso de negocio en estudio / Equipo.
2. Identificar los modos de falla potencial en el proceso de negocio / Equipo.
3. Identificar los posibles efectos del fracaso del proceso de negocio / Equipo.
4. Identificar las causas de la falla del proceso de negocio / Equipo.
5. Identificar los modos de detección del proceso de negocio / Equipo.

6. Determinar la clasificación de gravedad, ocurrencia, detección y número de prioridad de riesgo del proceso de negocio / Equipo.
7. Redactar las mejoras propuestas.

A continuación, se presenta en la Figura 6 el diagrama de flujo para el análisis de un AMEF.

Figura 6.- Diagrama de Flujo para el Análisis de un AMEF / FMEA.



Fuente: (Zárate , 2012)

Los beneficios de la realización de un AMEF son los siguientes:

- Realizado antes de producción masiva de un producto puede ayudar a identificar deficiencias en el diseño.
- Identificar si una falla ocurre sola o en combinación con otros factores, identificación de efectos inaceptables o significativos e identificación de modos de falla que pueden afectar seriamente el funcionamiento.
- Determinar si es necesario implementar metodologías que reduzcan las fallas en los procesos productivos.
- Proporciona un modelo lógico para la evaluación de la probabilidad o tasa de ocurrencia de un sistema o producto.
- Ayuda a definir la estrategia y programa general de mantenimiento preventivo.
- Apoya al diseño de secuencias de aislamiento de fallas y para el desarrollo de planes alternativos de operación y reconfiguración.
- Suministrar un documento de respaldo para demostrar el cuidado que se ha brindado al proceso/producto para asegurar su cumplimiento.

En cuanto a sus deficiencias y limitaciones se puede mencionar que es un análisis difícil y tedioso para el caso de sistemas complejos que involucran múltiples funciones y conjuntos dentro de un componente, debido a la cantidad de información que se debe detallar, aunado a la necesidad de un especialista de dicho campo. Un AMEF puede ser realizado por un individuo, pero al ser revisado por otras personas, ya sean de la misma especialidad o de otro departamento de la industria, permitirá tener otras perspectivas lo que fortalecerá el análisis. Otra deficiencia que se identifica es la incapacidad del documento para brindar una medición de confiabilidad total del sistema.

Finalizado el análisis de Modo de Falla y Efecto es posible determinar el tiempo de vida y mantenimiento de los equipos, lo cual brinda la oportunidad de planear estratégicamente el reabastecimiento de componentes o los tiempos de mantenimiento para crear una tendencia de disponibilidad 100% de los equipos.

Para determinar el tiempo de vida y mantenimiento de equipos existen diversas pruebas y métodos, las más comunes para productos son las que se desarrollan a continuación.

3.4 Prueba HALT/HASS

Las pruebas HALT y HASS permiten a los desarrolladores y fabricantes identificar rápida y eficazmente las debilidades del producto, desde la preproducción como en postproducción (Quality Inspection Organization, 2015).

Los ensayos de vida altamente acelerada (HALT por sus siglas en inglés) consisten en reproducir de manera controlada y rápida las condiciones a las que un determinado elemento o producto pueda hacer frente a lo largo de su vida útil, el término fue acuñado en 1988. Pueden consistir en ciclos térmicos, mecánicos (de vibración) o de humedad, dichas condiciones pueden aplicarse por separado o simultáneamente (Thermotron Industries, 1998). El objetivo es crear un ambiente con altos niveles de estrés, que hagan visibles las fallas de diseño en tiempos reducidos, a comparación de pruebas convencionales, esta técnica suele utilizarse para encontrar los límites de operación y de falla de un producto, o durante la fase de desarrollo para su optimización, generalmente se desarrolla en el proceso de diseño, permitiendo realizar cambio antes de iniciar la fabricación industrial. En la industria aeronáutica este método es a menudo obligatorio para los productos pues sus fallas suelen tener consecuencias desastrosas.

Los ensayos de tensión altamente acelerada (HASS, por sus siglas en inglés) se utilizan para la detección de productos defectuosos en la postproducción, practicado en sitio antes de la expedición de los productos, más que reemplazar bloquean aquellos productos que están por salir a mercado. Esta prueba utiliza la tensión más alta posible intentando simular el paso del tiempo en el producto, resulta fundamental para la elaboración de esta prueba que se haya realizado una prueba HALT con anterioridad, ya que se requiere la funcionalidad íntegra del producto para aplicar los niveles de tensión para determinar el máximo (Hobbs, 2008).

En conclusión, la única forma de reducir los periodos de prueba de los productos es estresando los modos de fallas exponenciales (nombradas así por su parentesco gráfico al comportamiento de la función exponencial), lo que incluye fallas eléctricas y mecánicas, una falla ocurre cuando el estrés incurrido excede la capacidad del producto (Crowe, 2001). Los resultados de estos ensayos se entregan, por lo general, entre el tercer y quinto día, que resulta ser nada comparado con las semanas y meses que conlleva asegurar el diseño de un producto (Doertenbach, 2000). Aunado a las anteriores pruebas, existe un análisis que ha sido fundamental para aumentar la confiabilidad

de los productos, en cuanto a su ciclo de vida y los procesos productivos del mismo, el análisis RAM, también conocido en México como Análisis CMD (Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad), será la base para el desarrollo de caso de estudio de este proyecto ya que se busca encontrar el 100% de disponibilidad de los componentes.

3.5 Análisis RAM

En los últimos años el mantenimiento ha recibido múltiples aportes provenientes del campo de la teoría de la confiabilidad y el manejo de datos, particularmente, el sector de la aviación ha sido la industria que mayor aprovechamiento ha realizado fomentando las mejores prácticas dentro del mantenimiento, dichas teorías se han intentado ampliar a grandes flotas de transporte urbano sin tener éxito (Moubray, 2004), esto debido a que no pueden aplicarse a la totalidad de una planta o una organización en general debido a la falta de homogeneidad en los equipos instalados, a las diferencias entre plantas y procesos y a la carencia de organismos de regulación, que coordinen y tengan autoridad para estandarizar las prácticas de mantenimiento. Lo anteriormente mencionado no impide que el personal técnico o ingenieros puedan aplicar las bases teóricas de la confiabilidad en sus procesos.

RAM es el acrónimo de Reliability (Confiabilidad), Availability (Disponibilidad) y Maintainability (Mantenibilidad), por lo tanto, este análisis permitirá pronosticar para un periodo de tiempo la disponibilidad y el factor de servicio de un proceso de producción concreto, facilita la posibilidad de pronosticar fallas críticas permitiendo de esta manera estar preparados y tomar decisiones anticipadas que permitan la maximización del uso de equipos entre fallas y evitar paradas no planificadas (Zárate , 2012). El proceso de aplicación del análisis puede ser en la fase de diseño de un producto, en la fase de fabricación, instalación y en operación, también se puede realizar durante el mantenimiento e incluso en la finalización de la vida útil del producto, generalizando este método se puede realizar en cualquier punto de la vida del producto; algunas de las consideraciones que se deben realizar para la aplicación son las siguientes:

- No considerar los daños causados por terceras personas.
- Todas las fallas de los componentes se consideran independientes entre sí y de aparición aleatoria.
- Se considera que todos los sistemas funcionan correctamente.

- El estudio se realiza con una perspectiva conservadora.
- Se considera que todos los elementos son reparables.

Para el análisis RAM es necesario determinar las tasas de falla y reparación de los componentes o equipos que conforman el sistema (Buitrago, 2018), así como la revisión de los planes de mantenimiento planificados y no planificados, se puede considerar esta parte como una pre-etapa en la cual se realizan los siguientes pasos (García X. , 2004):

1. Recopilación de datos históricos.

Buscando la mejora continua se hacen esfuerzos para la recolección de información de campo sobre datos de falla (tipo y frecuencia) y datos de reparación de los equipos. Entre más información de calidad, mayor será el impacto en la reducción de la incertidumbre.

2. Recopilación de opinión de expertos.

Es bueno contar con un equipo o individuos que conozcan a profundidad los procesos y equipos, esto permite evitar el sesgo en la información.

3. Búsqueda y adecuación de información genérica.

Si existe la información es bueno tenerla en cuenta para complementar la información propia, evidentemente debe ser de bases de datos internacionalmente reconocidas.

4. Revisión y validación de las bases de datos.

El equipo de trabajo dirige los esfuerzos para validar la información de confiabilidad para el elemento (MTTF, Mean Time To Failure y MTTR, Mean Time To Repair), en este paso se incluyen entrevistas formales con el personal asociado al proceso (operadores, analistas, programadores, ingeniero de procesos, etc), con el fin de intercambiar y aclarar discrepancias.

5. Estimaciones.

Con toda la información proveniente de los pasos anteriores se obtienen las estimaciones representativas de las tasas de falla y reparación característica del elemento de estudio o proceso.

Las etapas deben ser realizadas gradualmente, conforme se avanza se va desarrollando un mayor conocimiento del sistema hasta llegar a la última etapa en la cual se comparan los valores obtenidos con los objetivos iniciales planteados. Si algún objetivo no se cumple, es necesario repetir el

análisis, a menos que se tome una decisión que implique reducir las exigencias especificadas al inicio. Por ejemplo, suponga que se tiene un proceso de manufactura para la fabricación de un anillo y se estableció como objetivo permitir una variación de ± 0.1 kilates de la especificación 14k, al terminar el análisis RAM los resultados se encontraban entre 13.8 y 14.2 kilates, se podría evaluar y cambiar el objetivo de permitir una variación de ± 0.2 kilates del producto final. Es claro que esta decisión es consensuada entre un grupo de especialistas y directivos implicados en la toma de decisión (García X., 2004).

Etapas 1: Plan RAM

- Se deben establecer los objetivos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.
- Definir las categorías de las fallas.

Confiabilidad básica – Tiempo Medio Entre Fallas.

Confiabilidad de servicio no vital – Tiempo Medio de Buen Funcionamiento.

Confiabilidad de servicio vital – Tiempo Medio Entre Fallas que afectan al servicio.

De acuerdo con las categorías establecidas se procede a estructurar la información como se muestra en la Tabla 5.- Tabla de confiabilidad y gravedad de fallas.

Tabla 5.- Tabla de confiabilidad y gravedad de fallas.

Fiabilidad Básica - Tiempo Medio Entre fallas. fallas que requieren una acción correctora de mantenimiento o la intervención del personal para restablecer la funcionalidad.					Gravedad de las fallas.			
Pos	Falla	Tasa de fallas	MTTR	Efectos	Catastrófico	Crítico	Marginal	Insignificante
Fiabilidad de Servicio No Vital - Tiempo Medio de Buen Funcionamiento. fallas que obligan a intervenir al personal de mantenimiento, sin afectar el servicio.					Gravedad de las fallas.			
Pos	falla	Tasa de fallas	MTTR	Efectos	Catastrófico	Crítico	Marginal	Insignificante
Fiabilidad de Servicio Vital - Tiempo Medio Entre fallas que afectan al servicio. fallas que provocan un retraso en el servicio.					Gravedad de las fallas.			
Pos	falla	Tasa de fallas	MTTR	Efectos	Catastrófico	Crítico	Marginal	Insignificante

Fuente: García (2004).

En la siguiente tabla se describen los grados de gravedad de las fallas.

Tabla 6.- Clasificación de Gravedad de Fallas.

Tipo	Grado	Descripción
I	Catastrófico	Muertes y daños materiales y medioambientales muy importantes.
II	Crítico	Lesiones graves a personas y daños materiales y medioambientales importantes.
III	Marginal	Lesiones leves a personas y daños materiales y medioambientales menores.
IV	Insignificante	Sin lesiones a personas ni daños materiales ni medioambientales.

Fuente: García (2004).

Etapa 2: Análisis preliminares (AMEF y FTA).

Para la elaboración del análisis RAM es necesario entender ampliamente el funcionamiento del elemento de estudio y del sistema, por lo que se requiere toda la información que facilite el entendimiento y en este caso se utilizará el AMEF. En esta etapa se realiza una breve descripción del Análisis de Modos de Falla y Efectos, se puede encontrar más información en el punto 3.2 del presente documento.

Un análisis AMEF siempre debe llevar la descripción y función de cada componente, los modos y causas de falla y las consecuencias de la falla, logrando dividir en efectos locales, efectos en el siguiente nivel superior y efectos finales (Díaz Povedano, 2021). Es importante también detallar el modo en el que se detectan las fallas, los dispositivos alternativos existentes, así como la probabilidad de falla y el nivel de criticidad. En ocasiones, se podrán encontrar AMEF preestablecidos, es muy común encontrarlos para la industria automotriz o aeronáutica, aunque siempre es aconsejable revisar su aplicabilidad para su uso pues cada sistema o elemento es diferente, o sus condiciones de operatividad pueden ser particulares. Otro análisis que proporciona información detallada y cuantitativa es el análisis de árbol de fallas.

Etapa 3: Mantenimiento Preventivo.

El mantenimiento preventivo mejora la confiabilidad del equipo y su gran ventaja es la programación, es ejecutado en el momento más favorable para el sistema. En esta etapa se confirma el tiempo medio de reparación (MTTR) con indicación del tiempo de recambio de componente y del número de operarios, herramienta y maquinas necesarias. Se estudia también la

calidad del servicio (QoS), que está basado en el tiempo medio entre fallas que afecten al servicio, el tiempo medio para restaurar el servicio y una disponibilidad determinada.

Se procede a comparar si se cumplen los objetivos de disponibilidad y confiabilidad establecidos en la etapa 1, sin pasar por alto las redundancias implantadas en los subsistemas y todos los criterios de seguridad adoptados.

Etapa 4: Unidades Reemplazables.

- Se enlista la probabilidad de falla de los componentes de los subsistemas que puedan reemplazarse y de su tiempo medio de reparación.

Para el cálculo del tiempo medio de reparación se debe considerar el tiempo de diagnóstico + el tiempo de recambio y ajuste + el tiempo de puesta en servicio.

- Se debe identificar el costo de los componentes desmontables que se pueden reemplazar y el número de reparaciones posibles.

Esto para un análisis económico futuro del sistema.

Etapa 5: Análisis de Riesgos.

