



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS COMPONENTES INTERNOS EN UN MOTOR
TURBOPROP PW120, PARA DETERMINAR SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN, BASADO
EN LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DEL ACEITE LUBRICANTE Y EL DETECTOR DE
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Saúl Noé Pérez Espinoza

Asesorado por el Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres

Guatemala, agosto de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS COMPONENTES INTERNOS EN UN MOTOR
TURBOPROP PW120, PARA DETERMINAR SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN, BASADO
EN LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DEL ACEITE LUBRICANTE Y EL DETECTOR DE
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SAÚL NOÉ PÉREZ ESPINOZA

ASESORADO POR EL ING. BYRON GIOVANNI PALACIOS COLINDRES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Juan Carlos Molina Jiménez |
| VOCAL V | Br. Mario Maldonado Muralles |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

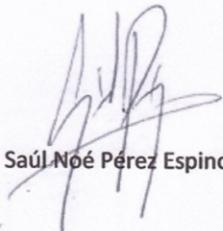
| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| EXAMINADOR | Ing. Julio César Molina Zaldaña |
| EXAMINADOR | Ing. Erick René Guerrero Silva |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado

**EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS COMPONENTES INTERNOS EN UN MOTOR
TURBOPROP PW120, PARA DETERMINAR SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN, BASADO
EN LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DEL ACEITE LUBRICANTE Y EL DETECTOR DE
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el
13 de agosto de 2008



Saúl Noé Pérez Espinoza.

Guatemala, 20 de mayo de 2011

Ing. Julio César Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería, USAC
Presente.

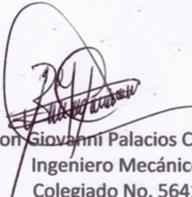
Estimado Ing. Campos:

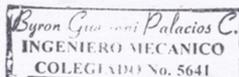
De manera atenta me dirijo a usted para manifestarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado: ***Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas***, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Mecánica ***Saúl Noé Pérez Espinoza*** con número de carné **2001-13181**.

Por lo cual, después de haber realizado la revisión del respectivo informe final y de haberle efectuado las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular, aprovecho para presentarle mis muestras de aprecio.

Atentamente,


Byron Giovanni Palacios Colindres
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 5641



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del asesor del trabajo de graduación titulado, EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS COMPONENTES INTERNOS EN UN MOTOR TURBOPROP PW120, PARA DETERMINAR SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN, BASADO EN LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DEL ACEITE LUBRICANTE Y EL DETECTOR DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS, del estudiante Saúl Noé Pérez Espinoza, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área



Guatemala, julio de 2011.

/behdei.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado **EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS COMPONENTES INTERNOS EN UN MOTOR TURBOPROP PW120, PARA DETERMINAR SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN, BASADO EN LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DEL ACEITE LUBRICANTE Y EL DETECTOR DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS** del estudiante **Saúl Noé Pérez Espinoza**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, julio de 2011

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS COMPONENTES INTERNOS EN UN MOTOR TURBOPROP PW120, PARA DETERMINAR SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN, BASADO EN LOS DATOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DEL ACEITE LUBRICANTE Y EL DETECTOR DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**, presentado por el estudiante universitario **Saúl Noé Pérez Espinoza**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Remijnos
Decano



Guatemala, 2 de agosto de 2011.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

**El Gran Ingeniero y
creador del universo: El
eterno creador**

Por haber infundido en mí el aliento de vida, y por permitirme ser un elemento en su majestuosa creación, capaz de comprender y de desarrollar el maravilloso potencial humano con el cual hemos sido diseñados.

Mis padres:

Porque gracias a su gran amor y sacrificio han permitido que ésta meta sea hoy una realidad. Su ejemplo de incansable lucha, responsabilidad, ética y excelencia a lo largo de mi vida, han instituido los valores que me hacen ser un hombre y un profesional digno al servicio de mi país.

Por esto y muchas cosas más, estoy inmensamente agradecido con ustedes. Este logro es suyo.

Ginger

Por llenar mi vida de amor y felicidad. Por ser mi alma gemela y amiga incondicional en todo tiempo, pero especialmente por ser esa gran mujer que me inspira ser un hombre mejor cada día. Gracias por existir, te amo.

**Mis hermanos y
sobrinos**

Con cariño y amor fraternal.

Mis amigos

A los de ayer y a los de siempre; a aquellos que tristemente ya nos han abandonado en el camino de la vida, a los que están lejos y a los que hoy alegremente acompañan mi andar por esta senda. Ustedes le han dado significado real a las palabras: alegría, apoyo, consuelo, cariño y hermandad. Doy gracias a la vida por haberlos cruzado en mi camino.

Guatemala

Porque seas una nación grande y prospera.

AGRADECIMIENTOS A:

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

Semillero donde la ciencia, las artes y la cultura convergen para gestar y producir el capital intelectual de nuestro país.

A mi asesor de trabajo de graduación

Ing. Byron Palacios.

A mis catedráticos

Ing. Carlos Pérez.

Ing. Hugo Ramírez.

A los ingenieros

Pablo Rousselin Avendaño

Francisco Sologastoa Solís

Agradecimientos muy especiales a los ingenieros

Vera Gladys Marroquín Argueta

José Santiago Méndez Arana

Por el incondicional y preciado apoyo que me han brindado a lo largo de mi formación profesional. Por su gran calidad humana y por el privilegio que me han dado, al considerarme como un miembro más de su familia. Muchas gracias.

A mis compañeros de labores

Por su camaradería, amistad y espíritu de equipo siempre presentes en el ejercicio de nuestras actividades profesionales.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN | XIX |
| OBJETIVOS | XXIII |
| INTRODUCCIÓN | XXV |
| | |
| 1. MOTORES DE AVIACIÓN | 1 |
| 1.1. Fundamentos de la propulsión | 1 |
| 1.1.1. Energía potencial y energía cinética | 1 |
| 1.1.2. Leyes de Newton del movimiento | 2 |
| 1.1.2.1. Primera Ley de Newton | 2 |
| 1.1.2.2. Segunda Ley de Newton | 2 |
| 1.1.2.3. Tercera Ley de Newton | 2 |
| 1.2. Propulsión | 4 |
| 1.3. Motores de aviación | 9 |
| 1.3.1. Desarrollo de los motores de aviación | 9 |
| | |
| 2. MOTORES DE TURBINA | 13 |
| 2.1. Desarrollo de las turbinas de gas | 13 |
| 2.2. Consideraciones en el diseño de turbinas de gas | 14 |
| 2.3. Ciclo termodinámico de las turbinas de gas | 18 |
| 2.3.1. El ciclo de Brayton de aire estándar | 18 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.3.2. | Ciclo de Brayton simple para motores con ejes independientes | 24 |
| 2.4. | El motor <i>Turboprop</i> | 27 |
| 2.4.1. | Motor <i>Turboprop Pratt & Whitney</i> serie 100 | 32 |
| 2.4.1.1. | Características de los motores de la serie PW100 | 35 |
| 3. | MANTENIMIENTO | 39 |
| 3.1. | Objetivo básico del mantenimiento | 39 |
| 3.2. | Definición de mantenimiento | 39 |
| 3.3. | Tipos de mantenimiento | 40 |
| 3.3.1. | Mantenimiento correctivo | 40 |
| 3.3.2. | Mantenimiento preventivo | 41 |
| 3.4. | Inspecciones | 43 |
| 3.4.1. | Inspección preventiva..... | 44 |
| 3.5. | Estrategias de mantenimiento | 44 |
| 3.5.1. | Mantenimiento programado | 45 |
| 3.5.2. | Mantenimiento reactivo | 46 |
| 3.5.3. | Mantenimiento de oportunidad | 46 |
| 3.5.4. | Rediseño por obsolescencia | 46 |
| 3.5.5. | Mantenimiento predictivo | 47 |
| 3.5.5.1. | Importancia del mantenimiento predictivo | 47 |
| 3.5.5.2. | Consideraciones generales al evaluar la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo | 49 |
| 3.5.6. | Mantenimiento proactivo | 51 |
| 3.6. | Mantenimiento centrado en la confiabilidad | 51 |

| | | |
|------------|--|----|
| 3.6.1. | Estrategias de mantenimiento basado en la confiabilidad para equipos móviles | 57 |
| 3.6.2. | Análisis causa raíz | 58 |
| 3.7. | Ciclo de vida aplicado al mantenimiento | 59 |
| 3.8. | Determinación de la vida útil | 62 |
| 3.9. | Inspección predictiva y mantenimiento predictivo | 63 |
| 3.9.1. | Técnicas principales en las que se basa el mantenimiento predictivo | 65 |
| 3.9.1.1. | Factores del mantenimiento predictivo | 65 |
| 4. | MANTENIMIENTO DE MOTORES DE TURBINA | 67 |
| 4.1. | Mantenimiento programado | 67 |
| 4.2. | Mantenimiento no programado | 68 |
| 4.3. | Fases de mantenimiento en motores de turbina de gas | 68 |
| 4.3.1. | Inspecciones operacionales de rutina | 70 |
| 4.3.1.1. | Inspección según tipo de servicio | 70 |
| 4.3.1.2. | Inspección según tipo de chequeo | 71 |
| 4.3.2. | Inspecciones no rutinarias | 72 |
| 4.3.2.1. | Inspecciones por medio de boroscopio | 73 |
| 4.3.2.2. | Procedimientos para detección de fallas en motores de turbina | 77 |
| 4.3.2.2.1. | Monitoreo de condiciones | 77 |
| 4.3.2.2.2. | Indicadores de falla | 78 |
| 5. | SISTEMAS DE LUBRICACIÓN | 79 |
| 5.1. | Funciones y requerimientos para los aceites lubricantes | 79 |
| 5.5.1. | Funciones del aceite de motor | 79 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 5.5.2. | Características de los aceites de turbina | 80 |
| 5.2. | Funcionamiento del sistema, descripción y componentes | 83 |
| 5.2.1. | Sistema de lubricación de cárter húmedo | 84 |
| 5.2.2. | Sistema de lubricación de cárter seco | 84 |
| 5.2.3. | Sistema de lubricación de tanque caliente | 85 |
| 5.2.4. | Sistema de lubricación de tanque frío | 85 |
| 5.3. | Lubricación de los cojinetes | 86 |
| 5.4. | Componentes del sistema de lubricación | 86 |
| 5.4.1. | Depósitos de aceite | 86 |
| 5.4.2. | Bombas de aceite | 87 |
| 5.4.3. | Válvulas de alivio de presión de aceite | 87 |
| 5.4.4. | Filtros de aceite | 87 |
| 5.4.5. | Filtros de última oportunidad | 88 |
| 5.4.6. | Detector de partículas magnéticas | 88 |
| 5.5. | Mantenimiento del sistema de lubricación | 92 |
| 5.5.1. | Análisis del aceite | 93 |
| 5.5.1.1. | Objetivos del análisis de aceite | 94 |
| 5.5.2. | Descripción de los principales métodos de análisis | 95 |
| 5.5.2.1. | Absorción atómica | 96 |
| 5.5.2.2. | Análisis espectroscópico | 97 |
| 5.5.2.3. | Muestreo de aceite lubricante | 100 |
| 5.5.2.4. | Ferrografía directa (Conteo de partículas) | 102 |
| 5.5.2.5. | Espectrofotometría de absorción atómica (detección de elementos presentes) | 103 |
| 5.5.2.6. | Ferrografía analítica | 105 |
| 5.5.2.6.1. | Ferrograma | 106 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.5.3. | Aplicaciones de los análisis de aceite y partículas en turbinas de gas para aeronaves | 110 |
| 6. | MODELO PROPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN LOS ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE Y DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS | 113 |
| 6.1. | Diseño del Programa | 115 |
| 6.1.1. | Establecimiento de metas y objetivos del programa | 116 |
| 6.1.2. | Selección del equipo, clasificación y codificación | 117 |
| 6.1.3. | Selección de la tecnología y el laboratorio de diagnostico adecuado | 118 |
| 6.1.4. | Elaboración de cronogramas de inspección inicial | 120 |
| 6.1.5. | Selección de <i>software</i> adecuado para almacenamiento y análisis de la información | 121 |
| 6.1.6. | Programa de entrenamiento | 122 |
| 6.1.7. | Creación del sistema de archivo histórico de los equipos e implementación del registro de inspecciones | 123 |
| 6.2. | Implementación del programa | 124 |
| 6.2.1. | Recopilación de datos iniciales y establecimiento de límites operativos | 124 |
| 6.2.2. | Establecimiento de interfases con los laboratorios de análisis | 126 |
| 6.2.3. | Entrenamiento al personal a cargo de la interpretación de los datos de laboratorio | 127 |
| 6.3. | Administración del programa | 128 |
| 6.3.1. | Desarrollo del manual de procedimientos | 128 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.3.2. | Medición continua de parámetros, establecimiento de líneas base y seguimiento de las tendencias para predecir modos de falla | 129 |
| 6.3.3. | Ajuste de la frecuencia de inspección y servicio | 132 |
| 6.3.3.1. | Factor de costo | 134 |
| 6.3.3.2. | Factor de falla | 135 |
| 6.3.3.3. | Factor de ajuste | 135 |
| 6.3.4. | Corrección de las fallas detectadas; documentación y archivo en el historial de mantenimiento del equipo para aumentar la capacidad de diagnóstico del programa | 138 |
| 6.4. | Expansión del programa | |
| 6.4.1. | Ajuste de metas y limitantes de los equipos | 139 |
| 6.4.2. | Establecimiento de la eficiencia del programa y medición de los beneficios obtenidos | 139 |
| 6.4.3. | Incorporación de más equipos al programa | 140 |
| | CONCLUSIONES | 143 |
| | RECOMENDACIONES | 145 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 147 |
| | APÉNDICE | 151 |
| | ANEXOS | 153 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Ejemplificación comparativa de las fuerzas de acción y reacción actuantes en dispositivos de propulsión, bajo la tercera Ley de Newton | 3 |
| 2. | Diagrama esquemático de los dispositivos de propulsión | 5 |
| 3. | Esquema de un sistema de propulsión de una aeronave mediante una hélice | 7 |
| 4. | Ciclo de Brayton de aire estándar | 20 |
| 5. | Ciclo de Brayton ideal para motores con ejes independientes | 25 |
| 6. | Esquema básico de un motor <i>turboprop</i> | 28 |
| 7. | Comparación de la eficiencia entre una hélice y un turboreactor | 31 |
| 8. | Motor <i>Pratt & Whitney PW</i> de la Serie 100 | 33 |
| 9. | Curva de la bañera o curva del ciclo de vida de un equipo | 61 |
| 10. | Curva de degeneración con la determinación de la vida útil | 62 |
| 11. | Esquema general de un equipo de boroscopio | 74 |
| 12. | Puertos de acceso para inspección boroscópica en un motor PW100 . | 75 |
| 13. | Diagrama de un fibroscopio | 76 |
| 14. | Configuración básica de un detector de partículas magnéticas | 89 |
| 15. | Localización de los detectores de partículas magnéticas en un motor PW100 | 90 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 16. | Efectos de la adición o reemplazo total del aceite con respecto a la concentración de partículas | 98 |
| 17. | Efecto causado por el súbito incremento en la concentración de partículas magnéticas, detectado mediante análisis de aceite lubricante | 99 |
| 18. | Diagrama esquemático de un sistema de conteo de partículas | 103 |
| 19. | Esquema del análisis espectrofotométrico | 104 |
| 20. | Preparación de un ferrograma | 107 |
| 21. | Preparación del ferrograma | 108 |
| 22. | Identificación de partículas | 109 |
| 23. | Optimización del mantenimiento | 117 |
| 24. | Ciclo del análisis de aceite tradicional | 126 |
| 25. | Ciclo propuesto para análisis de aceite | 127 |
| 26. | Reporte de laboratorio de análisis de aceite | 130 |
| 27. | Tendencia de la concentración de hierro y cromo presente en el aceite analizado | 131 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|--------------------------------------|
| hp | Caballos de potencia (Horsepower) |
| Cst | Centistoke |
| , | Coma |
| US\$ | Dólar americano |
| : | Dos puntos |
| NDT | Ensayo no destructivo |
| H | Entalpía |
| S | Entropía |
| F | Fuerza |
| - | Guión |
| °C | Grados Celsius |
| °F | Grados Fahrenheit |
| °R | Grados Rankine |
| kg | Kilogramo masa |
| km | Kilometro |
| kW | Kilowatt |
| lb | Libra masa |
| L | Litro |
| m | Metro |
| ml | Mililitro |

| | |
|-------------|--|
| mph | Millas por hora |
| No. | Número |
| # | Número |
| ' | Pie |
| % | Porcentaje |
| " | Pulgada |
| . | Punto |
| ; | Punto y coma |
| rpm | Revoluciones por minuto |
| TET | Temperatura de entrada de turbina |
| EGT | Temperatura de gas de escape |
| ITT | Temperatura intermedia de turbina |
| slug | Unidad de masa en el sistema ingles |
| V | Velocidad |
| W | Trabajo |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------------|---|
| Aditivo | Un material agregado a un aceite o combustible para cambiar sus características o cualidades. |
| Aeronavegabilidad | Estado o calidad de una aeronave o de un componente de una aeronave que permite un seguro funcionamiento de acuerdo a especificaciones. |
| Álabe de turbina | Una aleta montada en el disco de turbina, formada y colocada para extraer energía de los gases de escape para generar rotación en el disco. |
| Álabe guía | Sección de cables conductores estacionarios que dirigen el flujo de aire o gases desde una parte principal del motor hacia otra. |
| Ángulo de ataque | El ángulo entre la línea de cuerda de la sección de la aleta del propulsor y el viento relativo. |
| Arranque en caliente | Arranque de un motor, o intento de arranque, que resulta en un exceso de límites de temperatura en la turbina, lo que ocasiona un cociente excesivo aire-combustible. |

| | |
|------------------------------------|--|
| Balance dinámico | Condición en la que una masa se mantiene libre de vibración mientras se encuentra en movimiento: todas las fuerzas ejercidas en varias partes de la masa están balanceadas por fuerzas iguales y opuestas. |
| Caballo de fuerza | Cantidad de fuerza necesaria para mover 33.000 lb a través de una distancia de 1 pie en un minuto. |
| Cámara anular de combustión | Cámara de combustión con forma anular. |
| Cámara de combustión | Sección interior del motor, en donde es inyectado y quemado el combustible y que contiene el combustor. |
| Cociente de presión | En una turbina de gas, el cociente entre la presión de descarga del compresor y la presión de entrada del mismo. |
| Compresor | Sección del motor que actúa como una bomba de aire para incrementar la energía del aire recibido del ducto de entrada y es descargado dentro de la turbina. |
| Contramarcha de hélice | Causa la rotación en un ángulo negativo de los alabes de las hélice de un motor turboprop, produciendo un empuje contramarcha |
| Depuración | Remoción de los productos de combustión en el cilindro a través de una válvula o puerto de escape. |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Directriz de aeronavegabilidad | Directriz emitida por la Autoridad de Aviación Civil, en donde se indica la ejecución de ciertas inspecciones y/o reparaciones en modelos de aeronaves específicos, como motores, propulsores, rotores o equipo complementario, y establecer tiempos límites para realizar esas operaciones. |
| Ensayo | Elemento sensor que se extiende dentro del flujo de aire o de gas, para medir velocidad, presión o temperatura. |
| Estator | Columna de alabes guías estacionarios. |
| Fluido | Cualquier sustancia que posee partículas elementales que se mueven fácilmente una respecto la otra, tales como los líquidos y los gases. |
| Flujo de masa | Flujo de aire medido en slug/s |
| Hélice de abanderamiento | Rotación de las palas en una hélice para eliminar el arrastre de provocada por ésta en molinete, sobre una aeronave de motor múltiple durante la falla de un motor. |
| Impulsor | El rotor principal de un compresor radial que aumenta la velocidad del aire bombeado. |
| Inyector de motor | Cualquier motor que expulse un chorro de gas o fluido y obtiene todos o la mayoría de su empuje como reacción de la eyección. |

| | |
|--|--|
| Inyector | Un tubo pequeño que funciona como dispositivo por el cual fluye un gas u otro fluido. |
| Línea de cuerda | Línea imaginaria que se extiende desde el borde delantero hacia el borde trasero de una capa de aire. |
| Mantenibilidad | Probabilidad de que un sistema fallando se restaure en un tiempo específico, cuando el mantenimiento se realiza bajo condiciones determinadas. |
| Momento de torsión aerodinámica | Fuerza operacional en una hélice que provoca el incremento en el ángulo del alabe del propulsor. |
| Palanca de condición | Palanca en la cabina de mando utilizada para cambiar la dirección del paso de la hélice durante la operación beta, y además para seleccionar el flujo de combustible durante la fase de gobierno de la hélice. |
| Penetrante | Un fluido, usualmente líquido o posiblemente gas, que es usado para entrar de forma discontinua y detectar una falla. |
| Penetrante fluorescente | Penetrante que contiene un pigmento fluorescente para mejorar la visibilidad de indicaciones en la falla. |
| Propulsor automático | Propulsor que cambia el ángulo de los álabes en respuesta a fuerzas operacionales. |

| | |
|--|---|
| Propulsor | Dispositivo usado para convertir potencia de eje o torque en empuje en las propelas en la parte delantera de la aeronave. |
| Regulación de hélice | Un modo de operación del motor donde el regulador de hélice selecciona el paso en los alabes para controlar las revoluciones por minuto y el flujo de combustible es establecido manualmente. |
| Sobre temperatura | Cualquier temperatura de escape que exceda la temperatura mínima permitida para cierta condición de operación. |
| Sobre velocidad | Velocidad del motor que excede las revoluciones por minuto prefijadas para cierto porcentaje. |
| Temperatura de gas de escape | Temperatura del gas de escape a la salida de la última etapa de turbina. |
| Temperatura intermedia de turbina | Temperatura de gas medida en la entrada de la segunda etapa del estator montado de la turbina |
| Termopar | Un par de juntas de cables de dos metales disimiles. Una corriente directa de voltaje es producido en una junta cuando la otra junta está a una mayor temperatura. |
| Tobera de combustible | Dispositivo aspersor que dirige el combustible atomizado dentro de la cámara de combustión. |

| | |
|-------------------------------|---|
| Tracción | Fuerza impulsora ejercida por una masa contra otra, que genera movimiento. En propulsión a chorro, la fuerza en la dirección de movimiento causada por la presión de fuerzas reactivas sobre las superficies internas del motor. |
| Turbina de flujo axial | Turbina en la que la energía del movimiento del aire es convertida en poder en el eje cuando el aire sigue un patrón paralelo al eje de rotación de la turbina. |
| Turbina de gas | Motor que consiste en un compresor, un quemador o intercambiador de calor, una turbina, que usa fluidos gaseosos en el trabajo medio produciendo caballos de poder en el eje, empuje de chorro o ambos. |
| Turbina libre | Turbina que opera con ejes independientes para alta y baja presión del rotor. |
| Turbina | Dispositivo rotativo puesto en marcha por fuerzas directas o reactivas, o bien una combinación de ambas, usado para transformar parte de la energía cinética de los gases de salida en el eje de potencia para dirigir el compresor y sus accesorios. |
| Turbohélice | Tipo de turbina de gas que convierte la energía calorífica extraída de una sustancia, en trabajo en eje de la hélice y empuje a chorro. |

Turborreactor

Turbina de gas cuya propulsión de salida es enteramente dada por el chorro de gases a través del inyector de la turbina.

Viscosidad

Resistencia de un fluido a la deformación bajo el efecto de un esfuerzo de corte aplicado.

RESUMEN

Por definición, mantenimiento es la serie de trabajos a ejecutar sobre cualquier equipo, que tiene como finalidad prolongar la vida útil y aumentar la continuidad de servicio para el cual fue diseñado; pretende mantener la función que el equipo desempeña y procurando que ésta se vea afectada en la menor escala posible, enfocándose en aspectos tales como la calidad económica del servicio, la duración del equipo y los costos de mantenimiento. En el caso de los motores aeronáuticos la evaluación de los aspectos anteriores no es la excepción, pero a estos tres se le agrega el factor de la seguridad.

Desde los inicios de la aviación, el desarrollo de los motores utilizados para impulsar aeronaves ha debido superar una serie de obstáculos que han obligado a desarrollar y perfeccionar las técnicas de diseño y fabricación mediante la constante investigación científica, hasta llegar a convertirse en las piezas de tecnología de punta que hoy en día representan. Desde los primeros motores recíprocos de pistón hasta las modernas turbinas de gas, el mantenimiento de estos equipos ha jugado un papel fundamental para impulsar la industria de la aviación, en gran medida, gracias al desarrollo de nuevas filosofías, prácticas y técnicas de mantenimiento que han permitido incrementar la confiabilidad de los equipos y en consecuencia, incrementar la disponibilidad del servicio que éstos prestan.

En el capítulo 1 se expone el tema general sobre los motores de aviación, la teoría y las leyes físicas que intervienen en la propulsión aérea, y el desarrollo de los primeros motores de aplicación aeronáutica.

El capítulo 2 está exclusivamente dedicado al desarrollo de los motores de turbina de gas: su diseño, principios termodinámicos, variantes y aspectos generales.

En el capítulo 3 se amplía el tema de mantenimiento. Definiciones, tipos, filosofías y estrategias, también se trata de manera muy amplia el mantenimiento basado en la condición y basado en la confiabilidad.

El capítulo 4 se describen los temas relacionados al mantenimiento de motores de turbina de gas: definiciones de los diversos tipos de mantenimiento, inspecciones de rutina y no rutina, chequeos de los distintos sistemas del motor, inspecciones no invasivas y procedimientos especiales de mantenimiento.

El capítulo 5 se enfoca en el estudio de los sistemas de lubricación de los motores de turbina en forma amplia: funcionamiento, tipos de sistemas de lubricación, componentes de un sistema de lubricación, aceites lubricantes, prácticas de mantenimiento específicas al sistema de lubricación. En este capítulo se explican los métodos utilizados para analizar la condición de contaminación del aceite lubricante, así como el método de Ferrografía analítica, utilizado en la determinación del origen de las partículas metálicas que pudieran encontrarse suspendidas en el aceite.

En el capítulo 6 se presenta una guía modelo para la elaboración de programas de mantenimiento predictivo, los cuales toman como base para la investigación, el grado de contaminación presente en el aceite lubricante, y la identificación de la composición de las partículas magnéticas que pudieran ser recolectadas por los detectores magnéticos del sistema de lubricación. Para la obtención de resultados positivos es de gran importancia tener amplios conocimientos del equipo a estudiar, así como hacer uso de la tecnología adecuada, que permita al operador conocer las fuentes de

contaminación para actuar de forma proactiva sobre los componentes con evidencia de falla, y evitar así el paro inesperado del equipo.

OBJETIVOS

General

Sintetizar los aspectos generales relacionados con el diseño, funcionamiento y mantenimiento de los motores de turbina de gas de aplicación aeronáutica, de manera que éstos puedan ser utilizados en la elaboración de programas especiales de mantenimiento, orientados a incrementar la confiabilidad operacional de los equipos.

Específicos

1. Proporcionar un marco conceptual generalizado de los principios teóricos, de diseño y funcionamiento de los motores de aviación.
2. Conocer de forma general los aspectos técnicos comprendidos en el mantenimiento de motores aeronáuticos, haciendo énfasis en los sistemas de lubricación.
3. Proponer y desarrollar una guía para la elaboración de un programa de mantenimiento basado en el mantenimiento predictivo, que permita monitorear y anticipar con precisión las causas que pudieran originar la falla de los componentes críticos en un motor aeronáutico, tomando como base la información obtenida de los análisis efectuados al aceite lubricante y a las partículas magnéticas recolectadas por los detectores magnéticos.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria de la aviación continúa siendo una de las industrias más seguras, confiables y de las que mayor potencial de transferencia tecnológica tiene hacia las áreas de transporte, desarrollo de materiales, electrónica, informática, telecomunicaciones, entre muchas más.

Gracias al desarrollo continuo de la aeronáutica, se pudo llevar al hombre al espacio exterior; logros que han sido posibles mediante la constante investigación y aplicación científica en el desarrollo de aeronaves más rápidas, seguras y confiables, así como también, a la mejora continua exigida para mantener los más altos estándares de calidad en sus distintos procesos.

Los pilares en que se sostiene la industria aeronáutica son, esencialmente, la seguridad y la eficiente prestación del servicio de los equipos. La meta principal de toda compañía que se dedique al transporte aéreo, es que estos principios puedan ser cumplidos, por lo que es necesario establecer objetivos que garanticen el cumplimiento de estos principios mediante el trabajo continuo y comprometido de todas las áreas de las industrias relacionadas con el diseño, fabricación, operación y mantenimiento de aeronaves.

Los factores de importancia en el mantenimiento de aeronaves, dada la complejidad de su organización, radican principalmente en la cuidadosa programación y el estricto control en la ejecución de las tareas de mantenimiento a efectuarse en las distintas áreas y en los diversos componentes individuales; es en esta división donde la

importancia de dichos controles es crítica. El cumplimiento de las tareas de mantenimiento está estrechamente ligado a los controles de disponibilidad de repuestos en almacenes, compra de partes, estimación de mano de obra, contratación de servicios especializados, rotación de partes, etc.

Uno de los rubros más costosos de mantenimiento en los que incurre una compañía aérea es la reparación de sus motores. Dada la importancia de estos elementos y por el impacto económico que su mantenimiento representa a las empresas, es lógico pensar que para mantenerlos en condiciones óptimas de funcionamiento, es prioritario invertir en capital humano y herramientas especializadas.

El propósito del presente trabajo de graduación es dar a conocer de manera general los aspectos principales del funcionamiento, diseño y mantenimiento de los motores de turbina, que servirán de guía para presentar un modelo para elaboración de programas de mantenimiento que permitan al usuario mantener el control constante de las condiciones internas del motor, usando para este fin, los datos proporcionados por el análisis del aceite lubricante y el análisis ferrográfico de las partículas magnéticas presentes en el circuito de lubricación.

Dicho programa pretende mantener operando el motor por el máximo periodo de tiempo posible previsto por el fabricante, sin que se produzcan daños colaterales en otros componentes, en caso de falla, mediante la implementación de una estrategia de mantenimiento adecuada que permita medir las tendencias de operación del motor y mediante la constante búsqueda de evidencia física de desgaste y contaminación, en los sistemas de lubricación.

1. MOTORES DE AVIACIÓN

1.1. Fundamentos de la propulsión

1.1.1. Energía potencial y energía cinética

Energía es la capacidad para hacer trabajo. Trabajo, en el sentido mecánico de la palabra, es la realización de una operación productiva por algunos medios mecánicos, y se efectúa cuando se aplica una fuerza a través de una distancia. Cuando un cuerpo se encuentra estacionario, a menudo tiene energía debida a su posición en relación a los demás cuerpos en el espacio, esto se llama energía potencial, porque el cuerpo tiene capacidad potencial para hacer trabajo. Si el cuerpo se mueve, tiene energía cinética, o energía debida al movimiento.

En la práctica, la energía puede transformarse, pero no todos los tipos de energía pueden recuperarse cuando la transformación está hecha. Por ejemplo, cuando se usa la electricidad para girar un motor eléctrico, una parte de la energía eléctrica cambia en calor a causa de la fricción, por lo tanto, la energía calorífica generada se perderá en el aire, solamente la energía mecánica del eje del motor estará disponible para efectuar trabajo. Debido a la transformación del tipo de energía, es posible la propulsión a chorro; esto se hace, transformando la energía química del combustible en energía calorífica, y luego en energía mecánica para acelerar el aire a través del motor, siendo esta aceleración la principal responsable de que una aeronave se mueva.

1.1.2. Leyes de Newton del movimiento

Muchas de las cosas que ocurren en un motor de turbina de gas pueden explicarse por medio de una o más de las leyes del movimiento de Newton.

1.1.2.1. Primera Ley de Newton

Un cuerpo en reposo permanecerá en este estado a menos que sea modificado por una fuerza exterior.

Una segunda parte de la primera Ley de Newton dice que un cuerpo en movimiento continuará moviéndose en línea recta a una velocidad uniforme hasta que sea alterada por una fuerza exterior. Al funcionamiento del motor de reacción no le concierne esta parte de la ley.

1.1.2.2. Segunda Ley de Newton

Explica que el cambio en el movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza aplicada. Esto se puede decir de otra forma: que una fuerza proporcional a la relación de cambio de la velocidad se produce cuando quiera que un cuerpo o masa se acelera.

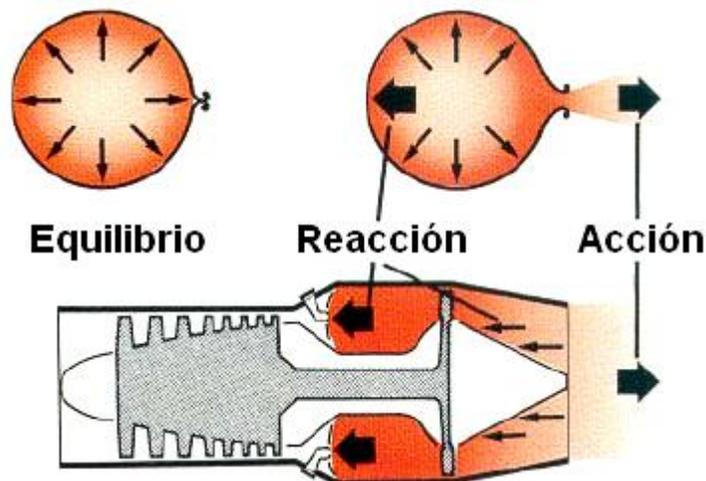
1.1.2.3. Tercera Ley de Newton

Esta Ley expresa que para cada acción, hay siempre una reacción igual y contraria a la fuerza aplicada. Para ilustrar la relación que ésta tiene con respecto al funcionamiento de un motor de turbina, se supondrá un globo como motor a reacción, con el fin de simplificar el análisis de las fuerzas actuantes en su funcionamiento:

Cuando un globo se infla con aire a temperatura ambiente y la boquilla se mantiene cerrada, de forma que ningún aire pueda escapar, el globo permanece sin movimiento sobre una mesa, debido a que la presión del aire en el interior del globo actúa uniformemente sobre la pared del mismo en todas las direcciones. Ninguna fuerza es ejercida que haga al globo moverse.

Cuando la boquilla del globo se abre, el aire escapa a través de la misma, debido a que ahora existe un escape que impide contener el aire uniformemente en el interior del globo, produciendo fuerzas desequilibradas sobre el mismo, y liberando la fuerza que originalmente presionaba sobre el área que estaba cerrada por la boquilla. La fuerza aplicada al resto de la superficie del globo permanece como estaba antes. Consecuentemente, el desequilibrio de presión resultante, hace que el globo se mueva en la dirección opuesta a la boquilla.

Figura 1. **Ejemplificación comparativa de las fuerzas de acción y reacción actuantes en dispositivos de propulsión, bajo la tercera Ley de Newton**



Fuente: <http://www.thejetengine.net>

Es el desequilibrio de las fuerzas en el interior del globo (o motor de turbina de gas, cohete, pulsorreactor o estatorreactor), lo que le da a todos los motores de reacción su nombre. Esta es la razón, por la que los motores de reacción son capaces de producir empuje sin apoyarse verdaderamente en el aire, al exterior de sus toberas de salida. Ambas, la "acción" y la "reacción", fuerzas descritas por Isaac Newton, tienen lugar dentro del motor.