Por lo general, los sistemas industriales son complejos ya que interaccionan de formas complicadas e imprevistas. En un sistema grande es en ocasiones irrealizable ensayar cada componente y mucho menos todas las combinaciones posibles, para ello existen las técnicas de análisis de riesgos que analizan interacciones potenciales entre partes del sistema. El análisis de operabilidad examina toda posible desviación en el funcionamiento y el comportamiento de un proceso, tiene como objetivo prevenir las consecuencias de las desviaciones en la operación, es de tipo cualitativo. Para esta etapa, el estudio de interés es el método HAZOP (Hazard and operability), cuyo objetivo es buscar las relaciones entre las causas y las consecuencias, para su elaboración se requiere la colaboración de expertos de diferentes áreas de conocimiento que aportan experiencia y logran identificar más problemas en conjunto. Este método proporciona el Nivel de Seguridad (SIL, por sus siglas en inglés) para evaluar las consecuencias potenciales de un evento.

El ciclo de vida de un equipo representa todas las fases del dispositivo, dentro de este, el SIL especifica en Nivel de Integridad de la Seguridad que define, en función del posible impacto

de una falla sobre personas y bienes y su probabilidad, el nivel de seguridad requerido del sistema, y, por lo tanto, de sus componentes.

Se concluye entonces que mientras mayor sea el Nivel de Seguridad, la probabilidad de que el sistema falla disminuye. No existen regulaciones para asignar el SIL a un elemento o proceso, es una decisión corporativa basada en la filosofía de gestión de riesgos y su tolerancia.

Etapas 6: Estudio RAM en detalle.

En las etapas anteriores se han estimado los datos y los diagramas preliminares para en esta etapa desarrollar los mismos a detalle, se enlistan las tablas en donde se reúne toda la información importante del análisis RAMS.

- Se establecen los requisitos mínimos de los componentes estudiados y asociados a los subsistemas, especificando Tiempo Medio Entre Fallas, Tasa de fallas (λ), análisis cualitativo, análisis cuantitativo obtenido de la metodología de árboles de fallas.
- Plan de seguimiento de la confiabilidad para verificar la confiabilidad del elemento durante su vida útil.
- Parámetros de Mantenibilidad.
- Disponibilidad con los tipos de fallas, su incidencia en el servicio, posibles retardos provocados en el sistema, tiempo para la detección y reparación de las fallas, medidas provisionales que se deben adoptar para disminuir la degradación de la operatividad.

Etapas 7: Evaluación de valores finales de RAM y contraste con objetivos planteados.

Los objetivos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad se comparan con los resultados obtenidos en las etapas anteriores. Para finalizar se establecen los valores finales de RAM. El análisis RAM sirve como simulador de “what if...” y permite inferir el impacto de cambios en los planes de mantenimiento, implementación de nuevas técnicas, modificaciones en los procesos de mantenimiento, cambios en la política de inventarios, en la disponibilidad y la producción del sistema.

Los principales resultados y documentación que surgen de un análisis RAM son:

- Pronóstico de disponibilidad de un determinado elemento o sistema en un periodo de tiempo.

- Pronóstico de confiabilidad de un determinado elemento o sistema en un periodo de tiempo.
- Tiempo medio de reparación de los componentes más significativos.
- Lista de verificación de comprobación para el cumplimiento de los objetivos establecidos.
- Base de datos con información técnica, operacional y de confiabilidad del sistema o elemento.

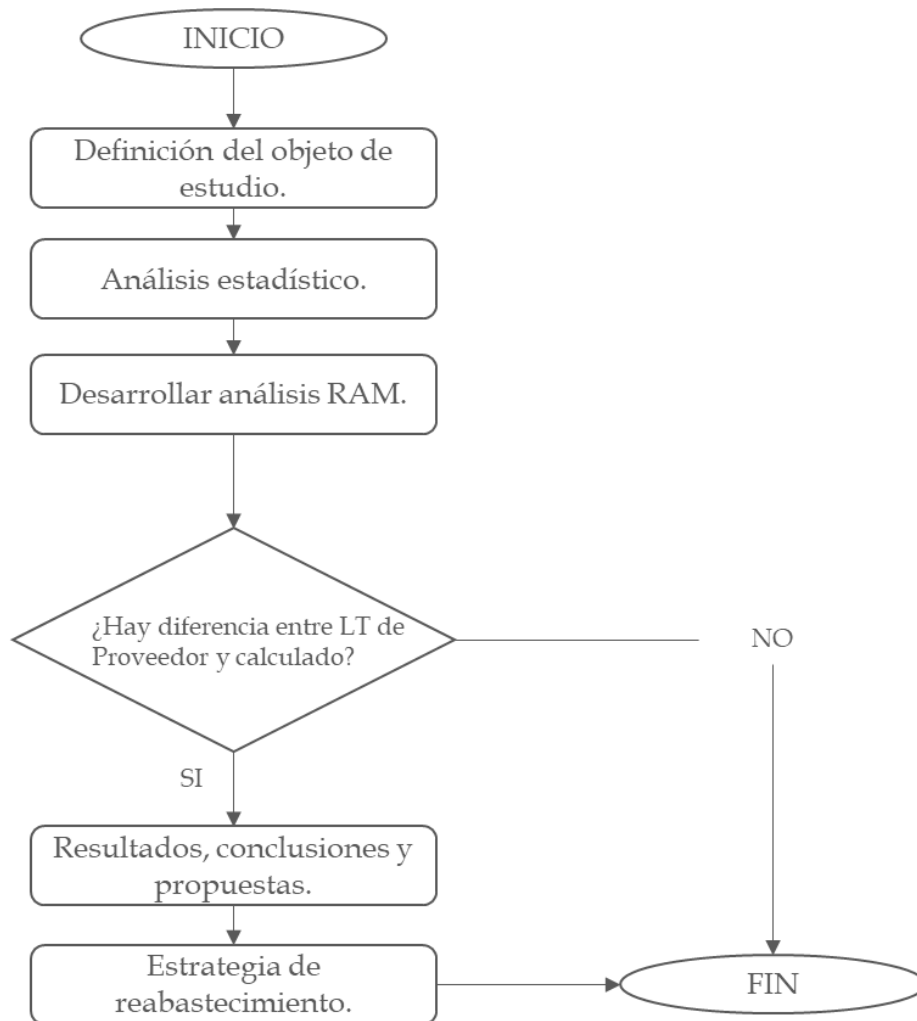
La confiabilidad de un análisis RAM dependerá especialmente de la asignación de las tasas de falla y reparación de los componentes o equipos que conforman el sistema, por lo cual se debe recalcar el detalle en la recopilación de los datos. Vale la pena relacionar los resultados obtenidos con un análisis económico, para sustentar las acciones de mitigación y mejora. Al ser un análisis cualitativo y cuantitativo en su conjunto, se deben implementar las premisas de mejora continua, así que es común ir actualizando y mejorando las conclusiones del análisis base.

Capítulo 4.- Metodología.

La presente investigación es de tipo mixta, pues se estudian características cuantitativas y cualitativas del componente de estudio. Es una investigación exploratoria pues busca generar un escenario en el que se obtenga un sistema de reabastecimiento con disponibilidad al 100% de un componente crítico para las operaciones de la compañía. A diferencia del proceso actual, con la propuesta se busca promover una planeación de los suministros eficaz y eficiente para cubrir los requerimientos de transportación de los clientes.

La metodología para cumplir el desarrollo del caso de estudio se muestra en la Figura 7.- Diagrama de la Metodología.

Figura 7.- Diagrama de la Metodología.



Fuente: Elaboración propia.

Definición del objeto de estudio.

El objeto de estudio para este trabajo se centra en las aeronaves de una empresa privada que se dedica al transporte aéreo de personal desde el continente a las plataformas ubicadas en la sonda de campeche, su base de operaciones se encuentra en el helipuerto de Ciudad del Carmen, Campeche, en donde se ubica también el hangar y el taller en donde se realizan los mantenimientos y servicios correspondientes a las aeronaves. El objeto de estudio será seleccionado con base en el costo del componente y su criticidad para la operación de acuerdo con la literatura revisada, también se tomarán en cuenta los factores de tiempo de reabastecimiento y tiempo de instalación.

Análisis estadístico.

Con el objeto de estudio seleccionado se procederá a desarrollar el análisis estadístico basado en los datos que se encuentran en las bitácoras de mantenimiento de las aeronaves. Será crucial determinar las principales fallas del componente y jerarquizarlas para profundizar en las más relevantes. Los datos no se han analizado estadísticamente.

Determinar principales fallas (Análisis ABC).

La determinación de las principales fallas será efectuada a través de la metodología de análisis ABC, se utilizará la información registrada en los últimos 5 años de operación.

Modelo de comportamiento probabilístico.

Se analizarán las horas de vuelo del componente antes de la falla para obtener el modelo de comportamiento probabilístico el cual servirá para desarrollar los cálculos.

- Vida Media Real
- Tiempo Medio entre Fallas
- Tiempo Medio de Reparación

Para determinar el comportamiento de los datos se realizará una prueba de bondad de ajuste a los datos.

Desarrollo de Análisis RAM.

Se desarrollará un análisis RAM con la base teórica del capítulo 3.

Tiempo de vida medio del proveedor vs real.

Se realizará un análisis y comparación del tiempo de vida medio que proporciona el proveedor con el tiempo de vida medio real que está presentando el componente en las condiciones que operan las aeronaves, y la relación que existe entre el desgaste del componente y las condiciones de la zona.

Resultados, conclusiones y propuestas.

Se presentan los resultados obtenidos y desarrollan las conclusiones de los análisis realizados, con dicha información se realiza una evaluación financiera para cuantificar el impacto económico para la empresa por la falta del componente.

Estrategia de Reabastecimiento.

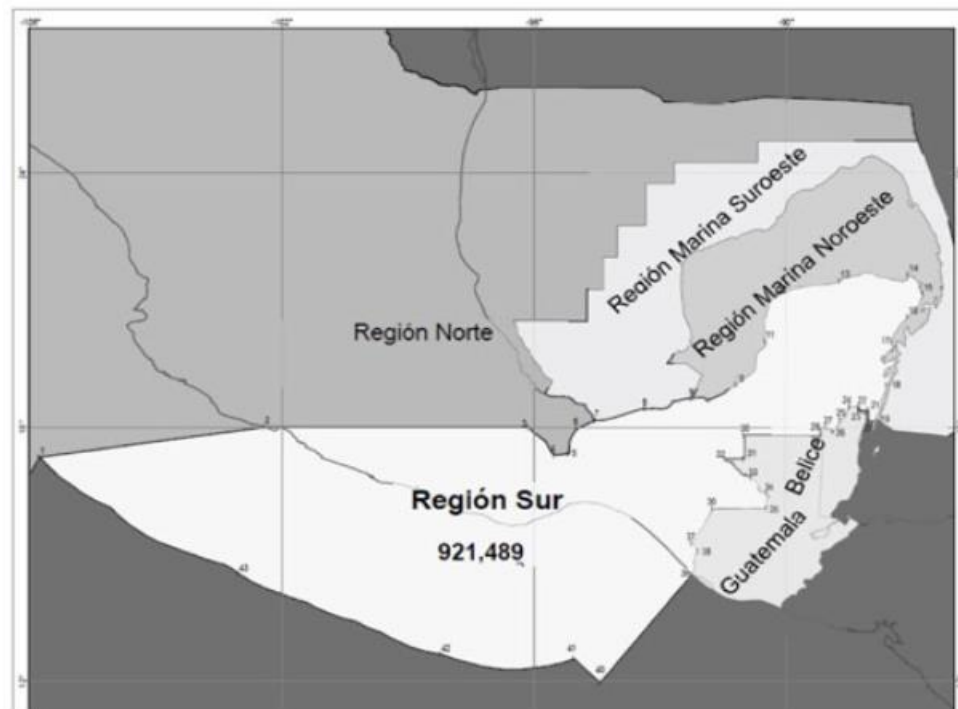
Se propone una estrategia de reabastecimiento para cumplir con la disponibilidad del componente y los beneficios económicos de la propuesta. Esta propuesta de reabastecimiento se elaborará bajo las proyecciones de la probabilidad de falla del componente.

Capítulo 5.- Caso de Estudio

5.1 Descripción de la empresa y caso de estudio.

Para el año 2019, la fuerza laboral de PEMEX era de 122,646 personas (PEMEX, 2020), de las cuales el 72% lleva a cabo sus actividades en la sonda, para llegar a las plataformas petroleras se tienen 2 vías, la vía marítima se realiza por medio de barcos tipo Ferry, la vía aérea se realiza por medio de helicópteros; para esto, PEMEX Exploración y Producción tiene contrato con una compañía del sector privado que le proporciona el servicio de taxi-aéreo, la cual pone a su disposición 9 aeronaves de ala rotativa con una capacidad máxima de 12 pasajeros.

Figura 8.- Sonda de Campeche.

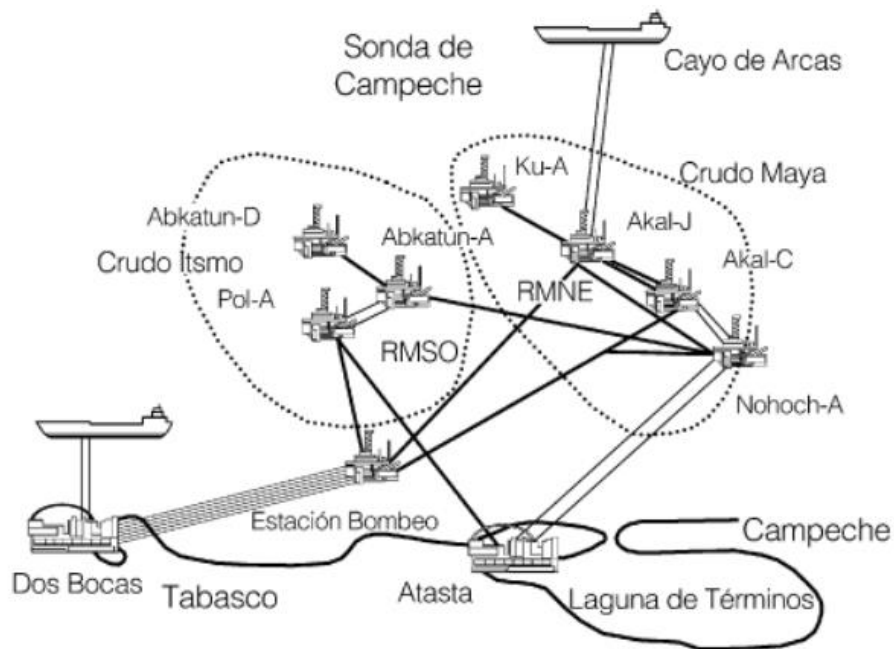


Fuente: Poder Ejecutivo de Petróleos Mexicanos (2013).