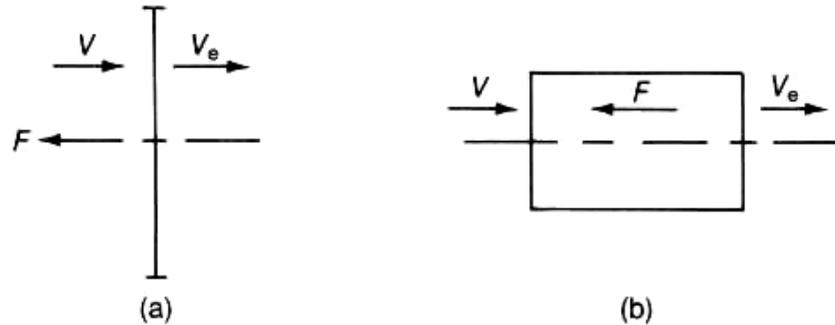
1.2. Propulsión

Todas las plantas de poder, que en la actualidad impulsan aeronaves, funcionan con base en el mismo principio elemental; todos admiten aire a una velocidad particular y descargan aire a la atmósfera a una velocidad más alta, produciéndose así una fuerza propulsora llamada empuje.

Para el caso de los motores de hélice, la producción del empuje puede modelarse esquemáticamente, de la forma como se muestra en la figura 2 (a). Aunque una hélice emplea varias aspas o palas, se supone que forman un disco completo al girar. El aire entra a la hélice con una velocidad de avance (V) de la aeronave, y sale con una velocidad más alta (V_e), este incremento produce el empuje (F).

Para el siguiente análisis, se asume que el aire a ambos lados de la hélice se encuentra a la misma presión atmosférica. También se supone que el aire sale de la hélice en dirección axial, sin rotación.

Figura 2. Diagrama esquemático de los dispositivos de propulsión



Fuente: <http://www.thejetengine.net>

Para el caso de los motores turboreactor y turboventilador, la producción del empuje se muestra en la figura 2 (b). Siempre y cuando la expansión en la tobera sea hasta alcanzar la presión atmosférica (una diferencia de presión crearía una fuerza adicional, que se ignora en el presente análisis), y la velocidad sea constante a través de la salida, el empuje resultante también se puede calcular por medio de la ecuación:

ecuación 1

$$F = \dot{m} * (V_e - V)$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico

F = empuje

V_e = velocidad final de la aeronave

V = velocidad inicial de la aeronave

Puede apreciarse en la ecuación que el empuje se logra por medio de un flujo másico de aire a través del dispositivo, relacionado con un incremento en la velocidad. Por lo tanto, puede lograrse un empuje particular, si se tiene un gran flujo másico de aire y un pequeño incremento en la velocidad. Por el contrario, es posible lograr el mismo empuje, por medio de un pequeño flujo másico de aire y un alto incremento de la velocidad. Para lograr una mejora en la obtención de un empuje mayor, es necesario introducir otro parámetro de rendimiento: la eficiencia de propulsión.

Considerando una hélice como parte de un sistema de aeronave, tal y como se muestra en la figura 3, la aeronave se mueve hacia adelante con la velocidad V relativa a un observador que se encuentra en tierra. En relación con la hélice, el aire entra con una velocidad V y sale con una velocidad V_e . Esto da un empuje resultante F que impulsa a la aeronave a la velocidad V . La rapidez de trabajo realizado sobre la aeronave es:

Ecuación 2

$$W_a = F * W$$

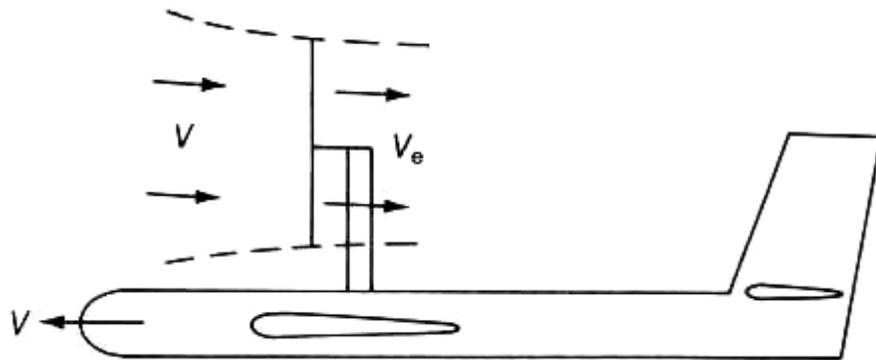
Donde:

W_a = trabajo efectuado sobre la aeronave

F = empuje

V = velocidad inicial de la aeronave

Figura 3. Esquema de un sistema de propulsión de una aeronave mediante una hélice



Fuente: <http://www.thejetengine.net>

Sustituyendo para el empuje F :

ecuación 3

$$W_a = \dot{m} * V * (V_e - V)$$

Donde:

W_a = trabajo efectuado sobre la aeronave

\dot{m} = flujo másico

V_e = velocidad final de la aeronave

V = velocidad inicial de la aeronave

Para lograr este empuje se aumenta la velocidad del aire a través de la hélice. Esto significa que la energía cinética del flujo de aire aumenta y que el suministro de potencia a la hélice debe igualar la razón de cambio de la energía cinética:

ecuación 4

$$W_a = \dot{m} * (V_e^2 - V^2)$$

Donde:

W_a = trabajo efectuado sobre la aeronave

\dot{m} = flujo másico

V_e = velocidad final de la aeronave

V = velocidad inicial de la aeronave

La eficiencia de propulsión es una medida de la rapidez de trabajo efectuado sobre la aeronave en comparación con el suministro de potencia a la hélice. Si se sustituyen ecuaciones 3 y 4 se obtiene:

ecuación 5

$$\mu_{prop} = \frac{W_a}{W_p}$$

Sustituyendo Ecuación 3 y 4 en 5:

$$\mu_{prop} = \frac{\dot{m} * V * (V_e - V)}{\dot{m} * (V_e^2 - V^2)}$$

Entonces:

ecuación 6

$$\mu_{prop} = \frac{V}{V_e + V}$$

Donde:

μ_{prop} = eficiencia de propulsión

V_e = velocidad final de la aeronave

V = velocidad inicial de la aeronave

Por tanto, la ecuación obtenida para la eficiencia de propulsión, también es verdadera para un motor turborreactor. También es aplicable para motores *turbofan*, en donde el chorro de aire frío (aire de *bypass*) y el chorro de gases calientes procedentes del generador de gas se mezclan antes de fluir a través de una sola tobera.

1.3. Motores de aviación

1.3.1. Desarrollo de los motores de aviación

El desarrollo de plantas de poder para aviación se traduce en el resultado de la utilización de los principios empleados en el desarrollo de los primeros motores de combustión interna. Durante la última parte del siglo XIX un buen número de motores fueron diseñados, construidos y utilizados para operar maquinarias de forma exitosa, proveyendo potencia para vehículos que anteriormente eran tirados por caballos.

Desde que el primer motor de combustión interna fuera operado exitosamente, diversos tipos de motores fueron diseñados y desarrollados, muchos de los cuales eran de uso apropiados para propulsar tanto vehículos como aeronaves, y otros, simplemente fallaron. Dichas fallas eran atribuidas a una baja eficiencia, carencia de seguridad en el servicio (ocasionado por pobre diseño y materiales que no soportaban las condiciones operativas), altos costos de operación, peso excesivo para la potencia obtenida, entre algunas otras deficiencias.

El reto para la industria de la aviación ha sido diseñar y desarrollar motores con elevadas relaciones de potencia/peso. Este objetivo ha sido cumplido, primero, con los livianos motores a pistón y de ahí, con los motores de turbina de gas.

De forma resumida, durante el desarrollo y evolución de los motores de aviación, se han dado de forma paralela diversos avances en el diseño, construcción y aplicaciones de estas máquinas. En consecuencia, el producto de este desarrollo acelerado, ha dado como resultado diversas transformaciones de en las plantas de potencia, siendo clasificados algunos de los avances y variaciones como se presenta a continuación:

- Motores a pistón
 - En línea hacia arriba
 - En línea invertidos
 - En V hacia arriba e invertidos
 - En doble V
 - Cilindros opuestos
 - En X
 - Radiales simples
 - Radiales dobles
 - Radiales múltiples

- Motores Jet
 - Turborreactor
 - *Prop-fan*
 - *Turbojet*
 - *Turbofan*

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

- *Turboprop*
- *Turboshaft*

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

2. MOTORES DE TURBINA

2.1. Desarrollo de las turbinas de gas

La turbina de gas es una planta de poder, que produce una gran cantidad de energía considerando su tamaño y peso. Su diseño compacto, bajo peso, la amplia gama de combustible a utilizar y la flexibilidad que ofrece, la convierte en la planta de poder ideal para aplicaciones en transporte, como operaciones de corta duración en tierra que requieran de una fuente de poder y plataformas en altamar.

La turbina de gas ha experimentado un progreso y crecimiento exponencial desde su primer desarrollo exitoso en la década de 1930. Las primeras turbinas de gas construidas entre 1940 y 1950, tenían eficiencias de ciclo sencillo de alrededor del 17%, debido a las bajas eficiencias del compresor, la turbina, y las bajas temperaturas de los gases en la sección de la turbina ocasionadas por las limitaciones en la metalurgia de esa época.

Los motores de turbina desarrollados por la industria aeroespacial han sido los líderes, en lo referente a desarrollo y tecnología en motores de turbina. El criterio para el diseño de estos motores se basa en una alta confiabilidad, alto desempeño, continuos ciclos de arranques y paradas, para poder operar de manera flexible misiones aéreas de toda índole. Una buena estimación de la vida promedio para estos motores, según criterios de diseño, es de 3500 horas entre inspecciones mayores (*Overhauls*). El desempeño de un motor para aplicación aeroespacial está dado en función de su relación empuje/peso.

El incremento en la relación empuje/peso ha sido alcanzado mediante el desarrollo de paletas de compresor con relaciones de alto aspecto, así como también por la optimización de las temperaturas de encendido en la cámara de combustión y la optimización en las relaciones de presiones a la entrada y salida de la sección de turbinas, todos con el objetivo de obtener la máxima salida de potencia por unidad de flujo.

2.2. Consideraciones en el diseño de turbinas de gas

Para todo diseño de turbinas de gas existen criterios esenciales que deben ser considerados, los cuales están basados en la experiencia y las consideraciones operacionales. Algunos de estos criterios se mencionan en orden de importancia:

- Alta eficiencia
- Alta confiabilidad, y en consecuencia alta disponibilidad
- Facilidad de servicio
- Facilidad de instalación y operación
- Conformidad con los estándares ambientales
- Incorporación de sistemas y controles auxiliares, los cuales deben tener un alto grado de confiabilidad
- Flexibilidad para cumplir con distintas operaciones y operación con distintos combustibles

El cumplimiento de estos criterios permitirá al usuario final tener una mayor comprensión de los requerimientos al operar una turbina de gas. Siendo los factores que más afectan la eficiencia de las turbinas, los siguientes:

- Incremento en la relación de presión: éste tiene como consecuencia el incremento de la eficiencia térmica de la turbina, cuando ésta es acompañada también de un incremento en la temperatura de encendido. El incremento en la relación de presión aumenta la eficiencia total a una determinada temperatura, independientemente, incrementando la relación de presiones más allá de cierto valor a una temperatura de encendido dada, puede resultar en una disminución de la eficiencia total del ciclo. Esto causa que el compresor sea más intolerante a la formación de suciedades en el filtro de aire en la admisión y en las paletas del compresor, creando así grandes caídas de eficiencia del ciclo y en el desempeño del motor.
- Efecto de la temperatura: es altamente predominante. Se ha estimado que aproximadamente por cada 100°F (55.5°C) de incremento en la temperatura, la potencia a la salida, incrementa aproximadamente 10% y se obtiene alrededor de 1-1.5% de incremento en la eficiencia, siendo éste el enfoque primario que los constructores de turbinas de gas han asumido para mejorar la eficiencia de éstas.

Las temperaturas de entrada a la turbina han aumentado su estabilidad, desde alrededor de 540°C (1000°F) en 1940 hasta 1425°C (2600°F) actualmente. Estos incrementos han sido posibles gracias al desarrollo de nuevos materiales y a las novedosas técnicas de enfriamiento para los componentes; tales como revestir las aspas de la turbina con capas cerámicas, y el enfriamiento de las aspas en la turbina con aire de descarga del compresor.

Alcanzar una alta disponibilidad y confiabilidad son dos de los más importantes parámetros en el diseño de una turbina de gas, donde; la disponibilidad de una planta de poder, se define como el porcentaje del tiempo que la planta se encuentra disponible para generar potencia en cualquier periodo dado, mientras que la confiabilidad de la planta, es el porcentaje del tiempo entre las reparaciones planificadas.

La disponibilidad de una planta de potencia se define como:

ecuación 7

$$A = \frac{(P - S - F)}{P}$$

Donde:

A = disponibilidad de la planta

P = periodo de tiempo (en horas), usualmente asumido como un año, que equivale a 8760 horas

S = estimado de horas fuera de operación de la planta, por trabajos mayores previamente planificados

F = horas fuera de operación, debido a paros forzados no planificados por reparaciones

La confiabilidad de una planta de potencia queda definida como:

Ecuación 8

$$R = \frac{(P - F)}{P}$$

Donde:

- R = confiabilidad de la planta
- P = periodo de tiempo (en horas), usualmente asumido como un año, que equivale a 8760 horas
- S = estimado de horas fuera de operación de la planta, por trabajos mayores previamente planificados
- F = horas fuera de operación, debido a paros forzados no planificados por reparaciones

El mayor impacto por la disponibilidad y confiabilidad se encuentra en la economía de la planta. La confiabilidad es esencial en la medida que, cuando el servicio que la planta provee se requiere, el mismo se encuentre disponible en el momento que éste es requerido. Ésta depende de muchos parámetros, tales como: el tipo de combustible, el cumplimiento de los programas de mantenimiento preventivo, el modo de operar, los sistemas de control, la temperatura en la cámara de combustión, etc.

La facilidad para ejecutar operaciones de mantenimiento, es una parte importante de cualquier diseño, desde el punto de vista en que la reducción de los tiempos de retorno a servicio en el mantenimiento resulta en alta disponibilidad para una turbina, traduciéndose en reducción de costos de operación y mantenimiento.

Un servicio de rutina puede ser cumplido bajo ciertas condiciones ejecutadas apropiadamente, tales como: monitoreo de la temperatura de los gases de escape, monitoreo de vibraciones de los ejes y monitoreo de sobrecargas.

Adicionalmente, el diseñador debe tomar en consideración la incorporación de puertos de inspección boroscópica, con el fin de poder efectuar evaluaciones visuales de las partes sometidas a altas temperaturas, de forma rápida. Carcasas divididas de fácil desarme, puertos especialmente dispuestos para efectuar balanceo de discos, cámaras de combustión y combustores de fácil acceso para desensamble, sin necesidad de desmontar la sección caliente en su totalidad, son algunas de las muchas formas en las que puede darse mantenimiento a una turbina.

Los sistemas auxiliares y de control deberán ser diseñados cuidadosamente, ya que a menudo son responsables de muchos de los paros no programados en muchas unidades. Los sistemas de lubricación son uno de los sistemas auxiliares más críticos en el diseño y operación de turbinas, ya que éstos deben estar provistos de un sistema de soporte, en caso de falla y deben ubicarse estratégicamente cerca de los puntos con alta incidencia de falla.

2.3. Ciclo termodinámico de las turbinas de gas

2.3.1. El ciclo de Brayton de aire estándar

Las turbinas de gas operan bajo el ciclo de Brayton (o de Joule). La sustancia de trabajo, usualmente aire, es comprimida adiabáticamente a alta presión, donde el calor es añadido a presión constante para elevar la temperatura, a tal punto que luego, los gases calentados se expandan adiabáticamente, y vuelvan a la presión original (ambiente).

Debido a la expansión de los gases a alta temperatura, el trabajo extraído en el proceso de expansión, excede al trabajo requerido para la compresión por una

cantidad que equivale a la salida neta de trabajo del ciclo. El ciclo se completa a la salida de los gases por el escape, a la presión ambiente con rechazo de calor. Al final del proceso de expansión la sustancia de trabajo posee una temperatura más alta que la que tenía originalmente al inicio del ciclo, la cual equivaldrá al calor de desecho que se disipa al ambiente a presión constante. Una característica única del ciclo ideal de Brayton, es que los procesos de adición y rechazo de calor se llevan a cabo a presión constante, éstos permiten el libre movimiento de la sustancia de trabajo por sí misma.

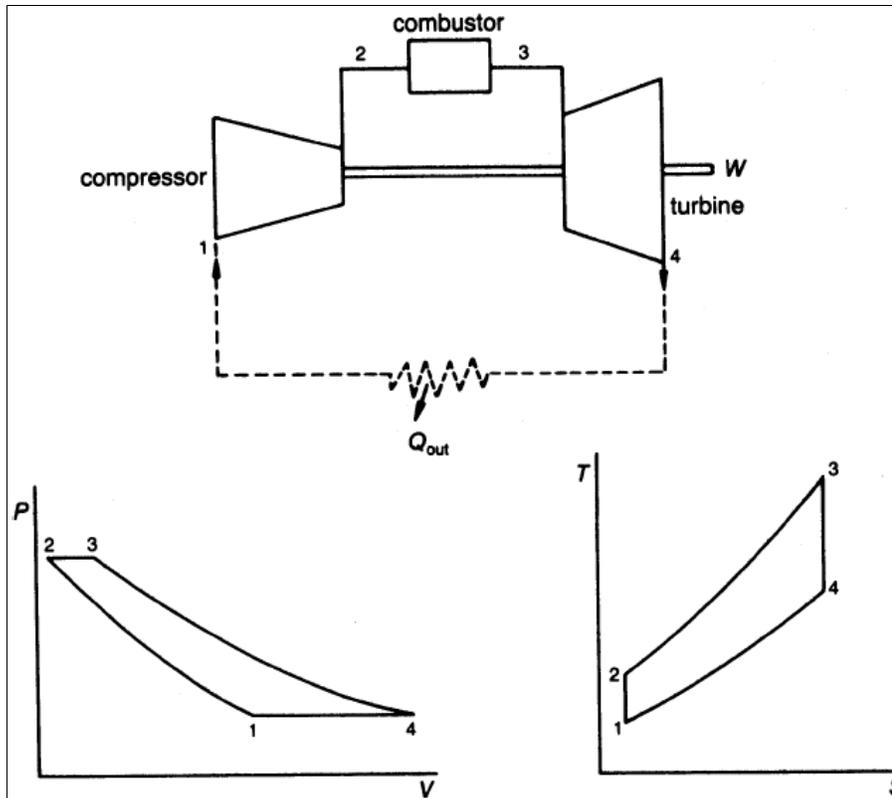
Cuando compresores y turbinas se encuentran acoplados bajo el principio de una turbomaquinaria rotativa, la turbina de gas actúa por completo como un motor de flujo continuo. (Referencia bibliográfica No. 3).

El ciclo de turbina de gas abierto puede modelarse como un ciclo cerrado mediante las suposiciones de aire estándar. El ciclo ideal que el fluido de trabajo experimenta en este período está integrado por cuatro procesos internamente reversibles:

- 1-2 Compresión isentrópica (en un compresor)
- 2-3 Adición de calor a presión constante
- 3-4 Expansión isentrópica (en la turbina)
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante

El ciclo ideal de Brayton consiste en dos procesos isobáricos y dos isentrópicos. Los dos procesos isobáricos se desarrollan en la cámara de combustión (generador de gas), y en el proceso de rechazo de calor hacia el medio ambiente. Los dos procesos isentrópicos los representan la compresión por medio del compresor, y el proceso de expansión en la turbina (ver figura 4).

Figura 4. Ciclo de Brayton de aire estándar



Fuente: Meherwan Boyce. **Gas turbine engineering handbook**. Pág. 59

Una simplificación de la primera ley de la termodinámica para el ciclo ideal de aire estándar de Brayton, asumiendo que no hay cambios en la energía cinética y potencial, mostrado en la figura 4 tiene las siguientes relaciones:

Trabajo del compresor:

ecuación 9

$$W_c = \dot{m}_a (h_2 - h_1)$$

Trabajo de la turbina:

ecuación 10

$$W_t = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3 - h_4)$$

Salida de potencia total:

ecuación 11

$$W_{cyc} = W_t - W_c$$

Calor añadido al sistema:

ecuación 12

$$Q_{2,3} = \dot{m}_f x C_{p_{comb}} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3) - \dot{m}_a h_2$$

Resumiendo, la eficiencia total del ciclo es:

ecuación 13

$$\eta_{cyc} = \frac{W_{cyc}}{Q_{2,3}}$$

Donde:

η_{cyc} = eficiencia total del ciclo

W_{cyc} = potencia total

$Q_{2,3}$ = calor añadido al sistema

Incrementando la relación de presiones y la temperatura de encendido se incrementa la eficiencia del ciclo de Brayton. Esta relación de la eficiencia total del ciclo está basada en ciertas simplificaciones y suposiciones tales como:

- a) $\dot{m}_a \gg \dot{m}_f$
- b) El gas es calorífica y térmicamente perfecto, lo que significa que el calor específico a presión constante (C_p) y el calor específico a volumen constante (C_v) son constantes, por lo que la relación de calores específicos γ permanece constante a través del ciclo;
- c) La relación de presiones (r_p) tanto para el compresor como para la turbina son las mismas, y
- d) Todos los componentes operan al 100% de eficiencia

Con estas suposiciones, el efecto de la eficiencia del ciclo ideal como una función de la relación de presiones para el ciclo de Brayton ideal, operando entre temperaturas ambiente y la temperatura de la cámara de combustión está dada por la siguiente relación:

ecuación 14

$$\eta_{ideal} = \left(1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right)$$

Donde:

r_p = relación de presiones, y

γ = relación de calores específicos

La ecuación anterior tiende a tener valores muy altos conforme las relaciones de presión van aumentando.

Asumiendo que la relación de presión es la misma en el compresor y la turbina, las siguientes relaciones se mantienen usando la relación de presión en el compresor:

ecuación 15

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Y usando la relación de presión en la turbina

ecuación 16

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_4}{T_3}$$

Cuando se analizan los efectos en el ciclo real, los efectos de las eficiencias del compresor, como el de la turbina, deben ser tomados en cuenta, para obtener la eficiencia total del ciclo entre la temperatura de encendido T_f y la temperatura ambiente T_{am} de la turbina. Esta relación está dada por:

ecuación 17

$$\eta_{Ciclo} = \left[\frac{\eta_t T_f - \frac{T_{amb} r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\eta_c}}{T_f - T_{amb} - T_{amb} \left(\frac{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\eta_c} - 1 \right)} \right] \left[1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right]$$

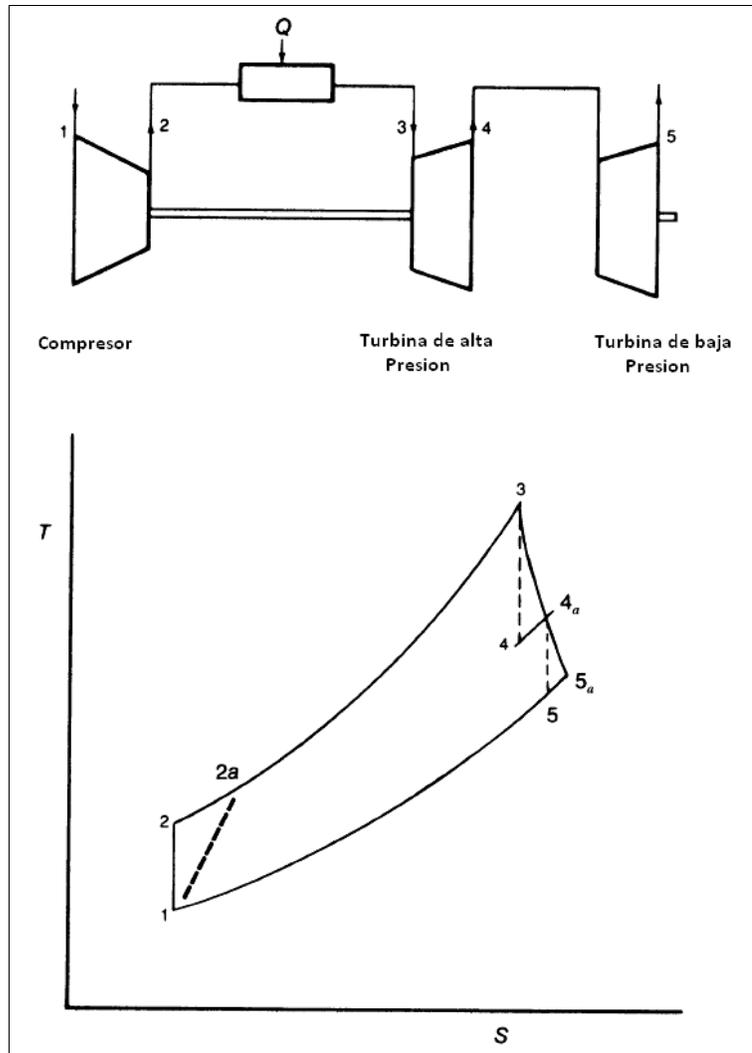
En consecuencia, de las anteriores ecuaciones puede deducirse que la eficiencia total del ciclo de Brayton puede mejorarse, incrementando la relación de presiones o incrementando la temperatura a la entrada de la turbina, y el trabajo por lb (o kg) de aire puede ser incrementado mediante el incremento de las relaciones de presión, o incrementando la temperatura de entrada a la turbina, o bien reduciendo la temperatura a la entrada del compresor.

Al analizar los ciclos reales, debe considerarse, que tanto la salida total de trabajo y la eficiencia del ciclo real son considerablemente menores a los correspondientes obtenidos durante el análisis del ciclo teórico, dado a los efectos de las eficiencias individuales del compresor, quemadores y de la turbina, así mismo por las pérdidas de presión dentro del sistema.

2.3.2. Ciclo de Brayton simple para motores con ejes independientes

El ciclo simple utilizado en motores con ejes independientes (concéntricos), es el más utilizado para aplicaciones en las cuales se demanda alto torque combinado con altas cargas variables. La figura 5 muestra esquemáticamente el ciclo simple de ejes independientes.

Figura 5. Ciclo de Brayton ideal para motores con ejes independientes



Fuente: Meherwan Boyce. **Gas turbine engineering handbook**. Pág. 71

La primera turbina tiene como función principal mover el compresor; la segunda es utilizada como fuente de potencia. Puede asumirse que el número de etapas en un motor que opera bajo el principio del ciclo de eje independiente es mayor que el de un motor que opera bajo el ciclo simple de eje sencillo, y que por lo tanto es ligeramente más eficiente que un ciclo de eje simple, debido al efecto de recalentamiento al que se somete la sustancia de trabajo entre las etapas de expansión en la turbina. Sin

embargo, si el número de etapas es el mismo, no hay un cambio en la eficiencia total del ciclo.

Del diagrama temperatura-entropía se pueden encontrar ciertas relaciones entre las turbinas, dado que el trabajo de la turbina de alta presión es mover el compresor; las ecuaciones utilizadas son:

ecuación 18

$$h_{4a} = h_3 - W_{ca}$$

ecuación 19

$$h_4 = h_3 - \left(\frac{W_a}{\eta_t} \right)$$

Por lo que, la salida de trabajo puede ser representada mediante la relación:

ecuación 20

$$W_a = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_{4a} - h_5)\eta_t$$

En este ciclo, el primer eje soporta al compresor y a la turbina que lo mueve, mientras el segundo eje soporta al conjunto de turbina libre que mueve la carga aplicada al motor. Los dos ejes pueden operar completamente a diferentes velocidades e incluso en distinta dirección. La ventaja que tiene una turbina de gas con este sistema de ejes separados, es su alto torque producido a bajas velocidades, producidos por medio de la turbina de potencia libre montada en las últimas etapas del motor. La reducción de velocidad se efectúa mediante una caja reductora de engranes montada en el eje de salida.

Alto torque a bajas revoluciones es de uso conveniente en aplicaciones automotrices, pero ofrece muy pocas ventajas si la turbina es utilizada para operaciones con potencia plena a velocidades constantes. Su uso es recomendable y limitado en aplicaciones que demanden potencia mecánica variable.

Esta disposición de ejes separados es ampliamente utilizada en motores *turbofan* y *turboprop*. En el caso de este último, debido a que el motor desarrolla su potencia para mover un conjunto de palas que moverán grandes masas de aire, demandando un alto torque, en lugar de empuje a la salida de la turbina.

2.4. El motor *Turboprop*

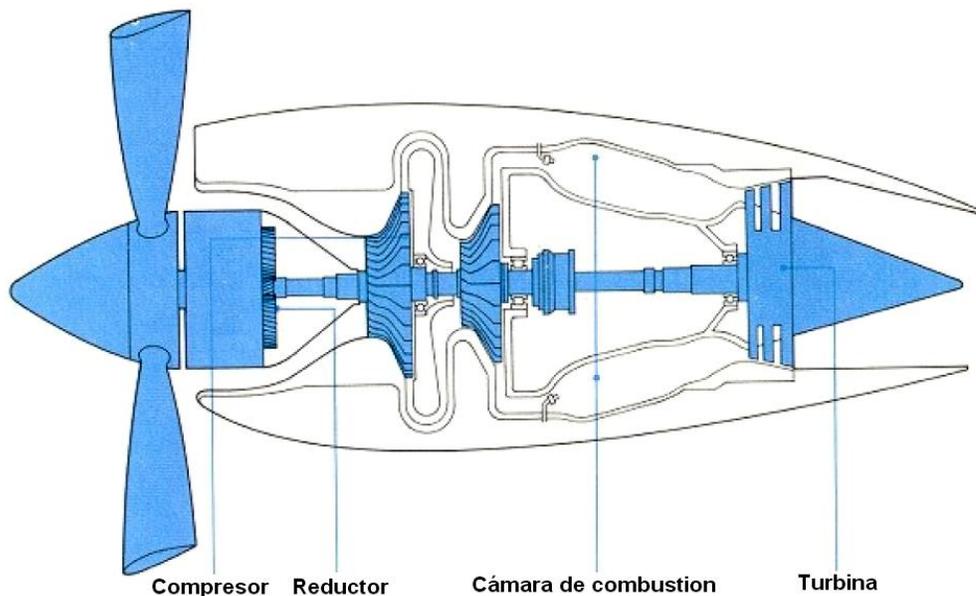
Los motores de turbina a gas en combinación con un ensamble de caja reductora y una hélice o propela, han sido utilizados durante muchos años y han probado ser la fuente de potencia más eficiente para impulsar aeronaves que operan en rangos de velocidad de 300 y 450 millas por hora. Estos motores han probado tener el mejor consumo específico de combustible que cualquier otro motor de turbina a gas, y se desempeñan a la perfección, tanto en alturas a nivel del mar como en grandes altitudes (arriba de los 20 000 pies).

A diferencia de un turboreactor que está diseñado para acelerar una masa de flujo de aire relativamente baja, a una alta velocidad de escape, inversamente, un Turboprop está diseñado para acelerar una gran masa de flujo de aire a baja velocidad. Esto como resultado provee un rendimiento inmejorable de combustible, a costa de la velocidad de vuelo y el ruido en cabina.

El ciclo termodinámico es igual al del reactor puro. En el reactor puro, la propulsión es el resultado de la reacción sobre la masa acelerada, en tanto que en el turboprop se obtiene por medio de la tracción de la hélice que recibe la energía procedente de la aplicada a la turbina que la mueve. La velocidad de salida de los gases de escape es pues, ya muy reducida, porque la energía cinética de los gases en la expansión ha sido captada, casi en su totalidad, por las turbinas para mover al compresor o compresores y la hélice. Sólo un pequeño empuje residual se obtiene en el turborreactor base, procedente de la energía que aún queda en la expansión después de la última turbina, pero este empuje es muy pequeño comparado con la tracción de la hélice.

Aunque, una gran variedad de nombres han sido aplicados a estas combinaciones de turbina y propela, el más ampliamente aceptado es *turboprop*. Otro nombre popularmente aceptado también es *propjet*.

Figura 6. Esquema básico de un motor *turboprop*



Dentro de las principales características y usos del turbohélice pueden citarse:

- Alto rendimiento propulsivo a bajas velocidades: lo cual resulta en cortas carreras de despegue que disminuyen rápidamente a medida que la velocidad aumenta. El motor es capaz de desarrollar alto empuje a bajas velocidades, porque la hélice puede acelerar grandes cantidades de aire a partir de velocidad 0 hacia delante del avión;
- Diseño más complicado y más pesado que un turboreactor;
- Consumo específico de combustible (TSFC) más bajo que el turboreactor;
- Combinación motor y hélice con mayor área frontal, lo cual necesita trenes de aterrizaje mayores, para los aviones de ala baja, pero que no necesariamente aumenta la resistencia parasitaria;
- Posibilidad de empuje inverso eficaz.

En un *turboprop* se dispone de una turbina adicional para arrastrar la hélice. Esta turbina extrae aproximadamente del 75% al 85% de la potencia de salida, para mover la propela. El equivalente total de la potencia al eje *SHP* (*Shaft Horsepower* por sus siglas en inglés) más el empuje producido por los gases de escape, está dado a 3750 ESHP [2796.38 kW]. Esto significa que la sección de la turbina del *turboprop*, tendrá más etapas que un motor *turbojet*, y que el diseño de los álabes de turbina es tal, que las turbinas extraerán más energía del flujo de gases calientes de escape.

En este tipo de motor, el compresor, la cámara de combustión, y la turbina de compresor comprenden lo que usualmente es llamado generador de gas o productor de gas. Este generador de gas produce los gases de alta velocidad que mueven las turbinas de potencia. El generador de gas cumple con una sola función: convertir la energía contenida en el combustible, en energía rotacional de alta velocidad.

La propulsión se realiza por la conversión de la mayor parte de energía de la corriente de gas, en potencia mecánica para arrastrar al compresor, accesorios, y carga de la hélice. Sólo una pequeña cantidad (aproximadamente 10%) del empuje del chorro está disponible por la corriente de gas, de relativamente baja presión y baja velocidad, creada por las etapas de turbina necesarias para arrastrar la carga extra de la hélice.

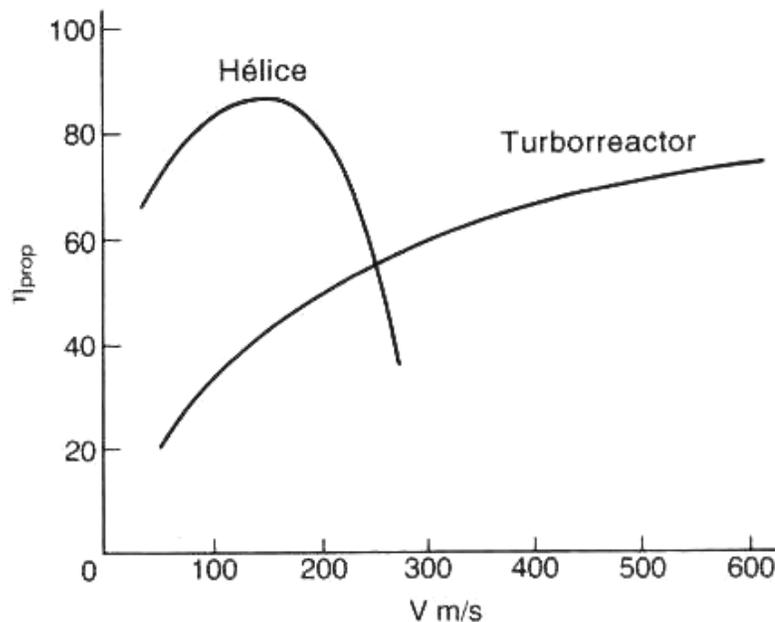
El principal objetivo de diseño está dirigido a mover la propela, uno de los métodos para llegar a este objetivo, es el uso de lo que se conoce como turbina libre; una turbina libre no está mecánicamente conectada al generador de gas; en vez de eso, una rueda de turbina, está instalada en el camino de los gases de escape, procedentes del generador de gas.

Otro método para convertir la energía obtenida del generador de gas, en energía rotacional de alta velocidad, en el eje de potencia, es instalar una tercera rueda de turbina, la cual tiene la capacidad de utilizar el exceso de energía de los gases calientes (que es energía en exceso no utilizada, requerida para mover la sección del compresor del motor), para mover la propela.

En la configuración de eje fijo, el eje está mecánicamente conectado a la caja reductora de engranajes de forma tal, que la energía rotacional de alta velocidad y bajo torque transmitida a la caja reductora desde la turbina, pueda ser convertida a baja velocidad y alto torque requerido para mover la hélice.

Dado a que la hélice debe ser movida por el motor, un complejo sistema de control es necesario para ajustar el ángulo de paso de la misma, con el propósito de administrar los requerimientos de empuje, en función de la fase de operación de la aeronave y para todos los rangos de potencia del motor. En condiciones normales de operación, ambos, la velocidad de la propela y la velocidad del motor, son constantes. El ajuste del ángulo de paso de la hélice y el flujo de combustible debe ser coordinado, de manera que se mantenga la condición de velocidad constante, de forma que, cuando el flujo de combustible decrezca, el ángulo de paso de la propela también lo haga.

Figura 7. **Comparación de la eficiencia entre una hélice y un turborreactor**



Fuente: Michael Kroes y Ralph Bent. **Aircraft Powerplants. Pág. 110**

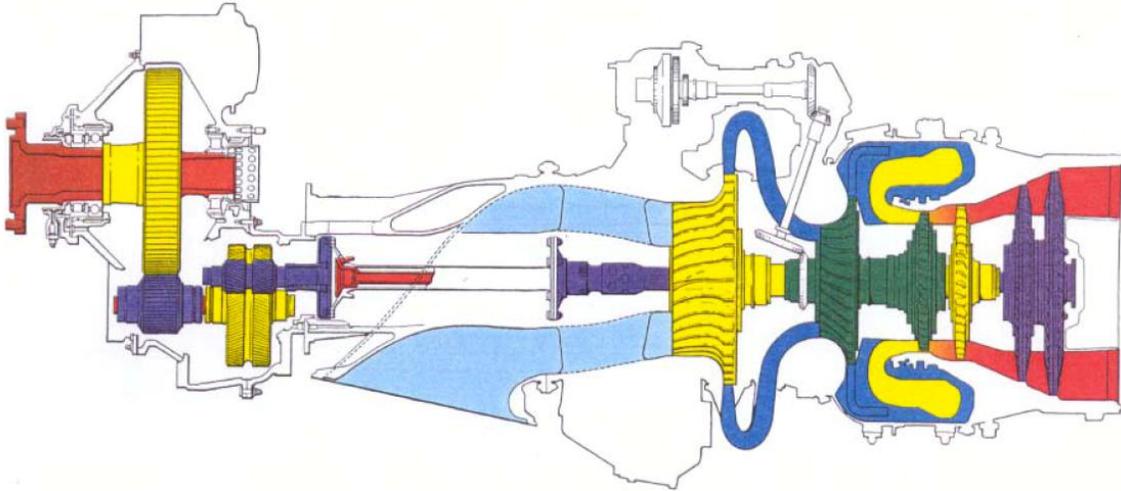
Estas características demuestran que los motores turbohélices son superiores para despegar con cargas pesadas en pistas de longitud corta y media. Normalmente los turbohélices están limitados a desarrollarse a velocidades de hasta 500 mph (805 km/h), ya que el rendimiento de la hélice cae precipitadamente a velocidades mayores, a causa de la formación de ondas de choque. No obstante los investigadores intentan superar, o ampliar esta limitación, experimentando con hélices multi palas de cuerda ancha y diámetro pequeño, que dicen ser más rentables que el *turbofan* de gran relación de paso, teniendo un 20% de reducción en el consumo específico de combustible.

2.4.1. Motor Turboprop Pratt & Whitney serie 100

Los motores *Pratt & Whitney* serie 100 (PW100), básicamente constan de una turbomaquinaria (generador de gas) y módulos de caja reductora de engranajes, conectados mediante un eje transmisor de potencia medida, integrados entre sí, mediante la cubierta de admisión de la turbomaquinaria como soporte estructural. Los modelos de motores *Pratt & Whitney* que constituyen la familia de la serie 100, fueron desarrollados a partir del modelo PW100, y han evolucionado a partir de su diseño básico mediante las múltiples variaciones en el rango de SHP, los cuales varían desde 1 800 hasta 2 500 SHP.

Motores de la serie PW100 han sido utilizados en muchos modelos de aeronaves de corto y mediano alcance, teniendo dentro de los principales usuarios a *Aerospatiale ATR42*, *British Aerospace ATP*, *De Havilland Dash 8*, *Embraer 120* y *Fokker 50*.

Figura 8. **Motor Pratt & Whitney PW de la Serie 100**



Fuente: Pratt & Whitney Canada. **PW100 Small Series: Customer training handbook. Pág. 10**

El motor PW100 es un motor de turbina que mueve un conjunto de palas (propelas), mediante una caja reductora de engranajes de dos etapas. Tres ensambles rotativos componen el corazón del motor. El primero de estos ensambles lo constituye el compresor de baja presión (LP) y la turbina de baja presión que lo mueve; otro ensamble es el compresor de alta presión (HP) y su correspondiente turbina de alta presión. El último ensamble está formado por dos turbinas de potencia y el eje principal de potencia de la turbina.

Los tres ensambles rotatorios no se encuentran conectados entre sí, rotan a diferentes velocidades y en direcciones opuestas entre sí, este diseño es denominado “motor de turbina libre”, y su configuración permite al operador variar la velocidad de la propela a discreción, sin tomar en cuenta la velocidad del compresor. El movimiento inicial del motor para el arranque es proporcionado por un motor eléctrico de arranque montado en la caja de engranes especial para los accesorios.

Los compresores tienen como función principal introducir aire al motor a través de la carcasa de admisión, incrementar la presión del aire mediante los dos impulsores centrífugos y entregarlo alrededor de la cámara de combustión.

El aire a presión entra a la cámara de combustión por medio de unos pequeños agujeros alrededor de ella y a una velocidad adecuada del compresor (NH), el combustible atomizado es introducido a la cámara de combustión, mediante las toberas de inyección, situadas alrededor de la carcasa de la cámara de combustión. Dos bujías de ignición se encargan de inflamar la mezcla de aire y combustible; los gases calientes generados en la combustión son dirigidos al área de las turbinas.

En este punto, la ignición de la mezcla ya no depende de las bujías de encendido, ya que dejan de trabajar en el momento en que existe una flama constante en la cámara de combustión.

Los gases calientes se expanden y aceleran a través de los álabes estáticos anulares de las turbinas de baja y de alta presión, y su constante movimiento empuja los álabes de los discos rotores de las turbinas de los compresores. Los gases aún en expansión pasan a través de la primera y segunda etapa de las turbinas de potencia, consiguiendo proveer energía rotacional para mover el eje de potencia, que finalmente moverá la hélice.

La caja reductora de engranes tiene como función reducir la velocidad de entrada del eje de potencia (20 000 rpm), a una velocidad apropiada para la operación de la hélice (1 200 – 1 300 rpm).

Los gases calientes remanentes, después de haber cedido su energía en las turbinas de potencia, son expulsados hacia la atmósfera por el ducto de escape del motor.

El apagado del motor se hace cortando el flujo de combustible suministrado a la cámara de combustión. Una unidad de control hidromecánico del combustible montada en la caja de accesorios de la caja reductora, regula el flujo de combustible suministrado a los inyectores, en función de la demanda de potencia requerida al motor en cualquier momento y condición de vuelo.

El gobernador de la propela (PCU), montado en la caja de accesorios de la caja reductora, controla y regula la velocidad de rotación de la propela, haciendo ajustes en el ángulo de incidencia de las palas en función de los requerimientos de potencia, selección de velocidad de vuelo y condiciones del vuelo.

2.4.1.1. Características de los motores de la serie PW100

Dentro de las características que definen a los motores de la serie 100, pueden citarse las siguientes:

- 2 Módulos separados:
 - Turbomaquinaria
 - Caja reductora de engranes

- Eje principal triple concéntrico

- Compresor de carretes dobles:
 - Rotor y compresor de baja presión (LP)
 - Rotor y compresor de alta presión (HP)

- Turbina libre:
 - Arranques más rápidos
 - Velocidades de propela ampliamente variables
 - Velocidades óptimas de operación para las secciones de compresor y turbina

- Flujo unidireccional:
 - Del frente hacia la parte posterior del motor
 - Escape de gases ubicado en parte trasera del motor
 - Recupera hasta un 100% del empuje por la propulsión del chorro de gases de combustión

- Cámara de combustión de flujo inverso: constituye un motor más corto y más ligero

- Caja reductora de engranajes de dos etapas

- Sistema de combustible con control electrónico digital y sistema de reserva manual

- Unidad de medición hidromecánica

- Sistema de ajuste automático de abanderamiento de la propela: asistente para la reducción de la carga de trabajo de los pilotos, en el caso de falla de un motor durante las maniobra de despegue

- Sistema electrónico de medición de torque

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

3. MANTENIMIENTO

3.1. Objetivo básico del mantenimiento

El mantenimiento procura contribuir por todos los medios disponibles a reducir, en lo posible, el costo final de la operación de un equipo o una planta. De este concepto se desprende un objetivo técnico por el que se trata de conservar en condiciones de funcionamiento seguro y eficiente todo el equipo, maquinaria y estructuras involucradas.

3.2. Definición de mantenimiento

Es la serie de trabajos a ejecutar sobre el equipo, con el fin de prolongar la vida útil y aumentar la continuidad de servicio para el cual fue diseñado. Estas actividades variarán dependiendo del tipo de industria en la que se aplique, el tipo de mantenimiento y rutina aplicada.

Es importante aclarar que el objetivo primordial de la actividad de mantenimiento será la conservación del servicio que están suministrando los equipos y no la conservación, en primer lugar, de la maquina misma. Por tal motivo deben equilibrarse en las labores de mantenimiento factores esenciales como:

- a) La calidad económica del servicio
- b) Duración adecuada del equipo
- c) Costos mínimos de mantenimiento

La ingeniería administrativa es una actividad humana que reúne los elementos necesarios para que los recursos humanos y materiales de una empresa cumplan con los objetivos predeterminados por ésta. Es notorio que todos los elementos son mutables y los equipos no son la excepción; por lo tanto, si se desea que siga funcionando de acuerdo con la idea que originalmente se concibió, es necesario e indispensable darle atención a sus necesidades, llevar a cabo una serie de trabajos, tales como: inspecciones, pruebas, limpieza, reparaciones, etc.

3.3. Tipos de mantenimiento

3.3.1. Mantenimiento correctivo

Es el conjunto de actividades que se deben llevar a cabo cuando un equipo, instrumento o instalación ha tenido una parada forzada o imprevista. También considera el caso de aquellas unidades operativas en las cuales se ha detectado una falla prematura, la cual deberá ser atendida inmediatamente, evitando así, que puedan provocar el reemplazo del equipo o equipos auxiliares relacionados, antes del tiempo de expiración contemplada. Abarca también la modificación de componentes o del equipo por completo.

Este es el sistema más generalizado, por ser el que menos conocimiento y organización requiere.

El mantenimiento correctivo se divide en dos categorías:

- Mantenimiento correctivo ligero
- Mantenimiento correctivo a fondo

Esta clasificación está en función de los trabajos que hay que desarrollar para corregir la falla.

Cuando se hace mantenimiento preventivo dentro de un sistema correctivo, se le llama mantenimiento rutinario. Cuando se hace mantenimiento correctivo en un sistema preventivo, se le llama corrección de falla. En la práctica, no es posible diferenciar totalmente ambos sistemas.

Todos los casos de mantenimiento correctivo deben atacarse de inmediato, a fin de lograr que el servicio, que el equipo provee, sea restablecido en el menor tiempo posible. Además de indicar que en todo trabajo de mantenimiento de esta naturaleza el personal debe tener el criterio bastante normado, para efectuar los trabajos absolutamente indispensables, a fin de restablecer el servicio de una manera rápida y segura.

3.3.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en una serie de trabajos el cual es necesario se lleve a cabo en una unidad operativa, equipo, instrumento o instalación, con el propósito de que opere a su máxima eficiencia, evitando que se produzcan paradas forzadas o imprevistas en el servicio para el cual fue diseñado.

Esta serie de trabajos generalmente se toma de las instrucciones que el fabricante ha referido en los manuales de mantenimiento, enriquecido con la experiencia y las aportaciones que puedan otorgar los técnicos de mantenimiento en cada especialidad. La clase de estos trabajos varia, pero se puede subdividir en dos grupos: los trabajos que no necesiten de herramientas especiales (mantenimiento

preventivo ligero), y el segundo utiliza herramientas especiales así, como personal calificado para desempeñarlo (mantenimiento preventivo a fondo).

Este sistema requiere un alto grado de conocimiento y una organización muy eficiente. Implica la elaboración de un plan de inspecciones para los distintos equipos a través de una buena planificación, programación, control y ejecución de actividades a fin de descubrir y corregir deficiencias que posteriormente puedan ser causa de daños más graves. Por esta razón éste es más barato que el mantenimiento correctivo, ya que tanto el material como la mano de obra y el momento de la labor están adecuados en cantidad, calidad y precio. Los programas de mantenimiento preventivo se dividen en:

- a. Programas de visita: estos son listados de los lugares o artefactos a los cuales debe dirigirse el profesional de mantenimiento, de acuerdo a la frecuencia que se haya estimado necesaria. Por lo general se usan dos tipos de programas de visita: a largo y corto plazo;

Buenos programas de visita aseguran la atención adecuada de los equipos a mantener, debiendo complementarse con buenos diagnósticos y mano de obra del personal de mantenimiento, lo que se traduce en inspecciones eficientes, pruebas útiles y rutinas bien ejecutadas. Las inspecciones, pruebas y rutinas deben programarse para ser ejecutadas sin estorbar el servicio productivo que el equipo provea.

- b. Programas de inspecciones, pruebas y rutinas. los programas serán, básicamente, lista de indicación de partes, en cualquier dispositivo o maquinaria que necesiten ser inspeccionadas y probados rutinariamente. Por ejemplo, en el caso de turbinas de gas, deben inspeccionarse los niveles de aceite lubricante, la temperatura del

aire de admisión, el nivel del tanque de combustible, el diferencial de presión en los filtros de combustible, etc.

3.4. Inspecciones

Se hace mención a la actividad de inspección, pues su papel es de suma relevancia en la investigación de fallas. La inspección como función general, es una de las herramientas menos utilizadas y consideradas por la gran mayoría de industrias, quizás por el desconocimiento de los beneficios que de ella se obtienen; si se atiende a las necesidades de los componentes de un determinado equipo, resulta ilógico no tomar en cuenta los puntos de control referenciales para evaluar su comportamiento.

Los puntos de control deben ser revisados periódicamente, pueden ser revisados por el inspector todos ellos deben servir para la detección de fallas.

Las inspecciones que han sido realizadas a conciencia dejan por lo general al descubierto, anomalías en los equipos; es importante que éstas sean corregidas de inmediato por el personal de mantenimiento. Si por cualquier razón no es posible corregir la falla o desperfecto en el momento, deberá establecerse un programa planeado para la solución a mediano y largo plazo.

Los factores que intervienen en la inspección tienen una disposición similar a los de la actividad de mantenimiento, pues la inspección puede ser preventiva o correctiva: con programas, reportes, visitas, rehabilitaciones, atenciones inmediatas, informes de calidad del servicio y notas de inspección.

3.4.1. Inspección preventiva

Las inspecciones preventivas constan de una serie de observaciones llevadas a cabo para verificar, la actuación humana sobre los equipos, instalaciones y procedimientos a su cargo, antes que el servicio que prestan estos elementos presente alguna falla.

Para conseguir una ampliación de uso adecuado de estas observaciones, así como de facilitar su control, es conveniente dividir los programas y reportes de inspección en:

- a) Programas de visitas
- b) Programas de inspección
- c) Programas de rehabilitación
- d) Notas de inspección
- e) Informes de calidad y servicio
- f) Lubricación y limpieza

3.5. Estrategias de mantenimiento

Durante muchos años el tipo de mantenimiento predominante ha sido el preventivo, que consiste en la sustitución o reparación de componentes a intervalos fijos determinados, ya sea con base en recomendaciones del fabricante del equipo o por estadísticas extraídas de los historiales. Pero esto no garantiza los niveles de confiabilidad requeridos en la actualidad, al mismo tiempo que lleva a un sobre costo por sustitución de partes o lubricantes cuando todavía se encuentran aptos para el uso.

El mantenimiento predictivo se enfoca a los síntomas de falla que se identifican utilizando las distintas técnicas, tales como: análisis de lubricantes, análisis de vibraciones, y ensayos no destructivos dentro de los que están: radiografías, ultrasonidos, termografías, etc. que permiten detectar los síntomas de inicio de falla de la maquinaria.

El mayor beneficio de la utilización de estas herramientas, es que se logra una alerta temprana que permite planificar una parada para corregir el problema, alcanzando de esta manera una mayor disponibilidad de la maquinaria y una reducción del número de fallas catastróficas.

Para llevar a cabo cualquiera de los dos tipos básicos de mantenimiento, actualmente se consideran cinco estrategias diferentes. Una de ellas, o la combinación de éstas puede ser la estrategia óptima para llevar a cabo la conservación y mantenimiento de los elementos de interés.

3.5.1. Mantenimiento programado

Las acciones llevadas a cabo mediante esta estrategia se realizan a intervalos regulares de tiempo, o cuando los equipos se sacan de operación. Este tipo de actividad requiere sacar de funcionamiento el equipo y sólo puede ser bien planificada cuando la falla es dependiente del tiempo de operación.

Las actividades que son siempre factibles de programar son la lubricación y la limpieza. Para llevarlas a cabo, los fabricantes de los equipos indican la frecuencia con que se requieren. Con esta información se puede establecer la programación correspondiente.

3.5.2. Mantenimiento reactivo

Esta estrategia no requiere planes por adelantado o ninguna otra actividad más que la de asegurar que, al momento de la falla se contará con el personal, las herramientas y los repuestos necesarios para atender la emergencia en el menor tiempo posible.

Desde todo punto de vista, esta es la estrategia menos deseable si se empleara como la única por seguir.

3.5.3. Mantenimiento de oportunidad

Esta estrategia propone una manera efectiva de dar mantenimiento. Se hace uso de los tiempos de parada de los equipos por otras estrategias empleadas o por paradas en la operación de la planta. Se hace uso de los tiempos muertos. El esfuerzo desplegado en aplicar esta estrategia puede ser muy efectivo desde el punto de vista económico.

3.5.4. Rediseño por obsolescencia

Esta es la mejor alternativa cuando las fallas son demasiado frecuentes y la reparación o los repuestos son muy costosos. Si se ejecuta bien, es una actividad de un solo tiempo; todas las demás son actividades repetitivas.

3.5.5. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo no es dependiente de la característica de la falla y es el más efectivo cuando el modo de falla es detectable por monitoreo de las condiciones de operación. Se lleva a cabo en forma calendarizada y no implica poner fuera de operación los equipos.

Entre las técnicas usadas en esta estrategia están las inspecciones, el chequeo de condiciones y el análisis de tendencias.

El mantenimiento predictivo, más que ser un método de trabajo, es una filosofía que se basa fundamentalmente en detectar una falla antes que suceda, para dar el tiempo suficiente para corregirla sin perjuicio del servicio. Para llevar a cabo estos objetivos se usan instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas (NDT's)

Otro de los aspectos del mantenimiento predictivo es la obtención de la información más completa que se pueda usar en la toma de decisiones. Además, permite el afinamiento de las técnicas utilizadas en el mantenimiento preventivo.

3.5.5.1. Importancia del mantenimiento predictivo

Un programa de mantenimiento predictivo tiene como objetivo mantener en perfecto estado el funcionamiento de la maquinaria, para lograr su máximo rendimiento. Para lograr esto, hay dos factores que juegan un papel importante en la tarea de mantenimiento: calidad y costos

Actualmente, todas las empresas están desarrollando y poniendo en práctica métodos y sistemas que conlleven a obtener una máxima producción al más bajo costo, para ser competitivas a nivel mundial. Muchas empresas tratan de lograr este objetivo, únicamente en ciertas áreas y específicamente en los procesos de producción, descuidando el mantenimiento de equipo, originándose así, fuertes fugas de dinero por los excesivos paros forzosos. La rentabilidad de una empresa no podrá ser óptima si se descuida la función de mantenimiento; de ahí su importancia.

Si se analiza el problema desde el punto de vista correcto, es decir, lograr alto rendimiento y bajo costo, es necesario controlar los siguientes aspectos:

- a) Las reparaciones de emergencia
- b) El tiempo muerto
- c) Seguridad de los trabajadores y operadores
- d) Costo de mano de obra en las reparaciones

Mediante un control eficiente de los factores antes mencionados y con una adecuada planificación y programación de los trabajos de mantenimiento, se puede obtener una disminución de costos. Hay que tener en cuenta, que el funcionamiento de una maquina hasta su destrucción, es costoso.

Dado que el mantenimiento es el factor más importante para el funcionamiento de las máquinas, se debe encontrar una solución, y ella descansa en que un alto porcentaje de las fallas están precedidas por ciertos signos o condiciones indicadoras que se van a producir. Si se usan estos signos para determinar cuándo tomar las acciones de mantenimiento al equipo, se podrían evitar fallas prematuras. Además, no se producirían interrupciones en el servicio.

El mantenimiento predictivo se efectúa mediante métodos indirectos para determinar, la condición de un equipo. Esta característica de predicción, permite aplicar en este tipo de mantenimiento las técnicas de planificación y organización.

3.5.5.2. Consideraciones generales al evaluar la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo

Con la introducción de la filosofía predictiva dentro de los procedimientos de mantenimiento ha sido posible obtener mejor calidad de información del estado de los equipos, y en consecuencia se han erradicado los siguientes problemas:

- a) Reemplazo de partes costosas en forma rutinaria, con la sola intención de asegurar que la maquinaria no fallará por la falta de cambio de la misma;
- b) Predecir intuitivamente el tiempo de vida remanente en elementos de maquinaria, tales como: cojinetes, aislamientos, resortes, tanques, motores, etc.;
- c) Preguntarse si el personal encargado de la operación de los equipos está siguiendo realmente las instrucciones de manejo;
- d) Suspensión del servicio, fuera de programación, por fallas imprevistas.

Lo más razonable es que los problemas de mantenimiento se tengan que plantear con el carácter de una verdadera reorganización, de todo o parte del departamento; sustituyendo prácticas inconexas o todo un programa de carácter correctivo, preventivo y predictivo.

El primer paso a tomar en cuenta para implementar un programa de mantenimiento predictivo, es determinar la técnica apropiada en función del equipo en particular, teniendo en consideración, que los resultados que se obtengan de su aplicación aporten los datos que permitan determinar cuantitativamente el estado actual del elemento de análisis.

Después de elegir el método de inspección, es preciso conocer el máximo potencial de información aprovechable que las pruebas pueden aportar en los análisis. Posterior a esta fase, la interpretación de la información es vital para que el sistema funcione, ya que se puede estar utilizando una tecnología muy eficiente en la obtención de datos, y ser pobremente utilizada y/o mal interpretada.

Paso seguido al conocimiento profundo de los métodos elegidos, es preciso registrar cada una de las inspecciones realizadas a los equipos y, con esta información, construir una base de datos en la que puedan ser consultados todos las muestras puntuales y la tendencia del parámetro de estudio, y mediante métodos estadísticos de análisis, poder obtener información útil para la toma de decisiones.

Otro factor a considerar es el estado de conservación del equipo, pues es evidente que resultaría en un gasto innecesario de recursos financieros y de tiempo, aplicar las técnicas más modernas a los equipos que desde hace mucho tiempo debieron haber tenido una reparación general.

A diferencia del mantenimiento preventivo, que debe aplicarse en conjunto, el mantenimiento predictivo puede aplicarse gradualmente. De hecho, en muchas instituciones, se utilizan instrumentos de diagnóstico, sin tener instaurado un sistema de mantenimiento predictivo como tal, por lo que es conveniente adquirir los

instrumentos de diagnóstico paulatinamente, siempre que éstos justifiquen la inversión que se ha efectuado.

3.5.6. Mantenimiento proactivo

Esta estrategia de mantenimiento pretende maximizar la vida útil operativa de los equipos y sus componentes, identificando y corrigiendo las causas que corrientemente originan las fallas. Por ejemplo, asegurando que las maquinas funcionan bajo las condiciones de carga y velocidad establecida por su condición de diseño y que, además, sus componentes (rodamientos, sellos, acoples, etc.) son instalados correctamente y que su condición de lubricación es adecuada, ya se puede asegurar una vida útil operativa más extendida y con menos paradas intermedias que el promedio de las maquinas del mismo tipo.

3.6. Mantenimiento centrado en la confiabilidad

El concepto de confiabilidad tiene distintas acepciones válidas, pero en un contexto más apegado al objetivo de la presente investigación, se refiere a “la probabilidad que un sistema, equipo o componente cumpla con la función para la cual fue diseñado sin fallas, durante el período de tiempo establecido bajo condiciones y rangos de operación determinados”.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad o *RCM (Reliability Centered Maintenance*, por sus siglas en inglés), tuvo su origen en la industria aeronáutica norteamericana, durante la década entre 1960 y 1970, gracias a los estudios realizados por Stanley Nowlan y Howard Heap de *United Airlines*®. Este nuevo concepto se desarrolló con la finalidad de ayudar a las líneas aéreas a investigar las causas

principales de las fallas presentadas en los aviones comerciales y, basando en los resultados obtenidos, ayudar a los directores a determinar las políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y manejar las consecuencias de estas fallas.

En la década de los sesenta surgió la seria preocupación por la alta incidencia de fallas en los aviones, que producían accidentes fatales. En efecto, de cada millón de aviones comerciales que despegaban de algún aeropuerto, 60 sufrían este tipo de accidentes. Previendo un gran aumento en el tránsito aéreo, en los EE.UU. se vio la necesidad de estudiar cómo reducir esta incidencia de accidentes, para evitar que la industria de la aviación se tornara no apta para el transporte de pasajeros. El otro aspecto que limitaría el éxito de la aviación civil comercial eran también los altísimos costos de mantenimiento de aviones.

En la década de los ochenta, la técnica RCM comenzó a penetrar en la industria en general. John Moubray fue pionero en elaborar una rigurosa metodología de aplicación de esta técnica en la industria, dando lugar a RCM2; que es hoy el procedimiento mundialmente más difundido para la aplicación de RCM. Éste fue el inicio del desarrollo del RCM, el cual en sus etapas iniciales, pasó por un cúmulo de supuestos y tradiciones, hasta llegar a convertirse en un proceso sistemático y analítico que convirtió a la aviación comercial en la forma más segura de viajar.

La aplicación de los criterios de RCM permitió bajar la incidencia en los noventa a razón de dos accidentes graves con fatalidades por cada millón de despegues.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) pone tanto énfasis en las consecuencias de las fallas como en las características técnicas de las mismas. Para poder evaluar estos dos aspectos el RCM necesita ser alimentado de información

procedente de los indicadores de gestión. Algunos de los indicadores básicos pueden obtenerse mediante:

- Integración y revisión de las fallas operacionales, considerando la evaluación de los aspectos de seguridad y amenazas al medio ambiente;
- Manteniendo total atención sobre las tareas del mantenimiento que más incidencia tienen en el funcionamiento y desempeño de los equipos, garantizando que los presupuestos de inversión asignados a mantenimiento se utilizan donde más beneficio va a reportar.

Si contablemente se registraran todos los costos involucrados por una baja confiabilidad, además de la mano de obra del mantenimiento, los repuestos utilizados y los costos de las contrataciones de terceros, quedan sin contemplar los siguientes rubros:

- Seguridad
- Impacto en el medio ambiente
- Lucro cesante por pérdidas de volumen de producción
- Calidad de productos
- Calidad de servicio
- Aumento de costos de operación u otros costos

En la práctica, la confiabilidad puede apreciarse por la relación que guardan entre sí, cinco factores llamados universales y, que se consideran existentes en todo recurso por conservar. Estos factores son:

- a) Edad del equipo
- b) Medio ambiente en donde opera
- c) Carga de trabajo
- d) Apariencia física
- e) Mediciones y pruebas de funcionamiento

Dos conceptos auxiliares muy útiles en la evaluación de sistemas y componentes son:

- Fallas funcionales: es la capacidad de cualquier elemento físico de satisfacer un criterio de funcionamiento deseado. Ejemplo, un equipo que deja de funcionar totalmente deja de satisfacer la necesidad para el que fue diseñado;
- Fallas parciales (potenciales): se definen como las condiciones físicas identificables, que indican qué va a ocurrir una falla funcional. Estas fallas están por encima o por debajo de los parámetros identificados para cada función individual.

Los equipos móviles así como las líneas de producción, tienen la peculiaridad de poseer varios componentes y subsistemas operando en serie, de modo que la falla en cualquier ítem que compone el equipo genera una detención del sistema.

Para aclarar el punto anterior, basta con analizar el efecto de la confiabilidad individual de cada uno de los elementos que componen un sistema, dado a que la confiabilidad de un sistema en serie, compuesto por n equipos, es el producto de las confiabilidades de los distintos ítems que constituyen dicho sistema. Por lo tanto, la confiabilidad del sistema es menor o igual que la confiabilidad de cualquier elemento que lo compone.

ecuación 21

$$C_{Sistema} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i$$

Donde:

$C_{Sistema}$ = confiabilidad del sistema

Por ejemplo, un equipo pesado es un sistema complejo formado por decenas de subsistemas operando simultáneamente tales como: motor, transmisión, sistema hidráulico, sistema neumático, sistema eléctrico, sistema de control, entre otros, los cuales a su vez, están formados por cientos de componentes individuales. Análogamente, una línea de producción también es un sistema en serie formado por decenas de equipos, operando uno a continuación de otro. Cada componente o subsistema poseerá su propio patrón de fallas característico. La confiabilidad del sistema puede ser medida a través del tiempo medio entre fallas de cada elemento, analizando su evolución mediante la observación particular de su variabilidad.

La planificación de la confiabilidad exige la comprensión de las definiciones fundamentales:

- Cuantificación de la confiabilidad en términos de probabilidad
- Clara definición de lo que es el buen funcionamiento
- El ambiente en el que el equipo ha de funcionar
- El tiempo de funcionamiento requerido para operar entre fallos esperados

Comprendidas y aclaradas las definiciones anteriores, para llevar a cabo la implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, se recomienda que durante la fase de planificación se contemple la ejecución de las siguientes etapas:

- Análisis de criticidad
- Análisis de la situación actual
- Revisión del plan de mantenimiento
- Análisis de la confiabilidad del proceso, y confiabilidad humana
- Plan de Implementación
- Implementación
- Fijación de los objetivos
- Seguimiento a través de Indicadores de control de gestión

Al considerar la observación de las etapas anteriores, puede esperarse con altas probabilidades de éxito que el programa sea capaz de generar importantes beneficios en un tiempo relativamente corto (dependiendo de los niveles de compromiso a la gestión de seguimiento), reflejándose éstos principalmente en los siguientes aspectos:

- Aumento de la confiabilidad de los equipos;
- Aumento de la seguridad de las personas e instalaciones;
- Aumento de la disponibilidad, como una consecuencia de los dos primeros beneficios;

- Aumento de la productividad en las operaciones, al reducir el número de interrupciones no programadas: paradas largas y cortas, defectos en la calidad de los productos atribuibles al mal funcionamiento de equipos, pérdidas por disminución de velocidad de producción por fallas o defectos presentes en los equipos, etc.;
- Disminución de los costos de mantenimiento, al disminuir las fallas ocasionales y repetitivas, así como la disminución de los costos de inventarios por exceso de almacenamiento de repuestos;
- Extensión de la vida en servicio de los componentes y equipos, al facilitar la identificación de problemas potenciales, haciendo uso de técnicas predictivas de diagnóstico, así como la búsqueda de oportunidades y la factible aplicación de métodos de inspección y mantenimiento proactivo, que ayuden a identificar las causas latentes relacionadas con la operación de los equipos fuera de los límites de diseño predefinidos, sobrecarga sostenida, etc. aplicando métodos de análisis de causa raíz (RCA).

3.6.1. Estrategias de mantenimiento basado en la confiabilidad para equipos móviles

En el caso de maquinaria pesada o equipos móviles, es posible aplicar el mantenimiento proactivo en los componentes que presentan patrones de falla relacionados con el desgaste. La maquinaria pesada es dependiente de sistemas hidráulicos, tales como: lubricantes, aceites hidráulicos, refrigerantes, combustibles y aire, los cuáles pueden transportar contaminantes dentro del sistema.

Para este tipo de equipos, el análisis de aceite permite monitorear el estado de desgaste de los equipos, detectar fallas incipientes en forma temprana, así como también, establecer un programa de lubricación basado en condición.

En esta medida, para el caso de equipos móviles, diseñar e implementar una estrategia proactiva basada en los resultados del análisis de aceite, genera no sólo un aumento de la confiabilidad, sino también mayores beneficios económicos por extensión de la vida en servicio de los equipos y lubricantes.

3.6.2. Análisis causa raíz

El análisis de causa raíz es una herramienta utilizada para identificar las causas fundamentales que originan las fallas o problemas recurrentes, las cuales al ser corregidas evitarán la ocurrencia de los mismos. Es una técnica que identifica causas lógicas y su efecto relacionado, por medio de un análisis deductivo que identifica la relación causal que conduce al sistema, equipo o componente a fallar. Para el desarrollo de este análisis se utilizan una gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problema, disponibilidad del dato y conocimiento de las técnicas: análisis causa efecto, árbol de fallas, análisis de cambio, análisis de barreras y eventos, y análisis de factores causales.

Este análisis puede ser aplicado cuando en los equipos o instalaciones se presenta cualquiera de las siguientes situaciones:

- En forma proactiva: para evitar fallas recurrentes de alto impacto en costos de operación y mantenimiento;

- En forma reactiva para resolver problemas complejos que afectan la organización;
- En equipos y sistemas con un alto costo de mantenimiento correctivo; pero particularmente si existe un dato de fallas de equipos con alto impacto en los costos de mantenimiento o pérdidas de producción;
- En análisis de fallas repetitivas de equipos o procesos críticos;
- En análisis de errores humanos en el proceso de diseño y aplicación de procedimientos y de supervisión.

Normalmente cuando ocurre una falla, ésta es percibida porque genera ciertas manifestaciones o fenómenos de fácil localización (síntomas), no así las causas de la misma (causa raíz) que mientras más complicado sea el sistema, mayor será la dificultad de localizar el origen de dichas causas, pudiendo atacar las manifestaciones de la falla pero no su origen, lo que se traduce en potencialidad de ocurrencia de fallas que se harán recurrentes.