El caso de estudio fue seleccionado de una empresa cuyo inicio de operaciones se dio en el 1977, cumpliendo con 45 años de experiencia operando en la zona. Al ser prestador de servicios directo de PEMEX, es la compañía con el mayor número de operaciones costa fuera del país y una de las principales en el continente.

Como cualquier otro medio de transporte, los helicópteros son diseñados para operar en condiciones normales, como se puede observar en la Figura 9.- Esquema de las instalaciones costa afuera: Sonda de Campeche., las instalaciones petroleras se encuentran costa afuera delimitada aproximadamente por las siguientes coordenadas N 20° 10', W 92° 40', N 18° 55' y W 91° 55' y los traslados son a través del océano, volar sobre el este es considerado por el fabricante como una condición anormal, debido a las altas concentraciones de salitre en el ambiente, lo cual, trae como consecuencia un desgaste mayor en los componentes de las aeronaves.

Figura 9.- Esquema de las instalaciones costa afuera: Sonda de Campeche.



Fuente: PEMEX (2002^a).

Como consecuencia de este desgaste por las condiciones anormales de vuelo, las aeronaves quedan fuera de servicio más tiempo del normal por la falta de los componentes dañados no esperados al realizar los servicios de mantenimiento programado.

Se aplicará el presente estudio al componente Pala de Rotor Principal (MRB, por sus siglas en inglés Main Rotor Blade) identificado con un número de parte (PN), que forma parte de un conjunto de componentes que de acuerdo con el manual del fabricante es identificado con el nombre de Main Rotor Hub, este subsistema de la aeronave se conforma con el Hub en donde se instalan las 4 palas con 8 tornillos expandibles en los Pitch Horns (Ver Figura 10.-Estructura de MRH.), además del componente de estudio.

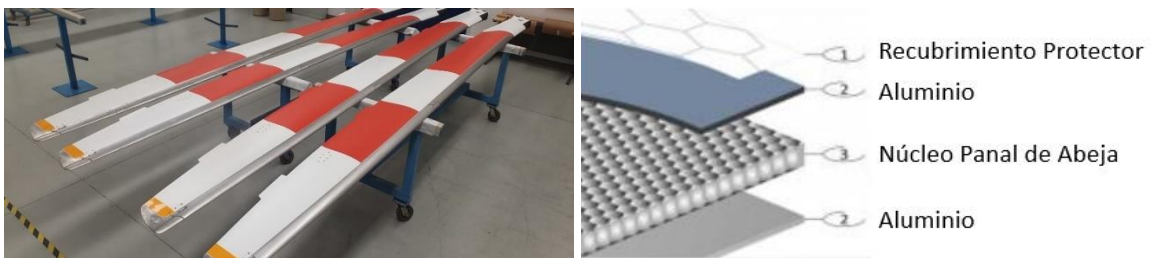
Figura 10.-Estructura de MRH.



Fuente: Elaboración Propia.

Las palas de rotor principal están construidas en su interior por una estructura llamada núcleo de panel desarrollada en el año 1940, a través de los años ha sido fabricado de diferentes materiales que van desde el oro hasta la cera, actualmente el fabricante de los manufactura con fibra de vidrio, y llevan este nombre por la geometría de su estructura similar a un panel, permite minimizar la cantidad de material para alcanzar el peso, la densidad suficiente y optimizar el costo de manufactura.

Figura 11.- Main Rotor Blade y su estructura interior.



Fuente: Elaboración Propia.

El núcleo es recubierto por aleación de aluminio, en el grado aeroespacial la lámina más utilizada es la aleación 2024 gracias a su resistencia a las altas temperaturas (216°C) y corrosión, a su vez, la lámina es recubierta con pieles de fibra de vidrio.

De acuerdo con el manual del fabricante estas aeronaves deben recibir mantenimientos programados cada 25, 100, 300, 600, 2500, 3000, 5000 y 6000 horas de vuelo, para este caso en particular la compañía se encarga de brindar el servicio de mantenimiento, reparación y overhaul (MRO) a sus aeronaves que son todas las acciones que tienen el objetivo de retener o restaurar un artículo en un estado en el que pueda realizar su función requerida. Las acciones pueden incluir la combinación de técnicas y cuestiones administrativas, así como la implicación de técnicos, ingenieros, niveles de supervisión y gerenciales, particularmente el overhaul se podría definir como la restauración total de una pieza, cabe mencionar que no se considera una pieza nueva, pero se establece que su ciclo de vida reinicia desde las 0 horas de vuelo; la compañía está autorizada por el fabricante para llevar a cabo estas actividades. Los helicópteros vuelan un promedio de 35 horas a la semana, para cubrir las necesidades del cliente y cada hora de vuelo está valuada en \$5,000.00 USD.

La empresa fabricante de la aeronave detalla perfectamente los procedimientos para efectuar los servicios de mantenimiento mediante un manual, el cual menciona los pasos a seguir, las herramientas necesarias y los componentes, refacciones y consumibles que se requieren para completar los servicios. El manual está diseñado para los desgastes de las aeronaves en condiciones normales, determinando tiempos de vida estimados para los componentes (Véase punto 1.3.2.- Componentes críticos) sin embargo, en condiciones de altas concentraciones de salitre en el ambiente como las que se tienen en la sonda de campeche se ha encontrado que el desgaste es más rápido pues al recibir las aeronaves en el taller y realizar las inspecciones de rutina se encuentran daños no esperados o componentes corroídos que deben ser reemplazados, las cuales reciben el nombre de “Discrepancias” en el manual del fabricante, entendiéndose como partes extras dañadas. Estas discrepancias impactan directamente en el tiempo que una aeronave se encuentra fuera de servicio (F/S), ya que no se cuenta con sus reemplazos en el almacén.

5.3 Recolección de datos.

En la industria aeronáutica cada componente cuenta con un récord histórico (Figura 12.- Ejemplo de récord Histórico de Componente.), en el cual se colocan las fechas de instalación, de remoción y los motivos por los cuales ha sido removido.

Figura 12.- Ejemplo de récord Histórico de Componente.

Component Name **BLADE MR (FS-HR)**

Part Number _____

Serial Number _____

Page 1 of 1

HISTORICAL SERVICE RECORD

NOTICE: WHEN RETURNING ANY LIMITED LIFE COMPONENT TO BHTC/BHTI FOR ANY REASON IT IS MANDATORY THAT A VALID HISTORICAL SERVICE RECORD ACCOMPANY THE COMPONENT.

INSTALLATION DATA							REMOVAL DATA						
Date	Installed on Aircraft Serial No.	By (Activity)	Installed At	Component Hours / RIN			Next Scheduled <input type="checkbox"/> Insp <input type="checkbox"/> O/H <input type="checkbox"/> RET	Date	Removed At	Component Hours / RIN			Reason For Removal
				Since New	Since O/H					Since New	Since O/H		
				A/C Hours	Comp. Hrs	Comp. Hrs				A/C Hours	Comp. Hrs	Comp. Hrs	
				RIN	RIN	RIN	RIN			RIN	RIN	RIN	
				0.0	NEW								
				0.0	NEW								
History of Inspection, Overhaul, Repair and Application of Technical Bulletin, Service Bulletin, Airworthiness Directives, Etc.													
Component Total Time / RIN		Description of Work Accomplished						Complied With By - Signature affirms work performed IAW FAR Part 43					
								Signature	Cert. No.	Date			

Fuente: Fabricante (2013).

Los datos recolectados se van a organizar en una hoja de registro que llevará los datos que se muestran a continuación:

Tabla 7.- Hoja de Registro.

Hoja de Registro para Análisis Estadístico								
Item	Fabricante	Componente	PN	SN	Matricula A/C	Tiempo Total	Horas de Vuelo	Motivo de Remoción
		Main Rotor Blade				3675	2350	Corrosión/Fisura
		Main Rotor Blade				15081	1386	Corrosión/Fisura
		Main Rotor Blade				8647	1036	Corrosión/Fisura

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos que se van a recolectar son el número de serie del componente, la matrícula de la aeronave en la que estaba operando el componente antes de su remoción, el tiempo total del componente desde su fabricación, las horas de vuelo que estuvo operando el componente hasta el momento de su remoción y el motivo de la remoción. La información más significativa para el estudio será la de las columnas **horas de vuelo** y **motivo de remoción**.

Es importante llevar en el registro las horas de vuelo totales de los componentes desde su fabricación y las matrículas de las aeronaves en las que operan, ya que pasan por diferentes compañías y las condiciones de vuelo son distintas. Por ejemplo, la siguiente pala de rotor principal con número de serie A3354:

Figura 13.- Ejemplo HSR de MRB.

NOMENCLATURE: **M/R BLADE HIGH VISIBILITY**

NO. PIÉCE/PART NUMBER: [REDACTED]

NO. SÉRIE/SERIAL NUMBER: [REDACTED]

PAGE: 4 DE/OF 4

AVERTISSEMENT: QUAND UNE COMPOSANTE AVEC UNE LIMITE DE VIE EST RETOURNÉE À BHTC (BHTI PEU IMPORTER LA RAISON IL EST OBLIGATOIRE QUE LA COMPOSANTE SOIT ACCOMPAGNÉE PAR UN DOCUMENT HISTORIQUE DE SERVICE QUI EST VALIDE.

NOTICE: WHEN RETURNING ANY LIMITED LIFE COMPONENT TO BHTC(BHTI) FOR ANY REASON, IT IS MANDATORY THAT A VALID HISTORICAL SERVICE RECORD ACCOMPANY THE COMPONENT.

DOCUMENT HISTORIQUE DE SERVICE - HISTORICAL SERVICE RECORD

DONNÉ DE POSE - INSTALLATION DATA					SCH POUR/FOR	DONNÉE DE DÉPOSE - REMOVAL DATA					
DATE	POSÉ SUR AÉRONEF NO. INSTALLED ON A/C NO.	PAR (ACTIVITÉ) BY (ACTIVITY)	INSTALLÉ A INSTALLED AT	HRS/RIN DE LA COMPOSANTE COMPONENT HOURS/RIN		[X] INSP. 2500 HRS À / AT HRS AÉRONEF A/C HRS A/C RIN AÉRONEF/ DATE	DATE	DEPOSÉ A REMOVED AT	HRS/RIN DE LA COMPOSANTE COMPONENT HOURS/RIN		RAISON DE LA DÉPOSE REASON FOR REMOVAL
			HRS D'AÉRONEF A/C HOURS A/C RIN AÉRONEF	HRS COMP. HRS RIN	DEPUIS NEUF SINCE NEW			DEPUIS INS. SINCE IN.	HRS D'AÉRONEF A/C HOURS A/C RIN AÉRONEF	HRS COMP. HRS RIN	
21 Feb 2015	[REDACTED]	AJESA	9218-05	11,692:34	710:35	On Cond	3 Nov 2015	9315-00	11,162:29	1107:30	REMOVED OPERAND
DEC 28 2020	[REDACTED]	AJESA HES AFRC HES	7108-36	12,189:29	1207:30	On Cond	Mar 21 2021	3360:36	12441:29	1,959:30	TO REPAIR A FISSURE WAS FOUND

Se puede observar que estuvo volando para una compañía en una matrícula de aeronave cuyas operaciones se realizaban en la ciudad de México para inspección de instalaciones de un cliente dedicado a la industria eléctrica por 11,000 horas sin presentar daño alguno, sin embargo, cuando vuela en otra matrícula de aeronave cuyas operaciones son en la sonda de campeche la fisura se presenta a las 1,459 horas de vuelo.

Figura 14.- Helicóptero.



Fuente: Propia

Debido a estos detalles la recolección de datos se hará de manera individual revisando el Récord Histórico de cada una de las palas de rotor principal que han operado en la zona geográfica de estudio y se tomarán únicamente los datos de interés.

En la industria aeroespacial, absolutamente todos los componentes que forman parte de la aeronave son críticos, por lo que se selecciona un componente para realizar el análisis con base en los siguientes criterios:

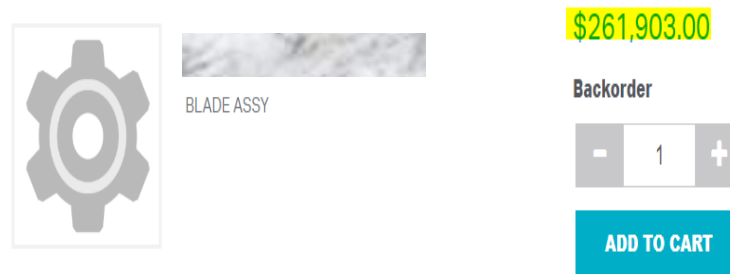
- Principal causa por la que las aeronaves quedan fuera de servicio.

De acuerdo con los datos recabados es el principal motivo por el cual los helicópteros quedan fuera de servicio, cuando una aeronave se ve afectada por otro componente, por ejemplo, el Rotor Blade Bolt, existe la posibilidad de tener un stock o de conseguirlo rápidamente con el proveedor o un broker.

- El precio del componente.

La pala de rotor principal es uno de los componentes más caros de la aeronave, el precio de una pieza nueva ronda los \$261,903.00 USD. La primera opción es reparar la pala con los hallazgos, la segunda opción es realizar un intercambio con el proveedor y la última opción es adquirir una nueva. Debido a su alto costo es complicado contar con disponibilidad en el almacén.

Figura 15.- Precio del Componente Nuevo con el Fabricante.