3.7. Ciclo de vida aplicado al mantenimiento

Se entiende por control predictivo de mantenimiento, la determinación del punto óptimo para la ejecución del mantenimiento preventivo en un equipo, o sea, el punto a partir del cual la probabilidad que el equipo falle, asume valores indeseables.

La determinación de este punto trae como resultado índices ideales de prevención de fallas, tanto en el aspecto técnico como en el económico, dado que la intervención del equipo no es efectuada durante el período en que aún está en

condiciones de prestar servicio, ni en el período en que sus características operativas están comprometidas. Los métodos de determinación pueden ser realizados bajo dos Formas en función de las características de los equipos: análisis estadístico y análisis de síntomas.

El análisis estadístico es aplicado cuando existe en la instalación, una cantidad apreciable de equipos o componentes con las mismas características, que puedan ser considerados como un universo, para el desarrollo de los cálculos de probabilidades y que tienen características aleatorias de fallo; es decir, en los cuales no es posible hacer acompañamiento de sus variables.

El análisis de síntomas es aplicado cuando es necesario el desarrollo de estudios para la determinación del punto predictivo, en equipos con características impares, con relación a los demás equipos instalados y en los cuales es posible hacer mediciones de sus variables.

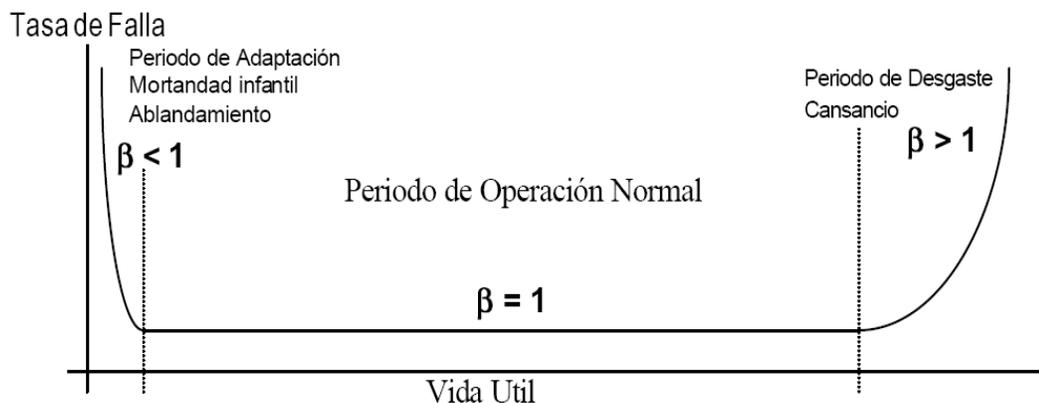
El análisis estadístico se basa en la determinación del término de vida útil, objeto del estudio en la curva de tasa de fallas con relación al tiempo, entendiéndose por tasa de fallas a la relación entre un incremento del número de fallas y el incremento correspondiente de tiempo, en cualquier instante de la vida de un equipo; y por vida útil al período de tiempo, durante el cual el equipo desempeña su función con una tasa de fallas aceptable.

Tradicionalmente, la tasa de fallas representa la medida de probabilidad que un equipo que está operando presente fallas, o sea, deje de operar, cuando se incrementa un intervalo de tiempo. Para su determinación, es necesario agrupar los datos de muestreo de las ocurrencias por períodos de tiempo, determinar la función de

distribución acumulativa $F(t)$ definida como: el número de ítems del universo que fallan en un determinado intervalo de tiempo.

De manera semi-empírica, Wallodi Weibull desarrolló una función matemática en cuya curva puede reflejarse el estado de un equipo con respecto al tiempo, durante el cual puede presentar uno de los tres estándares de falla. La composición de las tres condiciones que normalmente representan las fases de vida de una instalación, equipo o pieza es conocida como curva del ciclo de vida.

Figura 9. **Curva de la bañera o curva del ciclo de vida de un equipo**



Fuente: Lourival Tavares. **Administración moderna del mantenimiento. Pág. 88**

La elección apropiada de β en la distribución de Weibull y la experiencia ha demostrado que puede usarse para una gran mayoría de modelos de falla que incluyen las fallas imprevistas (que se comportan como un exponente negativo), de manera similar al comportamiento en una distribución normal.

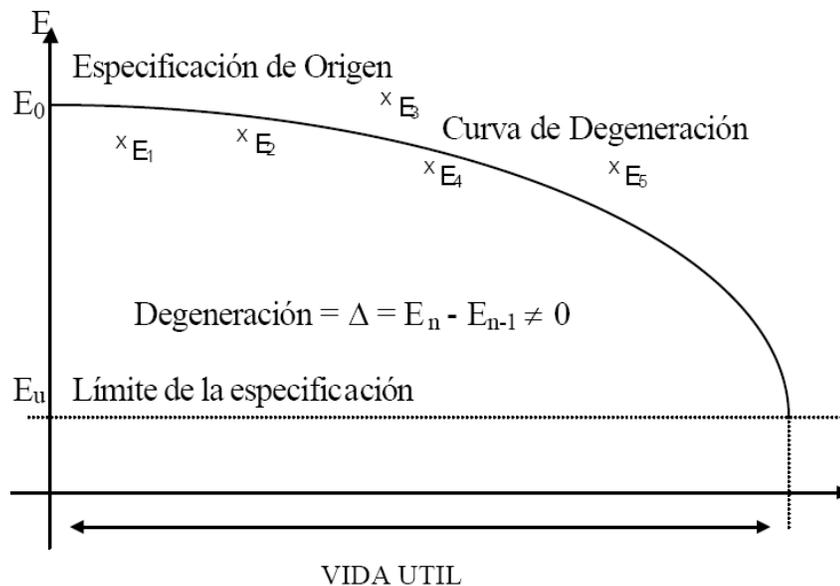
El valor $\beta = 1$ (tasa de fallas constante) puede ser indicativo de modos múltiples de falla existente o que los datos de los tiempos para fallas son sospechosos. Una tasa de fallas constante, puede también indicar que las fallas son debidas a eventos

externos, tales como el uso indebido del equipo o deficiencia de las intervenciones para mantenimiento.

3.8. Determinación de la vida útil

Si se toma para el cálculo uno de los elementos del conjunto y la variación de la condición del elemento en función del tiempo, la degradación de su estado podrá ser representada en la curva de degeneración similar a la de la figura 10. En ésta se puede plantear que la condición aceptable para usar el elemento, es cuando los valores de condición que determinan su estado, son mayores que un valor fijado por un criterio técnico económico.

Figura 10. Curva de degeneración con la determinación de la vida útil



Fuente: Lourival Tavares. **Administración moderna del mantenimiento.** Pág. 88

Donde:

E_t = condición del elemento en un instante "t" de tiempo

E_0 = condición inicial del elemento

E_u = valor fijado por un criterio técnico-económico

Entonces, la intersección de la curva de degeneración (obtenida por la extrapolación del conjunto de datos recopilados en monitoreos) con la línea límite de especificación que representa el valor fijado por un criterio técnico económico, determina la vida útil del elemento; y todo el concepto está basado en curvas aplicables para cada caso.

De la observación y análisis de esta curva se puede decir que el mantenimiento preventivo convencional ejecuta acciones correspondientes a renovar la condición del elemento a un valor mayor al de un momento específico, y que puede resultar igual a la condición inicial. Lo que se podría interpretar en el gráfico así:

$E(t_1) \rightarrow E_1$

$E(t_2) \rightarrow E_2 \dots$ etc.

3.9. Inspección predictiva y mantenimiento predictivo

La inspección convencional determina apenas los valores de la condición en la que se encuentra el elemento en un instante $E(t_i)$. Si se realizan estas inspecciones de forma sucesiva, se puede realizar una extrapolación para la determinación del tiempo de intersección de las curvas de degeneración con la línea límite de la especificación deseada.

Debido a que muchas veces los elementos sujetos a inspección no se encuentran accesibles, muchas veces dado a que no se desea interrumpir el servicio prestado por el equipo, se hace necesario que para conocer los valores que proporcionen información de la condición del elemento se disponga de un sistema automatizado que permita conocer en todo momento los valores de interés para el análisis. Esos valores reciben tratamiento matemático correspondiente con la determinación del mecanismo de degeneración, con el objetivo de prever la ocurrencia de una anomalía en la curva de degeneración y la optimización de los tiempos de mantenimiento preventivo t_i . La obtención de las curvas de degeneración de cada una de las variables involucradas en el análisis, permitirá determinar los tiempos t_i que indicarán las mejores épocas para la intervención en el equipo.

Las intervenciones para monitoreo que caracterizan al mantenimiento predictivo tienen por objetivo:

- a) Aumentar los valores iniciales E_0 y los valores de la condición del elemento posteriores a un mantenimiento preventivo E_1, E_2 etc.;
- b) Aumentar los valores de tiempo entre mantenimientos preventivos E_{t_i} por alteración en el desarrollo de la curva $E(t)$.

Ese tipo de mantenimiento empieza en las fases de especificación de condiciones, proyecto, fabricación e instalación logrando la minimización de los costos de mantenimiento preventivo y correctivo y, la maximización de la eficiencia del mantenimiento.

3.9.1. Técnicas principales en las que se basa el mantenimiento predictivo

Se ha considerado conveniente clasificar las técnicas principales en las que se basa el mantenimiento predictivo siguiendo un orden lógico, ya que la mayoría de estas técnicas se han originado en los sentidos humanos (vista, oído, tacto), gracias al desarrollo de instrumentos que aportan una amplificación cuantitativa de los sentidos.

Las principales técnicas son:

- a) Visuales
- b) Ultrasónicas
- c) Basadas en la medición de temperatura
- d) Basadas en la medición de vibraciones
- e) Electromagnéticas
- f) De radiación
- g) De análisis de aceites lubricantes
- h) Basadas en la medición de la velocidad

3.1.1.1. Factores del mantenimiento predictivo

Las necesidades de tener una organización apropiada de mantenimiento, tener la capacidad de programar y planificar con acierto, ha sido puesta en relieve por los motivos siguientes:

- Una creciente mecanización: la mecanización cada vez mayor en la industria ha reducido el costo de mano de obra directa; pero a la vez, ha impuesto la exigencia de conservar debidamente los medios de producción y servicio que prestan;

- Aumento de los inventarios de repuestos: la mecanización en la industria y la complejidad de los elementos exige la existencia de repuestos y accesorios;
- Controles más estrictos de producción: aún cuando esta clase de controles ha reducido al mínimo los inventarios de materiales entre las distintas operaciones, ha provocado que sea mayor el impacto de las interrupciones en la producción;
- Plazos de entrega cortos: han hecho que reduzcan los inventarios de productos terminados, proporcionando un mejor servicio al cliente; al mismo tiempo, han aumentado el efecto perjudicial de las interrupciones en la producción;
- Exigencias crecientes de buena calidad: una buena calidad en el producto terminado mejora las ventajas, pero también hace relevante la urgencia de corregir cualquier condición impropia de producción, como la calidad de la misma;
- Costos mayores: son el resultado de una mano de obra cada vez más cara y el constante aumento de los precios en la materia prima y accesorios. Las reparaciones traen consigo mayor gasto que el mantenimiento. Dependiendo del tipo de mantenimiento, las fallas disminuyen en el tiempo. Es decir, el tiempo que tardará en presentarse una falla cuando se tiene implementado un programa de mantenimiento predictivo, será mucho mayor dado que se estará continuamente controlando las tendencias del elemento afectado, mientras que en el mantenimiento de avería la falla se presentará al poco tiempo de comenzar a presentarse los síntomas.

4. MANTENIMIENTO DE MOTORES DE TURBINA

El mantenimiento de los motores de turbina comprende el trabajo que se requiere para mantener el motor y sus componentes (sistemas auxiliares) en condición aeronavegable, mientras éste se encuentre instalado en una aeronave (en ala o mantenimiento de línea), además incluye el trabajo que es requerido para retornar un motor en condiciones aeronavegables una vez que éste haya sido removido de la aeronave (para trabajos mayores a ser llevados a cabo por un taller especializado).

El mantenimiento de un motor en ala se divide en dos categorías:

- Programado, y
- No programado

4.1. Mantenimiento programado

Incluye las inspecciones periódicas que deben ser efectuadas de acuerdo al programa de mantenimiento del motor y del avión, según el fabricante. La trascendencia de estos chequeos va más allá de la apertura de los cobertores del motor, para desempeñar trabajos más elaborados delimitados bajo tiempos especificados, los cuales son usualmente calculados por las horas voladas o por los ciclos acumulados por el avión.

Una política de mantenimiento continuo, en donde los chequeos son llevados a cabo progresivamente y de manera conveniente, dentro de los límites de tiempo específicos, en lugar de coincidir con los tiempos de chequeo para el avión, ha sido ampliamente adoptada. Con la introducción de dispositivos para monitoreo en condiciones de alta eficiencia y confiabilidad, un gran número de tareas aceptadas tradicionalmente podrían convertirse en innecesarias.

4.2. Mantenimiento no programado

Abarca los trabajos necesarios ocasionados debido a sucesos que no están normalmente relacionados con límites de tiempo, por ejemplo: Ingestión de aves, golpes de rayo en el motor o aterrizajes forzados. Este trabajo además puede ser producto del mal funcionamiento, procedimientos caza fallas o bien inspecciones programadas provocadas por diversas razones.

4.3. Fases de mantenimiento en motores de turbina de gas

Las inspecciones establecidas para los motores de turbina de gas se dividen en un gran número de clasificaciones y dependen mucho del tipo de operaciones bajo las cuales estén operando los motores. Por ejemplo, un operador aéreo que realiza rutas de largo alcance, tendrá una programación de inspecciones muy diferente a la programación de una aerolínea de servicio local, en donde la frecuencia de despegues y aterrizajes es alta. Las inspecciones y procedimientos de mantenimiento están programados; sin embargo, se toman en consideración los datos del número de ciclos, así como el número total de horas de operación que el motor haya acumulado desde su último chequeo. Un ciclo de vuelo está definido como la completación del proceso que describe un despegue y un aterrizaje.

Para ejemplificar de mejor manera el impacto que tiene el conteo de ciclos y horas de vuelo acumuladas por un motor, en función del tipo de operación que desempeñe la aeronave en la cual está montado el motor, es válido comparar dos situaciones: un avión que opera vuelos internos entre dos ciudades cercanas contra una avión que efectúa operaciones trasatlánticas; donde el avión que opera los vuelos cortos podría estar acumulando 12 horas diarias de operación, mientras completa 15 ciclos durante el mismo tiempo. En el otro caso, las operaciones de vuelos trasatlánticos pueden llegar a durar hasta 18 horas, en los cuales estarán completándose solamente 2 ciclos.

Es bastante claro que el desgaste, erosión y daños por el calor serán mucho mayores en los motores del avión con operación regional en comparación con el de rutas largas. Por lo que de acuerdo con las operaciones de inspección y mantenimiento, estas tendrán que efectuarse con mayor frecuencia en el avión regional.

Las inspecciones periódicas son requeridas después de haber completado cierto número de horas o ciclos acumulados de operación, o una combinación de ambas. Estas inspecciones podrán ser clasificadas como mayores y menores. El momento en el que estas inspecciones deberán ser desempeñadas es establecido por el operador de la aeronave, de acuerdo con los resultados de la experiencia operacional.

Sumado a las inspecciones periódicas efectuadas de manera regular, las aerolíneas frecuentemente especifican algunas inspecciones complementarias denominadas “chequeos de línea”, “chequeos A”, u otra nomenclatura. Cada aerolínea posee sus propios códigos y clasificación para estas inspecciones: la única forma en que un técnico pueda saber que inspeccionar y como debe hacerlo, es obteniendo la información de la hoja de chequeos proporcionada por la compañía.

4.3.1. Inspecciones operacionales de rutina

Una aerolínea típica puede designar las operaciones de servicio estándar por nombres tales como: “Servicio No.1”, “Chequeo A, B, C...”, etc. Estas operaciones deben incluir un número de operaciones especiales estándar adicionales según sea necesario.

4.3.1.1. Inspección según tipo de servicio

Un servicio número 1 debe ser efectuado por personal de la base de mantenimiento, cada vez que el avión aterrice o cuando acumule un cierto número de ciclos completos, dependiendo de la cantidad de tiempo que la aeronave se mantenga en vuelo. Usualmente el servicio incluirá la corrección de algunos artículos críticos reportados en la bitácora del avión así como servicios regulares (reabastecimiento de combustible, etc.), además de una inspección visual de los alrededores. Esta inspección alrededor de la aeronave incluye la inspección de aquellos objetos que pueden ser observados desde el nivel del suelo.

La inspección de los motores durante este recorrido, incluye una inspección visual a la sección de admisión del motor, palas de la hélice (o álabes del ventilador), observación por fugas de combustible, aceite, etc., provenientes de los compartimientos del motor, así como una inspección con linterna de la sección del escape y turbinas.

El servicio número 2 puede incluir las siguientes inspecciones:

- a) Revisión de la bitácora de vuelo y bitácora de mantenimiento de la aeronave;

- b) Chequeo de la cantidad de aceite en los depósitos de los motores;
- c) Inspección visual de los motores con las cubiertas destapadas.

4.3.1.2. Inspección según tipo de chequeo

El chequeo “A” es usualmente efectuado después de 500 horas de operación. Las inspecciones relacionadas con este chequeo pueden incluir:

- a) Relleno de los tanques de aceite. Debe anotarse en la bitácora, la cantidad añadida del aceite a cada motor;
- b) Revisión de la admisión al motor, cobertores, y soportes estructurales por daños. Chequear cualquier anomalía y fugas al exterior;
- c) Inspección por daños a la sección de escape utilizando una lámpara fuerte. Verificar la condición de las últimas etapas de la turbina

El chequeo “B” es un poco más extenso que el anterior, e incluye las siguientes tareas:

- a) Verificar los bordes de la entrada al motor, cámara de admisión, paletas guía, y los alabes de la primera etapa del compresor, utilizando para esto una lámpara fuerte;
- b) Chequear el motor, instalaciones, secciones intermedias, accesorios y los cobertores de motor. Lubricar los enganchadores de los cobertores con lubricantes aprobados;

- c) Chequear los discos indicadores de los extintores de fuego;
- d) Ejecutar el filtrado de aceite (Si fuese necesario) de acuerdo a las indicaciones del manual del fabricante;
- e) Remover la pantalla de aceite, y revisar en busca de evidencias de depósitos de carbón y/o metal;
- f) Instalar nuevamente la pantalla de aceite y apretar al par requerido, dado por el manual;
- g) Revisar la cantidad de aceite dentro de las primeras 2 horas posteriores al apagado del motor. En caso exista pérdida de aceite, rellenar el tanque nuevamente al nivel especificado y anotar la cantidad agregada.

4.3.2. Inspecciones no rutinarias

Durante la operación de un motor de turbina, muchos eventos pueden ocurrir que pueden requerir de inspecciones especializadas de forma inmediata, con el fin de determinar las causas que provocaron el daño en el motor y poder tomar una decisión certera acerca de las acciones correctivas del caso.

Entre algunos de los eventos que pueden requerir una inspección especial del motor, se encuentran las inspecciones ocasionadas por daños de objetos extraños (FOD - *Foreign object damage* - por sus siglas en inglés); ingestión de hielo, aves, operaciones sobre el límite del motor (temperatura y velocidad), excesivas cargas por fuerzas G, y cualquier otro evento que pueda provocar daños internos y externos al motor.

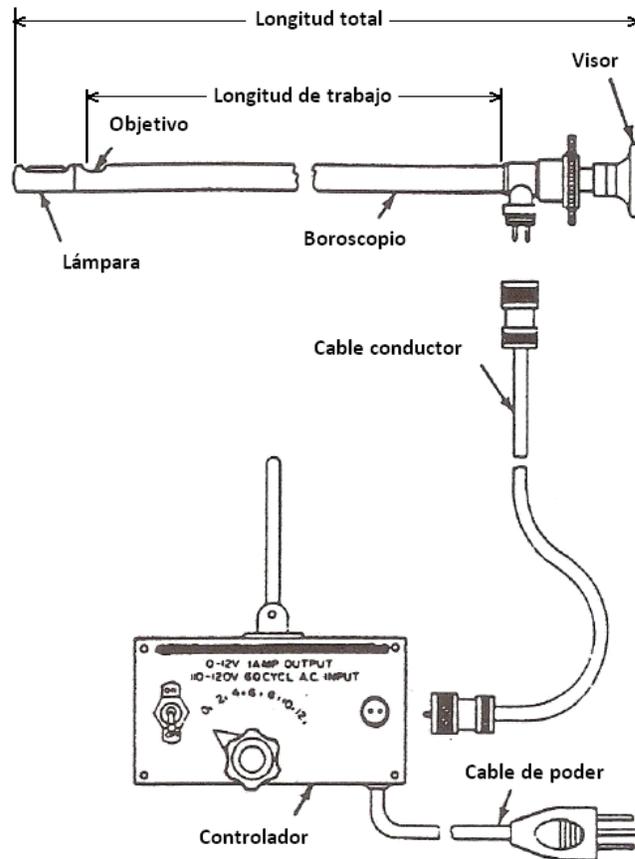
Las inspecciones no rutinarias requieren de las mismas técnicas que las utilizadas para las inspecciones diarias y/o periódicas. Estas incluyen inspecciones visuales no asistidas, inspecciones con luz, uso de lentes de aumento, aplicaciones de líquidos fluorescentes o ensayos con líquidos penetrantes, uso de boroscopio o videoscopio, y el manejo de técnicas radiográficas. Usualmente el manual de mantenimiento del fabricante del motor especificará la técnica más eficiente para cada inspección en particular.

4.3.2.1. Inspecciones por medio de boroscopio

Inicialmente los equipos de boroscopio fueron utilizados como dispositivos de inspección para examinar el interior de los cilindros de motores de pistón recíprocante, y ahora su uso se ha extendido a los motores de turbina. Estas inspecciones permiten al personal de mantenimiento ejecutar evaluaciones visuales, tanto a los elementos de la sección caliente, como a los de la sección de compresores en un motor de turbina, y así conocer su condición de operación, sin necesidad de desarmar el motor.

Básicamente, el boroscopio es un instrumento tubular rígido que puede ser comparado con un pequeño periscopio. En uno de sus extremos hay un visor, con uno o más lentes conectados entre sí, al dispositivo emisor de luz. En el otro extremo hay un espejo, lentes y una fuente de luz. El tubo se introduce en el motor mediante los puertos de inspección, localizados en la carcasa del motor, en ciertos puntos específicos que permitan la inspección de áreas críticas dentro del motor. Los puertos están normalmente cerrados mediante tapones removibles. La figura 11 muestra un esquema básico de un equipo de boroscopio.

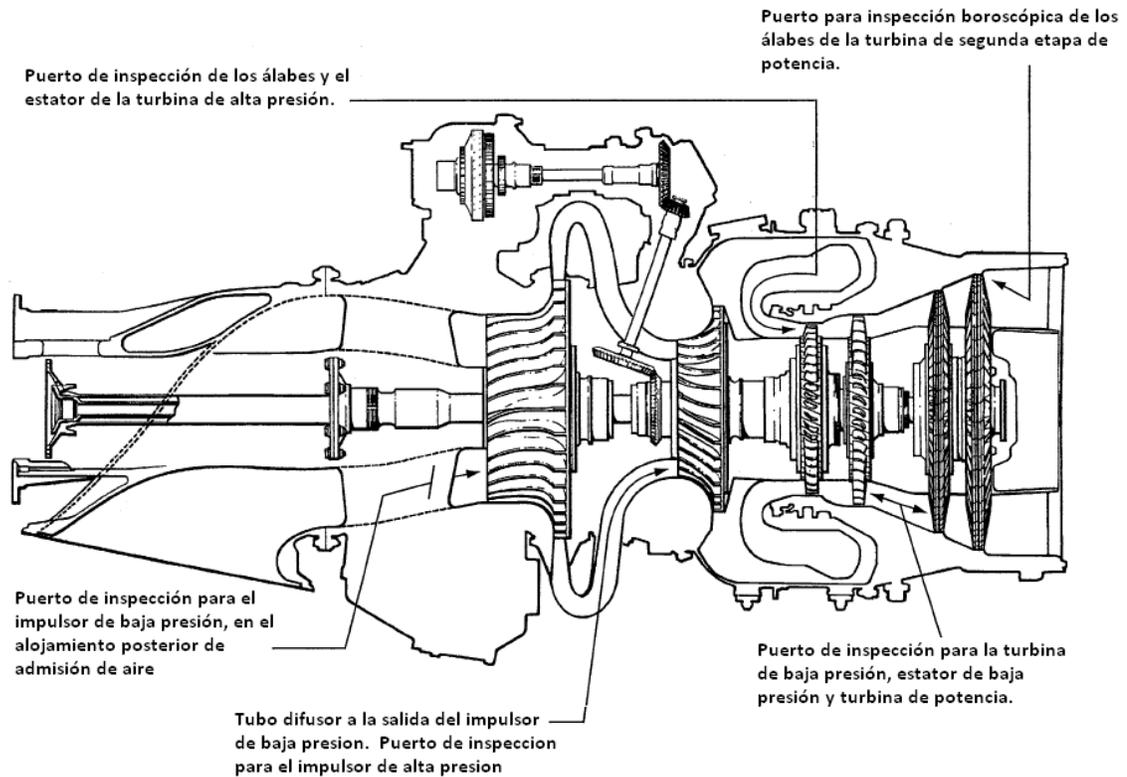
Figura 11. Esquema general de un equipo de boroscopio



Fuente: Michael Kroes y Ralph Bent. **Aircraft Powerplants. Pág. 481**

Cuando una inspección de boroscopio se efectúa, el técnico debe saber que partes deben ser examinadas, de acuerdo al tipo de servicio que esté programando; remover los tapones específicos de los puertos por los cuales se introducirá el equipo y volver a colocar el tapón respectivo en su puerto, al finalizar el trabajo.

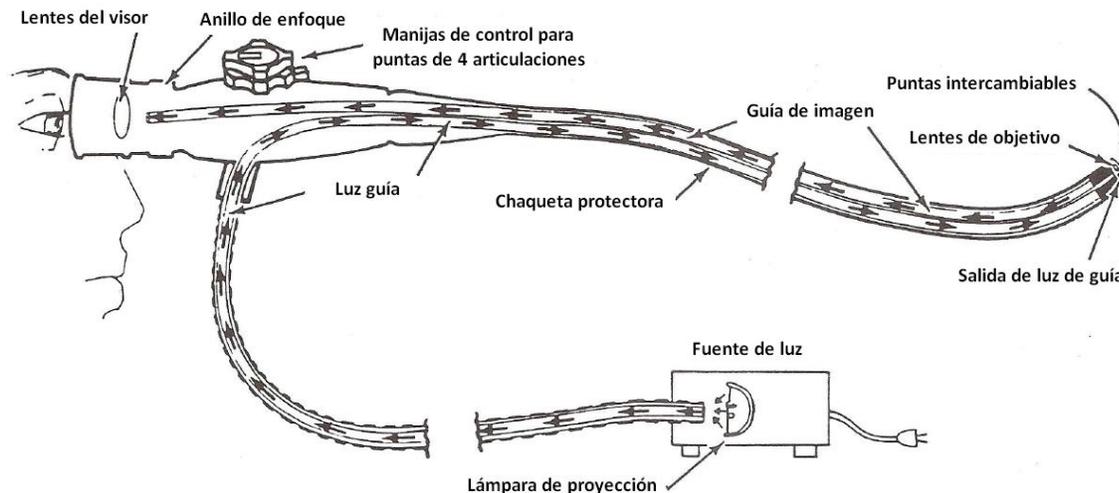
Figura 12. Puertos de acceso para inspección boroscópica en un motor PW100



Fuente: Pratt & Whitney Canada. **PW100 Small Series: Customer training handbook. Pág. 55**

Una variante del boroscopio rígido es el fibroscopio, (ver figura 13), que posee usualmente una sección flexible cerca de la punta, por lo que el observador puede tener un mayor alcance de visión después de haber introducido el aparato en el puerto de inspección, esta característica permite examinar áreas que con el boroscopio rígido sería imposible llegar a ver, tales como esquinas, ángulos de piezas, incluso recorrer la circunferencia completa de un estator, para verificar la condición de todos los segmentos.

Figura 13. Diagrama de un fibroscopio



Fuente: Michael Kroes y Ralph Bent. **Aircraft Powerplants. Pág. 481**

La adecuada identificación de fisuras, esfuerzos por fatiga y corrosión son críticas durante las inspecciones de mantenimiento. Los inspectores a menudo encuentran dificultad para identificar entre un defecto y una imagen poco clara.

Actualmente existe una nueva técnica de obtención de imágenes mediante corrección electrónica; estos nuevos dispositivos cuentan con una sonda de inspección, un procesador de video y un proyector que permite la presentación de las imágenes obtenidas, el cual es capaz de producir imágenes con alta definición, alta calidad de color e imágenes con aumento, que pueden ser archivadas en archivos de video y fotografías, facilitando así, el trabajo de diagnóstico de los inspectores.

4.3.2.2. Procedimientos para detección de fallas en motores de turbina

Los procesos llevados a cabo en la detección y caza de fallas pueden ordenarse de acuerdo con el siguiente orden lógico: identificación de indicaciones de falla, aislamiento de la falla y la solución de la causa del problema. Cuando la falla es aislada o identificada, la corrección de la avería se facilita por la lógica utilizada para llegar al punto que la está causando y su posterior corrección.

Los fabricantes junto con los operadores de turbinas de gas trabajan conjuntamente para desarrollar la información y las técnicas necesarias para desarrollar los procedimientos en búsqueda de fallas. Numerosos sistemas han sido desarrollados con la finalidad de poder facilitar la detección de las fallas, aislarlas y corregirlas.

4.3.2.2.1. Monitoreo de condiciones

Los dispositivos para monitoreo de condiciones han sido diseñados y desarrollados para brindar indicaciones de cualquier deterioro en el motor en un tiempo prudencial previo a que la falla inminente se presente, e indicar las áreas o el módulo en el cual el daño está ocurriendo. Estas herramientas ayudan a dar un diagnóstico con mayor rapidez, las cuales pueden ser seguidas por observaciones de monitoreo periódico, o acciones de mantenimiento inmediatas a ser efectuadas en la base de mantenimiento mayor.

Los dispositivos para monitoreo de condiciones y los equipos complementarios pueden ser ampliamente categorizados e implementados como indicadores en las cabinas de vuelo, grabadoras de vuelo e indicadores en tierra.

4.3.2.2.2. Indicadores de falla

Entre los indicadores de falla se incluyen aquellos instrumentos o dispositivos en la aeronave que pueden alertar a los miembros de la tripulación acerca de cualquier problema que esté desarrollándose en la operación del motor. Estos indicadores se dividen en dos grupos: los instrumentos indicadores estándar usados para conocer los parámetros de operación del motor en todo momento durante su funcionamiento, y los dispositivos especiales diseñados para detectar problemas que no pueden detectarse mediante los indicadores de parámetros.

Los instrumentos indicadores más comunes en un motor de turbina de gas son los medidores de temperatura de los gases de escape (EGT), indicadores del porcentaje de rpm (N_1 y N_2), la relación de presiones del motor (EPR por sus siglas en inglés), indicadores de temperatura y presión de aceite, e indicador de flujo de combustible.

En el caso de los motores turboeje y *turboprop*, indicadores de torque son comúnmente incluidos. Conocer las lecturas en estos indicadores es especialmente efectivo cuando se efectúan procedimientos caza fallas. Adicionalmente a los equipos estándar de indicación, recientemente se han desarrollado equipos para diagnóstico caza fallas incorporados (BITE = *built-in troubleshooting equipment*, por sus siglas en inglés) en aviones modernos. Estos sistemas incluyen sensores especiales y transductores electrónicos capaces de convertir señales de vibración, temperatura, torque y muchas otras variables, en datos indicativos de problemas en el motor.

5. SISTEMAS DE LUBRICACIÓN

Debido a las muchas partes móviles dentro de un motor de turbina, es necesario reducir el contacto entre las superficies de las piezas que se mueven en relación unas entre otras, ya que este movimiento produce fricción, lo cual consume energía. Esta energía se transforma en calor a temperaturas comparativamente bajas y en consecuencia, reducen el la potencia de salida disponible en el motor. Además, la fricción entre las partes metálicas causa desgaste. Cuando se usan lubricantes, una delgada película de lubricante es aplicada entre las superficies móviles con el objetivo de reducir el desgaste y la pérdida de la potencia del motor

5.1. Funciones y requerimientos para los aceites lubricantes

5.1.1. Funciones del aceite de motor

Los motores de aviación se someten a operan en un rango de ambientes muy amplio con variaciones de temperatura, humedad y presión rápidamente cambiantes.

Para ejemplificar de forma resumida esta condición; durante el despegue, el motor está corriendo a su máxima potencia por varios minutos. Luego la potencia se reduce gradualmente hasta que la altura y potencia de crucero han sido establecidas. El motor operará por un tiempo determinado (minutos u horas) a la potencia de crucero, la cual es en muchos modelos aproximadamente un 70% de la potencia máxima.

En los motores de turbina no es posible utilizar aceites de grado automotriz, debido a que éstos son enfriados por aire y funcionan a temperaturas superiores a los automotrices. Muchos de los aditivos utilizados en los aceites para autos tampoco pueden usarse en aviación, debido a que podrían inducir al pre-encendido del combustible y en consecuencia a la falla del motor.

En la mayoría de los motores turboprop, el aceite aparte de lubricar el motor, es utilizado como fluido hidráulico para el gobernador de la hélice, así como para lubricar los mecanismos de las cajas reductoras de engranajes.

Algunas de las funciones del aceite lubricante son:

- Lubricar para reducir la fricción entre partes que se encuentran en movimiento
- Para enfriamiento de varios elementos del motor
- Sellar las cámaras de combustión en los motores recíprocos, mediante el llenado de los espacios vacíos entre las paredes de cilindros y pistones
- Limpiar el motor por dentro, arrastrando los lodos y otros residuos fuera del motor hasta depositarlos en el filtro de aceite
- Ayuda a prevenir la corrosión, protegiendo las partes metálicas de entrar en contacto con el oxígeno, agua y otros agentes corrosivos
- Servir de amortiguador entre las partes que se encuentran sujetas a cargas por impacto

5.1.2. Características de los aceites de turbina

La lubricación apropiada de los motores aeronáuticos requiere el uso de aceites lubricantes que cumplan con las siguientes características:

- a) Viscosidad apropiada: debido a las altas temperaturas de operación de los motores como las temperaturas ambientales en las que operan las aeronaves, el aceite deberá ser distribuido de manera efectiva a todas las partes lubricadas del motor, y deberá resistir las presiones entre las varias superficies lubricadas;
- b) Altas propiedades antifricción: para reducir la resistencia a la fricción entre las partes en movimiento, cuando están separados únicamente por una película lubricante. Un fluido lubricante ideal provee una fuerte película de aceite para prevenir fricción metálica y crear una mínima cantidad de fricción interna del lubricante, o arrastre por el aceite mismo;
- c) Máxima fluidez a temperaturas mínimas: especialmente importantes cuando se opera en ambientes a temperaturas inferiores al punto de congelación, para garantizar el flujo positivo de aceite a todas las partes lubricadas durante los arranques;
- d) Alto índice de viscosidad: el aceite lubricante deberá ser capaz de mantener o presentar una mínima variación en su viscosidad con respecto a las variaciones de temperatura;

Esta propiedad asegura mantener la película lubricante adecuada para la protección uniforme a todos los elementos lubricados del equipo, especialmente cuando el equipo opera en ambientes con temperaturas extremas muy variables, combinado con las temperaturas internas del motor;

- e) Alta protección anti desgaste: para resistir la acción de fatiga que ocurre en la microscópica capa límite de la película lubricante, para prevenir del contacto

metálico. La teoría de la lubricación fluida se basa en la actual separación de las superficies metálicas por medio de una película de aceite. Entre tanto la película lubricante no se rompa, la fricción interna (fricción fluida) del lubricante toma lugar de la fricción metálica por deslizamiento, que de otra manera podría existir;

- f) Máxima capacidad de enfriamiento: que sea capaz de absorber la mayor cantidad de calor posible de todas las superficies lubricadas. Una de las razones para utilizar lubricantes líquidos es la capacidad que tienen para absorber y disipar el calor. Otra de las razones, es que los lubricantes líquidos pueden ser fácilmente bombeados o atomizados para su distribución;

Muchas partes de motor, especialmente aquéllas que soportan gran carga a velocidades de rozamiento altas, son lubricadas por aceite sometido a presión directa. En lugares en donde la lubricación a presión directa no es práctica, es factible aplicar el aceite mediante una neblina lubricante que brinda la adecuada protección requerida. Independientemente del método de aplicación, el aceite absorbe el calor y luego lo disipa al medio ambiente por medio de intercambiadores de calor (enfriadores de aceite);

- g) Máxima resistencia a la oxidación: reduciendo el efecto nocivo de los depósitos en las superficies metálicas;
- h) No deberá tener efectos corrosivos, tanto para las partes metálicas como para los sellos y empaques que se encuentran en contacto con el lubricante. La adecuada selección y aplicación del aceite lubricante deberá cumplir con las especificaciones del fabricante del motor, a la vez que asegurarán que se satisfaga las necesidad de

lubricación y que posee las propiedades requeridas al ser compatibles con los materiales de fabricación del equipo.

La información de los aceites aprobados para el uso en motores *Pratt & Whitney* PW100, así como las características principales de los aceites utilizados en motores de turbinas de gas, se describe en el anexo 2.

5.2. Funcionamiento del sistema, descripción y componentes

Los motores alternativos tienen abundancia de piezas en movimiento, tal como los émbolos, bielas, cigüeñal, mecanismos de actuación de las válvulas, y accesorios arrastrados por engranajes, y su sistema de lubricación absorbe mucho calor de las paredes del cilindro y de la parte inferior de los émbolos. Por esta razón llevan una gran cantidad de aceite y tienen un alto régimen de consumo de aceite. No es extraño para ciertos motores en estrella grandes que lleven veinte o treinta galones de aceite de base mineral de relativamente alta densidad y usen tanto como cuatro o cinco galones por hora.

Por su parte, los motores de turbina de gas tienen sólo una parte básica móvil, más los engranajes de arrastre de accesorios. El sistema de lubricación debe absorber una gran cantidad de calor, la mayoría del cual proviene de los cojinetes del eje de turbina. Los grandes motores de turbina llevan entre cinco y ocho galones de aceite de base sintética de baja viscosidad. Con la idea de absorber el calor, el aceite circula a través del motor a un alto régimen de flujo varias veces por minuto. Puesto que el aceite no tiene contacto con el área de combustión, y se usan sellos alrededor del eje compresor/turbina, se pierde muy poco por el escape. Como resultado de esto, un

motor de turbina no consume tanto aceite como un motor alternativo, normalmente menos de una pinta por hora.

Existen dos clasificaciones básicas de sistemas de lubricación para los motores de turbina:

- De cárter húmedo y
- Cárter seco

5.2.1. Sistema de lubricación de cárter húmedo

En un sistema de cárter húmedo, el aceite presurizado se usa para lubricar el acoplamiento del rotor de turbina y los cojinetes del eje del rotor, pero los engranajes de arrastre de accesorios se lubrican por barboteo por el aceite que lleva la caja de engranajes la cual sirve como depósito de aceite. El aceite que ha lubricado a los cojinetes se drena por gravedad y se recoge y devuelve a la caja de engranajes, donde se almacena hasta que vuelve a circular a través del sistema.

5.2.2. Sistema de lubricación de cárter seco

El sistema de lubricación más usado es el tipo de cárter seco, en el que el aceite después de servir sus funciones de lubricación y refrigeración, es devuelto por medio de bombas de recuperación a un depósito fuera del propio motor. Existen dos tipos de sistemas de lubricación de cárter seco: el sistema de tanque caliente, y el sistema de tanque frío.

5.2.3. Sistema de lubricación de tanque caliente

En un sistema de lubricación de tanque caliente, el intercambiador de calor del aceite (o enfriador) está en el subsistema de presión, y el aceite recuperado no es enfriado antes de ser devuelto al tanque.

Después de dejar el enfriador de aceite, el aceite fluye a través de los filtros de los cojinetes a los inyectores que pulverizan el aceite en los cojinetes. El aceite se drena desde las cavidades de los cojinetes y se recoge por las bombas de recuperación para ser devuelto al depósito de aceite.

5.2.4. Sistema de lubricación de tanque frío

El sistema de tanque frío es el mismo que el de tanque caliente, con excepción del funcionamiento del enfriador de aceite y las válvulas termostática y de derivación del radiador.

El aceite va directamente desde la bomba de presión a través de los filtros y los cojinetes. Desde los cojinetes, se drena, se recoge y devuelve al depósito de aceite por medio de las bombas de recuperación. Si el aceite está suficientemente frío, vuelve al depósito a través de la válvula termostática, pero si está demasiado caliente, esta válvula se cierra, forzando al aceite a fluir a través del enfriador donde se libera del exceso de calor.

5.3. Lubricación de los cojinetes

El cojinete se lubrica por la pulverización de aceite desde un inyector o boquilla. La boquilla lleva un orificio calibrado que asegura que la correcta cantidad de aceite se suministre de manera eficaz al cojinete, en todas las condiciones de velocidad y carga operacionales del motor.

Tras lubricar al cojinete, el aceite se drena fuera del compartimento interior y se devuelve al depósito de aceite por medio de una bomba de recuperación. Esta bomba tiene una capacidad considerablemente mayor que la cantidad de aceite usado para lubricar al cojinete, y junto con el aceite se extrae aire de la cámara del cojinete. La baja presión en la cámara interior y la más alta presión en la cámara exterior origina un pequeño flujo de aire a través del sello de laberinto. Este flujo hacia dentro del aire evita cualquier flujo de aceite hacia fuera a través del sello de aceite.

5.4. Componentes del sistema de lubricación

5.4.1. Depósitos de aceite

Los depósitos de aceite usados con un motor de turbina normalmente están montados sobre el motor o próximos a él. Por normas de diseño dadas por la FAA se requiere que estos depósitos tengan un tapón de llenado hermético y un espacio de expansión del 10% de su capacidad. El depósito debe diseñarse de manera tal, que sea imposible llenar de forma inadvertida el espacio de expansión.

5.4.2. Bombas de aceite

Todas las bombas de aceite usadas en el sistema de lubricación del motor de turbina son bombas de desplazamiento positivo, porque mueven una cantidad específica de aceite cada vez que giran. Existen dos funciones básicas de estas bombas en un motor de turbina de gas: las bombas de presión producen presión de aceite para lubricar a los cojinetes y engranajes, y las bombas de recuperación recogen el aceite después de que éste ha realizado sus funciones y lo devuelve al depósito.

5.4.3. Válvulas de alivio de presión de aceite

Dado a que las bombas de aceite usadas en los motores de turbina son del tipo de desplazamiento positivo, se requiere que se instale una válvula de alivio de presión con la finalidad de mantener constante la presión de salida a medida que la velocidad del motor cambia.

5.4.4. Filtros de aceite

Es extremadamente importante que el aceite que circula a través de un motor de turbina de gas se mantenga tan limpio como sea posible. Para hacer esto, el aceite se filtra después de salir de la bomba de presión y una vez más antes de ser pulverizado por las boquillas inyectoras. La eficacia de un filtro de aceite se mide en micrones, siendo un micrón una millonésima de metro, o aproximadamente 39 millonésima de pulgada (0'000 039).

Los tres tipos de filtros de aceite más usados en los motores de turbina de gas son: los filtros de malla de alambre, los filtros de discos, y los filtros de fibra plegada.

Para que el motor funcione satisfactoriamente cuando el filtro está parcialmente obstruido. Estos filtros tienen sobre el alojamiento un botón indicador rojo, que salta para informar al técnico de mantenimiento que el filtro está parcialmente obstruido para que se tome la adecuada acción de mantenimiento.

5.4.5. Filtros de última oportunidad

Para asegurar que los cojinetes reciben solamente aceite limpio, muchos motores tienen filtros de tipo tamiz instalados justo delante de los inyectores de aceite. A éstos con frecuencia se les llama filtros de última oportunidad y solamente pueden limpiarse cuando el motor se desmonta para ser revisado.

5.4.6. Detector de partículas magnéticas

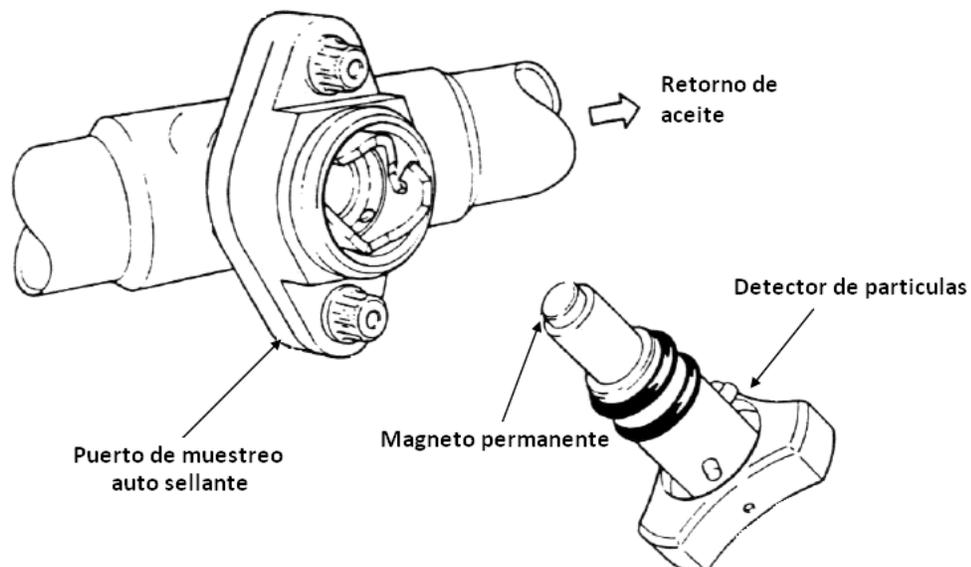
Los detectores magnéticos de partículas están instalados en los sistemas de recuperación de muchos motores de turbina, para atraer y retener las partículas de metal férrico que pudieron haber sido recogidas por el aceite y que puedan estar circulando por el sistema.

El objetivo principal de estos dispositivos es proporcionar al operador señales de alarma previas al fallo catastrófico de un equipo mecánico crítico, mediante la incorporación de sensores que detectan la presencia de contaminantes metálicos en el aceite lubricante desprendidos de cualquier elemento de máquina, para poder efectuar el diagnóstico de las averías en los sistemas lubricados, en especial en turbinas de gas y cajas reductoras de transmisión de aeronaves.

Típicamente la fatiga del metal suele ser el modo de falla de los cojinetes de los motores de turbina y en las cajas reductoras de engranajes. En el inicio de la falla, pequeñas partículas de metal que se producen son arrastrados por el aceite lubricante hacia los conductos de lubricación y el depósito principal de almacenamiento del mismo. La capacidad para detectar estos chips mientras la aeronave se encuentra en vuelo permite que el módulo afectado pueda ser transferido a una instalación de mantenimiento para efectuar su diagnóstico y programar la reparación.

Este tipo de detector combina la acción predictiva para conocer cuando existe un grado elevado de desgaste en los elementos mecánicos, así como la acción preventiva de atraer hacia ese órgano cualquier partícula procedente del desgaste de cualquier elemento que sea eliminada de la recirculación del aceite lubricante hacia los mecanismos a lubricar, disminuyendo así el desgaste y por tanto mantener bajo control la vida útil de los equipos.

Figura 14. Configuración básica de un detector de partículas magnéticas

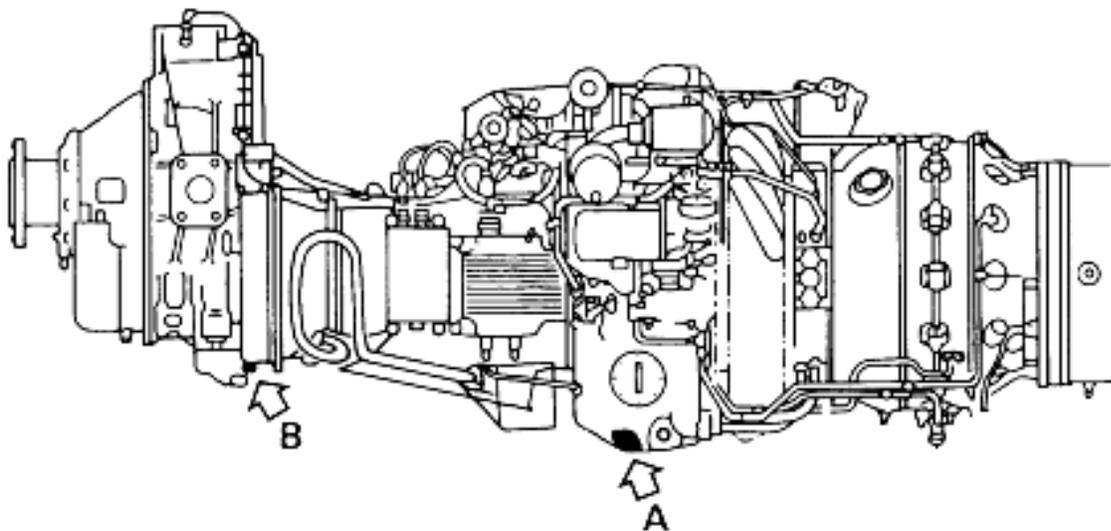


Fuente: Michael Kroes y Ralph Bent. **Aircraft Powerplants. Pág. 347**

Los detectores de partículas magnéticas están constituidos por un núcleo imantado que atrae hacia sí mismo las partículas ferromagnéticas suspendidas en el aceite. Éste a su vez, que se constituye en el polo conductor eléctrico que al existir partículas adheridas a sus terminales, aterriza la corriente eléctrica haciendo las veces de un interruptor que unido a un circuito eléctrico, indicará cuando el desgaste en un equipo mecánico controlado es excesivo y conviene proceder a su reparación.

Sobre los elementos afectados es difícil conocer el grado de desgaste, ya que efectuar el diagnóstico implicaría parar el equipo donde está contenido y desarmar el conjunto completo para observar y realizar las medidas correctivas, por lo cual es conveniente adoptar medidas preventivas basadas en las recomendaciones del fabricante, o en la experiencia en función de las condiciones en las cuales el equipo opera normalmente.

Figura 15. **Localización de los detectores de partículas magnéticas en un motor PW100**



Fuente: Pratt & Whitney Canada. **Turboprop Gas Turbine Engine Maintenance Manual. Pág. 233**

A la postre, los procedimientos de ferrografía analítica o el de espectrometría serán los métodos bajo los cuales podrá detectarse con certeza la fuente productora de las partículas, siendo la espectrometría un método más simple y mucho menos costoso.

Cualquier problema grave en este tipo de maquinas, tales como importantes desequilibrios, fallos en el engrase, deterioro de un diente de un engranaje, etc. se exterioriza mediante un contacto anormal metal - metal que produce desgaste en la zonas en contacto y desprendimiento de virutas metálicas, normalmente de origen férrico. Salvo que la maquina tenga elementos derivados del cobre, plomo u otros minerales, estos deterioros son potencialmente diagnosticados mediante la técnica de la ferrografía analítica que, basada en el análisis de partículas férricas existentes en una muestra de lubricante (cuantitativa y cualitativamente) aportará un diagnóstico del estado y del grado de evolución del deterioro.

En la actualidad, grupos de investigación han desarrollado una manera totalmente nueva y revolucionaria de detectar y medir el tamaño de las virutas de metal atrapado en las líneas de retorno de aceite de motores y cajas reductoras. Es capaz de detectar partículas en un caudal de hasta 20 galones/minuto y opera con un *software* operativo integral que analiza la salida del sensor para comprobar la señal característica generada por un chip y eliminar las señales falsas. Éste analiza el tamaño de cada partícula y se mide la tasa de generación de éstas, con los cuales calcula y establece los niveles de alarma para indicar que la tasa de generación o los límites de tamaño de la viruta se han superado.

Muchos detectores están conectados a un circuito eléctrico que ilumina una luz de aviso sobre el panel de instrumentos cuando las partículas metálicas puentean el espacio en el detector.

5.5. Mantenimiento del sistema de lubricación

El servicio del sistema de lubricación de un motor de turbina de gas es una tarea importante del mantenimiento. Los distintos tipos de motores tienen distintos requisitos, y es importante, antes de intentar cualquier servicio, estar totalmente familiarizado con las instrucciones para ese motor y su instalación en el avión en particular.

Utilizar sólo el aceite especificado en el manual de operaciones o servicios, y llenar el depósito hasta el nivel adecuado para la temperatura del aceite existente. Es siempre una buena práctica hacer el servicio al sistema de lubricación tan pronto como sea posible después de que el motor se ha parado. El motivo es que si el motor ha estado parado durante un tiempo, parte del aceite del depósito puede pasarse al motor. Luego cuando el depósito se llena a su nivel correcto, habrá demasiado aceite en el sistema.

Si cuando se compruebe el aceite antes de la puesta en marcha del motor, el nivel de aceite está por debajo de la marcación normal *"add oil"*, hacer un giro seco de motor con la puesta en marcha para permitir que el sistema de recuperación devuelva el aceite al depósito. Después comprobar el nivel de aceite y hacer el servicio según sea necesario.

El número de horas que un motor de turbina puede funcionar entre cambios de aceite es mucho mayor que para un motor alternativo. De hecho, los operadores de ciertos motores grandes no tienen un intervalo de cambio específico, sino que más bien depende del cambio de filtro y la recarga normal de aceite en lugar de un cambio de aceite programado.

El mantenimiento de los filtros de aceite es un punto muy importante en los sistemas de lubricación, debido a la importancia de la información que una adecuada observación de este elemento puede proveer al técnico respecto al estado interno del motor. Durante la inspección del filtro de aceite, los residuos en las pantallas, discos o cartuchos desechables, así como en la carcasa del filtro, deben ser examinados cuidadosamente para detectar si son de origen metálico o no. Un motor nuevo o recién reparado tenderá a presentar una pequeña cantidad de partículas en forma de polvo metálico en el filtro, de la cual esta condición no es considerada anormal.

Después que el motor ha sido operado por un tiempo y se ha cambiado el aceite una o más veces, no deberían aparecer partículas metálicas apreciables en el elemento filtrante. Si un residuo inusual de partículas de metal es encontrado en la pantalla, el motor deberá ser retirado de servicio y desensamblado para determinar el origen de las partículas. Esta precaución deberá ser tomada para prevenir de una falla desastrosa del motor durante el vuelo.

5.5.1. Análisis del aceite

Los programas de análisis de aceites lubricantes comprenden diversos procedimientos o métodos analíticos utilizados para determinar la condición actual de la operación de un aceite dentro en un sistema mecánico, los niveles de contaminación, desgaste y degradación del paquete de aditivos en los lubricantes, así como también identificar la contaminación causada por el desgaste de los componentes de la maquinaria y por elementos foráneos que ingresan al sistema de lubricación.

El análisis de aceite lubricante al ser utilizado dentro de ciertos límites, puede ser utilizado para identificar algunos problemas en el motor antes que fallas y daños mayores ocurran, asegurando así una utilización del aceite y el equipo lo más extensamente posible y libre de problemas. Existen muchos programas de análisis de aceite lubricante, por lo que las técnicas y pruebas efectuadas por cada laboratorio pueden variar ampliamente. Las consideraciones claves para la selección de la técnica apropiada incluirán: el tipo de aceite a analizar, los elementos presentes en la muestra, exactitud, precisión, costo, certificaciones del personal encargado de efectuar las pruebas y disponibilidad de equipos.

5.5.1.1. Objetivos del análisis de aceite

Los principales objetivos que persigue el análisis de aceite, cuando éste ha sido establecido dentro de un programa de mantenimiento son:

- a) Determinar las condiciones del motor, mediante el estudio de las propiedades y de los contaminantes del aceite en el sistema de lubricación;
- b) Evaluar la severidad de las condiciones de trabajo del motor, mediante el establecimiento de alertas tempranas a problemas potenciales, tomando en cuenta las diversas variables que puedan estar afectando el desempeño del aceite dentro del equipo;
- c) Establecer los periodos óptimos para el reemplazo de lubricantes en función de las características de operación y grado de contaminación;

- d) Minimizar la probabilidad de fallas en el motor y sus consecuentes tiempos de parada, así como alargar el tiempo de operación entre reparaciones programadas.

5.5.2. Descripción de los principales métodos de análisis

El programa de análisis de aceite para un motor de de aviación consta de dos áreas básicas: el análisis de contaminación del aceite y la evaluación cuantitativa y cualitativa de las partículas metálicas de desgaste presentes en suspensión, así como en el elemento filtrante. Un aspecto muy importante al seleccionar el laboratorio que llevará a cabo estos estudios es que éste deberá estar reconocido y certificado por el fabricante del motor.

Las partículas de desgaste son pequeñas cantidades de metal que han sido desbastadas durante la operación normal del motor. Por la identificación de cada metal de desgaste y la cantidad presente en la muestra de aceite, el proceso de análisis de la muestra por parte del laboratorio puede, generalmente, determinar si dicha cantidad es excesiva e incluso determinar de qué parte del motor procede. La cantidad de estas partículas está dada en partes por millón. Estas partículas de desgaste son por lo general más pequeñas que una micra ($1 \mu\text{m}$), y éstas son mucho más pequeñas de lo que el filtro de aceite es capaz de remover del sistema de lubricación, así que estas pequeñas partículas permanecerán suspendidas en el aceite.

Los contaminantes mayores serán atrapados y retenidos por el filtro de aceite. El análisis de estas partículas más grandes es también un importante punto dentro de lo que comprende un análisis de aceite lubricante.

De los métodos más comunes para analizar metales de desgaste en muestras de aceite son: el método de absorción atómica y el espectrómetro de emisión óptica.

5.5.2.1. Absorción atómica

El fenómeno de emisión atómica es un proceso mediante el cual un átomo en estado de excitación, vuelve espontáneamente a la fase de energía mínima al emitir luz. La longitud de onda de la luz emitida dependerá de la diferencia de energía entre los niveles de la transición electrónica.

En este método, una pequeña cantidad de la muestra original de aceite es quemada (ionizada) dentro de una flama de alta temperatura. Tomando en cuenta que existen múltiples niveles de energía dentro del átomo, capaces de originar cientos de posibles transiciones electrónicas, y en consecuencia, cientos de longitudes de onda o líneas de emisión por elemento producirán un espectro exclusivo de líneas de emisión, que podrá usarse para identificar el elemento.

Un equipo especial detecta la cantidad de energía absorbida de cierto elemento químico particular (en este caso de los metales de desgaste), y su cantidad en partes por millón es determinado. Este equipo se calibra para efectuar pruebas en búsqueda de un elemento específico, y debe ser reajustado para las pruebas siguientes en la búsqueda de otros elementos.

El método de absorción atómica provee el mayor nivel de precisión para cada metal analizado, pero tiene por inconveniente la gran cantidad de tiempo demorado al efectuar cada prueba. Por ejemplo, un análisis para encontrar 10 metales distintos en una muestra de aceite requiere 10 ajustes del equipo y 10 pruebas. Muchas veces,

varias muestras de aceite son analizadas en búsqueda del mismo elemento usando el mismo equipo, para lo que se calibra una vez el equipo y luego se vuelve a ajustar para la búsqueda de los otros metales.

5.5.2.2. Análisis espectroscópico

Este método es utilizado para determinar la presencia de los diferentes elementos que están presentes en un lubricante, sean estos elementos contaminantes o del paquete de aditivos del aceite.

En el procedimiento con espectrógrafo de emisión óptica, una pequeña cantidad de la muestra original de aceite se hace pasar por un atomizador para crear una niebla y seguidamente es incendiada. Debido a que cada átomo tiene su espectro específico, puede determinarse qué tipo de material se encuentra presente, ya que la intensidad del espectro es directamente proporcional a la concentración del elemento. Por lo que el dispositivo de detección mide diferentes niveles de la luz emitida. Este equipo simultáneamente puede medir la cantidad de luz emitida por más de 18 metales distintos presentes en la muestra.

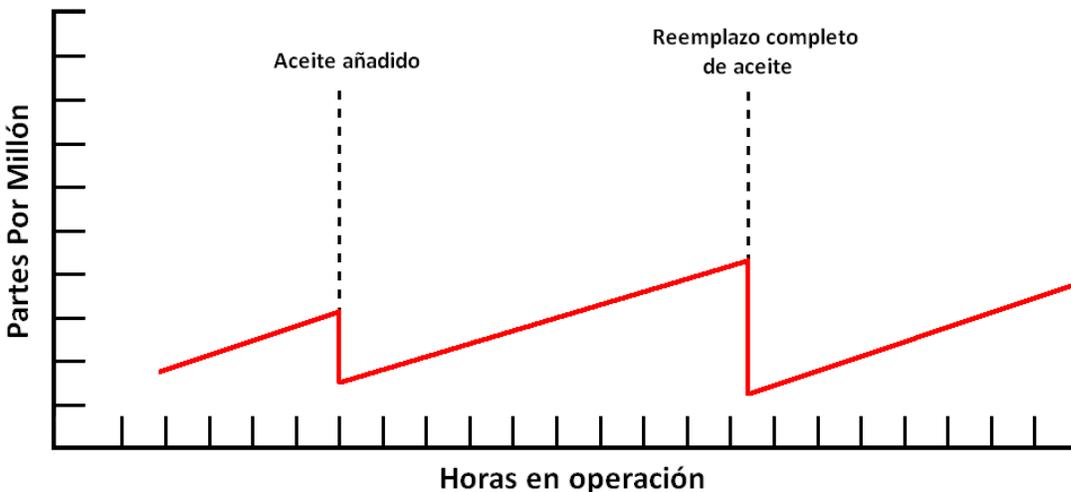
El espectrógrafo de emisión ofrece una precisión un tanto de menor que el método de absorción atómica, pero en poco más de un minuto puede ser completado un análisis de metales de desgaste. En consecuencia, este método aporta información tanto cualitativa como cuantitativa.

Debido a que ambos métodos trabajan con el mismo principio de medición de la energía radiante, las ventajas que ofrece un método sobre otro en cuanto a la precisión de los resultados y la velocidad de análisis, actualmente se emplean detectores

simultáneos y secuenciales para variadas longitudes de onda y frecuencias. En los detectores simultáneos se tiene la ventaja de de la capacidad multi-elemental de la espectroscopia de emisión, mediante el uso de múltiples detectores para medir muchos elementos al mismo tiempo. La principal ventaja de este diseño es la velocidad de análisis.

El valor real de analizar químicamente el contenido de los contaminantes presentes dentro del suministro de aceite en un sistema de lubricación, radica en la valiosa información que provee al respecto de la historia del motor previo a, e incluso, al momento de la toma de la muestra.

Figura 16. **Efectos de la adición o reemplazo total del aceite con respecto a la concentración de partículas metálicas**



Fuente: Michael Kroes y Ralph Bent. **Aircraft Powerplants. Pág. 351**

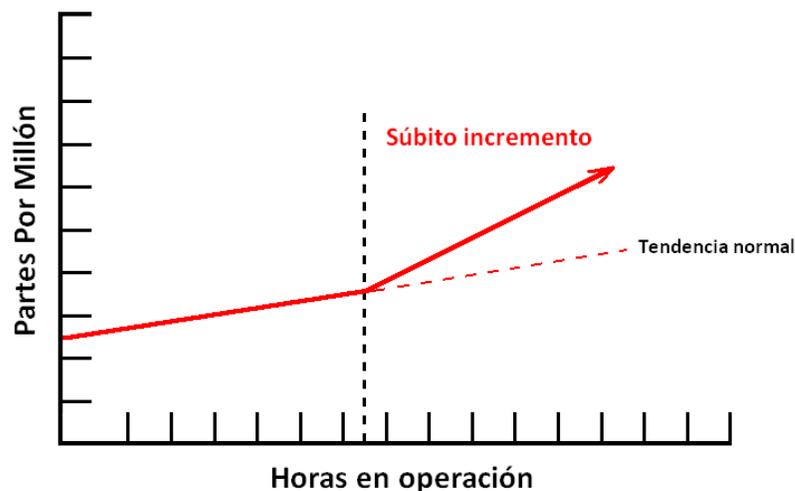
La curva descrita en la figura 16 ilustra la necesidad de la obtención de datos confiables procedentes de los análisis de aceite obtenidos en varias muestras. Esta gráfica muestra como las cantidades de algunos materiales (metales de desgaste) en el

aceite tienden a aumentar conforme las horas de operación del motor incrementan. Una de estas lecturas puede ser afectada por la adición de aceite limpio o el reemplazo total del mismo.

Si el análisis de una muestra de aceite indica un cambio repentino en la tendencia normal que se ha establecido por inspecciones previas, es bastante probable que un problema pueda estar desarrollándose, como se muestra en la figura 17.

Este cambio en la tendencia normal en el contenido de contaminantes también podría deberse a la toma de una muestra efectuada de manera incorrecta. Por ejemplo, si la muestra fue tomada de un contenedor de aceite que fue drenado a un recipiente sucio, o la información dada en la forma con la que se envió al laboratorio no era fiable, entonces obviamente la muestra no será un indicador verdadero de la condición del motor.

Figura 17. Efecto causado por el súbito incremento en la concentración de partículas magnéticas, detectado mediante análisis de aceite lubricante



Fuente: Michael Kroes y Ralph Bent. **Aircraft Powerplants. Pág. 351**

Si el súbito incremento fuera debido a una contaminación accidental, la tendencia tendría que normalizarse en el siguiente análisis de aceite. Si la tendencia de los contaminantes continuara en ascenso en las siguientes muestras tomadas entre cortos periodos de operación, como lo muestra la figura 17, esto podría confirmar el desarrollo de un problema mayor en el motor.

Mediante la comparación de los análisis efectuados en varios motores en el pasado, es posible hacer predicciones a partir de las condiciones de los mismos. Esta información puede ser utilizada por los técnicos para elegir técnicas adicionales de inspección útiles en la determinación de las condiciones de un motor.

5.5.2.3. Muestreo de aceite lubricante

El *kit* suministrado por el laboratorio incluye recipientes para las muestras tomadas del depósito de aceite y del filtro, así como un formulario con instrucciones para la toma de muestras y casillas para anotar los datos de interés para efectuar el análisis: tiempos del aceite y el filtro, modelo y número de serie del motor, tiempo transcurrido desde la última muestra de aceite, cantidad de aceite agregado desde el último muestreo, horas del motor desde el último cambio de aceite e información adicional. Todas estas instrucciones son sumamente importantes, dado que en muchas ocasiones un procedimiento de toma de muestras deficiente o falta de información en los formularios, han sido la causa principal al obtener resultados erróneos. Si el análisis refleja una condición que debe ser corregida urgentemente, el cliente deberá ser informado a la mayor brevedad posible.

En adición al análisis químico del contenido en el aceite, el criterio de muchos laboratorios es acertado al solicitar muestras procedentes del filtro de aceite también,

ya que en caso de existir partículas de desgaste de mayor tamaño no podrían ser detectadas químicamente solamente en el aceite. En este caso el filtro se enjuaga en dirección opuesta al flujo operativo para quitar todas las partículas adheridas a su superficie y que puedan ser removidas. Este análisis comprenderá el pesado de las muestras como referencia para determinar el grado de contaminación, el tamaño y forma de las partículas y el tipo de material que será analizado; esto para poder establecer la procedencia de las partículas metálicas atrapadas, y cualquiera que se encuentre, para determinar su procedencia.

Normalmente, las muestras del aceite deberán tomarse poco tiempo después de que el motor haya estado rodando. Se introduce un tubo en el depósito de aceite o en el punto de purga debidamente limpio, y este aceite se coloca en el frasco de muestra suministrado con el *kit*.

El análisis de aceite es un buen ejemplo del mantenimiento preventivo. Para que esta técnica pueda efectivamente brindar resultados positivos es importante tomar muestras frecuentemente, para poder establecer tendencias.

Un motor normal debería mostrar un lento pero constante desarrollo de metal en el aceite a medida que las horas de funcionamiento del motor se acumulan. En cada cambio de aceite, los contenidos metálicos descienden y la tendencia de desarrollo comienza a un régimen ligeramente más alto.

Es aconsejable comenzar a efectuar los análisis de aceite preferiblemente cuando el motor se encuentra nuevo o en condiciones optimas después de una reparación mayor; es aceptable también comenzar en motores que tienen acumuladas pocas horas de operación, obteniendo con esto resultados con cierto grado de certeza. Los

resultados no serán altamente confiables, ni darán información útil cuando la programación de las muestras no se efectúa en intervalos planificados con regularidad, de acuerdo a las condiciones de operación del equipo, ni tampoco se pueden sacar conclusiones cuando solamente se ha extraído una sola muestra para análisis.

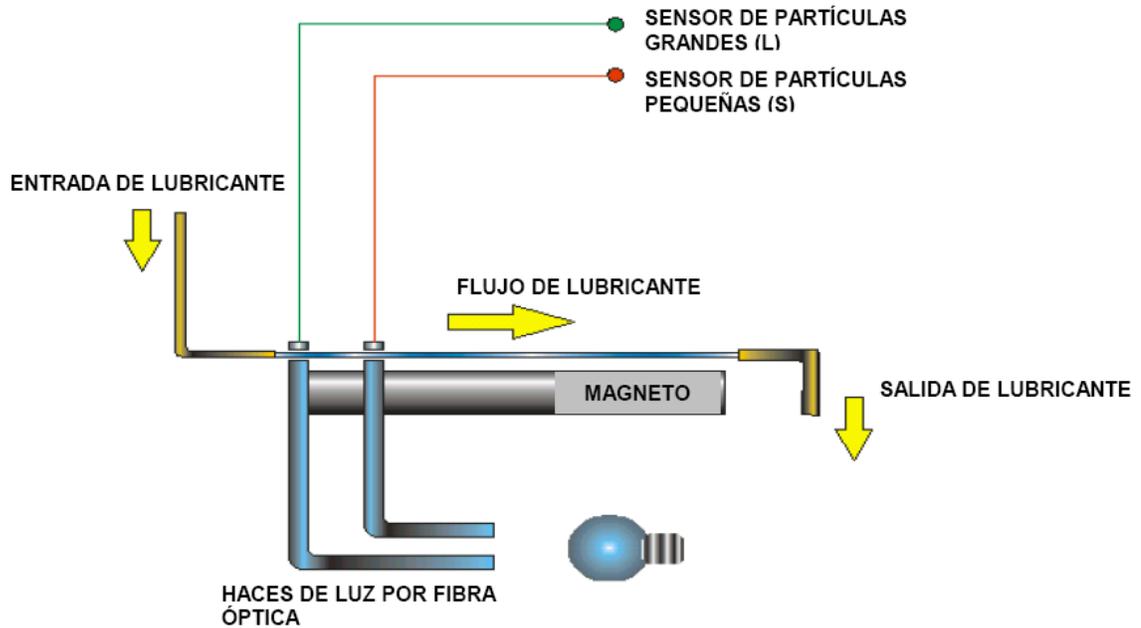
Un programa exitoso de análisis de aceite podrá ser llevado a cabo durante toda la vida operativa del motor, ya que las líneas de tendencia normal podrán ser fácilmente establecidas, y en caso alguno de los parámetros establecidos durante la vida operativa del equipo se sale de la línea normal de tendencia, podrán reflejar con certeza que el motor está experimentando el desarrollo de alguna falla.