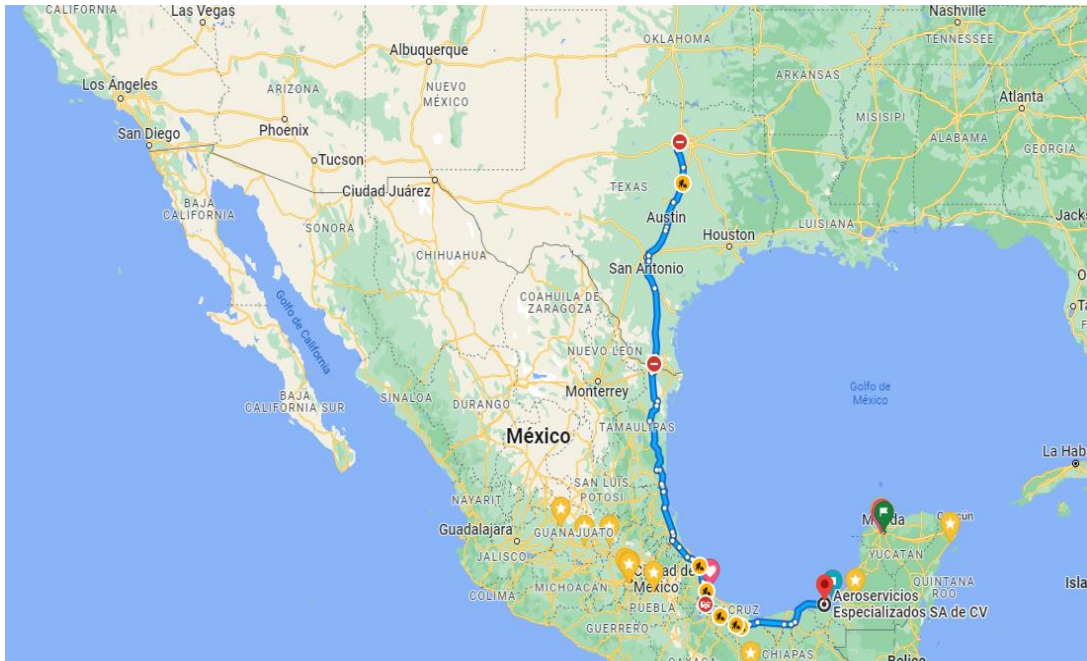


Fuente: Fabricante (2023)

- Implicaciones logísticas para disponer del componente.

Debido a las dimensiones del componente y el proceso de importación al país, el adquirirlo o intercambiarlo conlleva un tiempo de traslado de al menos 72 horas en condiciones ideales para tenerlo disponible en almacén. Por lo cual, si una aeronave vuela en promedio 5 horas diarias, durante la espera de los componentes se dejaría de volar 15 horas, lo que en términos monetarios significaría dejar de ganar \$60,000.00 USD por los 3 días de la aeronave fuera de servicio.

Figura 16.- Recorrido Terrestre del Traslado del Componente.

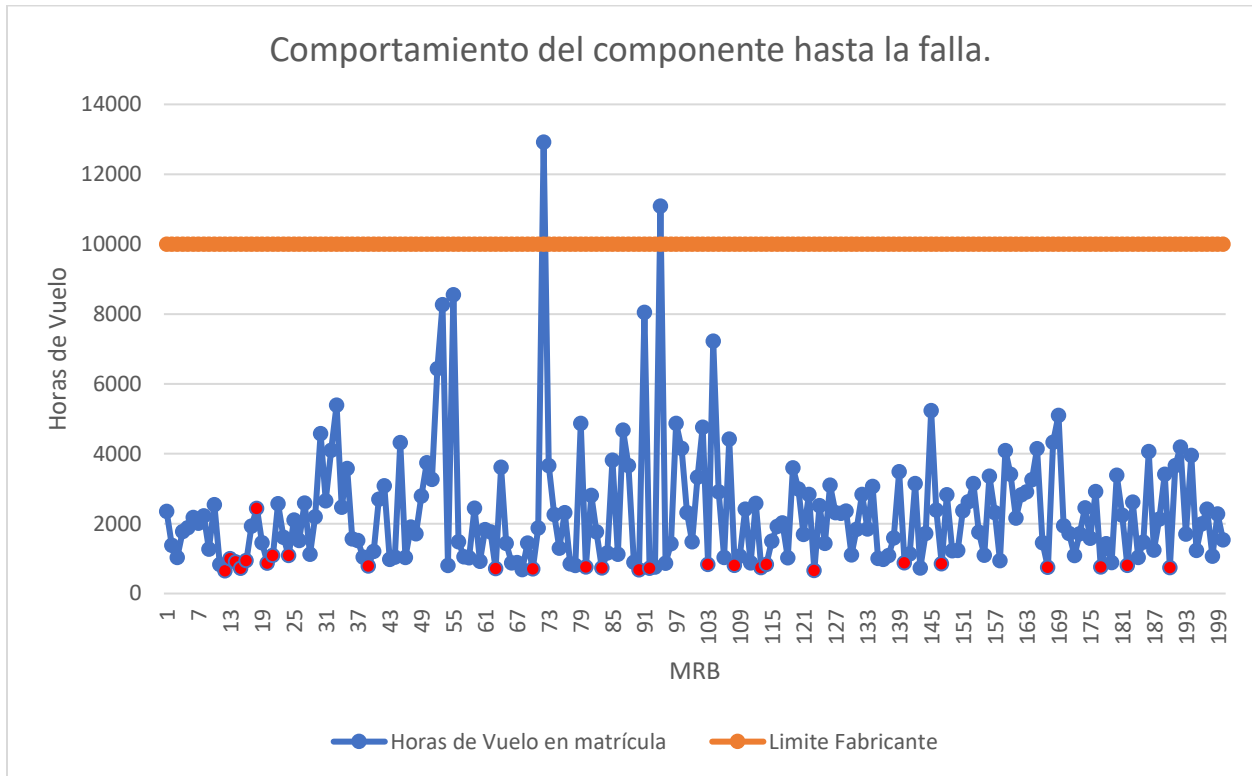


Fuente: Elaboración propia en Google Maps.

5.4 Datos obtenidos: Variables de análisis y estructura de datos.

Los datos recabados para el presente estudio se encuentran en el Anexo 2.- Hoja de Registro de Datos, en la siguiente gráfica se puede apreciar el comportamiento de los datos. Se han recabado los datos de 200 palas de rotor principal.

Gráfica 1.- Comportamiento del Componente hasta la Falla.



Fuente: Elaboración Propia.

Se ha encontrado que las principales causas por las cuales las palas de rotor principal quedan fuera de servicio son la corrosión (puntos azules) y la delaminación (puntos rojos). Aplicando la metodología ABC para su clasificación se concluye que la corrosión es el factor con mayor porcentaje:

Tabla 8.- Porcentaje de Fallas.

Porcentaje de Fallas		
Corrosión	174	87%
Delaminación	26	13%

Fuente: Elaboración Propia.

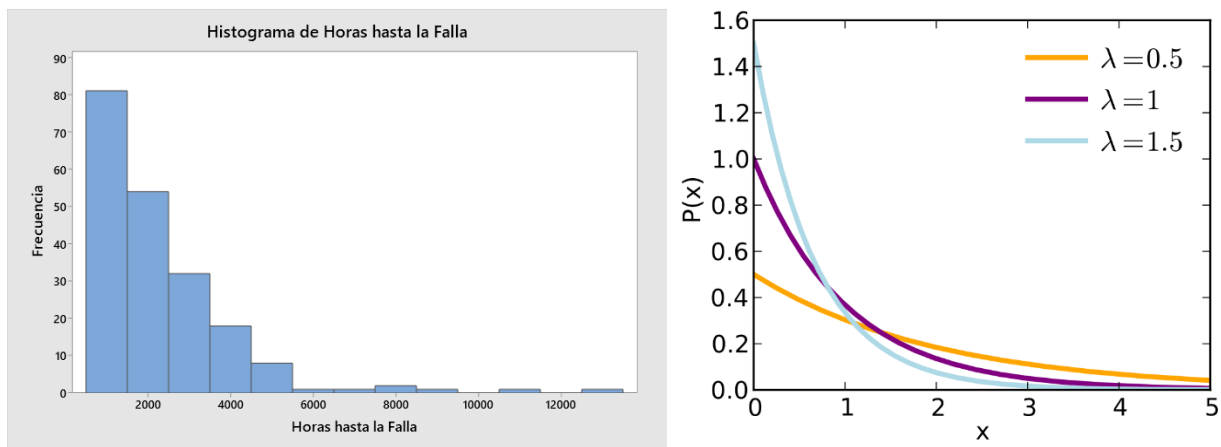
Se puede observar en la gráfica que las delaminaciones, además de ser en menor medida, ocurren en su totalidad antes de las 1000 horas de vuelo. Se infiere entonces que una vez que las palas de rotor principal han superado la barrera de las 1000 horas de vuelo sin sufrir delaminación es altamente probable que ya no presenten esta falla.

5.5 Análisis Estadístico.

Para determinar que distribución estadística es la ideal para los datos recabados, se realiza la prueba de bondad de ajuste utilizando el software Minitab.

En la Gráfica 2.- Histograma de Horas hasta la Falla y Distribución Exponencial. se observan las horas de vuelo hasta la falla y del lado derecho algunos ejemplos de curvas de la distribución exponencial para apreciar la similitud de los comportamientos.

Gráfica 2.- Histograma de Horas hasta la Falla y Distribución Exponencial.



Fuente: Elaboración Propia.

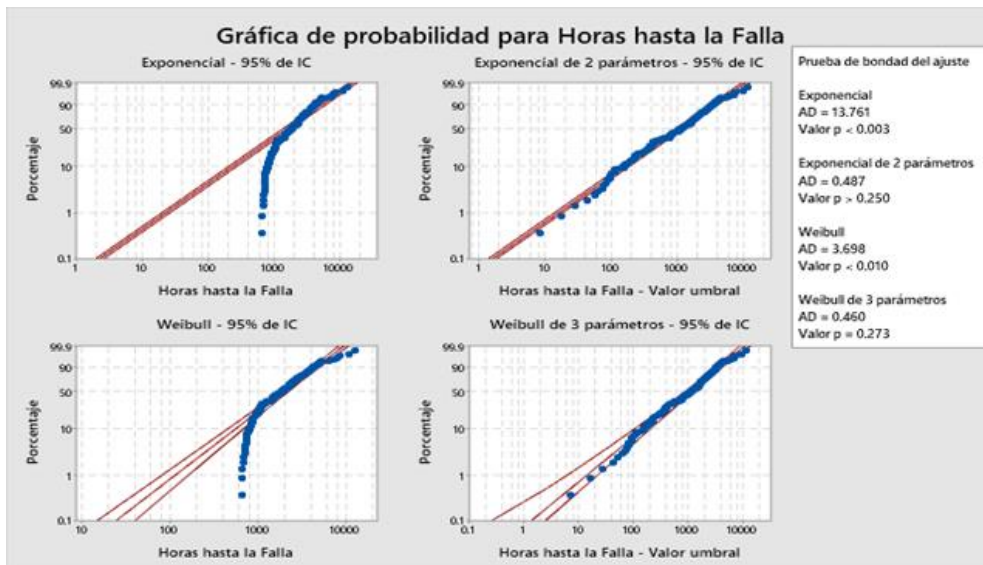
Los resultados obtenidos para la prueba de bondad de ajuste muestran que la distribución que mejor se ajusta a los datos es la exponencial de dos parámetros con un valor P superior a 0.25 (Tabla 9.- Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste en Minitab).

Tabla 9.- Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste en Minitab

Distribución	AD	P LRT P
Normal	9.864	<0.005
Transformación Box-Cox	1.601	<0.005
Lognormal	1.434	<0.005
Lognormal de 3 parámetros	1.685	* 0.000
Exponencial	13.761	<0.003
Exponencial de 2 parámetros	0.487	>0.250 0.000
Weibull	3.698	<0.010
Weibull de 3 parámetros	0.460	0.273 0.000
Valor extremo más pequeño	25.867	<0.010
Valor extremo por máximos	3.305	<0.010
Gamma	2.498	<0.005
Gamma de 3 parámetros	0.464	* 0.000
Logística	5.285	<0.005
Loglogística	1.769	<0.005
Loglogística de 3 parámetros	2.141	* 0.000

En la Tabla 9.- Resultados de la Prueba de Bondad de Ajuste en Minitab se aprecian los valores de P para las distintas distribuciones estadísticas con las que el software ha realizado la prueba, el valor P de la distribución Weibull de 3 parámetros es de 0.273, si bien es un valor mayor que el de la distribución exponencial de 2 parámetros es importante tomar en cuenta que los datos con los que se están trabajando son tiempos hasta la falla de un componente y de acuerdo con la literatura la distribución que comúnmente se ajusta a estos datos es la exponencial, por lo que se utilizará dicha distribución. A continuación, se muestra la Gráfica 3.- Prueba de bondad de ajuste. en donde se aprecia el ajuste de los datos a las distintas distribuciones con el software Minitab.

Gráfica 3.- Prueba de bondad de ajuste.

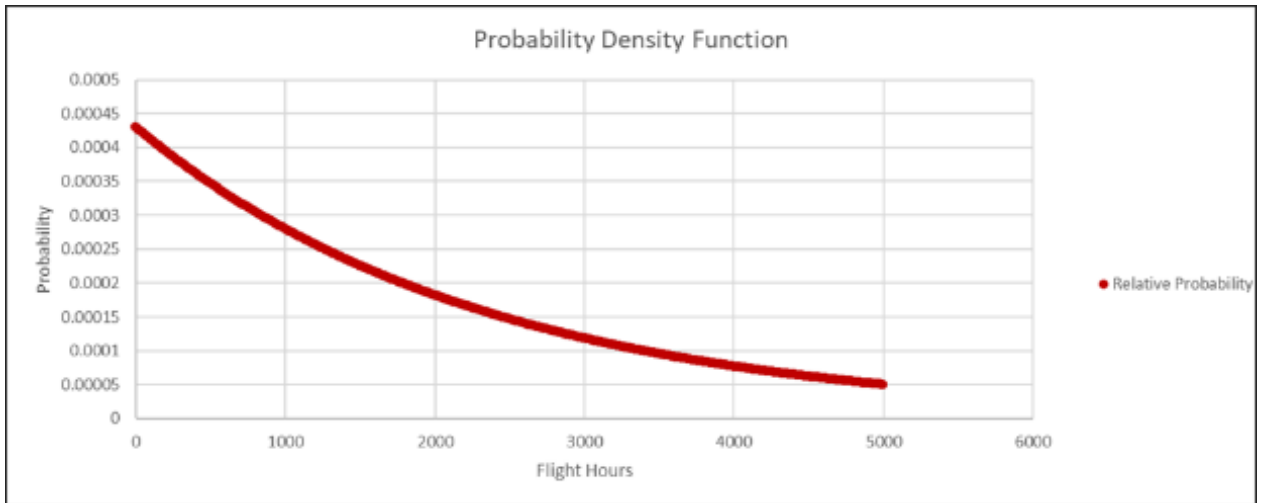


Se procede con el cálculo de la función de densidad de las palas de rotor principal que está dada por la ecuación (19), para posteriormente graficarla a través del tiempo:

$$f_x(x) = 0.00043e^{-0.00043x}, \quad x \geq 0 \quad (19)$$

En la Gráfica 4.- Función de Densidad. se puede observar la función de densidad que, de igual manera, se asemeja a la gráfica exponencial.