5.5.2.4. Ferrografía directa (conteo de partículas)

La ferrografía directa consiste en una medición cuantitativa de la concentración de las partículas ferrosas en una muestra de fluido a través de la precipitación de esas partículas en un tubo de vidrio sometido a un fuerte campo magnético.

Dos rayos de luz transportados por fibra óptica impactan sobre el tubo en dos posiciones correspondientes a la localización en la cual las partículas grandes y las pequeñas serán depositadas por el campo magnético. La luz es reducida en relación a las partículas depositadas en el tubo de vidrio y esta reducción es monitoreada y medida electrónicamente. Dos conjuntos de lecturas son obtenidos de las grandes y pequeñas partículas (partículas por encima de 5 micras y partículas por debajo de 5 micras). Generalmente, más de 20000 partículas mayores de 5 micras indican una alerta de seguimiento y más de 40000 son excesivas e indican problemas de desgaste en componentes ferrosos de la maquina.

Figura 18. Diagrama esquemático de un sistema de conteo de partículas



Fuente: [Http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf](http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf)

Actualmente se impone un refinamiento de este método (otro sensor después del S) permite obtener en número de partículas en total de partículas mayores de 1.2 micras, el total de partículas mayores de 5 micras y el total de partículas mayores de 12 micras.

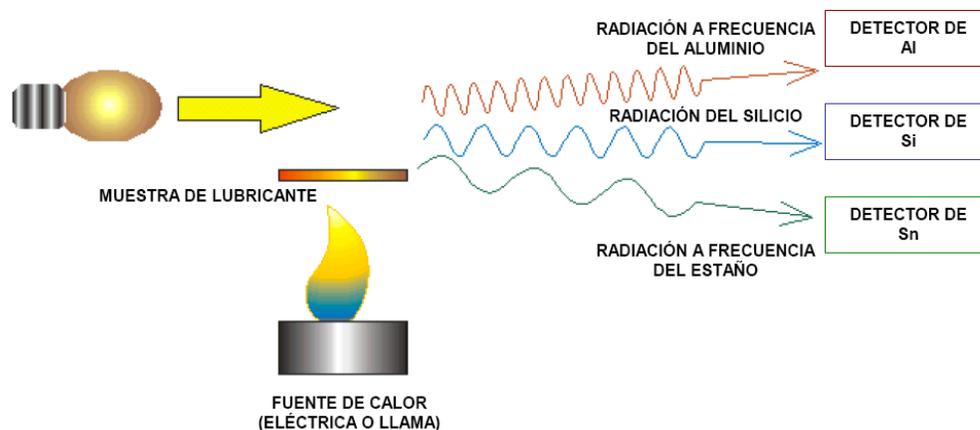
Dentro de sus desventajas se menciona que sólo mide partículas ferromagnéticas y para ser decisiva requiere de un análisis posterior de ferrografía analítica.

5.5.2.5. Espectrofotometría de absorción atómica (detección de elementos presentes)

Este análisis, en conjunto con el conteo de partículas, es el más popular en la implementación de programas de mantenimiento predictivo, debido a que en los

centros industriales, los proveedores de lubricante ofrecen el servicio como un valor agregado a la venta. El principio básico consiste en someter la muestra de lubricante a una fuente alto voltaje (15 kV) en la cual se calienta y libera energía. Fenómenos especiales de radiación se generan, en los cuales se pueden diferenciar y asignar las radiaciones a diferentes frecuencias a elementos específicos constituyentes del lubricante. La intensidad de radiación a una frecuencia específica es proporcional a la concentración de su respectivo elemento.

Figura 19. **Esquema del análisis espectrofotométrico**



Fuente: [Http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf](http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf).

Algunos de los elementos detectados más importantes son:

| | |
|------------------|--------------------------------|
| Silicio: | polvo, aditivos antiespumantes |
| Calcio: | polvo, aditivos detergentes |
| Bario, magnesio: | aditivos detergentes |
| Hierro: | engranajes y rodamientos |
| Cromo: | anillos y camisas de pistón |
| Aluminio: | pistones |

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| Estaño, cobre, plata: | cojinetes |
| Plomo: | contaminación con gasolina |
| Vanadio, sodio: | combustible quemado |

El fabricante del aceite cuenta con tablas de valores máximos de elementos en el lubricante, en relación al tipo de máquina y proceso productivo.

Otro análisis generalmente incluido en este tipo de reportes es el de propiedades fisicoquímicas. Incluye referencias a la oxidación, apariencia, porcentaje de agua y viscosidad.

- Ventajas: se pueden obtener las concentraciones de elementos simultáneos (20 a 60 elementos). La prueba dura alrededor de un minuto. Su costo es bajo;
- Desventajas: puede fallar al vaporizar partículas más grandes de 10 micras. No diagnostica por sí sola el tipo de desgaste presente.

5.5.2.6. Ferrografía analítica

Es una técnica que permite la exanimación microscópica y el análisis de las partículas del desgaste separadas de todo el tipo de fluidos. Desarrollada a mediados de los años 70 como técnica predictiva del mantenimiento, fue utilizado inicialmente para precipitar magnéticamente partículas ferrosas del desgaste de los aceites lubricantes. Esta técnica fue utilizada con éxito para supervisar la condición de los motores, de las cajas de engranajes, y de las transmisiones de aviones militares.

Cuando es implementada correctamente provee gran información de causa raíz. A pesar de sus capacidades es frecuentemente excluida de los programas de análisis de aceites, debido a que comparativamente, es bastante costosa. Además, es una prueba que requiere tiempo, paciencia y alta habilidad por parte del analista. Por lo tanto, este análisis representa costos significativos que no se presentan en otros análisis de aceites.

El principio de la ferrografía analítica consiste en separar sistemáticamente el material particulado suspendido en el lubricante, sobre una plaqueta de vidrio. La plaqueta es examinada bajo el microscopio para distinguir tamaño, concentración, composición, morfología y condición superficial de las partículas ferrosas y no ferrosas que caracterizan el desgaste.

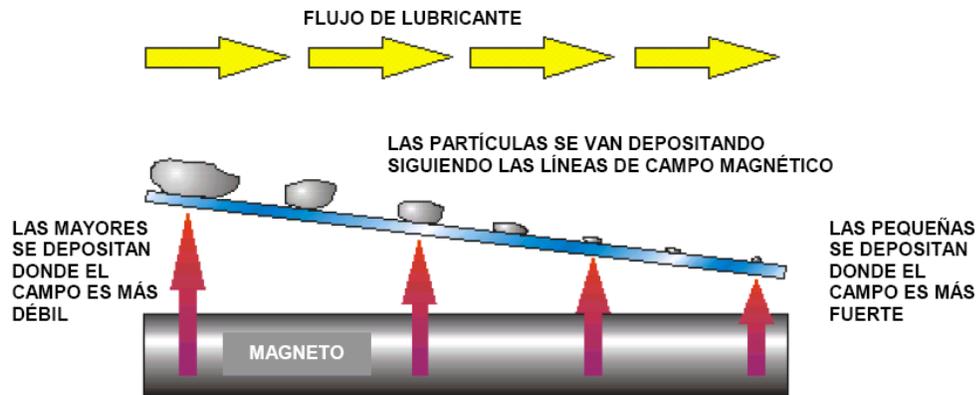
El examen detallado descubre los misterios de las condiciones de desgaste anormal apuntándolo hacia el componente fuente, con un excelente acercamiento a la causa raíz del problema.

5.5.2.6.1. Ferrograma

El lubricante a examinar se diluye para mejorar la precipitación de partículas y la adhesión a la plaqueta. La muestra diluida se hace fluir sobre la plaqueta por gravedad (la plaqueta se posiciona inclinada). La plaqueta, a su vez descansa en un magneto el cual atrae las partículas ferrosas y permite la adherencia en la plaqueta.

Debido al campo magnético las partículas ferrosas se alinean en cadenas horizontales a lo largo de la plaqueta; las partículas más grandes se depositan hacia el punto de entrada y las pequeñas hacia el punto de salida.

Figura 20. Preparación del ferrograma



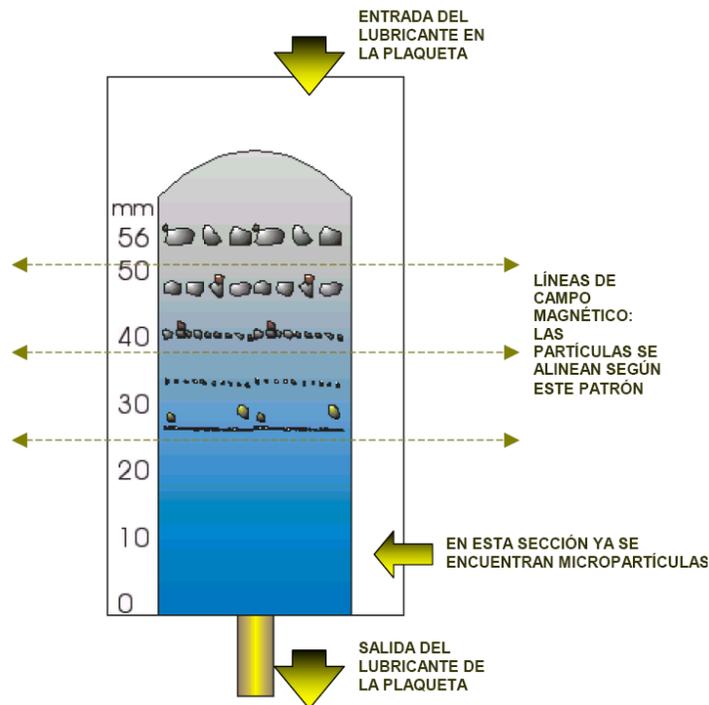
Fuente: [Http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf](http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf)

La ausencia de partículas ferrosas reduce sustancialmente la efectividad del análisis de las no ferrosas.

La plaqueta preparada de esta manera con estas cadenas de partículas, se denomina ferrograma. Después de que las partículas son depositadas en el ferrograma la plaqueta se lava y las partículas quedan permanentemente adheridas. El ferrograma será luego analizado utilizando un microscopio bicromático.

El ferrograma es examinado bajo un microscopio bicromático polarizado equipado con una cámara digital. El microscopio utiliza dos luces: una superior de color rojo (reflejada) y una inferior de color verde (transmitida). Este juego de luces ayuda a distinguir tamaño, forma y geometría de las partículas ferrosas y no ferrosas. Las partículas son clasificadas para determinar el tipo de desgaste y su causa.

Figura 21. Preparación del ferrograma



Fuente: [Http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf](http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf)

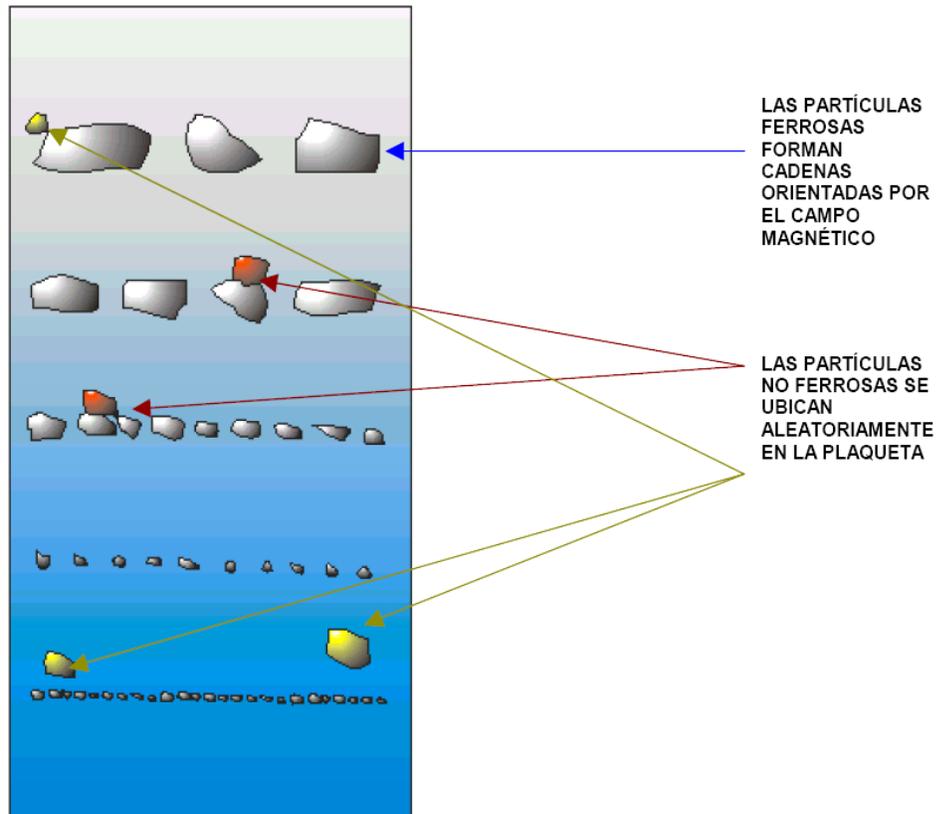
Se identifican seis categorías de partículas:

- a) Partículas blancas no ferrosas
- b) Partículas de cobre
- c) Partículas del babbitt
- d) Contaminantes
- e) Fibras
- f) Partículas ferrosas
 - Acero de alta aleación
 - Acero de baja aleación
 - Óxidos metálicos negros

- Fundición de hierro
- Óxidos rojos (herrumbre)

Después de la clasificación e identificación de la composición se pondera el tamaño de las partículas usando una escala micrométrica en el ocular del microscopio. Partículas con un tamaño mayor de 30 micras definen condiciones severas o anormales.

Figura 22. **Identificación de partículas**



Fuente: [Http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf](http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf)

Frecuentemente la forma de la partícula es una clave importante sobre el origen del desgaste. Partículas laminares indican aplastamiento en las áreas de rodamientos por alta presión o contacto lateral.

Las estrías son signos de desgaste por arrastre sin lubricación y las esferas son generadas en presencia de fatiga en los rodamientos. Un incremento en ellas indica exfoliación.

- **Ventajas:** el análisis del tamaño, color, forma, cambios en tratamiento térmico y efectos de luz de las partículas de desgaste indica al analista experto la naturaleza, severidad y causa raíz de un desgaste anormal. Esta información habilita al grupo de mantenimiento para implementar acciones correctivas y preventivas con excelente asertividad. Se detectan problemas mucho más tempranamente que con el análisis de emisión y espectrometría. Acerca al analista a la causa raíz del problema;
- **Desventajas:** requiere gran experiencia para la lectura del ferrograma. La preparación de la muestra requiere tiempo. Tanto los equipos como los costos de las pruebas son bastante altos en comparación con los otros tipos de análisis.

5.5.3. Aplicaciones de los análisis de aceite y partículas en turbinas de gas para aeronaves

Motores tipo *jet* y derivados de éstos son susceptibles a varios mecanismos de falla. Algunos de estos modos de falla avanzan muy rápidamente, mientras que los otros se pueden aclarar centenares de horas de operación antes de que una condición de cierre se alcance.

La mayoría de las fallas en las turbinas de gas ocurren en el paso del gas. Estas fallas con frecuencia, pero no siempre, causan un aumento en el tamaño de la partícula del desgaste y concentración en el sistema del aceite, posiblemente debido a la transmisión de fuerzas de desequilibrio a los cojinetes de turbina y otras partes lubricadas. El resultado de estos efectos en los cojinetes y el consecuente desgaste en los engrane es entonces detectado por el análisis del aceite y el análisis de partículas de desgaste.

Determinar la fuente exacta del problema del desgaste puede ser difícil en una turbina de gas a causa de la complejidad de los sistemas de paso de aceite.

Típicamente el lubricante es forzado a pasar por distintas cavidades que albergan cojinetes y engranes sometidos a lubricación forzada por líneas individuales de retorno conectadas a un tanque de bombeo de aceite, luego este lubricante pasa por un filtro y un intercambiador de calor hasta que el ciclo se completa y se repite continuamente.

Los detectores magnéticos de partículas a menudo se instalan en las líneas de retorno de aceite en varias partes del motor. Éstos pueden ayudar a localizar con toda precisión la fuente de generación en los casos donde la metalurgia de la partícula, determinada por ferrogramas de calor-tratando, es semejante para varias partes de motor.

Sin embargo, los detectores magnéticos no darán una advertencia hasta que la situación de desgaste sea tan severa que se generen partículas de gran tamaño. En ese momento, la oportunidad para el mantenimiento predictivo esté perdida. Otras técnicas analíticas, tal como el análisis de la vibración, pueden ayudar a localizar con toda precisión la parte afectada utilizando un software especial que procese todos los

datos obtenidos, para luego efectuar las recomendaciones al departamento de mantenimiento y se efectúen las acciones correctivas. En todo caso, las herramientas del mantenimiento predictivo integradas ofrecen al ingeniero de mantenimiento la mejor herramienta de decisión.

6. MODELO PROPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN LOS ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE Y DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

El mantenimiento basado en condición consiste en monitorear los parámetros de operación de los equipos para detectar condiciones anormales que permitan predecir su falla. Estas acciones, eliminan en buena medida la incertidumbre respecto a la confiabilidad de la máquina y permite que ésta no falle de manera repentina o catastrófica.

El mantenimiento basado en la confiabilidad (MBC) es una estrategia de mantenimiento, que actualmente está basada en la filosofía del mantenimiento predictivo: reconocer los síntomas de falla de una maquinaria, para poder predecir el momento en la que ésta se presentará. Una vez identificadas la falla o el componente que la puede estar provocando, se programa su reparación o reemplazo, evitando así una falla catastrófica.

Por otra parte, aplicar la estrategia de mantenimiento proactivo, significa reconocer las causas que ocasionan las fallas y establecer una estrategia que permita controlarlas y en un mejor caso, eliminarlas para atenuar y desaparecer su efecto y por consiguiente sus síntomas. Los programas exitosos de MBC aplican una combinación de ambos tipos de mantenimiento, con la finalidad de obtener los beneficios de ambas filosofías.

La importancia de una lubricación adecuada es un factor de suma importancia en la vida útil de la maquinaria. Los aceites lubricantes además de tener la función de proteger los principales componentes de la maquinaria, remueven los contaminantes y los transportan para que éstos puedan ser eliminados del sistema mediante los dispositivos de filtrado. Esta función convierte a los lubricantes en fuentes de información importante acerca de la presencia de contaminantes de distinta índole que puede ser causantes de fallas (función proactiva), así como también servir de vehículo para advertir la presencia de partículas metálicas de desgaste de la maquinaria (función predictiva).

Es así, que el análisis de aceite es una técnica simple, pero que es capaz de proporcionar gran cantidad de información al profesional de mantenimiento, con respecto a:

- La salud del lubricante (función proactiva)
- Grado de contaminación (función proactiva)
- Evidenciar el grado de desgaste de la maquinaria (función predictiva)

La práctica establece que los programas de análisis de aceite exitosos, son aquéllos que han sido diseñados después de una cuidadosa evaluación de la misión, metas y objetivos para su implementación. De lo contrario, un programa establecido sobre bases débiles se convertirá en un derroche de tiempo y recursos.

Constantemente estos programas deberán ser sometidos a reingeniería en donde se podrán efectuar los cambios para que de acuerdo a los resultados obtenidos en las fases iniciales, progresivamente se puede comenzar a aplicar la estrategia del mantenimiento proactivo, y así poder obtener los importantes beneficios que dicha

filosofía ofrece. Los programas deben además incorporar nuevas tecnologías y cambios estructurales y estratégicos, así como ajustarse al resto de estrategias y filosofías de mantenimiento aplicadas en la industria. De esta premisa se infiere que para poder iniciar un programa exitoso, la educación y el entrenamiento es parte fundamental de este proceso, y los mismos deberán ser dirigidos a todos los niveles de la organización.

Los principales beneficios del monitoreo de condición de la maquinaria son determinar la condición actual del equipo para asegurar su operación de manera segura, eficiente y económicamente sustentable. Estos beneficios se obtendrán como producto de la determinación de los siguientes parámetros:

- Detección de las condiciones que puedan causar fallas (mantenimiento proactivo)
- Detección de problemas actuales en el equipo (mantenimiento predictivo)
- Diagnosticar la causa de la falla (mantenimiento proactivo)
- Pronóstico de la utilidad (mantenimiento predictivo)

El monitoreo de condición estudia la evolución de los parámetros seleccionados en función del tiempo y, establece una tendencia que indica la existencia de un fallo, su gravedad y predecir el tiempo en el que el equipo puede fallar.

6.1. Diseño del programa

Para la construcción de un modelo para implementación de un programa de mantenimiento basado en los análisis de aceite lubricante, se hace necesario llevar a cabo el seguimiento de ciertos pasos lógicos que asistirán al profesional de mantenimiento a llevar una planificación sistemática y ordenada para asegurar el éxito de este programa.

6.1.1. Establecimiento de metas y objetivos del programa

Este primer paso es, en algunos casos, el más difícil para desarrollar un plan de mantenimiento predictivo. Determinar exactamente qué es lo que se quiere obtener del programa y en cuánto tiempo se desea obtener los primeros resultados. Usualmente el mejor inicio es trabajar sobre una base limitada y expandirse después de obtener algunos resultados positivos.

Para efectos del presente trabajo y con la finalidad de citar algunos de los objetivos que un programa de esta naturaleza busca, específicamente en motores de aviación, los beneficios comúnmente esperados son:

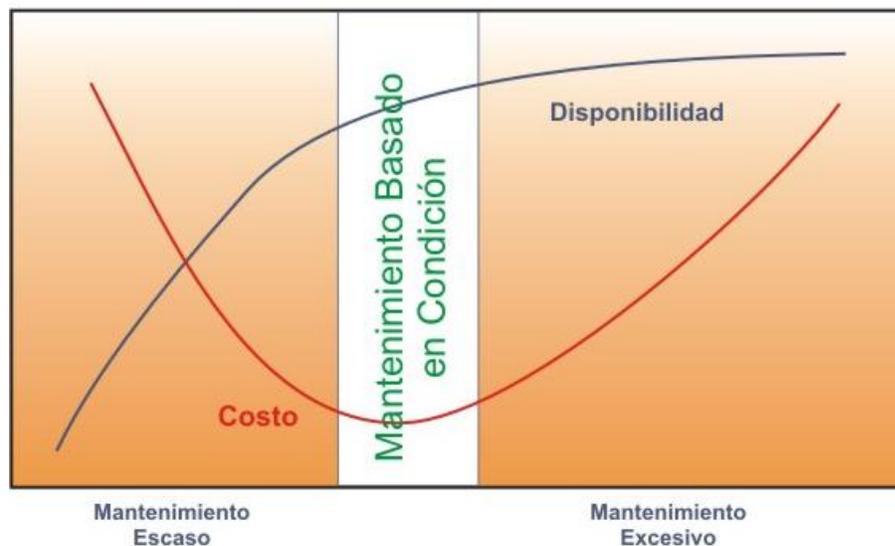
- Disminuir la probabilidad de falla del motor durante su operación en vuelo (aumento de confiabilidad);
- Alta disponibilidad operacional, como una consecuencia de la alta confiabilidad del equipo; lo que se traduce en una producción constante del servicio de la aeronave en la que el motor se encontrará instalado;
- Ampliación de los intervalos entre reparaciones, con lo que se incrementa el tiempo efectivo de vida en servicio y se disminuyen los costos de operación al operar de forma segura el motor, por más tiempo;
- Disminución de los costos operativos al reducir la probabilidad de fallos inesperados, cese de operación y lucro cesante, compra de partes no planificada, pago de horas hombre extra y puesta fuera de operación del motor.

6.1.2. Selección del equipo, clasificación y codificación

La selección de los equipos se efectúa tomando en consideración el nivel de criticidad del equipo, la confiabilidad y disponibilidad, nivel de seguridad y los costos asociados a operación y tiempos muertos. En cualquier entorno, se debe considerar una condición de optimización de estrategias de mantenimiento, de tal manera que los costos de la aplicación de tecnologías y estrategias no sean superiores a aquéllos que se tratan de evitar.

En industrias, tales como: la generación de energía y la petroquímica, los análisis de vibración han sido los ensayos más importantes, en la determinación de la condición de las grandes maquinarias rotatorias. De manera inversa, las compañías de transporte y de maquinaria pesada, confían en los análisis de aceite lubricante para la toma de decisiones efectivas de mantenimiento en forma predictiva.

Figura 23. Optimización del mantenimiento



Fuente: Lourival Tavares. **Administración moderna del mantenimiento.** Pág. 92

Para efectos de la presente investigación y propuesta, el proceso de codificación es bastante simplificado, ya que tomando en cuenta que se está tratando de un grupo de motores de un modelo específico, la codificación para su identificación se hará tomando únicamente el número de serie de cada uno de ellos para diferenciarlo. El código está dividido en: modelo del motor más el número de serie, quedando de la forma siguiente: PW120 120XXX.

6.1.3. Selección de la tecnología y el laboratorio de diagnóstico adecuado

La selección de la tecnología adecuada para cada tipo de equipo depende de diversos factores, tales como: el tipo de maquinaria, el modo de falla a diagnosticar y la capacidad de inversión.

Una de las mejores maneras para evaluar la tecnología adecuada es mediante el análisis de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF). Otras opciones incluyen el desarrollo de los análisis de causa raíz, análisis de Pareto y análisis de frecuencia de falla, etc. Independientemente de cuál sea el análisis a aplicar, lo importante es que el programa esté dirigido a determinar la causa de la falla y puedan obtenerse los indicadores de deterioro. Una vez se ha efectuado el análisis de las causas de la falla crítica en el equipo, es importante determinar una acción de mantenimiento que permita eliminarla, detectarla y controlarla. En este punto se dan las condiciones para poder elegir la técnica de análisis y la estrategia más adecuada tomando en cuenta si ésta responde a las preguntas:

- ¿De dónde proviene la falla?
- ¿Qué la causa?
- ¿Qué tan severa es?

- ¿Es controlable?
- ¿Puede predecirse en cuanto tiempo ocurrirá la falla?

Las estadísticas prueban que aproximadamente el 10% de las causas generan el 90% de las fallas, por ello resulta fundamental no continuar gastando valiosos recursos en las consecuencias de las mismas fallas.

Las maquinarias rotativas tienen asociada una probabilidad de falla que se incrementa a medida que aumenta el nivel de desgaste en el sistema. Es por ello que, siendo un motor de turbina de gas dependiente de una óptima lubricación, cualquier tipo de contaminación que se encuentre en su sistema puede describirse como una falla incipiente. Esto significa que aunque el equipo no experimente una pérdida de desempeño durante su operación normal, las condiciones que llevan a la falla y reducen la vida de sus componentes internos pueden encontrarse presentes, por lo que siendo éstas una constante amenaza al equipo, el análisis de aceite lubricante es la herramienta que mayores beneficios podrá aportar en el desarrollo del programa.

Para llevar adelante el programa sobre una base predictiva, es fundamental entender que los fabricantes de los equipos y los lubricantes establecen los límites aceptables de operación tomando en consideración que no todos los equipos por iguales que éstos sean, estarán desempeñando su función en las mismas condiciones ambientales y operacionales entre sí.

Para poder apegarse a los límites mínimos que exigen los fabricantes es altamente recomendable comenzar a atacar las principales fuentes de contaminación, tomando como inicio las instalaciones de almacenamiento de materiales, a manera que se pueda verificar que se llevan a cabo los cuidados mínimos de los lubricantes. Desde

este punto, la estrategia ya está tomando en cuenta el manejo adecuado de los aceites, previo a su uso en el motor, evitando el ingreso de agentes contaminantes (aire, agua y polvo principalmente) que aceleran el proceso de degradación natural del aceite y, que son potenciales responsables del desgaste prematuro del motor.

Teniendo conocimiento de estas condiciones, la elección del laboratorio deberá hacerse tomando en cuenta los siguientes requisitos mínimos: ¿es un laboratorio aprobado por el fabricante del motor?, ¿cuenta éste con los requisitos y certificaciones mínimas para los tipos de ensayo requeridos?, ¿velocidad de respuesta para los análisis?, ¿hay algún valor agregado por los servicios de análisis de aceite y partículas, tales como seguimiento a las tendencias, entrenamiento a los técnicos, etc.?. Es importante que todos estos aspectos sean cubiertos a la hora de seleccionar el laboratorio, pues de la veracidad de los resultados y la calidad del servicio que brinde impactará de forma directa en el mantenimiento y la confiabilidad de los equipos. Además que de la inversión que se hará al firmar el contrato de servicio a corto o largo plazo, podrás obtenerse el máximo provecho posible.

6.1.4. Elaboración de cronogramas de inspección inicial

Antes de poner en marcha el programa de análisis de aceites, corresponde elaborar un cronograma de inspecciones iniciales a la flota, con el objetivo de conocer la condición actual de los motores. Muy importante sería que éstas fueran llevadas a cabo al mismo tiempo, debido a que las condiciones ambientales son las mismas; entonces los resultados obtenidos, en el mejor de los casos, será muy similar en todos los equipos. También esto variará de acuerdo al desgaste normal del motor.

Datos de importancia para el inicio de las inspecciones son:

- Tiempo acumulado del motor desde nuevo
- Ciclos acumulados desde nuevo
- Horas transcurridas desde la última inspección mayor
- Horas transcurridas desde la última inspección de sección caliente
- Horas transcurridas desde la última adición de aceite al sistema o último cambio de aceite efectuado
- Tipo de aceite utilizado

Dado a que el programa también contempla el análisis y monitoreo por posible contaminación por partículas magnéticas en el sistema de lubricación, también es requerido que en cada chequeo se efectúen las inspecciones a los detectores de partículas magnéticas.

6.1.5. Selección de *software* adecuado para almacenamiento y análisis de la información

El manejo adecuado de la información será la columna vertebral sobre la cual el programa de mantenimiento se basará para ingreso de los datos de inspección inicial para cada motor en el programa, programación de las inspecciones de acuerdo a los intervalos iniciales propuestos y resultados de las pruebas efectuadas en el laboratorio.

Posteriormente, cuando los primeros resultados de laboratorio sean recibidos, el programa deberá calcular y ajustar la frecuencia de inspección a cada motor, almacenar los datos históricos para referencia futura, establecer las tendencias iniciales y los límites operativos permisibles de control, consumo de aceite entre

inspecciones, consumo de combustible, y demás anotaciones y comentarios que puedan ser indicativos de una operación normal o anómala que puedan facilitar el proceso de la investigación predictiva.

Para el manejo de información, bases de datos y generación de reportes existen en el mercado muchas opciones viables, cuyo precio está sujeto a las variaciones que el operador requiera. Si el operador considera que no es necesario invertir una cantidad considerable para este programa, un paquete de computación, tal como *Microsoft Excel*[®] es una opción bastante útil y flexible para el manejo de la información. Se hace preciso que la persona responsable de administrar la base de datos posea habilidades y experiencia en bases de datos, así como un buen manejo de archivos y preparación de informes ejecutivos concisos, que sean de utilidad en la toma de decisiones por parte de la alta dirección.

6.1.6. Programa de entrenamiento

Para que el programa sea capaz de generar información valiosa y útil para cumplimiento de los objetivos, debe precisarse de un programa de entrenamientos al personal involucrado de las tareas de inspección y análisis de información.

Debe determinarse si dicho entrenamiento puede ser impartido por personal propio de la empresa, o si por ser éste muy especial se debe subcontratar personal externo para impartirlo. Es importante elaborar un calendario de entrenamientos para familiarizarse con los nuevos procesos que el plan de mantenimiento y las técnicas asociadas requieren.

6.1.7. Creación del sistema de archivo histórico de los equipos e implementación del registro de inspecciones

Para concretar la fase de planificación e iniciar la construcción de las bases de datos que alimentarán al programa, es imperativo recopilar la mayor cantidad de información disponible que ayude a la construcción de los archivos históricos de los equipos.

Esta labor podrá efectuarse entrevistando e investigando los registros en las áreas directamente implicadas en la operación de los equipos: operaciones (producción), planificación, mantenimiento, compras y materiales, ingeniería y confiabilidad. Esto con el fin de tener a la mano todos los aspectos relevantes que permitan crear el perfil general de las condiciones operativas del equipo basado en el historial de mantenimiento, historial de fallas, ordenes de trabajo, reportes de fallas y paros inesperados, cambios en las condiciones de operación y ambientales, etc.. Esta información es útil para medir la efectividad del programa de mantenimiento que la organización lleva a cabo actualmente.

Más adelante, este indicador servirá para comparar el desempeño entre las metodologías anterior y presente, al ser implementado por completo el programa propuesto en el presente trabajo. Toda esta información aportará soporte adicional en la definición de la estrategia propuesta por el programa, validando si la misma es la más adecuada para alcanzar los objetivos y metas propuestas al inicio, justificando la implementación de disciplinas adicionales para llegar a alcanzarlos en caso fuera necesario.

6.2. Implementación del programa

6.2.1. Recopilación de datos iniciales y establecimiento de límites operativos

De conformidad con el cronograma de inspecciones iniciales en la flota, se deberá dar paso a la toma de los primeros datos/muestras en cada uno de los equipos. Es recomendable, siempre que las condiciones así lo permitan, efectuar esta toma de datos cuando los equipos son nuevos o han sido restaurados, para establecer las líneas base de todos los parámetros cuando el equipo se encuentra en su condición óptima. Idealmente los equipos deberían operar bajo las mismas condiciones ambientales y en regímenes de operación similares, para detectar variaciones significativas entre ellos.

En el caso de la industria del transporte esta condición es difícilmente realizable. Dadas las complicaciones para obtener un escenario ideal, se recomienda efectuar una campaña de revisión de las tareas de mantenimiento programado, y determinar que todas éstas se hayan efectuado a su debido tiempo y cumplidas de acuerdo a la fecha estipulada. Habiendo cumplido con éstas consideraciones, se puede proceder a la toma de datos.

Para construir las líneas base de cada uno de los parámetros a considerar, deberá efectuarse la primera toma de datos en toda la flota en una fecha específica. Consecutivamente y de acuerdo a la unidad de medida especificada para el cómputo de los intervalos de inspección (horas de operación, ciclos o por tiempo determinado), se determinará la programación de la inspecciones subsiguientes.

Para establecer las líneas base se recomienda utilizar en las primeras cinco muestras un intervalo semanal o quincenal como máximo. Esto permitirá obtener con

mayor rapidez la medida promedio para cada parámetro. Con esta línea base se calculan los límites inferior y superior para cada uno ítem, basado en los manuales y recomendaciones del fabricante. Hay que recordar que cada equipo posee distintas características y por ende niveles de tolerancia.