Gráfica 4.- Función de Densidad.

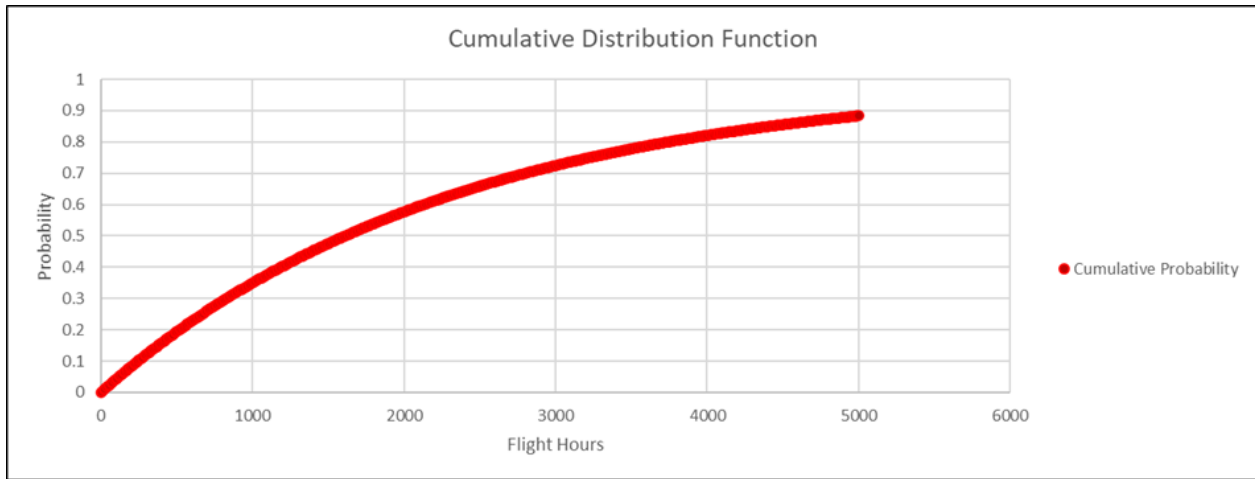


La ecuación (19) describe la probabilidad relativa, que en este caso de estudio el valor de x será el que cambiará pues representa el tiempo (horas de vuelo). Esta información es importante porque nos permite ver como la probabilidad de falla va disminuyendo por cada hora de vuelo, pero la que realmente nos proporciona la mejor información para la toma de decisiones es la función de distribución acumulada (ecuación (20)), ya que nos indica el comportamiento de las fallas en función del tiempo, con base en la probabilidad de falla.

$$F_x(x) = 1 - e^{-0.00043x}, \quad x \geq 0 \quad (20)$$

La cual indica que la probabilidad de falla incrementa conforme aumentan las horas de vuelo del componente, y se aproxima a un momento de falla segura en términos probabilísticos, es decir, la tasa de fallas.

Gráfica 5.- Función de Distribución Acumulada.



Dicha tasa de fallas está dada por $\lambda=1/\text{TMAF}$ (Tiempo Medio Antes de la Falla), y el tiempo de operación en óptimas condiciones es igual al recíproco de la tasa de fallas $\text{MTAF}=1/\lambda$.

$$\lambda = \frac{1}{2288} = 0.00043 \quad (21)$$

Con las tres ecuaciones mencionadas es posible conocer todo el comportamiento de la vida útil del componente, al tener la distribución de probabilidad se pueden tomar decisiones con base matemática. Teniendo la probabilidad de falla en función de las horas de vuelo es posible determinar cuándo iniciar el proceso de reposición del componente teniendo en cuenta las implicaciones logísticas y financieras.

El fabricante estipula en sus manuales de mantenimiento para este componente que las revisiones se realizan cada 2,500 horas y el tiempo de vida estimado es de 10,000 horas. Sin embargo, el análisis estadístico muestra que las palas de rotor principal que operan en la zona costera de la Sonda de Campeche no están cumpliendo con este tiempo de vida y siendo este menor ya que, la media de tiempo de vida útil es aproximadamente de 2288 horas de vuelo, lo que significa que están rindiendo 77.12% menos del tiempo de vida esperado.

5.6 Análisis Cualitativo con base en RAM.

La industria aeronáutica ha sido la mejor explotada en la aplicación de los análisis RAM, esto gracias a la homogeneidad de los equipos que se instalan en las aeronaves, al no existir una gran variedad de modelos, como en el caso de los automóviles, es bastante práctico y discreto la posibilidad de pronosticar los periodos de tiempo y de disponibilidad de los equipos o reemplazos. Una de las grandes ventajas de este análisis es que puede ser utilizado en cualquier fase, en la práctica se obtiene información relevante desde la fase de fabricación del producto, para el caso particular de este caso de investigación es relevante para efectuar un análisis cualitativo durante la vida útil del producto, el cual se muestra en la Tabla 10.- Tabla de Confiabilidad y Gravedad de Fallas.

Como se mencionó en capítulos anteriores, en la industria aeronáutica todos los componentes que conforman la aeronave son críticos, desde el remache más pequeño hasta las palas de rotor principal que se están estudiando, después de los análisis estadísticos se ha concluido que las principales fallas encontradas en las palas son la corrosión y la delaminación.

Tabla 10.- Tabla de Confiabilidad y Gravedad de Fallas.

Fiabilidad de Servicio Vital - Tiempo Medio Entre Fallos que afecten al servicio. Fallos que provocan un retraso en el servicio.					Gravedad de los Fallos.			
Pos	Fallo	Tasa de Fallos	MTTR	Efectos	Catastrófico	Crítico	Marginal	Insignificante
1	Corrosión Inoperante	0.000439675	NA	Rompimiento de la Pala de Rotor Principal y desplome de la aeronave.	x			
3	Delaminación	0.001162332	0.167	Perdidas aerodinámicas en el Rotor Principal.				x
Tipo	Grado	Descripción						
I	Catastrófico	Muertes y daños materiales y medioambientales muy importantes.						
II	Crítico	Lesiones graves a personas y daños materiales y medioambientales importantes.						
III	Marginal	Lesiones leves a personas y daños materiales y medioambientales menores.						
IV	Insignificante	Sin lesiones a personas ni daños materiales ni medioambientales.						

De acuerdo con el análisis cualitativo realizado en términos de gravedad con base en las plantillas del análisis RAM y en conjunto con el equipo de expertos, la gravedad de las fallas por delaminación resultan insignificantes ya que son detectadas a tiempo y las reparaciones pueden ser efectuadas en el taller, se encuentra en el análisis estadístico que las delaminaciones ocurren por debajo de las mil horas de vuelo, por lo que se atribuye como un error de diseño reparable y

corregible en sitio. Por otro lado, y con consecuencias mayores encontramos afectada la confiabilidad de las palas de rotor principal por el factor corrosión. Se ha calculado la tasa media de fallas y a diferencia de la delaminación este caso no es reparable en sitio por lo cual no cuenta con un MTTR, además de que el nivel de gravedad de la falla resulta catastrófico pues podría significar el rompimiento de una pala de rotor principal.

De acuerdo con las etapas del análisis RAMs, para este punto se han efectuado: la recopilación de datos históricos, la recopilación de opinión de expertos, búsqueda y adecuación de la información genérica, la revisión y validación de las bases de datos y por último las estimaciones. Finalizado el análisis estadístico y el cualitativo es posible pasar a la elaboración de la estrategia de reabastecimiento.

5.7 Estrategia de reabastecimiento.

Con la información recabada y analizada en la etapa anterior es posible elaborar la estrategia de reabastecimiento, para ello se requiere de inicio la planeación de la demanda, en este caso de estudio las aeronaves tienen una demanda de vuelos determinística y variable. Gracias a que se conocen las necesidades de operación del cliente las proyecciones son precisas lo que facilita en gran medida el manejo de información.

5.7.1 Planeación de la Demanda de Vuelos.

Como se mencionó en el punto 5.1 la empresa cuenta con 9 aeronaves para brindar el servicio y la planeación de horas de vuelo por aeronave mensuales para el periodo enero – junio 2023 se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11.- Planeación de Horas de Vuelo por Aeronave periodo enero-junio 2023.

Aeronave	MRB	Horas de Vuelo 07 de Enero 2023	Planeación de Horas de Vuelo por Aeronave					
			Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
AAA	A1	1899	150	100	110	120	115	125
	B1	420						
	C1	2834						
	D1	2834						
AAB	A2	288	130	100	110	115	96	92
	B2	3265						
	C2	1263						
	D2	268						
AAC	A3		F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S
	B3	F/S						
	C3							
	D3							
ABA	A4	2761	125	130	80	110	115	120
	B4	2158						
	C4	858						
	D4	1995						
ABB	A5	1810	125	92	100	104	60	88
	B5	2473						
	C5	1326						
	D5	1118						
ABC	A6	462	115	144	92	150	104	100
	B6	278						
	C6	2119						
	D6	1980						
ACC	A7	2410	110	115	120	138	125	130
	B7	1470						
	C7	2278						
	D7	2096						
CAC	A8	2702	100	110	138	144	69	125
	B8	1936						
	C8	427						
	D8	770						
BAB	A9	2187	130	120	110	115	120	115
	B9	2505						
	C9	1601						
	D9	1478						
BCC	A10	2232	80	110	125	139	114	120
	B10	873						
	C10	1376						
	D10	1289						

A cada aeronave se le ha asignado un código de 3 letras y se aplica un filtro de semáforo (Tabla 12) para alertar su proximidad a la tasa de fallas (λ) del componente, ya que será clave para determinar el momento de reabastecimiento.

Tabla 12.- Semaforo de Alertas.

Semáforo de Alertas		
Color	Horas de Vuelo del Componente (Intervalo)	Probabilidad de Falla
	2168 - 2287	60% - 62%
	2288 - 2408	62% - 64%
	2409 - 2529	64% - 66%
	2530 - 2649	66% - 68%
	2650 - 2770	68% - 70%
	2771 - 2891	70% - 72%
	2892 - en adelante	72% -

Las aeronaves para el periodo enero – junio 2023 volarán en promedio 113 horas al mes, este avance representa un incremento del 2% en el porcentaje de falla, motivo por el cual el semáforo cambia de color en ese intervalo.

Definido el criterio, y establecido el semáforo indicador se procede a proyectar el periodo de los seis meses siguientes, primero para definir la cantidad de palas de rotor principal necesarias para cumplir con la necesidad de las aeronaves y evitar que estas queden fuera de servicio.

Tabla 13.- Proyección de MRB.

MRB	Horas de Vuelo al Finalizar el Mes						Requerimiento Ideal de Palas							Total
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Día 0	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	
A1	2049	2149	2259	2379	2494	2619					1			3
B1	570	670	780	900	1015	1140								
C1	2984	3084	3194	3314	3429	3554		1						
D1	2984	3084	3194	3314	3429	3554		1						
A2	418	518	628	743	839	931								1
B2	3395	3495	3605	3720	3816	3908		1						
C2	1393	1493	1603	1718	1814	1906								
D2	398	498	608	723	819	911								
A3	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S	F/S
B3														
C3														
D3														
A4	2886	3016	3096	3206	3321	3441		1						3
B4	2283	2413	2493	2603	2718	2838			1					
C4	983	1113	1193	1303	1418	1538								
D4	2120	2250	2330	2440	2555	2675				1				
A5	1935	2027	2127	2231	2291	2379						1		2
B5	2598	2690	2790	2894	2954	3042		1						
C5	1451	1543	1643	1747	1807	1895								
D5	1243	1335	1435	1539	1599	1687								
A6	577	721	813	963	1067	1167								2
B6	393	537	629	779	883	983								
C6	2234	2378	2470	2620	2724	2824			1					
D6	2095	2239	2331	2481	2585	2685				1				
A7	2520	2635	2755	2893	3018	3148		1						3
B7	1580	1695	1815	1953	2078	2208								
C7	2388	2503	2623	2761	2886	3016		1						
D7	2206	2321	2441	2579	2704	2834			1					
A8	2802	2912	3050	3194	3263	3388		1						2
B8	2036	2146	2284	2428	2497	2622					1			
C8	527	637	775	919	988	1113								
D8	870	980	1118	1262	1331	1456								
A9	2317	2437	2547	2662	2782	2897		1						3
B9	2635	2755	2865	2980	3100	3215		1						
C9	1731	1851	1961	2076	2196	2311						1		
D9	1608	1728	1838	1953	2073	2188								
A10	2312	2422	2547	2686	2800	2920		1						1
B10	953	1063	1188	1327	1441	1561								
C10	1456	1566	1691	1830	1944	2064								
D10	1369	1479	1604	1743	1857	1977								
								11	3	2	2	1	1	20

En la Tabla 13 se observa que se tienen 11 palas de rotor principal instaladas con una probabilidad de falla mayor al 62%, de acuerdo con lo determinado en la reunión de expertos el criterio para iniciar el proceso de reabastecimiento es a partir de una probabilidad de falla del 62% que es cuando el componente tiene 2,288 horas de vuelo.

Con esta proyección se puede determinar cuántos componentes se requerirán en los siguientes seis meses, partiendo del día 0 se observa que hay instaladas en las aeronaves 11 palas de rotor principal que se encuentran en un porcentaje de aparición de corrosión inoperante considerable. El siguiente mes el requerimiento disminuye y pasa a ser de 3 palas de rotor principal, siendo este el máximo

de palas requeridas por mes en el periodo proyectado. Es importante recalcar que las horas de vuelo que se muestran en la tabla son las horas de vuelo de los componentes en la zona de la Sonda de Campeche.

Para realizar el reabastecimiento es importante contar con la información de los equipos disponibles en almacén, por lo que se realiza un análisis de disponibilidad en almacén.

5.7.2 Disponibilidad de Componentes en el Almacén.

El almacén de la empresa está conformado por 3 almacenes:

1. Almacén de componentes: En este almacén se encuentran los materiales e insumos consumibles y los componentes menores (menores por sus dimensiones).
2. Almacén de componentes mayores: En este almacén se encuentran, como su nombre indica los componentes mayores y cuenta con aire acondicionado ya que algunos componentes requieren ser resguardados a determinada temperatura, aquí se encuentran ubicados las palas de rotor principal.
3. Almacén de componentes electrónicos: En este almacén se encuentran todos los equipos electrónicos que se instalan en las aeronaves, esta adecuado con deshumidificador, aire acondicionado y protocolos de ingreso bien establecidos.

En el almacén de componentes mayores, es posible encontrar componentes en dos condiciones: Reparable y Operativo. Como su nombre lo indica, los reparables son aquellos que han cumplido con su tiempo de operación y que pueden recibir un overhaul o ser reparados para volver a operar. Los operativos son aquellos disponibles para ser instalados en cualquier momento.

El inventario con el que cuenta la empresa, para la pala de rotor principal se muestra en la Tabla 14:

Tabla 14.- Existencias de MRB en Almacén.

Almacen de Reparables			Almacen Operativas		
PN	Componente	Qty	PN	Componente	Qty
412-015-300-109	Main Rotor Blade	17	412-015-300-109	Main Rotor Blade	4

Se cuenta con 17 palas de rotor principal en condición de reparable y 4 palas en condición de operativas. Las 17 piezas que se encuentran en reparables pueden ser enviadas a reparación o intercambiarlas (Exchange) con el fabricante, sus implicaciones se mencionan en el siguiente punto.

5.7.3 Evaluación Financiera.

La viabilidad financiera de una intervención como la propuesta de estrategia de reabastecimiento que se está llevando a cabo es el punto más relevante, pues recursos financieros serán necesarios para su implementación y se debe estimar el presupuesto de esta.

Para llevar a cabo esta evaluación, es necesario conocer las condiciones en las que se puede adquirir el componente:

- **Reparación:** Es posible enviar a reparar las palas que se encuentran en condición de reparable con el fabricante, el tiempo de entrega es de 45 días hábiles, el precio final varía de acuerdo con las reparaciones necesarias, pero en promedio la factura emitida por el fabricante es de \$60,000.00 usd. Se deben agregar costos de embalaje y transporte (Ida y vuelta), así como los costos fiscales por efectuar las importaciones temporales correspondientes.
- **Intercambio (Exchange):** Consiste en enviar una pala en condición de reparable para que el fabricante te envíe una pala operativa, es importante mencionar que la pala que envía el fabricante tiene horas de vuelo en otras aeronaves, esto resulta irrelevante pues ya se ha comprobado en las secciones anteriores que el promedio de horas de vuelo que opera una pala de rotor principal en la Sonda de Campeche es de 2288 horas de vuelo, así que mientras la pala de rotor que envía el fabricante no tenga más de 7000 horas de vuelo se puede recibir sin mayor inconveniente. Al recibir el fabricante la pala de rotor en condición de reparable, la evaluará y emitirá una factura que en promedio ronda los \$123,260.00 usd. Se deben agregar costos de embalaje y transporte (Ida y vuelta), así como los costos fiscales por efectuar las importaciones temporales correspondientes.

- **Nuevo:** El precio de adquisición de una pala de rotor principal nueva es de \$261,903.00 usd. Se deben agregar costos de transporte (Ida), así como los costos fiscales por efectuar la importación temporal correspondiente.

Aunado a los costos mencionados anteriormente, es necesario considerar para el cálculo del costo total de adquisición los tiempos de entrega, que se traducen en el costo de tener una aeronave fuera de servicio (on time y off time) para establecer en que condición serán solicitados los componentes.

Tabla 15.- Costo de las Opciones de Adquisición del Producto.

Precios (usd)		Transporte	Fiscales	Embalaje	Tiempo de Entrega (días)	Perdida si se efectua a tiempo	Perdidas estimadas si AC F/S	Costo Total de Adquisición (On time)	Costo Total de Adquisición (Off time)
Nueva (N)	\$ 261,903.00	\$ 4,588.61	\$ 41,904.48		3	-	\$ -15,000.00	\$ 308,396.09	\$ 323,396.09
Reparable (R)	\$ 60,000.00	\$ 9,177.22	\$ 9,600.00	\$ 34,482.00	51	-	\$ -255,000.00	\$ 113,259.22	\$ 368,259.22
Intercambio (I)	\$ 123,260.00	\$ 9,177.22	\$ 19,721.60	\$ 34,482.00	7	-	\$ -35,000.00	\$ 186,640.82	\$ 221,640.82

La Tabla 15.- Costo de las Opciones de Adquisición del Producto. muestra que la mejor opción preventiva, es decir solicitar los componentes con tiempo y no de forma reactiva, es mandar a reparar las palas de rotor principal con un costo total de adquisición de \$113,259.22 usd. En caso de ser solicitados de manera reactiva, se aprecia que el costo de mandar a reparar el componente es el mayor, debido a que al tener la aeronave fuera de servicio las pérdidas estimadas (lo que se deja de ganar) deben ser sumadas al costo total de adquisición, por lo que resulta conveniente solicitar en intercambio las palas por un costo total de adquisición de \$221,640.82 usd, encareciendo la adquisición del componente casi al doble (1.957).

5.7.4 Estrategia de Reabastecimiento.

Se desglosa la estrategia para el periodo enero – junio 2023 de manera mensual recordando que las opciones para la adquisición del componente son Nuevo (N), Intercambio (I) y Reparado (R); y considerando por política de la empresa que solo se pueden solicitar 2 intercambios por aeronave al mes:

Tabla 16.- Estrategia de Reabastecimiento.

Requerimientos			Estatus de Almacenes al Inicar el Mes.			
Enero		7	Necesario			
NNNNNNN	\$	2,158,772.61	\$	1,306,485.71		
IIIIIIII	\$	1,306,485.71				
Requerimientos						
Febrero		3	Recurso Mensual			
III	\$	559,922.45	\$	559,922.45		
Requerimientos						
Marzo		2	Recurso Mensual			
RR	\$	226,518.43	\$	226,518.43		
RI	\$	299,900.03				
Requerimientos						
Abril		2	Recurso Mensual			
RR	\$	226,518.43	\$	226,518.43		
RI	\$	299,900.03				
Requerimientos						
Mayo		1	Recurso Mensual			
R	\$	113,259.22	\$	113,259.22		
Requerimientos						
Junio		1	Recurso Mensual			
R	\$	113,259.22	\$	113,259.22		
		Recurso 6 Meses	\$	2,545,963.44		
			Almacen de Reparables			
			Almacen Operativas			
Componente	Qty	Componente	Qty			
Main Rotor Blade	10	Main Rotor Blade	11			
			Almacen de Reparables			
			Almacen Operativas			
Componente	Qty	Componente	Qty			
Main Rotor Blade	14	Main Rotor Blade	3			
			Almacen de Reparables			
			Almacen Operativas			
Componente	Qty	Componente	Qty			
Main Rotor Blade	15	Main Rotor Blade	2			
			Almacen de Reparables			
			Almacen Operativas			
Componente	Qty	Componente	Qty			
Main Rotor Blade	15	Main Rotor Blade	2			
			Almacen de Reparables			
			Almacen Operativas			
Componente	Qty	Componente	Qty			
Main Rotor Blade	16	Main Rotor Blade	1			
			Almacen de Reparables			
			Almacen Operativas			
Componente	Qty	Componente	Qty			
Main Rotor Blade	16	Main Rotor Blade	1			

Se han puesto en la tabla de requerimientos las mejores opciones para adquirir los componentes siendo el costo mínimo el criterio de selección. Como consecuencia de la falta de planeación para la adquisición de los componentes, la cantidad de adquisiciones requeridas en el mes de enero resulta mayor debido a las 7 palas de rotor principal necesarias, lo cual se traduce a un mayor impacto en costos en ese período. Sin embargo, en los siguientes periodos la cantidad de adquisiciones requeridas disminuye debido a la correcta planeación los recursos económicos necesarios para cubrir las necesidades de componentes de las aeronaves.

Conclusiones.

La industria aeronáutica en su área de mantenimiento es regulada por la FAA (Administración Federal de Aviación) en América y por la EASA (Administración Europea de Seguridad Aérea) en Europa, en México se cuenta con la Agencia Federal de Aviación Civil, tienen procedimientos bien establecidos con el único fin de salvaguardar la integridad de las personas. En el presente proyecto se han utilizado herramientas estadísticas que parten de la teoría de confiabilidad para comprender el comportamiento del tiempo de vida de un componente que no está cumpliendo con el esperado, debido a las condiciones y el ritmo de operación al que es sujeto el componente.

Al utilizar la herramienta de determinación de fallas ABC, es posible determinar las principales fallas en el componente, para el caso de estudio: la corrosión con un 87% y el resto de delaminación, la cual, al repararse en sitio no presentaba mayores inconvenientes.

Y mediante la aplicación del análisis RAM, el cual incluye el análisis estadístico de los datos históricos y el análisis cualitativo, la tasa de fallas es obtenida, para determinar el punto clave para iniciar el proceso de reabastecimiento con el uso de las funciones de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulada. Para el caso de estudio, se ha determinado que el tiempo medio de falla se ubica a las 2,288 horas de vuelos, significando un porcentaje de 62% y siendo este el recíproco de la tasa de falla.

Por lo que al realizar la planeación de abastecimiento y el análisis de costos se concluye que para el caso de estudio se deben solicitar 7 palas de rotor principal en condición de intercambio para el primer mes y 3 en condición de intercambio para el segundo mes, esto debido a que no es posible mandar a reparar ninguno de los que se tienen en el almacén de reparables por los 45 días que toma enviar a reparar, para marzo es posible mandar a reparar las 2 palas de rotor principal que se requieren (desde enero), y para los siguientes meses el tiempo y la planeación permiten solicitar las reparaciones con antelación, siendo siempre la mejor opción el envío a reparación de las palas que se tienen en el almacén. Se requiere para completar los primeros 6 meses de operación del año un total de \$2,545,963.44 USD, a manera de comparación si se hubieran solicitado los 16 componentes a condición de intercambio los recursos requeridos hubieran ascendido a \$2,986,253.12 USD, un aumento de \$440,289.68 USD, que podrían ser ahorrados. Vale la pena mencionar que el gasto inicial por la adquisición de las 10 palas de rotor principal en intercambio

en los primeros 2 meses de la planeación, en un futuro podrían disminuirse al ser enviados a reparación con tiempo.

Al aplicar la metodología es posible realizar una estrategia de reabastecimiento que asegure la operatividad de esta, ahorrando significativos recursos a la compañía en el largo plazo y evitando el comportamiento reactivo del departamento de abastecimientos para la solicitud de los componentes. Para este trabajo de investigación se ha seleccionado el componente por su alto costo, sin embargo, podría replicarse la metodología para otros componentes que tampoco están cumpliendo con su tiempo de vida esperado, conociendo su comportamiento probabilístico se podrían tomar decisiones representando más ahorros para la compañía en su estrategia de abastecimiento. El análisis desarrollado en el presente trabajo permite identificar componentes críticos, tasas de falla y tiempos de reabastecimiento, por lo que es posible su aplicación en otros sectores o industrias.

Referencias

- Acuña, J. (2003). *Ingeniería de Confiabilidad*. Cartago, Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.
- Aguilar, J., Torres , R., & Magaña , D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1), 15 - 26.
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales*. Santiago de Chile: RiL editores.
- Avila, V., Rodriguez , A., & Lias, Y. (Octubre - Diciembre de 2005). Influencia de los Parámetros Medioambientales en la Corrosión de Elementos Estructurales Metálicos. *Ciencias Holguín*, XI(4), 1-11.
- AW&ST. (Abril de 2013). The MRO global leading players. (M. Edition, Ed.) *Aviation Week and Space Technology*.
- Ballester , S., Olmeda , P., Macián , V., & Tormos, B. (2002). El Mantenimiento de las Flotas de Transporte. *Técnica Industrial* 247, 42-47.
- Bayout, M., & Alves, R. (2007). On the use of the THERP methodology in the human reliability analysis of nuclear power plants - compliance with the USNRC good practices criteria. *Conferencia Nuclear Atlantica Internacional*. Sao Paulo: Asociación Brasileña de Energia Nuclear.
- Bilurbina, L., Liesa , F., & Iribarren, J. (2003). *Corrosión y protección*. Barcelona: UPC.
- Buitrago, J. (2018). *Modelo de Confiabilidad con Metodología (RAM) para un Sistema de Bombeo de Agua de Inyección*. Bogotá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- CIMdata. (2002). *Product lifecycle management: Empowering the future of business*. Tech Rep.
- Creus, A. (1992). *Confiabilidad y Seguridad. Su aplicación en procesos industriales*. Madrid: Marcombo.
- Crowe, D. (2001). *Design for Reliability*. Washington: CRC Press.