En función de la criticidad del equipo y de cada parámetro, será calculado el coeficiente de seguridad para establecer los distintos niveles de alarma. Para aclarar este punto es fundamental definir los tipos de alarmas existentes:

- Alarmas estadísticas
- Alarmas absolutas

Las alarmas estadísticas están basadas en los propios valores registrados en el equipo. El análisis de la tendencia estadística permite identificar las fallas incipientes de acuerdo al comportamiento de uno o varios de los parámetros observados. Las alarmas absolutas son límites condenatorios que se aplican al estado de contaminación del lubricante, y que pueden restringir la operación del equipo basado en las recomendaciones del fabricante, en el caso que las hubiera, o en su defecto a las recomendaciones del laboratorio que analiza las muestras. No se debe olvidar la variabilidad inherente a la propia exactitud de las pruebas que se realizan.

Haciendo especial énfasis en remarcar la importancia que para poder identificar las causas de falla, deben tenerse en cuenta las condiciones operativas y ambientales. Dos equipos idénticos con condiciones operativas y ambientales disímiles no requerirán las mismas intervenciones de mantenimiento, ni presentarán la misma clase de fallas. Para el caso de equipos idénticos en condiciones operativas similares, es posible utilizar las mismas alarmas estadísticas.

6.2.2. Establecimiento de interfases con los laboratorios de análisis

La selección adecuada de la institución que se encargará de recibir la información, procesar y enviar las recomendaciones para cada caso, es de suma importancia, ya que de la precisión y rapidez en la entrega de los informes dependerá el buen funcionamiento de los equipos analizados.

Figura 24. **Ciclo del análisis de aceite tradicional**



Fuente: elaboración propia

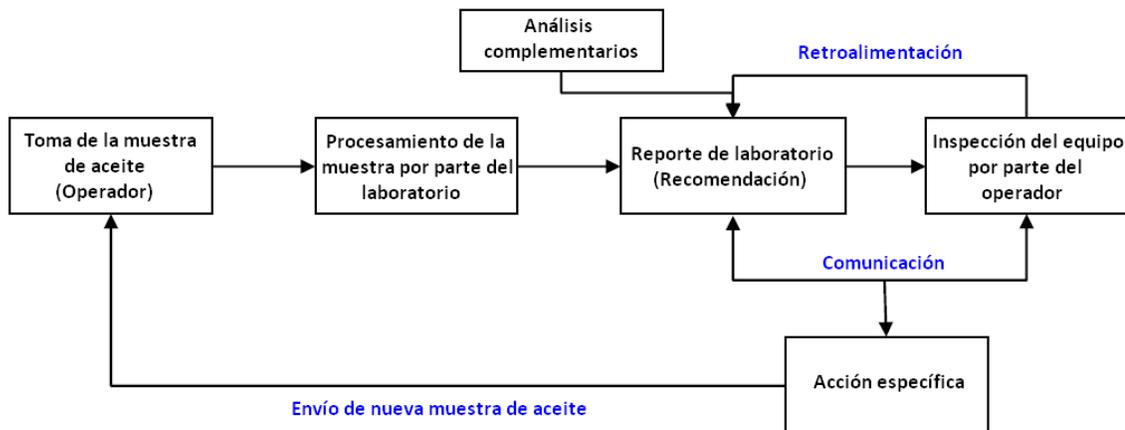
El laboratorio que se encargará de analizar las muestras deberá ser previamente evaluado, tomando en cuenta todos aquellos asuntos correspondientes a cumplimiento de normas, reconocimiento y/o certificación por parte de los fabricantes de los equipos, precisión en los análisis, velocidad de respuesta, etc.

Puede darse el caso que un laboratorio cumpla con estos requisitos, pero que a la larga nunca se llegue a establecer una relación laboratorio-operador, lo cual se verá reflejado en el beneficio obtenido versus el costo.

Tradicionalmente la relación entre el laboratorio y los operadores no va más allá del cumplimiento únicamente del trabajo que le es encomendado: recibo de la muestra, análisis y envío de resultados. Esta interfaz se ejemplifica en la figura 24.

Al desarrollarse la relación operador-laboratorio los beneficios para ambos son mutuos, ya que el operador puede obtener beneficios mayores por cada muestra enviada para análisis (valor agregado) al tener un respaldo de seguimiento por parte del laboratorio, que lo puede asesorar para tomar una mejor decisión con respecto a la condición actual de su equipo. El laboratorio por su parte se fortalece al brindar estos servicios que pueden llevarlo a suscribir contratos de mediano y largo plazo. La figura 25 ejemplifica esta interfaz.

Figura 25. **Ciclo propuesto para análisis de aceite**



Fuente: elaboración propia

6.2.3. Entrenamiento al personal a cargo de la interpretación de los datos de laboratorio

El trabajo del personal encargado de interpretar las muestras no se limita únicamente al recibir los resultados del laboratorio. Confiar ciegamente en los resultados procedentes del laboratorio suele ser un error muy común en la industria.

Es por ello, que el entrenamiento al personal participante en el programa debe ser integral, al brindar un panorama general del proceso y luego enfatizar en cada una

de sus etapas; desde las etapas iniciales cuando se planifica la toma de la muestra, manipulación, envío al laboratorio, interpretación de los resultados y finalmente, la aplicación de las acciones correctivas.

En muchas ocasiones, aún cuando los errores incluidos dentro de los procesos anteriores se hayan minimizado, se falla en la implementación de las acciones correctivas necesarias para mitigar el modo de falla incipiente hallado. La falta de procedimientos, la ausencia de capacitación y/o fallas en los controles son algunas de las causas que inciden en la falla catastrófica del equipo.

Muchas empresas, por ejemplo, invierten mucho dinero en capacitar a quién interpreta los análisis de aceite, pero muy poco o nada, en quién debe llevar a cabo la acción correctiva, tirando por la borda los esfuerzos realizados pues los modos de falla no son mitigados.

6.3. Administración del programa

6.3.1. Desarrollo del manual de procedimientos

Con el objetivo de definir todos los temas de importancia que cada miembro que forma parte del programa de análisis de aceite debe observar y cumplir, es muy importante que dichas disposiciones queden definidas dentro de un documento preparado y avalado por la organización.

En este documento deben quedar definidos todos aquellos elementos, instrucciones y procesos en detalle, a fin de que todo miembro del programa pueda

tener a la mano toda la información concisa que conlleve al buen desempeño de sus atribuciones.

Entre los elementos que éste puede contener están: los objetivos del programa, los alcances, organigramas, definición de puestos, atribuciones específicas de cada puesto, niveles de autoridad, procedimientos detallados paso a paso para cada actividad, así como las disposiciones de distribución y destino final de la documentación y materiales generados.

Dicho manual debe ser elaborado por el administrador del programa, y se recomienda efectuar revisiones al mismo a intervalos convenientes para ajustarlo de acuerdo a las necesidades de la empresa, cambios de tecnología de análisis, expansión en número de equipos, cambios basados en la experiencia, rotación de personal, etc.

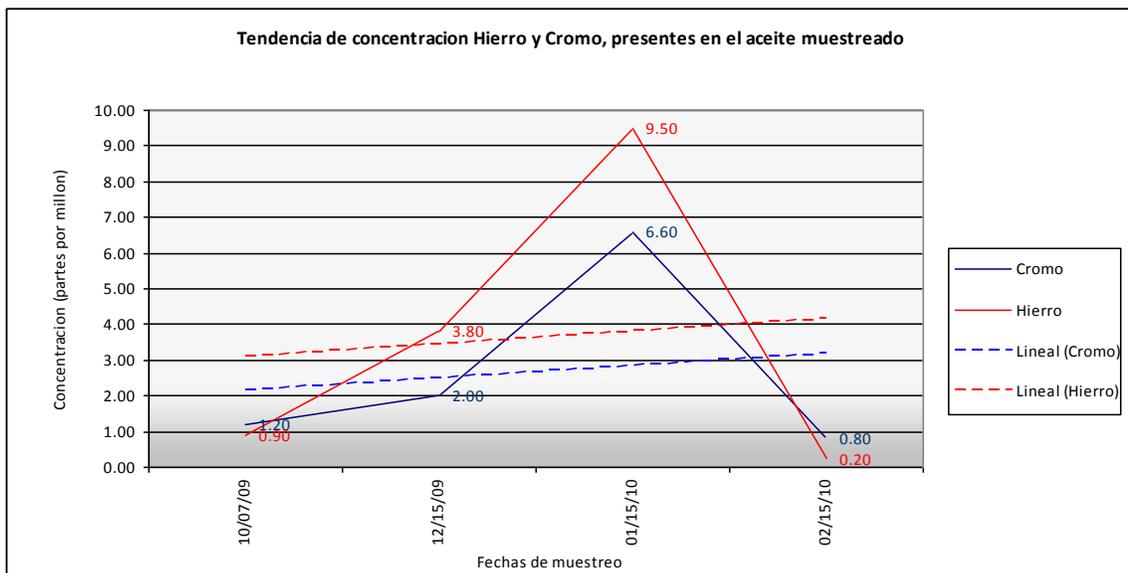
6.3.2. Medición continua de parámetros, establecimiento de líneas base y seguimiento de las tendencias para predecir modos de falla

Conforme el programa evoluciona, continuamente las bases de datos estarán siendo cargadas con datos procesados por los laboratorios, conteniendo la información del estado de salud de los equipos. Un ejemplo de la forma típica de tabular esta información se presenta en el caso ilustrado en la figura 26.

Tal y como se muestra, los datos necesarios para poder establecer tendencias son básicamente: código del equipo, fecha, orden de trabajo, horas del aceite, horas del filtro, y todos los resultados enviados por el laboratorio. Dependiendo del tipo de equipo en estudio y de manera independiente a las características del mismo, los elementos sujetos a monitoreo pueden variar. En el caso presentado en la figura 27, se tomaron únicamente como elementos determinantes para la situación expuesta únicamente el cromo y el hierro.

Como puede apreciarse, los valores para ambos elementos fueron en aumento conforme se aumentaron las horas en operación del aceite, estableciendo así una tendencia ascendente en la concentración de ambos.

Figura 27. **Tendencia de la concentración de hierro y cromo presente en el aceite analizado**



Fuente: elaboración propia

Los resultados del análisis de aceite en laboratorio también reflejaron evidencia de material inorgánico no metálico que sugiere contaminación del sistema de aceite, muy probablemente causado por el ingreso de suciedad al tanque principal desde el tapón de llenado.

Es necesario aclarar que el caso expuesto no toma en cuenta múltiples fechas de muestreo, lo cual hace que el gráfico de tendencias no presente una línea base completamente definida, con la cual al iniciar a evidenciarse problemas en los elementos arriba mencionados, no se observa una desviación marcada conforme al tiempo, sino solamente una constante tendencia ascendente. En la vida real, al tener suficientes datos muestreados, esta línea logra definirse adecuadamente con lo cual establecer límites de alarma es más fácilmente.

Para el establecimiento de las alarmas absolutas para cada elemento bajo estudio, es necesario conocer los valores límite para cada uno directamente del fabricante.

6.3.3. Ajuste de la frecuencia de inspección y servicio

La literatura especializada en mantenimiento predictivo propone un método tradicional para calcular la frecuencia de inspección predictiva basada en la curva P-F, en la cual el tiempo entre inspecciones para algunos equipos, debe ser la mitad del tiempo entre la falla potencial y la falla funcional (intervalo P-F) y para otros, el tiempo entre inspecciones debe ser menor que el intervalo P-F asegurando que la diferencia entre ambos sea mayor al tiempo de reparación. Basado en la información y la experiencia en distintas industrias, esta metodología presenta los siguientes inconvenientes en su aplicación:

- a) El método es antifuncional cuando no es posible tener suficientes datos para construir una curva P-F para cada modo de falla;
- b) La curva varía si es afectada por factores externos tales como: variaciones en el contexto operativo, fallas operacionales y deficiencias relacionadas con mantenimiento.

En la mayoría de los casos, la frecuencia es calculada con la ayuda de una curva P-F general sólo para algunos componentes principales del equipo a ser inspeccionado, o utilizando criterios no formales, basados en el costo de las inspecciones versus el costo de no poder predecir la falla.

Considerando las anteriores deficiencias, la relación riesgo costo beneficio implícita en la operación de los equipos en la industria, y a manera de presentar un método que tenga la capacidad de asistir en la toma de decisiones gerenciales, orientado a evaluar el impacto de las estrategias de mantenimiento seleccionadas por la empresa, se propone el uso de un modelo matemático capaz de calcular con el intervalo de tiempo entre inspecciones predictivas.

El modelo matemático propuesto calcula el valor del intervalo entre inspecciones predictivas con una relación directamente proporcional a tres factores: el factor de costo, el factor de falla y el factor de ajuste. De esta forma, el intervalo es calculado mediante la fórmula:

ecuación 22

$$I = C \times F \times A$$

Donde:

C = factor de costo

F = factor de falla, y

A = factor de ajuste

6.3.3.1. Factor de costo

Está definido como el costo de una inspección predictiva dividido entre el costo en que se incurre por no detectar la falla. En general, este costo está asociado con la compra, costos de transporte e instalación de las partes de repuesto, y el lucro cesante enfrentado por la empresa por la parada no planificada del equipo. Otros costos asociados se ven reflejados en la calidad de los productos y servicios prestados por el equipo, la seguridad industrial y el cuidado del ambiente.

La relación del factor de costo es la siguiente:

ecuación 23

$$C = \frac{C_i}{C_f}$$

Donde:

C_i = es el costo de una inspección predictiva (en unidades monetarias)

C_f = es el costo en que se incurre por no detectar la falla (en unidades monetarias)

Nota: el factor de costo es un número adimensional.

6.3.3.2. Factor de falla

Se define como factor de falla, la cantidad de fallas que pueden detectarse con la inspección predictiva, dividida entre la tasa de fallas estimadas en un periodo dado (por lo general anualmente).

La relación del factor de falla es la siguiente

ecuación 24

$$F = \frac{F_i}{\lambda}$$

Donde:

F_i = cantidad de modos de falla que pueden ser detectados utilizando la tecnología predictiva (expresada en fallas por inspección), y

λ = tasa de fallas presentada por el equipo, y que además, podrían ser detectadas por la tecnología predictiva aplicada (expresada en fallas por año)

La unidad de medida del factor de falla, está dada en fallas por año.

6.3.3.3. Factor de ajuste

Una vez calculados los factores de costo y de falla, se procede a multiplicarlo por un factor de ajuste, el cual, estará basado en la probabilidad de ocurrencia de más de 0 fallas en un año, utilizando la distribución acumulativa de Poisson con media igual a λ (tasa de fallas expresada como fallas por año).

Para calcular este factor se hace uso de la función matemática logaritmo natural multiplicada por $-1(-\ln)$, la cual, se comporta de una manera muy parecida al criterio gerencial de incremento o decremento del intervalo de inspección al tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de más de 0 fallas en un año. Para valores de probabilidad de ocurrencia entre 0 y valores cercanos a 0.37, la función arroja resultados desde infinito hasta 1 y para valores de probabilidad entre 0.37 y 1 la función arroja resultados entre 1 y 0. Por lo que a mayor probabilidad de ocurrencia, el intervalo de inspección predictiva se reducirá de forma exponencial.

La probabilidad de ocurrencia de más de cero fallas se expresa como:

ecuación 25

$$1 - P(0, \lambda) = 1 - e^{-\lambda}$$

Donde:

$P(0, \lambda)$ es la función de distribución acumulativa de Poisson para un valor de ocurrencia 0 y media λ

Así, el factor de ajuste será igual a:

ecuación 26

$$A = -\ln(1 - e^{-\lambda})$$

El factor de ajuste es un número adimensional.

Finalmente, al sustituir las ecuaciones 22, 23 y 25 en 21, la función que determina el intervalo de inspecciones predictivas queda definido como:

ecuación 27

$$I = -\frac{C_i \times F_i}{C_f \times \lambda} \times \ln(1 - e^{-\lambda})$$

Expresado en años por inspección. Siendo el inverso de esta relación igual a la frecuencia de inspección (f), la misma estará expresada en inspecciones por año.

Dicho modelo es recomendable para valores de λ menores que 1, ya que para valores mayores que la unidad, la frecuencia de inspección se puede incrementar en tal dimensión, que los costos de inspección por año pueden ser superiores al costo de no poder detectar la falla.

Para valores de frecuencia superiores a 52 inspecciones por año y para valores de costos anuales de inspección superiores al 10% del costo total de la no posibilidad de detección de falla, es recomendable evaluar la instalación de dispositivos de monitoreo continuo a fin de tener acceso a información en tiempo real, referente a los parámetros seleccionados para establecer el mantenimiento por condición y/o hacer análisis de causa raíz, destinados a disminuir la tasa de incidencia de fallas a valores inferiores a 1 falla por año.

Para llegar a reducir la tasa de fallos, puede llegarse a considerar un proceso de evaluación de rediseño de los equipos, de estrategias de mantenimiento, procedimientos de operación, ingeniería y mantenimiento.

6.3.4. Corrección de las fallas detectadas; documentación y archivo en el historial de mantenimiento del equipo para aumentar la capacidad de diagnóstico del programa

Conforme el sistema sea alimentado con datos, y los gráficos de tendencias reflejen incrementos en la contaminación del aceite y en la concentración de partículas metálicas en suspensión, es necesario que el analista de los datos emita las alertas correspondientes al departamento de mantenimiento, con el fin de investigar las causas que están generando dichas condiciones. Posterior a los procesos de investigación y corrección de falla, es necesario que la falla sea documentada y archivada en los registros de cada equipo, para la construcción de los registros históricos de mantenimiento y servicio. También es importante que en dicho registro sean documentados los trabajos efectuados por mantenimiento rutinario.

Este proceso tienen como principal objetivo ayudar al operador a construir un archivo en el cual pueda apoyarse documentalmente para efectuar procedimientos en búsqueda de fallas, teniendo información de los últimos trabajos que fueron efectuados en el equipo, síntomas presentados durante la operación, modos de falla, y reparaciones mayores.

También sirve para alimentar la base de datos del programa de confiabilidad (cuando éste se encuentra implementado), el cual estadísticamente mostrará los problemas que tienen mayor incidencia en la operación normal del equipo, y que posteriormente servirá para tomar acciones concretas para la corrección y reducción de la probabilidad de reincidencia de dichas condiciones.

6.4. Expansión del programa

6.4.1. Ajuste de metas y limitantes de los equipos

Con una base de datos sólida, estadísticas reales de operación y fallas, e historial de reparaciones de todos los equipos, el programa alcanzará la madurez y será capaz de predecir el comportamiento de los equipos analizados y permitir la intervención oportuna de mantenimiento antes que la falla se presente.

Cuando se tenga suficientes datos de acuerdo a las distintas condiciones de operación, será entonces posible reevaluar las acciones de mantenimiento que hasta el momento se han llevado a cabo, que en caso de ser apropiadas, permitirán modificar los valores de los indicadores obtenidos, hasta ajustarlos a los valores que se encuentren acordes a los objetivos deseados por el operador, en términos económicos y de seguridad.

6.4.2. Establecimiento de la eficiencia del programa y medición de los beneficios obtenidos

Tomando en cuenta que al inicio del programa se tomaron como bases fundamentales para su funcionamiento los objetivos, la misión y visión, es propicio efectuar constantemente evaluaciones del rendimiento, para estimar el valor que su implementación le ha agregado a la organización. Considerando que la implementación de este tipo de programas requiere grandes inversiones de tiempo, capital humano y recursos financieros, esta evaluación se basará en medir qué tantos ahorros ha representado a la empresa durante su ejecución y en cuanto tiempo se han logrado,

dado a que la planificación estratégica con la que se construyó dicho programa requiere fechas específicas para entrega de resultados.

La eficiencia de cada fase por individual será medida calculando el avance de cada proceso específico, con respecto a los logros esperados a la fecha de evaluación. El resultado obtenido dará como resultado el porcentaje de avance de cada fase en específico, y dependiendo de estos resultados se estimará la parte de responsabilidad de cada área involucrada en el cumplimiento de los objetivos. Al final al hacer la sumatoria de todas las eficiencias, el resultado final se resumirá en obtener el rendimiento de las inversiones arriba mencionadas contra los resultados obtenidos, en términos de ahorro por costos de operación y ganancias totales por prestación de servicio constante.

6.4.3. Incorporación de más equipos al programa

Conforme el programa se fortalece y madura, y los objetivos para los cuales fue creado ofrezcan resultados positivos a la organización en los aspectos técnicos y financieros, se consolida la idea de expandir la misma filosofía de mantenimiento a otras áreas en las cuales pueden visualizarse beneficios similares, asumiendo que este tipo de programas tienen como prioridad atender las necesidades en unidades críticas en la organización.

Vale la pena documentar de manera sistematizada todos los procedimientos, formulaciones, así como las estrategias aplicadas en el desarrollo del proyecto principal, ya que de las experiencias obtenidas durante su gestación y desarrollo pueden afrontarse los retos que la expansión requiere. No se recomienda hacer uso de esta metodología de manera uniforme para todo proceso, ya que el grupo técnico

encargado de evaluar la factibilidad de su implementación deberá evaluar objetivamente cada caso de manera individual; identificando las necesidades particulares de cada equipo, definir objetivos, desarrollar metodologías de aplicación y formular las estrategias más adecuadas para conseguir los resultados esperados.

Los programas de mantenimiento basado en la confiabilidad son un excelente método para asegurar la operación segura, eficiente y económicamente conveniente de equipos críticos en la industria.

En el presente trabajo se tomó como base para la propuesta presentada la industria de la aviación, por ser esta industria en la cual la filosofía de mantenimiento basado en la confiabilidad se desarrolló, en gran parte, debido a la alta criticidad de los equipos que ésta incluye. Los alcances de esta filosofía abarcan un gran número de industrias para su aplicación, y queda a criterio de las políticas de cada organización, implementarla como una herramienta generadora de ahorros y ganancias, siempre y cuando el costo para su introducción esté debidamente justificado contra los beneficios esperados en los plazos que se establezcan.

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

CONCLUSIONES

1. Mediante la aplicación de las bases teórico- técnicas, basadas en los principios de diseño y funcionamiento de los motores aeronáuticos, incluyendo aspectos de operación y mantenimiento enfocados en los sistemas de lubricación y los métodos de obtención de muestras de aceite lubricante, se desarrolló el programa de mantenimiento propuesto para conocer tempranamente las causas potenciales de falla en motores de turbina de gas.
2. Se propuso un método capaz de medir las tendencias de contaminación presentes en el aceite lubricante, mediante la clasificación e identificación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en una muestra de aceite, así como la constitución de las partículas magnéticas recolectadas en los detectores magnéticos del sistema de lubricación, para conocer el origen de dichas partículas y poder efectuar las acciones de mantenimiento de forma proactiva.
3. Considerando las características propias del diseño del sistema de lubricación del motor *Pratt & Whitney* PW120, se ha determinado que el método propuesto no aporta resultados consistentes al determinar el grado de contaminación del aceite lubricante, debido a que estos motores están diseñados para consumir pequeñas cantidades de aceite lubricante junto con el combustible a una tasa máxima de 0.16 cuartos/hora. Esto implica que el motor al quemar aceite de manera continua durante su operación normal, hace que sea necesario nivelar el tanque de almacenamiento con aceite limpio frecuentemente, lo que no permite establecer tendencias de contaminación reales. Por lo que los análisis

espectrométricos del aceite para estos motores se limitan únicamente a identificar los contaminantes presentes en las muestras, cuando éstas han sido extraídas durante procedimientos en búsqueda de fallas (correctivos), y no de manera predictiva como el método desarrollado en el presente trabajo lo propone.

4. Se presentó una guía para la construcción de programas de mantenimiento, diseñado para ser implementado en cualquier equipo crítico y en todo tipo de industria, siempre que éste se encuentre fundamentado sobre la filosofía del mantenimiento predictivo.

RECOMENDACIONES

1. A empresas de transporte y mantenimiento aéreo, talleres y organizaciones de mantenimiento aprobadas, y operadores de aeronaves de ala fija y/o ala rotativa: consultar en las publicaciones técnicas del fabricante la existencia de este tipo de programas de mantenimiento, desarrollados previamente por el constructor. En caso de no existir, establecer contacto directo con el fabricante para conocer la factibilidad de implementar estas técnicas predictivas, considerando las características propias de diseño de sus motores.
2. A los profesionales de ingeniería mecánica que lean esta publicación: considerando que el modelo propuesto en el presente trabajo de graduación fue planteado tomando como elemento de estudio un motor de turbina de gas, siendo éste un componente de alta criticidad en un avión, el uso del modelo presentado, no limita su aplicabilidad a este tipo de máquinas únicamente; por lo que puede ser tomado como guía para cualquier aplicación industrial y de transporte que cuente con similares características.
3. A industrias productoras de bienes y de prestación de servicios: estimar cuantitativamente el impacto negativo que la falta de mantenimiento adecuado de sus equipos puede representar en términos de rentabilidad, competitividad, calidad de los productos que vende y en la continuidad de la prestación de los servicios que brinda. Dado a que los paros de producción nunca dan como resultado indicadores positivos para las empresas, es importante considerar un cambio de actitud respecto a la labor del mantenimiento, y promover nuevas

estrategias basadas en la filosofía del mantenimiento proactivo, que permitan aumentar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, reducir sus costos de mantenimiento a largo plazo, y disminuir al mínimo la probabilidad de los paros inesperados por causa de fallas no controladas.

4. A gerentes y jefes de mantenimiento: efectuar un mapeo técnico que permita identificar aquellos equipos con alta criticidad en los procesos que se desarrollan en sus correspondientes industrias, evaluar cualitativa y cuantitativamente el impacto que la falla de éstos puede causar en la producción de servicio, conocer, si por las características de diseño del equipo, es posible monitorear sus condiciones de operación continuamente, estimar el costo de implementación de la tecnología que permita efectuar el monitoreo de condiciones, y evaluar el valor que agregaría a la organización la implementación de un programa de mantenimiento predictivo para estos equipos. Con estos indicadores es factible presentar a la dirección, la justificación financiera de la implementación de este tipo de programas, contra el costo de reparación, reemplazo o de redundancia de estos equipos ante un fallo producido por la falta de mantenimiento adecuado.

5. A las instituciones formadoras de profesionales de mantenimiento: incluir dentro de sus programas de formación académica cursos orientados a difundir las nuevas filosofías y tecnologías predictivas de mantenimiento, con la finalidad de formar profesionales familiarizados en el manejo de los equipos más usados en las diversas técnicas de inspección, que formen personal con competencias para identificar oportunidades de mejora en cualquier industria en la que se desempeñen, y que puedan adaptarse fácilmente a los cambios que exigen las nuevas tendencias de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. A-Maq S.A. Análisis de Maquinaria y Rueda, Marcel. Tutorial de ferrografía directa, análisis de elementos presentes y ferrografía analítica. [en línea]. Colombia 2005. [fecha de consulta: 7 julio 2009]. Disponible en:
<http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20de%20Ferrografia%20A-MAQ%202005.pdf>
2. Asociación Colombiana de Ingenieros. ¿Cómo mejorar la confiabilidad de un sistema? [en línea]. Colombia mayo 2009, n° 2. [fecha de consulta: 22 enero 2011]. Disponible en:
<http://www.aciem.org/bancoconocimiento/C/ComomejorarlaConfiabilidaddeunSistema/Mejora%20de%20la%20Confiabilidad%20C.A.pdf>
3. AVALLONE, Eugene A., BAUMEISTER Theodore III and SADEGH ALI M. *Mark's Standard Handbook for mechanical engineers*. 11th ed. New York: McGraw Hill. 2007. 2304 p. ISBN-13: 9780071428675
4. BOYCE, Meherwan P. *Gas turbine engineering handbook*. 2nd ed. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing. 2002. 799 p.
5. COHEN, H. *Teoría de las turbinas de gas*. 2da ed. España: Marcombo S.A. 1983.

6. GARCÍA RIVAS, Antonio. Fundamentos de Turbina de gas. [en línea]. Buenos Aires, Argentina 2006, [fecha de consulta: 23 abril 2010]. Disponible en: <http://www.thejetengine.net>.
7. KROES, Michael and BENT, Ralph. *Aircraft Powerplants*. 6th ed. New York: Glencoe Macmillan/McGraw-Hill. 1992. 331 p.
8. LOVICZ, Robert. Desgaste de partícula: una herramienta del mantenimiento predictivo. [en línea]. Estados Unidos 2010. [fecha de consulta: 17 noviembre 2010]. Disponible en: http://www.confiableidad.net/art_06/desgaste_de_particula.htm
9. MAYORGA, Byron Aníbal. *Implementación de programa para el mantenimiento predictivo, tomando como base el análisis de aceite en motores de combustión interna en la flotilla de cabezales cañeros del ingenio Pantaleón S.A.* Tesis (Ingeniero Mecánico). Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000. 144 p
10. MIGDAL, Cyril A., WARDLOW Andrea B., and AMEYE Jo L. *Oxidation and the testing of turbine oils*. Columbus, Ohio, United States of America: ASTM International. 2008. 103 p. ISBN: 9780803134935
11. MOUBRAY, John. *Reliability-centered maintenance*. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc. 1997. 746 p.
12. Pratt & Whitney Canada. *PW100 Small Series: Customer training handbook*. Canada. Pratt & Whitney Canada Corp. 2006. 193 p.

13. Pratt & Whitney Canada. *Turboprop Gas Turbine Engine Maintenance Manual*. Revision No. 47. Canada: Pratt & Whitney Canada Corp. 1984. 3153 p.
14. Shell Aviation Limited. *The Aeroshell Book, 18th ed. London, Great Britain: Shell Aviation Lubricants Department*. 2003. 373 p.
15. SUÁREZ, Raphael. Cálculo de la frecuencia de inspección de mantenimiento predictivo. [en línea]. Venezuela 2007. [fecha de consulta: 29 junio 2010].
Disponible en:
http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Frec_pred.pdf
16. TAVARES, Lourival Augusto. *Administración moderna del mantenimiento*. Río de Janeiro, Brasil: Novo Polo Publicacoes. 1999. 146 p.
17. YUNUS A. Cengel & Michael A. Boles. *Termodinámica*. 4ta ed. México: McGraw Hill Interamericana. 2003. 521 p.

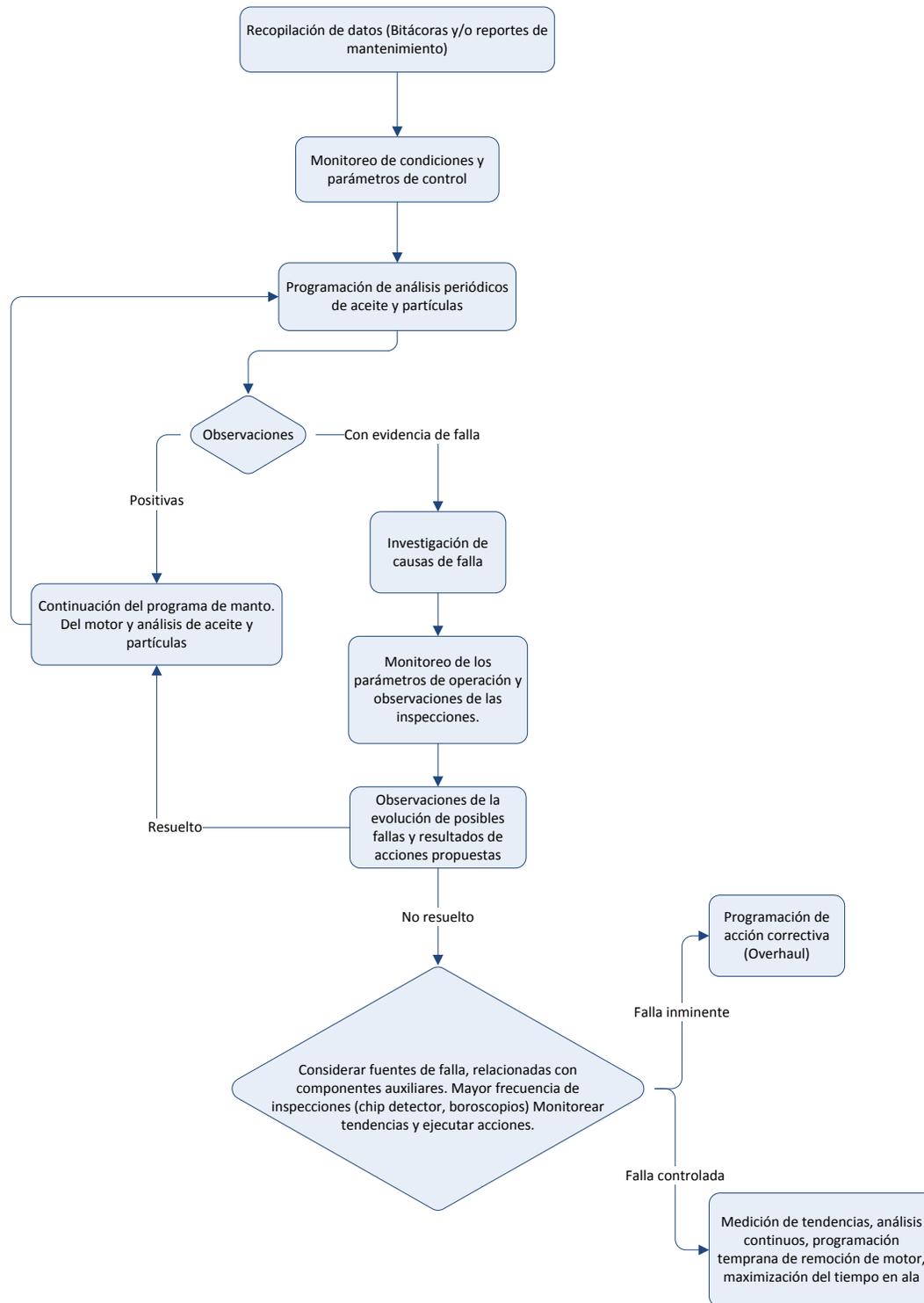
Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

APÉNDICE 1

Diagrama Ilustrativo

Diagrama de flujo para el monitoreo de tendencias



Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

ANEXO 1

Bitácora de mantenimiento

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

ANEXO 2

Aceites lubricantes para motores de turbina

Manual de mantenimiento parte 1

PRATT & WHITNEY CANADA
MAINTENANCE MANUAL
MANUAL PART NO. 3034642

TABLE 14, Acceptable Fuels Subject to Restricted Use (Cont'd)

| ISSUING AUTHORITY BODY | KEROSENE TYPE | FREEZE POINT °C (°F) | WIDE CUT TYPE | FREEZE POINT °C (°F) | HIGH FLASH KEROSENE TYPE | FREEZE POINT °C (°F) |
|-------------------------------|---------------|----------------------|----------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| GOST 10227 Bulgaria | T-1 | -60(-76) | - | - | - | - |
| BDS 5075-71 | TS-1 | -60(-76) | T-2 (See Note) | -60(-76) | - | - |
| BDS 5075-71 Czechoslovakia | T-1 | -60(-76) | - | - | - | - |
| CSN 65619 Poland | PL-3 | -60(-76) | - | - | - | - |
| PN-72/C-96026 | P-2 | -60(-76) | - | - | - | - |
| PN-72/C-96026 | PSM-2 | -60(-76) | - | - | - | - |

NOTE: Use of fuel lubricity improver strongly recommended.