- Diaz Povedano, G. (30 de Enero de 2021). *Terotecnic Ingeniería Predictiva*. Obtenido de Terotecnic : <https://terotecnic.com/ingenieria/el-analisis-rams/>
- Doertenbach, N. (Febrero de 2000). Highly Accelerated Life Testing - Testing With a Different Purpose. *2000 Proceedings*, 1-7.
- E, J. (1988). Corrosión en Zonas Marítimas Costeras: Captación y Determinación de los Cloruros Existentes en Atmósferas y Marinas. *IV Seminario Química Marina*, 91 - 97.
- Eda, A. (2013). *Análisis de Fallas de una Máquina Extrusora de Electrodo*. Piura: Repositorio Institucional Pirhua.
- EFNMS. (2013). *European Federation of National Maintenance Societies*. Recuperado el 20 de 03 de 2022, de MRO Definition: <http://www.efnms.org>
- García de Korazar, X. (2004). Proceso de Mejora de RAMS a lo largo del ciclo de vida (I). *Información de Máquinas-Herramienta, Equipos y Accesorios*.(304), 103-110. doi:ISSN 0210-1777
- García de Korazar, X. (2004). Proceso de mejora de RAMS a lo largo del ciclo de vida (II). *Información de Maquinas-Herramientas, Equipos y Accesorios*(305), 60-65.
- García Palencia, O. (2012). *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial: Principios Fundamentales*. Bogotá: Ediciones de la U. doi:ISBN: 978-958-762-051-1
- García, O. (2012). *Gestión Moderna en el Mantenimiento Industrial* (Primera ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.
- Guan, X., Jie, X., & Guangyan, Z. (2017). Modelado de confiabilidad para sistemas de múltiples componentes sujetos a múltiples procesos de falla competitivos dependientes con umbral de falla fuerte cambiante. *Conferencia de Gestión de Pronósticos y Salud del Sistema 2017*. Harbin: IEEE. doi:10.1109/PHM.2017.8079117
- Hobbs, G. (2008). *HALT and HASS The accepted quality and reliability paradigm*. Colorado: Hobbs Engineering.
- Huerta, R. (2004). *Curso Confiabilidad Operacional: Uso de Técnicas y Herramientas de Aplicación*. Bogotá: Customer Datastream.

- Huerta, R. (2006). Proceso de Análisis Integral de Disponibilidad y Confiabilidad como Soporte para el Mejoramiento Continuo de las Empresas. (págs. 1-19). Monterrey: Noria.
- IATA. (Diciembre de 2009). Overhauling Maintenance, Repair and Overhaul (MRO). *Airlines International*, 8. Obtenido de <http://www.iata.org/publications/airlinesinternational/december-2009/Pages/08.aspx>
- Knezevic, J. (1996). *Mantenibilidad*. Madrid: Isdefe.
- Krohn, A. (2000). *Análisis de Fallas y Desarrollo de Planes Específicos de Mantenimiento para Equipos del Área de Procesos del Complejo de Mejoramiento de Crudo de Petrozuata*. Caracas.: Universidad Metropolitana.
- Latino, C. (2003). Definición y Logro de la Cultura de la Confiabilidad. *Conferencia Internacional sobre Mejora de la Confiabilidad en Refinerías de Petróleo y Plantas Químicas*. Reliability Center Inc. Obtenido de Reliability Center Inc.
- McFadden, M., & Worrells, S. (2012). Global Outsourcing of Aircraft Maintenance. *Journal of Aviation Technology and Engineering*, 1, 63 - 73. doi:10.5703/1288284314659
- Medrano, J., González, V., & Díaz, V. (2017). *Mantenimiento: Técnicas y Aplicaciones Industriales*. CDMX: Grupo Editorial Patria.
- Mesa , D., Ortiz, Y., & Pinzón , M. (Mayo de 2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia Et Technica*, XII(30), 155-160.
- Mora Gutierrez, A. (2007). *Mantenimiento Estratégico Empresarial, enfoque sistemático Kantiano*. Medellin: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Mora Gutierrez, A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. DF: Alfaomega.
- Morandaira , J. C., & Salomón , J. (2012). *Empleo de los Helicópteros en Actividades Offshore y Lucha Contra Derrames de Petróleo*. La Habana: Instituto Panamericano de Ingeniería Naval Sección Cuba.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad*. New York: Industrial Press Inc.

- Palencia, J., Chikhani, A., Lara, J., Aguillón, O., Tremante, A., & Rojas, M. (2006). Aplicación de sistemas expertos en el modelaje de la predicción de fallas en activos industriales. *Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice*. Mayagüez: LACCET.
- Palencia, J. (2002). *Metodología de análisis de compresores recíprocos a través del modelaje de confiabilidad y cálculo de ciclo de vida*. Universidad Simón Bolívar.
- Patton, J. (1995). *Preventive Maintenance. The international society for measurement and control* (Vol. Second edition). Instrument Society of America.
- PEMEX (2002^a). *Evaluación de Riesgo Ecológico e Impacto de las Operaciones Industriales (Análisis General)*. DF: Exploración y Producción.
- PEMEX (2020). *Anuario Estadístico 2019*. Ciudad de México: PEMEX
- Poder Ejecutivo de Petróleos Mexicanos (2013). *Estatuto Orgánico de Pemex - Exploración y Producción*. DF: Diario Oficial de la Federación. Obtenido de <http://www.diputados.gob.mx/leyesbiblio/regla/n369.pdf>
- Pérez, C. (2003). Confiabilidad y Evolución del Mantenimiento. *Soporte & compañía.*, 1-17.
- Pons, R., Villa, E., & Bermúdez, Y. (Julio - Diciembre de 2013). El análisis de confiabilidad humana en la mejora de procesos. *Prospectiva*, 11(2), 61 - 67.
- Posadas, C. (2009). *Efecto de la corrosión salina en el comportamiento de la vida en fatiga de una aleación de aluminio 2024-T3 de aplicación aeronáutica*. México DF: IPN.
- Poveda, A. (2011). *Aplicación de la Metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para el Desarrollo de Planes de Mantenimiento*. Guayaquil: Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Quality Inspection Organization*. (2015 de November de 2015). Obtenido de How HALT and HASS can help your product development efforts.: <https://qualityinspection.org/halt-hass/>
- Rottman, G. (2007). *Vietnam Airmobile Warfare Tactics*. Osprey.

- Salazar-Jiménez, J. A. (Julio - Septiembre de 2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127 - 136.
- Serna, M. (2007). *Estudio de corrosión en pieles y estructuras aeronáuticas*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente .
- Swain, A. (1964). *THERP*. New Mexico: Sandia Corporation Reprint.
- Thermotron Industries. (1998). *Fundamentals of Accelerated Stress Testing*. Kent: Thermotron.
- Tiburcio, C., Zambrano, P., Martínez , A., & Almeraya , F. (2013). Corrosión en la Industria Aeroespacial. En B. Valdez, & M. Schorr, *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial* (págs. 33-48). Barcelona: OmniaScience.
- Tomashov, N. (1966) *Theory of corrosion and protection of metals*. London: Collier McMillan
- Tres, G., Arriaga , R., Malo, J., & Uruchurtu, J. (2001). Monitoreo por ruido electroquímico de la corrosión del acero en una atmósfera contaminada. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 171 - 178.
- Zárate , M. (2012). *Análisis RAM*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

Anexos.

Anexo 1.- Componentes con Tiempo de Vida Establecido por el Fabricante

Componentes con Tiempo de Vida Establecido por el Fabricante			
Item	Descripción	Lifetime	UM
Main Rotor Hub			
1	Yoke Assembly	700	HR
2	Yoke Assembly	5000	HR
3	Yoke Assembly	4500	HR
4	Yoke Assembly	3000	HR
5	Spindle Assembly	5000	HR
6	Spindle and Damper Bearing Assy	5000	HR
7	Spindle and Damper Bearing Assy	10000	HR
8	Spindle and Shear Bearing Assy	10000	HR
9	Pitch Horn Assy	5000	HR
10	Pitch Horn Assy	15000	HR
11	Retention Bolt	5000	HR
12	Retention Bolt (Expandable)	5000	HR
13	Damper Bridge	5000	HR
14	Damper Bridge	10000	HR
15	Damper Bridge	15000	HR
16	Damper Bridge	10000	HR
17	Damper Bridge	15000	HR
18	Damper Bridge	10000	HR
19	Damper Bridge	10000	HR
20	Main Rotor Blade	10000	HR
21	Pivot Bearing	On condition	
22	Fitting	5000	HR
23	Damper Yoke Set	On condition	
24	Damper Yoke Set	On condition	
Main Rotor Droop Restraint			
25	Bolt (8)	120	Month
Main Rotor Droop Restraint			
26	Bolt, Bracket (16)	15000	HR
Main Rotor Controls			
27	Rephasing Lever Assembly	1250	HR
28	Rephasing Lever Assembly	5000	HR
29	Drive Link Assembly	5000	HR
30	Swashplate Outer Ring	2500	HR

Main Rotor Controls			
Item	Descripción	Lifetime	UM
31	Swashplate Outer Ring	10000	HR
32	Pitch Link Rod End Bearing	5000	HR
33	Pitch Link Rod End Bearing	5000	HR
34	Swashplate Link Rod End Bearing	5000	HR
35	Swashplate Link Rod End Bearing	5000	HR
36	Swashplate Link Rod End Bearing	5000	HR
37	Swashplate Support Assembly	5000	HR
38	Swashplate Support Assembly	5000	HR
39	Swashplate Support Assembly	5000	HR
40	Swashplate Support Assembly	15000	HR
41	Gimbal Ring Assembly	9000	HR
42	Gimbal Ring Assembly	9000	HR
43	Collective Sleeve	9000	HR
44	Collective Sleeve	9000	HR
45	Collective Lever Assembly	10000	HR
46	Collective Lever Assembly	2500	HR
47	Collective Lever Assembly	20000	HR
48	Collective Lever Pin	20000	HR
Main Rotor Control System Bolts			
49	Pitch Horn to Pitch Link (4)	2500	HR
50	Pitch Horn to Pitch Link (4)	2500	HR
51	Pitch Link-to-Rephasing Lever (4)	2500	HR
52	Pitch Link-to-Rephasing Lever (4)	2500	HR
53	Pitch Link-to-Rephasing Lever (4)	2500	HR
54	Swashplate Link-to-Rephasing Lever (3)	2500	HR
55	Swashplate Link-to-Rephasing Lever (2)	2500	HR
56	Swashplate Link-to-Rotating Ring (2)	2500	HR
57	Gimbal Ring-to-Swashplate Support (2)	2500	HR
58	Gimbal Ring-to-Swashplate Inner Ring (2)	1000	HR
59	Gimbal Ring-to-Swashplate Inner Ring (2)	2500	HR
60	Collective Lever-to-Swashplate Support (1)	2500	HR
61	Boost Tube-to-Universal (3)	2500	HR
62	Universal-to-Boost Cylinder (3)	2500	HR
63	Boost Cylinder-to-Lower Support (3)	2500	HR
64	Rephasing Lever-to-Hub (4)	1250	HR
65	Rephasing Lever-to-Hub (4)	2500	HR

Main Rotor Supplemental Control System Bolts			
Item	Descripción	Lifetime	UM
66	Swashplate Inner Ring-to-R.H. Cyclic Boost (1)	2500	HR
67	Swashplate Inner Ring-to-L.H. Cyclic Boost (1)	2500	HR
68	Collective Lever-to-Collective Boost (1)	2500	HR
Propulsion and Drive System			
69	Planetary Spider	On condition	
70	Planetary Spider	2500	HR
Propulsion and Drive System			
71	Planetary Spider	On condition	
72	Main Rotor Mast Assembly	10000	HR
73	Main Rotor Mast Assembly	10000	HR
74	Main Rotor Mast Assembly	10000	HR
75	Main Rotor Mast Assembly	10000	HR
76	Main Rotor Mast Assembly	5000	HR
77	Main Rotor Mast Assembly	2500	HR
78	Main Rotor Mast Assembly	5000	HR
79	Cap Retention	10000	HR
80	Cap Retention	10000	HR
81	Cap Retention	10000	HR
82	Mast Cap	5000	HR
83	Cone	10000	HR
84	Cone	5000	HR
85	Drive Pin	10000	HR
86	Drive Pin	5000	HR
87	Upper Cone Seat	10000	HR
88	Upper Cone Seat	10000	HR
89	Upper Cone Seat	10000	HR
90	Upper Cone Seat	5000	HR
91	Upper Cone Seat	2500	HR
92	Splined Plate Assy	Life Limited	
93	Splined Plate Assy	10000	HR
94	Splined Plate Assy	10000	HR
95	Splined Plate Assy	5000	HR
96	Splined Plate Assy	10000	HR
97	Splined Plate Assy	2500	HR

Propulsion and Drive System			
Item	Descripción	Lifetime	UM
98	Splined Plate Assy	Life Limited	
99	Cone	10000	HR
100	Cone	10000	HR
101	Cone	10000	HR
102	Cone	5000	HR
103	Lower Cone Seat	10000	HR
Item	Descripción	Lifetime	UM
104	Lower Cone Seat	10000	HR
105	Lower Cone Seat	2500	HR
106	Lower Cone Seat	10000	HR
107	Lower Cone Seat	5000	HR
Elevator and Controls			
108	Horn Assembly	On condition	
Airframe			
109	Upper Aft Beam Cap	On condition	
Tail Rotor Installation			
110	Blade Assembly	5000	HR
111	Blade Assembly	5000	HR
112	Yoke Assembly	5000	HR
Landing Gear			
113	High Aft Crosstube Assembly	10000	Cyc
114	High Aft Crosstube Assembly	20000	Cyc
115	High Aft Crosstube Assembly	20000	Cyc
116	High Aft Crosstube Assembly	12000	Cyc
Fire Extinguisher Cartridges			
117	HTL Industries P/N 13083-5	6	Years
118	HTL Industries P/N 30900400	6	Years
119	W. Kidde and Co. P/N 804943	6	Years
120	W. Kidde and Co. P/N 804944	6	Years
121	W. Kidde and Co. P/N 895408-1	10	Years
122	W. Kidde and Co. P/N 895409-1	10	Years
Floats			
123	Float Hose	6	Years
124	Float Hose	6	Years
125	Float Hose	6	Years
126	Squib Cartridges, Floats	15	Years
127	Squib Cartridges, Floats	15	Years
128	Cylinder Assembly, Floats	10	Years

Anexo 2.- Hoja de Registro de Datos.