G. Alternate/Emergency Fuels

CAUTION: ADDITIVES SUCH AS TETRA-ETHYL LEAD AND PHOSPHORUS COMPOUNDS, COMMON TO GASOLINE FUELS ARE HARMFUL TO HOT SECTION PARTS FROM A CORROSION, SULPHIDATION AND METALLURGICAL STANDPOINT.

- (1) The use of aviation gasoline (Avgas) is restricted and must be used only during an emergency. Avgas must not be used for more than 150 hours between engine overhauls.

CAUTION: ALTHOUGH DIESEL AND HEATING FUELS ARE CHEMICALLY SIMILAR TO JET FUELS, THEIR COLD FLOW, VISCOSITY AND FREEZING POINT CHARACTERISTICS ARE SPECIFICALLY CONTROLLED DURING REFINING TO LEVELS NOT SUITABLE FOR USE IN AIRCRAFT.

- (2) The operation of **PW100** engines on fuels other than the approved jet fuels is not recommended. Specifically excluded as possible alternate or emergency fuels are such products as automotive gasoline, diesel fuel, heating fuel or any combination of these products with the approved fuels.

5. Engine - Approved Lubricating Oils

A. General

- (1) Major factors affecting oil deterioration over time are engine mechanical condition, climatic, atmospheric and environmental conditions, dust and sand ingestion during take-off/landing modes and engine utilization.

- (2) When switching between approved oil brands, the following should be adhered to:

P&WC Proprietary Information. Subject to the restrictions on the title page.

72-00-00

ENGINE - DESCRIPTION AND OPERATION

Page 95

Dec 04/2009

Manual de mantenimiento parte 2

PRATT & WHITNEY CANADA
MAINTENANCE MANUAL
MANUAL PART NO. 3034642

- (a) If switching from a Type II, 5 Centistoke oil, listed in Table 16 (not third generation), to another oil brand also listed in Table 16 then:

Switch to new oil brand by adding new oil as required (topping off).

NOTE: Original oil does not need to be drained and engine does not need to be flushed.

- (b) If switching to an oil brand not listed in Table 16, the engine oil must be drained and the engine flushed (Ref. Servicing).
- (3) If oil of different brands or viscosities become inadvertently combined, the following applies:
- (a) If the oils which are combined are Type II, 5 Centistoke oils listed in Table 16, (not third generation), no further action is required.
- (b) Any combining of all other oils:
drain and flush complete oil system and;
fill with an approved oil (Ref. Servicing and Tables 16, 17 and 18).
- (4) Operators wishing to monitor oil quality are recommended to establish a program in collaboration with their oil supplier/manufacturer.

B. Approved Oils

- (1) 5 Centistoke Oils

The oils listed in Table 16 comply with specification PWA 521, Type II oil Ts3. These oils are fully approved for use in **PW100** engines.

- (2) 4 Centistoke Oils

The oils listed in Table 17 have undergone extensive engine and laboratory qualification testing prior to being approved for use in **PW100** engines.

- (3) Third Generation Oils

The term 'Third Generation' is one that oil companies use to describe turbine oils which they claim have superior thermal and oxidative stability when compared to typical Type II, 5 centistoke oils. To ensure that there is no confusion regarding the term 'Third Generation', P&WC consider as 'Third Generation' lubricants, only those listed in Table 18.

- (4) Other Oils

No other oils are approved for use in the **PW120**, **PW121** and **PW121A** engines. Should the use of an oil not listed be desired, the intended user should contact Pratt & Whitney Canada, Product Support Department, for consultation.

Manual de mantenimiento parte 3

| PRATT & WHITNEY CANADA MAINTENANCE MANUAL MANUAL PART NO. 3034642 | |
|---|---|
| TABLE 16, Approved Lubricating Oils - PWA 521, Type II (5-Centistoke) | |
| BRAND | SUPPLIER |
| Aero Shell Turbine Oil 500 | Shell Canada Ltd. 400-4th Avenue S.W. Calgary, Alberta Canada T2P 0J4 TEL: 1-800-661-1600 Shell International Petroleum Co. Shell Center London, SE1 7NA England TEL: 44 (0) 20 7934 1234 FAX: 44 (0) 20 7934 8060 URL: http://www.shell.com |
| Royco Turbine Oil 500 | Royal Lubricants Inc. P.O. Box 518 East Hanover, NJ 07936 USA TEL: 1-800-989-7692 FAX: (973) 887-6930 URL: http://www.royallube.com |
| Mobil Jet Oil II | Exxon Mobil Corp. 3225 Gallows Road Fairfax, VA 22037 USA TEL: 1-800-662-4525 FAX: (203) 846-3355 URL: http://www.exxonmobil.com |
| Castrol 5000 | Castrol Industrial North America Inc. 1001 West 31st Street Downers Grove, IL 60515 USA TEL: 1-800-462-6835 TEL: (630) 241-4000 FAX: (630) 241-1957 URL: http://www.castrolindustrial.com Castrol Canada Inc. 3620 Lakeshore Blvd. West Toronto, Ontario Canada M8W 1P2 TEL: (416) 252-5511 FAX: (416) 252-7315 |

P&WC Proprietary Information. Subject to the restrictions on the title page.

72-00-00

Page 98

ENGINE - DESCRIPTION AND OPERATION

Dec 04/2009

Manual de mantenimiento parte 4

| PRATT & WHITNEY CANADA MAINTENANCE MANUAL MANUAL PART NO. 3034642 | |
|--|---|
| TABLE 16, Approved Lubricating Oils - PWA 521, Type II (5-Centistoke) (Cont'd) | |
| BRAND | SUPPLIER |
| BP Turbo Oil 2380/ Exxon Turbo Oil 2380 | Castrol Specialised Industrial (U.K.) Wakefield House Pipers Way Swindon, Wilts SN3 1RE England TEL: 44 (0) 1793 512712 TEL: 44 (0) 1793 511521 FAX: 44 (0) 1793 453218 Air BP BP Exploration & Oil Inc. Maple Plaza II - 1N 6 Campus Drive Parsippany, NJ 07054 USA TEL: 973-401-4350 FAX: (973) 401-4355 URL: http://www.airbp.com |
| TABLE 17, Approved Lubricating Oils - 4-Centistoke | |
| BRAND | SUPPLIER |
| Castrol 4000 | DELETED |
| TABLE 18, Approved Lubricating Oils - PWA 521, Type II (5-Centistoke) "THIRD GENERATION" | |
| BRAND | SUPPLIER |
| Aero Shell Turbine Oil 560 | Shell Canada Ltd. 400-4th Avenue S.W. Calgary, Alberta Canada T2P 0J4 TEL: 1-800-661-1600 Shell International Petroleum Co. Shell Center London, SE1 7NA England TEL: 44 (0) 20 7934 1234 FAX: 44 (0) 20 7934 8060 URL: http://www.shell.com |
| <p>P&WC Proprietary Information. Subject to the restrictions on the title page.</p> <p style="text-align: right;">72-00-00 Page 98A</p> <p style="text-align: center;">ENGINE - DESCRIPTION AND OPERATION Dec 04/2009</p> | |

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 1

AEROSHELL TURBINE OILS

The earliest gas turbine engines were developed using straight mineral oils but the operational requirements for low temperature starting, either on the ground or at high altitude (re-lights) led to the development of a range of straight mineral oils with viscosities far lower than those of conventional aircraft engine oil of that time. For example, oils with viscosities between 2 mm²/s and 9 mm²/s at 100°C became standard for gas turbine engines, compared with viscosities of 20 mm²/s to 25 mm²/s at 100°C for piston engine oils.

Although demand for the low viscosity straight mineral turbine oils is diminishing, the following list tabulates the range of specifications covered.

| | |
|------------------------------|--|
| MIL-PRF-6081D Grade 1010 | - AeroShell Turbine Oil 2 |
| DEF STAN 91-99 (DERD 2490) | - AeroShell Turbine Oil 3 |
| DEF STAN 91-97 (DERD 2479/0) | - (AeroShell Turbine Oil 9 – grade now withdrawn) |
| DEF STAN 91-97 (DERD 2479/1) | - (AeroShell Turbine Oil 9B – grade now withdrawn) |

The higher viscosity 9 mm²/s oils in the foregoing range were required for the highly loaded propeller reduction gears of turboprop engines. In some of these engines the natural load carrying characteristics derived from the viscosity of the oil alone was not enough and required improvement by an EP (Extreme Pressure) additive. The resultant blend, AeroShell Turbine Oil 9B (grade now withdrawn), was used by aircraft and helicopter operators.

With the progressive development of the gas turbine engine to provide a higher thrust and compression ratio, etc., the mineral oils were found to lack stability and to suffer from excessive volatility and thermal degradation at the higher temperatures to which they were subjected.

At this stage, a revolutionary rather than evolutionary oil development took place concurrently with engine development and lubricating oils derived by synthesis from naturally occurring organic products found an application in gas turbine engines. The first generation of synthetic oils were all based on the esters of sebacic acid, principally dioctyl sebacate. As a class, these materials exhibited outstanding properties which made them very suitable as the basis for gas turbine lubricants.

However, these materials yielded a product with a viscosity of about 3 mm²/s at 100°C and alone had insufficient load carrying ability to support and transmit high gear loads. Therefore, to these materials were added thickeners (complex esters), which gave the required degree of load carrying ability and raised the final viscosity to about 7.5 mm²/s at 100°C.

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 2

Unlike straight mineral oils, the synthetic oils had to rely on additives, and in later formulations on multi-component additive packages, to raise their performance. This was particularly necessary to improve resistance to oxidation and thermal degradation; important properties which govern long term engine cleanliness.

The two different basic grades of synthetic oil found favour on opposite sides of the Atlantic; in the U.S.A. 3 mm²/s oils became standard while, in the U.K., 7.5 mm²/s oils were used. AeroShell Turbine Oil 300 and AeroShell Turbine Oil 750 respectively were developed to meet these two separate requirements.

The situation persisted for some years until 3 mm²/s oils were required for use in British pure jet engines. For many years AeroShell Turbine Oil 300 was the standard Shell 3 mm²/s oil and rendered satisfactory airline service in many different types of British and American engines. However, to provide a more than adequate margin of performance and to allow for further increase of operational life, principally in Rolls-Royce engines, AeroShell Turbine Oil 390 was developed.

Although the use of 3 mm²/s oils in aero-engines has declined, the use in auxiliary power units is increasing where, because of the low temperature viscometric properties, use of 3 mm²/s oils gives improved cold starting reliability after prolonged cold soak.

Soon after the introduction of AeroShell Turbine Oil 390 American practice changed. With the almost continuous increases in engine size and power output a demand developed in the U.S.A. for oils possessing improved thermal stability and high load carrying ability, with some sacrifice in low temperature performance, and the idea of introducing a "Type II" 5 mm²/s oil was formed.

These 5 mm²/s 'second generation', oils were usually based on 'hindered' esters and have since found wide application in American engines and subsequently in British, Canadian and French engines. AeroShell Turbine Oil 500 was developed to meet these requirements.

To meet the requirements to lubricate the engines of supersonic aircraft AeroShell Turbine Oil 555 was developed as an advanced 5 mm²/s synthetic oil with high temperature and load carrying performance.

Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 75**

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 3

Changes which have taken place over the last two decades in engine performance (in terms of improved fuel consumption, higher operating temperatures and pressures) and in maintenance practices have resulted in increased severity in lubricant operating conditions. These types of changes stress the engine oil and thus the original Type II oils are becoming less suitable for use in modern aircraft engines. This has resulted in the need for engine oils with very good (and improved) thermal stability such as AeroShell Turbine Oil 560. This type of oil with better thermal stability is now generally known as "third generation" or "HTS".

In military aviation, the British Military initially standardised on the 7.5 mm²/s oils as defined by DERD 2487 (now renumbered as DEF STAN 91-98), but then, in the mid 1980s switched and decided that future requirements will be met by the specification DERD 2497 (now renumbered as DEF STAN 91-100) covering high temperature performance oils.

In the U.S.A., the U.S. Air Force continues to prefer 3 mm²/s oils, and, more recently, 4 mm²/s oils and maintains their performance requirements by revisions to specification MIL-PRF-7808 (formerly MIL-L-7808). The U.S. Navy, with interest in turbo-prop engines and helicopter gearboxes, etc., have tended to use 5 mm²/s oils and after a series of specifications have finalised their requirements in the MIL-PRF-23699 specification (formerly MIL-L-23699). This latest issue of this specification, MIL-PRF-23699F, now caters for three classes of 5 mm²/s oils; these are Standard Class (STD), the Corrosion Inhibited class (C/I) and the High Thermal Stability Class (HTS). Various AeroShell Turbine Oils are approved for each Class and the Summary Table at the end of these notes should be consulted for further information.

More recently with the need to transmit more power and higher loads through helicopter gearboxes it has become apparent that MIL-PRF-23699 oils may not be completely satisfactory. With this in mind, many helicopter manufacturers (as well as the U.S. Navy) have now turned to the advanced high load carrying 5 mm²/s oil AeroShell Turbine Oil 555. This in turn has led to the development of a U.S. military specification DOD-L-85734 which covers a helicopter transmission oil against which AeroShell Turbine Oil 555 is fully approved.

VINTAGE AIRCRAFT

Vintage aircraft turbine engines were approved on oils available when the engine was originally manufactured and in many cases these oils were specific blends of mineral oils, such oils being no longer available. If the engine was approved on a mineral turbine oil other than MIL-L-6081 or DEF STAN 91-99 (formerly DERD 2490) oils then operators should consult with either the engine manufacturer/rebuilder or oil supplier. In some cases

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 4

it is possible to switch to a synthetic turbine oil but such a move can only be considered on a case by case basis. On no account assume that present turbine oils (both mineral and synthetic) are direct replacements for old vintage aircraft applications.

OIL ANALYSIS

Routine oil analysis is now seen as a valuable part of a good maintenance programme. Increasingly operators are adopting oil analysis programmes in order to help discover problems before they turn into major failures. Typically these programmes consist of spectrometric wear metal check, together with a few simple oil tests such as viscosity and acidity. Shell Companies can offer this service to operators.

It is important to note that the information gained is only as good as the sampling procedure. A single test is not enough to reveal trends and significant changes, it can only tell an operator if there is already a serious problem. Operators should therefore:

- **Take samples properly**

For best results, take the sample immediately after engine shutdown. The sample should be taken the same way every time. An improperly taken sample can lead to mistaken conclusions about engine problems.

- **Rely on a series of consistent tests over time**

Operators should look for significant changes or trends over time, not just absolute values.

- **Be consistent**

Always take the sample the same way at the same time interval. Always properly label the sample so that it's identity is known.

APPLICATIONS

Whenever an aircraft is certified, all of the engine oils are specified for each application point on the Type Certificate. The Type Certificate will specify, either by specification number or by specific brand names, those engine oils which are qualified to be used. The U.S. Federal Aviation Administration (FAA) regulations state that only engine oils qualified for specific applications can be used in certified aircraft. Therefore, it is the responsibility of the aircraft owner or designated representative to determine which engine oil should be used.

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 5

OIL APPROVALS

The oil approvals listed in this section are believed to be current at time of printing, however, the respective engine manufacturer's manuals and service bulletins should be consulted to ensure that the oil conforms with the engine manufacturer's latest lubricant approval listing.

TYPICAL PROPERTIES

In the following section typical properties are quoted for each turbine oil; there may be deviations from the typical figures given but test figures will fall within the specification requirement.

COMPRESSOR WASHING

Some turbine engine manufacturers permit or even recommend regular compressor washing. In this, water and/or special wash fluid is sprayed into the compressor during either ground idle running or during the final stages of engine shut down. The purpose of this washing is to restore the performance of the compressor by washing off any salt/sand/dirt/dust which may have collected on the compressor blade thereby causing deterioration in the performance of the compressor.

Operators should strictly follow the engine manufacturers' requirements for performing the compressor wash and in particular any requirement for a drying run since incorrect application of the wash/drying cycle could lead to contamination of the oil system by water and/or special wash fluid.

OIL CHANGE INTERVAL

For many gas turbine engines there is no set oil change interval, this is because the oil in the system changes over through normal consumption in a reasonable number of hours. For some engines, particularly smaller engines, the engine manufacturer recommends regular oil changes. Operators should therefore adhere to the recommendations for the specific model of engine they operate. Depending upon the condition of the oil and the oil wetted areas of the engine, the engine manufacturer may be prepared to authorise oil change extensions.

For gas turbines used in coastal operations (e.g. off-shore helicopter operations) where there is salt in the atmosphere, in high temperature/high humidity areas or in sandy/dusty areas regular oil changes can be beneficial because it allows removal of any salt/sand/dust/dirt/water contamination from the oil.

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 6

OIL CHANGEOVER

Generally synthetic turbine oils in one viscosity group are compatible and miscible with all other synthetic oils in the same viscosity group (and in many cases other viscosity groups as well). However, in changing from one synthetic turbine oil to another, an operator must follow the engine manufacturers' recommendations.

Change by top-off (mixing) allows the change over to take place slowly and there is increasing evidence that this is less of a shock to the engine and engine oil system. Whilst most engine manufacturers e.g. Rolls Royce, GE, P&W, CFMI, etc., allow change by top-off (mixing), other engine manufacturers e.g. Honeywell, do not and only allow changeover by either drain and refill or drain, flush and refill.

It is Shell's policy to always recommend that the engine manufacturer's recommendations are followed. In addition it is recommended that for the initial period during and after change over the oil filters are inspected more frequently.

COMPATIBILITY WITH MATERIALS

The advent of synthetic oil for gas turbine engine lubrication permitted greater extremes of temperature to be safely encountered (far in excess of those possible with mineral oils), and brought with it the problem of compatibility, not only of elastomers, but of metals, paints, varnishes, insulation materials and plastics. In fact all materials associated with lubricants in aircraft have had to be reviewed and new materials evolved, in some cases, to enable maximum benefit to be obtained from the use of synthetic turbine oils.

Much of this evaluation has been undertaken by the manufacturers in the industries concerned, and may be summarised under the general heading of the materials groups.

ELASTOMER COMPATIBILITY

When using a synthetic ester turbine oil the compatibility with sealing materials, plastics or paints has to be examined.

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 7

As a general rule, Shell Companies do not make recommendations regarding compatibility, since aviation applications are critical and the degree of compatibility depends on the operating conditions, performance requirements, and the exact composition of materials. In many cases the equipment manufacturers perform their own compatibility testing or have their elastomer supplier do it for them. Many elastomer suppliers do produce tables showing the compatibility of their products with a range of other materials. Therefore, the information provided here can only be considered as a guideline.

| Elastomer/Plastic | Mineral Turbine Oils | Synthetic Ester Turbine Oils |
|--------------------------|-----------------------------|---|
| Fluorocarbon (Viton) | Very good | Very good |
| Acrylonitrile | Good | Poor to Good (high nitrile content is better) |
| Polyester | Good | Poor to Fair |
| Silicone | Poor to Good | Poor to Fair |
| Teflon | Very Good | Very good |
| Nylon | Poor to Good | Poor |
| Buna -S | Poor | Poor |
| Perbunan | Good | Fair to Good |
| Methacrylate | Good | Poor to Fair |
| Neoprene | Fair to Good | Poor |
| Natural Rubber | Poor to Fair | Poor |
| Polyethylene | Good | Good |
| Butyl Rubber | Very Poor to Poor | Poor to Fair |
| Poly Vinyl Chloride | Poor to Good | Poor |

Compatibility Rating:
 Very Good – Good – Fair – Poor – Very Poor

Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 80**

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 8

PAINTS

Epoxy resin paints have been found to be practically the only paints entirely compatible giving no breakdown or softening or staining in use, except for the very light colour shades, which are susceptible to staining due to the actual colour of the anti-oxidant inhibitor contained in practically all ester based lubricants.

PLASTICS

Only the more common plastics can be considered for evaluation of compatibility.

The best from chemical and physical aspects is polytetrafluoroethylene, as might be expected from its generally inert properties. This is closely followed by higher molecular weight nylon. Polyvinyl chloride is rapidly softened by the hot oil and is not recommended. Currently, polythene and terylene are also suspect in this respect, but have not been extensively evaluated.

VARNISHES

Many commonly used phenolic impregnated varnishes are softened by contact with the hot oil, but a few of the harder grades show moderate to good resistance. Silicone varnishes and TS 188 are considerably softened.

Modified alkyd type varnishes, when baked, possess good resistance to oil but have poor resistance to water. When good resistance to water is also required, it is recommended that the varnish be coated with a water resistant finish.

MINERAL AND VEGETABLE OILS

Ester based synthetic oils are incompatible with mineral and vegetable oils. In no circumstances should these products be used together and, if changing from one type to another, then particular care is needed to ensure that all traces of the previous product are removed prior to ester lubricant application.

METALS

Copper and alloys containing copper

As in mineral oil applications, pure copper has a marked catalytic effect at sustained high oil temperatures on the break down of the esters to acid derivatives, and its use in engines or other equipment is thus most undesirable. Copper alloys such as brass and bronze do not possess this property to any great degree and can be used with safety.

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 9

Aluminium and steel and their alloys

These materials are not affected.

Cadmium

Cadmium, in the form of plating as a protective treatment for storage of parts destined to be in contact with oil in service, experiences a tendency at the higher temperatures to be taken into solution by synthetic oils. This solvent action does not harm the lubricant, but the slow removal of cadmium plating after many hours of service will detract from its efficiency as a subsequent protective.

Lead and alloys containing lead

Lead and all alloys containing lead are attacked by synthetic lubricants. The way the lubricant reacts with the lead differs according to the type of lubricant, but in general, all lead compounds should be avoided. The most common forms of lead are lead abrasable seals and lead solder used particularly in filters and mesh screens. In these cases the mesh screen should be brazed.

OTHER METALS

Magnesium is not affected except where hydrolysis occurs. Thus magnesium should not be used if there is any likelihood of hydrolysis occurring or alternatively the magnesium could be coated with epoxy to protect it.

Monel and Inconel are not affected.

Tungsten accumulates a very thin soft black film after prolonged immersion in synthetic oils under static conditions. It is readily removed by wiping, leaving no sign of corrosion. Under the scrubbing conditions normally associated with circulatory oil systems this film does not materialise and its effect may be ignored.

Zinc, as galvanised protective, is attacked by synthetic lubricants leading to the formation of zinc soaps and thus should not be used. Storage of synthetic oils is best achieved in tinned mild steel cans or failing this, bright mild steel.

Titanium is not affected.

Silver and silver plating is generally not affected. However, in some synthetic ester oils, the additive pack, especially high load additives, react with the silver and blacken or even de-plate the silver.

Chromium plating is not affected.

Características de los aceites para turbina, fabricados por Shell – Parte 10

Nickel and alloys are generally satisfactory.

Tin plating is generally satisfactory.

For aircraft oil tanks the recommended material is light alloy or stainless steel.

NON-AVIATION USE OF AEROSHELL TURBINE ENGINE OILS

In selecting an AeroShell turbine engine oil for a non-aviation application, the properties of the oil must be examined. This will only give an approximate indication as to the expected performance in the specific application. However, such data must be regarded as guidance only. There is no laboratory test that can give a complete prediction of performance in actual use, and the final stage in any decision must involve performance tests in either the actual equipment or in the laboratory/test house under conditions expected in service.

The main use of AeroShell turbine engine oils in non-aviation applications is in aero-derived industrial and marine gas turbine applications. Such engines have found application in:

- electrical power generation
- large pumps and compressors, especially in pipeline applications and in petrochemical process industry
- marine propulsion

In an aero-engine, essential design features are its size and weight, which results in compact units. Such designs place heavy demands on the engine components and lubricants to ensure total reliability in the high temperatures within the engine.

The land and sea based derivatives of the aero-engines retain the essential design elements of their aviation versions and thus have similar lubrication requirements. Engine manufacturers therefore approve the use of aircraft synthetic turbine oils in these engines. Only these lubricants have the characteristics required to provide the unit lubrication and cooling within the severe operating environment.

There is a full range of AeroShell turbine oils approved by the major engine manufacturers for use in their industrial and marine derivatives of aero-engines and a quick reference table is included at the end of this section.

Sumario de las especificaciones de los aceites para turbina, fabricados por Shell –

Parte 1

| Specification Number | AEROSHELL TURBINE OIL | | | | | | | Comments | |
|--------------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | 308 | 390 | 500 | 529 | 531 | 555 | 560 | | 750 |
| MIL-PRF-7808L | | | | | | | | | U.S. Air Force 3 mm ² /s oil specification 4 mm ² /s oil specification |
| Grade 3 | Approved | — | — | — | — | — | — | — | |
| Grade 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| MIL-PRF-23699F | | | | | | | | | U.S. Navy 5 mm ² /s oil specification |
| STD | — | — | Approved | Approved | — | — | — | — | |
| C/I | — | — | — | — | Approved | — | — | — | |
| HTS | — | — | — | — | — | — | Approved | — | |
| DOD-85734 | — | — | — | — | — | Approved | — | — | U.S. helicopter transmission specification |
| DEF STAN 91-93 (DERD 2458) | — | — | — | — | — | — | — | — | U.K. 5 mm ² /s Marine Gas Turbine oil specification |
| DEF STAN 91-94 (DERD 2468) | — | Approved | — | — | — | — | — | — | U.K. 3 mm ² /s oil specification |
| DEF STAN 91-98 (DERD 2487) | — | — | — | — | — | — | — | Approved | U.K. 7.5 mm ² /s oil specification |
| DEF STAN 91-100 (DERD 2497) | — | — | — | — | — | Approved | — | — | U.K. Advanced 5 mm ² /s oil specification |
| DEF STAN 91-101 (DERD 2499) | — | — | — | — | — | — | — | — | U.K. 5 mm ² /s oil specification |
| Grade OX-27 | — | — | Approved | — | — | — | — | — | |
| Grade OX-28 | — | — | — | — | — | — | — | — | |

Fuente: Shell Aviation Limited. The Aeroshell Book. Pág. 84

Especificaciones de aceite 500 para turbina, fabricados por Shell – Parte 1

AEROSHELL TURBINE OIL 500

AeroShell Turbine Oil 500 is a 5 mm²/s synthetic hindered ester oil incorporating a carefully selected and balanced combination of additives to improve thermal and oxidation stability and metal passivation.

APPLICATIONS

AeroShell Turbine Oil 500 was developed essentially to meet the requirements of Pratt & Whitney 521 Type II and MIL-L-23699 specifications and is entirely suitable for most civil and military engines requiring this class of lubricant. AeroShell Turbine Oil 500 is approved for use in a wide range of turbine engines as well as the majority of accessories.

AeroShell Turbine Oil 500 contains a synthetic ester oil and should not be used in contact with incompatible seal materials and it also affects some paints and plastics. Refer to the General Notes at the front of this section for further information.

SPECIFICATIONS

| | |
|----------------------------------|---|
| U.S. | Approved MIL-PRF-23699F Grade STD |
| British | Approved DEF STAN 91-101 Grade OX-27 |
| French | Equivalent DCSEA 299/A |
| Russian | – |
| NATO Code | O-156 |
| Joint Service Designation | OX-27 |
| Pratt & Whitney | Approved 521C Type II |
| General Electric | Approved D-50 TF 1 |
| Allison | Approved EMS-53 (Obsolete) |

Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 102**

Especificaciones de aceite 500 para turbina, fabricados por Shell – Parte 2

| EQUIPMENT MANUFACTURER'S APPROVALS | |
|--|--|
| AeroShell Turbine Oil 500 is approved for use in all models of the following engines: | |
| Honeywell | TFE 731, TPE 331, GTCP 30, 36, 85, 331, 660 and 700 series APUs. ALF 502, LF507, LTS101, LTP101, T53, T55, AL5512 |
| Allison (Rolls-Royce) | 250 Series, 501 D13, T56, GMA 2100, GMA 3007 |
| BMW-Rolls Royce | BR710, BR715 |
| CFM International | CFM 56 cleared for flight evaluation |
| GE | GE 90, CF6, CT58, CF700, CJ610, CJ805, CF34, CT7, CT64 |
| IAE | V2500 Series, all marques |
| Motorlet | M601D, E and Z |
| Pratt & Whitney | JT3, JT4, JT8, JT9, JT12, PW4000, PW6000 |
| Pratt & Whitney Canada | JT15, PT6A, PT6T, ST6, PW100, PW200, PW300, PW500 |
| Rolls-Royce | RB211-22B, -524, -535, Trent, Tay, Gnome, Spey, RB183, Adour, M45H, Viper (Series MK 301, 521, 522, 526, 535, 540, 601, 623 and 632) |
| Full details of the approval status of AeroShell Turbine Oil 500 in APUs and other engines/accessories is available. | |

Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 103**

Evaluación del estado de los componentes internos en un motor turboprop PW120, para determinar sus condiciones de operación, basado en los datos obtenidos del análisis del aceite lubricante y el detector de partículas magnéticas

Especificaciones de aceite 500 para turbina, fabricados por Shell – Parte 3

| PROPERTIES | MIL-PRF-23699F Grade STD | TYPICAL |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| Oil Type | Synthetic ester | Synthetic ester |
| Kinematic Viscosity mm ² / _s @ 100°C @ 40°C @ -40°C | 4.90 to 5.40 23.0 min 13000 max | 5.17 25.26 8996 |
| Flashpoint, Cleveland Open Cup °C | 246 min | 256 |
| Pourpoint °C | -54 max | <-54 |
| Total Acidity mgKOH/g | 1 max | 0.01 |
| Evaporation Loss 6.5 hrs @ 204°C % m | 10.0 max | 2.52 |
| Foaming | Must pass | Passes |
| Swelling of Standard Synthetic Rubber SAE-AMS 3217/1, 72 hrs @ 70°C swell % | 5 to 25 | Within Limits |
| SAE-AMS 3217/4, 72 hrs @ 204°C swell % | 5 to 25 | Within Limits |
| standard silicone rubber 96 hrs @ 121°C | 5 to 25 | Within Limits |
| Thermal Stability/Corrosivity 96 hrs @ 274°C - metal weight change mg/cm ² - viscosity change % - Total Acid Number Change mgKOH/g | 4 max 5 max 6 max | 0.5 2.69 2.03 |

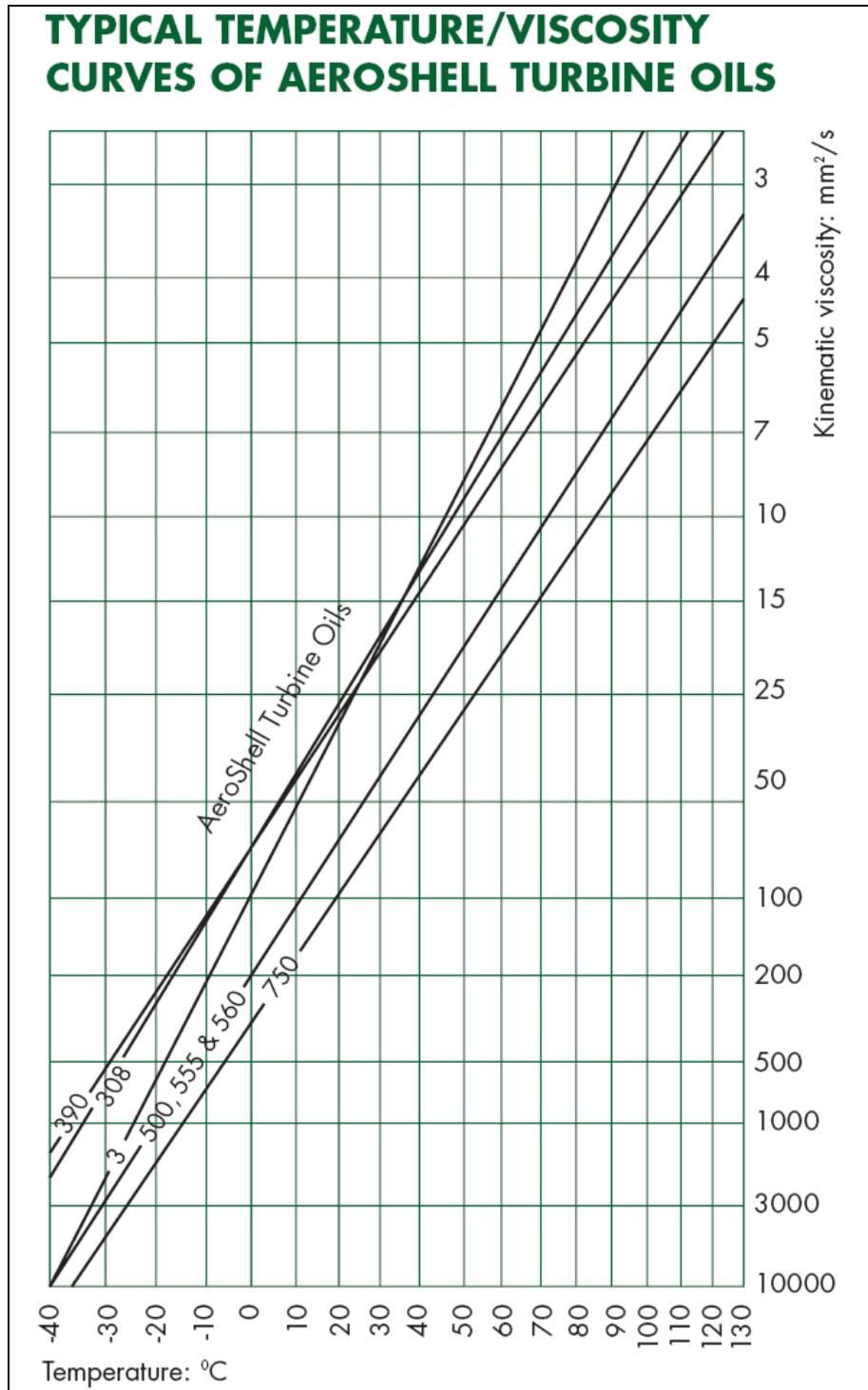
Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 104**

Especificaciones de aceite 500 para turbina, fabricados por Shell – Parte 4

| PROPERTIES | MIL-PRF-23699F Grade STD | TYPICAL |
|--|---|----------------------------|
| Corrosion & Oxidation Stability 72 hrs @ 175°C 72 hrs @ 204°C 72 hrs @ 218°C | Must pass Must pass Must pass | Passes Passes Passes |
| Ryder Gear Test, Relative Rating Hercolube A % | 102 | 117 |
| Bearing Test Rig Type 1½ conditions – Overall deposit demerit rating – viscosity change @ 40°C % – Total Acid Number change mgKOH/g – filter deposits g | 80.0 max –5 to +30 2 max 3 max | 47 19 1.1 0.4 |
| Sonic shear stability – viscosity change @ 40°C % | 4 max | NIL |
| Trace metal content | Must pass | Passes |
| Sediment mg/l Ash mg/l | 10 max 1 max | 2.6 0.05 |
| <p>AeroShell Turbine Oil 500 is also approved for use in the industrial and marine versions of the Rolls Royce Trent, Avon, Allison 501K and 570K, Honeywell TF35, Pratt & Whitney GG3/FT3, GG4/FT4, GG12/FT12, all General Electric LM Series of units, Turbomeca industrial engines and certain Solar gas turbine engines.</p> <p>A viscosity/temperature chart is shown at the end of this section.</p> | | |

Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 105**

Curvas de temperatura/viscosidad de los aceites para turbina



Fuente: Shell Aviation Limited. **The Aeroshell Book. Pág. 132**