Hoja de Registro para Análisis Estadístico				
Item	Componente	Tiempo Total	Horas de Vuelo en matrícula	Motivo de Remoción
1	Main Rotor Blade	3675	2350	Corrosión/Fisura
2	Main Rotor Blade	15081	1386	Corrosión/Fisura
3	Main Rotor Blade	8647	1036	Corrosión/Fisura
4	Main Rotor Blade	7420	1774	Corrosión/Fisura
5	Main Rotor Blade	6854	1883	Corrosión/Fisura
6	Main Rotor Blade	11513	2183	Corrosión/Fisura
7	Main Rotor Blade	4330	2012	Corrosión/Fisura
8	Main Rotor Blade	4545	2227	Corrosión/Fisura
9	Main Rotor Blade	11307	1278	Corrosión/Fisura
10	Main Rotor Blade	5083	2543	Corrosión/Fisura
11	Main Rotor Blade	9923	838	Corrosión/Fisura
12	Main Rotor Blade	9772	649	Delaminación
13	Main Rotor Blade	6101	994	Corrosión/Fisura
14	Main Rotor Blade	5452	901	Delaminación
15	Main Rotor Blade	715	715	Delaminación
16	Main Rotor Blade	2346	939	Delaminación
17	Main Rotor Blade	11699	1936	Corrosión/Fisura
18	Main Rotor Blade	12196	2433	Delaminación
19	Main Rotor Blade	12441	1459	Corrosión/Fisura
20	Main Rotor Blade	8330	870	Delaminación
21	Main Rotor Blade	9679	1083	Delaminación
22	Main Rotor Blade	7683	2577	Corrosión/Fisura
23	Main Rotor Blade	6605	1615	Corrosión/Fisura
24	Main Rotor Blade	3921	1086	Delaminación
25	Main Rotor Blade	7181	2111	Corrosión/Fisura
26	Main Rotor Blade	11503	1518	Corrosión/Fisura
27	Main Rotor Blade	5951	2594	Corrosión/Fisura
28	Main Rotor Blade	8636	1127	Corrosión/Fisura
29	Main Rotor Blade	7484	2194	Corrosión/Fisura
30	Main Rotor Blade	7760	4580	Corrosión/Fisura
31	Main Rotor Blade	2977	2655	Corrosión/Fisura
32	Main Rotor Blade	4868	4104	Corrosión/Fisura
33	Main Rotor Blade	6802	5395	Corrosión/Fisura
34	Main Rotor Blade	4200	2470	Corrosión/Fisura
35	Main Rotor Blade	5073	3578	Corrosión/Fisura
36	Main Rotor Blade	2927	1570	Corrosión/Fisura

Hoja de Registro para Análisis Estadístico

Item	Componente	Tiempo Total	Horas de Vuelo en matrícula	Motivo de Remoción
37	Main Rotor Blade	2653	1520	Corrosión/Fisura
38	Main Rotor Blade	2069	1046	Corrosión/Fisura
39	Main Rotor Blade	994	786	Delaminación
40	Main Rotor Blade	1696	1210	Corrosión/Fisura
41	Main Rotor Blade	4512	2698	Corrosión/Fisura
42	Main Rotor Blade	4589	3085	Corrosión/Fisura
43	Main Rotor Blade	1021	980	Corrosión/Fisura
44	Main Rotor Blade	1488	1043	Corrosión/Fisura
45	Main Rotor Blade	8584	4323	Corrosión/Fisura
46	Main Rotor Blade	1040	1032	Corrosión/Fisura
47	Main Rotor Blade	2054	1903	Corrosión/Fisura
48	Main Rotor Blade	2300	1717	Corrosión/Fisura
49	Main Rotor Blade	4280	2791	Corrosión/Fisura
50	Main Rotor Blade	5574	3747	Corrosión/Fisura
51	Main Rotor Blade	6236	3271	Corrosión/Fisura
52	Main Rotor Blade	7009	6437	Corrosión/Fisura
53	Main Rotor Blade	14139	8267	Corrosión/Fisura
54	Main Rotor Blade	1340	805	Corrosión/Fisura
55	Main Rotor Blade	14773	8559	Corrosión/Fisura
56	Main Rotor Blade	2654	1482	Corrosión/Fisura
57	Main Rotor Blade	1634	1049	Corrosión/Fisura
58	Main Rotor Blade	1929	1027	Corrosión/Fisura
59	Main Rotor Blade	2472	2449	Corrosión/Fisura
60	Main Rotor Blade	957	929	Corrosión/Fisura
61	Main Rotor Blade	3300	1833	Corrosión/Fisura
62	Main Rotor Blade	2090	1765	Corrosión/Fisura
63	Main Rotor Blade	826	707	Delaminación
64	Main Rotor Blade	4575	3618	Corrosión/Fisura
65	Main Rotor Blade	1755	1438	Corrosión/Fisura
66	Main Rotor Blade	1378	877	Corrosión/Fisura
67	Main Rotor Blade	1653	887	Corrosión/Fisura
68	Main Rotor Blade	843	685	Corrosión/Fisura
69	Main Rotor Blade	2425	1449	Corrosión/Fisura
70	Main Rotor Blade	702	698	Delaminación
71	Main Rotor Blade	2756	1876	Corrosión/Fisura
72	Main Rotor Blade	19225	12921	Corrosión/Fisura

Hoja de Registro para Análisis Estadístico

Item	Componente	Tiempo Total	Horas de Vuelo en matrícula	Motivo de Remoción
73	Main Rotor Blade	7023	3661	Corrosión/Fisura
74	Main Rotor Blade	4474	2262	Corrosión/Fisura
75	Main Rotor Blade	1709	1299	Corrosión/Fisura
76	Main Rotor Blade	3110	2321	Corrosión/Fisura
77	Main Rotor Blade	1475	856	Corrosión/Fisura
78	Main Rotor Blade	1212	802	Corrosión/Fisura
79	Main Rotor Blade	8792	4874	Corrosión/Fisura
80	Main Rotor Blade	1188	758	Delaminación
81	Main Rotor Blade	4215	2811	Corrosión/Fisura
82	Main Rotor Blade	2725	1768	Corrosión/Fisura
83	Main Rotor Blade	1123	726	Delaminación
84	Main Rotor Blade	1905	1159	Corrosión/Fisura
85	Main Rotor Blade	6655	3822	Corrosión/Fisura
86	Main Rotor Blade	1198	1123	Corrosión/Fisura
87	Main Rotor Blade	6846	4680	Corrosión/Fisura
88	Main Rotor Blade	3825	3662	Corrosión/Fisura
89	Main Rotor Blade	1175	902	Corrosión/Fisura
90	Main Rotor Blade	1323	670	Delaminación
91	Main Rotor Blade	15190	8055	Corrosión/Fisura
92	Main Rotor Blade	814	720	Delaminación
93	Main Rotor Blade	1090	756	Corrosión/Fisura
94	Main Rotor Blade	21540	11087	Corrosión/Fisura
95	Main Rotor Blade	1212	873	Corrosión/Fisura
96	Main Rotor Blade	1547	1433	Corrosión/Fisura
97	Main Rotor Blade	7153	4870	Corrosión/Fisura
98	Main Rotor Blade	7921	4157	Corrosión/Fisura
99	Main Rotor Blade	3110	2315	Corrosión/Fisura
100	Main Rotor Blade	2700	1483	Corrosión/Fisura
101	Main Rotor Blade	4706	3333	Corrosión/Fisura
102	Main Rotor Blade	7227	4767	Corrosión/Fisura
103	Main Rotor Blade	1586	828	Delaminación
104	Main Rotor Blade	14224	7229	Corrosión/Fisura
105	Main Rotor Blade	3407	2914	Corrosión/Fisura
106	Main Rotor Blade	1596	1038	Corrosión/Fisura
107	Main Rotor Blade	5771	4425	Corrosión/Fisura
108	Main Rotor Blade	1123	803	Delaminación
109	Main Rotor Blade	1217	1075	Corrosión/Fisura

Hoja de Registro para Análisis Estadístico

Item	Componente	Tiempo Total	Horas de Vuelo en matrícula	Motivo de Remoción
110	Main Rotor Blade	2878	2416	Corrosión/Fisura
111	Main Rotor Blade	1759	881	Corrosión/Fisura
112	Main Rotor Blade	3135	2583	Corrosión/Fisura
113	Main Rotor Blade	870	738	Delaminación
114	Main Rotor Blade	1271	833	Delaminación
115	Main Rotor Blade	2722	1500	Corrosión/Fisura
116	Main Rotor Blade	3713	1923	Corrosión/Fisura
117	Main Rotor Blade	3478	2026	Corrosión/Fisura
118	Main Rotor Blade	1482	1022	Corrosión/Fisura
119	Main Rotor Blade	4611	3597	Corrosión/Fisura
120	Main Rotor Blade	5500	2998	Corrosión/Fisura
121	Main Rotor Blade	3304	1691	Corrosión/Fisura
122	Main Rotor Blade	3399	2836	Corrosión/Fisura
123	Main Rotor Blade	922	659	Delaminación
124	Main Rotor Blade	3023	2518	Corrosión/Fisura
125	Main Rotor Blade	1903	1442	Corrosión/Fisura
126	Main Rotor Blade	4819	3107	Corrosión/Fisura
127	Main Rotor Blade	2495	2315	Corrosión/Fisura
128	Main Rotor Blade	3161	2301	Corrosión/Fisura
129	Main Rotor Blade	4469	2362	Corrosión/Fisura
130	Main Rotor Blade	2067	1110	Corrosión/Fisura
131	Main Rotor Blade	3542	1845	Corrosión/Fisura
132	Main Rotor Blade	2908	2841	Corrosión/Fisura
133	Main Rotor Blade	3221	1852	Corrosión/Fisura
134	Main Rotor Blade	4530	3068	Corrosión/Fisura
135	Main Rotor Blade	1066	1006	Corrosión/Fisura
136	Main Rotor Blade	1172	981	Corrosión/Fisura
137	Main Rotor Blade	1354	1088	Corrosión/Fisura
138	Main Rotor Blade	2789	1597	Corrosión/Fisura
139	Main Rotor Blade	5019	3493	Corrosión/Fisura
140	Main Rotor Blade	1241	879	Delaminación
141	Main Rotor Blade	1805	1133	Corrosión/Fisura
142	Main Rotor Blade	4765	3153	Corrosión/Fisura
143	Main Rotor Blade	896	737	Corrosión/Fisura
144	Main Rotor Blade	2163	1725	Corrosión/Fisura
145	Main Rotor Blade	7264	5242	Corrosión/Fisura
146	Main Rotor Blade	3786	2390	Corrosión/Fisura

Hoja de Registro para Análisis Estadístico

Item	Componente	Tiempo Total	Horas de Vuelo en matrícula	Motivo de Remoción
147	Main Rotor Blade	1258	852	Delaminación
148	Main Rotor Blade	3127	2833	Corrosión/Fisura
149	Main Rotor Blade	1639	1231	Corrosión/Fisura
150	Main Rotor Blade	2147	1234	Corrosión/Fisura
151	Main Rotor Blade	4313	2376	Corrosión/Fisura
152	Main Rotor Blade	4668	2626	Corrosión/Fisura
153	Main Rotor Blade	3480	3148	Corrosión/Fisura
154	Main Rotor Blade	2690	1756	Corrosión/Fisura
155	Main Rotor Blade	1617	1095	Corrosión/Fisura
156	Main Rotor Blade	4442	3364	Corrosión/Fisura
157	Main Rotor Blade	3860	2316	Corrosión/Fisura
158	Main Rotor Blade	1843	945	Corrosión/Fisura
159	Main Rotor Blade	5198	4091	Corrosión/Fisura
160	Main Rotor Blade	3627	3420	Corrosión/Fisura
161	Main Rotor Blade	3479	2166	Corrosión/Fisura
162	Main Rotor Blade	5621	2831	Corrosión/Fisura
163	Main Rotor Blade	3458	2912	Corrosión/Fisura
164	Main Rotor Blade	5858	3259	Corrosión/Fisura
165	Main Rotor Blade	4783	4149	Corrosión/Fisura
166	Main Rotor Blade	2899	1458	Corrosión/Fisura
167	Main Rotor Blade	1304	745	Delaminación
168	Main Rotor Blade	5942	4332	Corrosión/Fisura
169	Main Rotor Blade	7765	5101	Corrosión/Fisura
170	Main Rotor Blade	2218	1946	Corrosión/Fisura
171	Main Rotor Blade	2324	1719	Corrosión/Fisura
172	Main Rotor Blade	1141	1086	Corrosión/Fisura
173	Main Rotor Blade	2280	1717	Corrosión/Fisura
174	Main Rotor Blade	4334	2459	Corrosión/Fisura
175	Main Rotor Blade	2832	1581	Corrosión/Fisura
176	Main Rotor Blade	4467	2920	Corrosión/Fisura
177	Main Rotor Blade	1046	754	Delaminación
178	Main Rotor Blade	2493	1429	Corrosión/Fisura
179	Main Rotor Blade	1709	886	Corrosión/Fisura
180	Main Rotor Blade	4785	3394	Corrosión/Fisura
181	Main Rotor Blade	2731	2247	Corrosión/Fisura
182	Main Rotor Blade	1436	800	Delaminación
183	Main Rotor Blade	2645	2616	Corrosión/Fisura

Hoja de Registro para Análisis Estadístico

Item	Componente	Tiempo Total	Horas de Vuelo en matrícula	Motivo de Remoción
184	Main Rotor Blade	1455	1033	Corrosión/Fisura
185	Main Rotor Blade	2716	1475	Corrosión/Fisura
186	Main Rotor Blade	6605	4068	Corrosión/Fisura
187	Main Rotor Blade	2125	1250	Corrosión/Fisura
188	Main Rotor Blade	3959	2136	Corrosión/Fisura
189	Main Rotor Blade	4699	3419	Corrosión/Fisura
190	Main Rotor Blade	832	738	Delaminación
191	Main Rotor Blade	4934	3662	Corrosión/Fisura
192	Main Rotor Blade	4824	4194	Corrosión/Fisura
193	Main Rotor Blade	2078	1703	Corrosión/Fisura
194	Main Rotor Blade	4939	3959	Corrosión/Fisura
195	Main Rotor Blade	1855	1237	Corrosión/Fisura
196	Main Rotor Blade	2203	1993	Corrosión/Fisura
197	Main Rotor Blade	3228	2415	Corrosión/Fisura
198	Main Rotor Blade	1815	1073	Corrosión/Fisura
199	Main Rotor Blade	4270	2281	Corrosión/Fisura
200	Main Rotor Blade	2644	1535	Corrosión/Fisura