

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE INGENIERA MECÁNICA**

**ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO DE MOTOR DIESEL  
DE CAMIÓN DE EXTRACCIÓN MINERA BASADO EN LA CONFIABILIDAD  
OPERACIONAL PARA MINIMIZAR EL COSTO DE CICLO DE VIDA DEL ACTIVO**

Memoria para optar al Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Alumno: Enrique Saavedra Castro

Profesor: Hugo Valenzuela Rosenzuaig

**2018**

## ÍNDICE GENERAL

### INTRODUCCIÓN

Objetivo General

Objetivos específicos

### CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1 Marco Teórico

1.1.1 Función Mantenimiento y sus tipos

1.1.2 Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad

1.1.2.1 Disponibilidad ( $A_i$ )

1.1.2.2 Confiabilidad  $R(t)$

1.1.2.2.1 Probabilidad acumulada de falla  $F(t)$

1.1.2.2.2 Tasa de falla instantánea  $\lambda(t)$

1.1.2.2.3 Densidad de probabilidad de falla  $f(t)$

1.1.2.2.4 Vida media MTTF

1.1.2.2.5 Tiempo medio entre fallas MTBF

1.1.2.3 Mantenibilidad  $M(t)$

1.1.2.3.1 Tasa de reparación  $\lambda_m(t)$

1.1.3 Mantenimiento centro en la confiabilidad (RCM)

1.1.4 Mantenimiento productivo total (TPM)

1.1.5 Optimización de mantenimiento preventivo (PMO)

1.1.6 Costos del mantenimiento

- 1.1.6.1 Costo de ciclo de vida del activo
- 1.1.6.2 Costo global del mantenimiento:
- 1.1.6.3 Optimización de Costos de mantenimiento
- 1.1.7 Distribuciones estadísticas aplicadas al mantenimiento
  - 1.1.7.1 Distribución de Poisson
  - 1.1.7.2 Teorema de Palm
  - 1.1.7.3 Distribución de Geométrica
  - 1.1.7.4 Distribución Gaussiana
  - 1.1.7.5 Distribución exponencial
  - 1.1.7.6 Distribución de Weibull
  - 1.1.7.7 Validación del modelo
  - 1.1.7.8 Proceso homogéneo de Poisson (HPP) y el Proceso no homogéneo de Poisson
  - 1.1.7.9 Aplicación de las Distribuciones en la ingeniería de mantenimiento
- 1.1.8 Estrategias de mantenimiento
  - 1.1.8.1 Costos de las tácticas de mantenimiento
- 1.1.9 Componentes críticos
  - 1.1.9.1 Pareto de valorizado
  - 1.1.9.2 Análisis de la confiabilidad
  - 1.1.9.3 Análisis de Disponibilidad
  - 1.1.9.4 Matriz de criticidad
- 1.1.10 Modelo de reemplazo de Equipo

- 1.1.11 Gestión de repuesto centrada en costos y confiabilidad
  - 1.1.11.1 Minimización del costo global sin demora en pedido (sin costo de falla)
  - 1.1.11.2 Costo de adquisición
  - 1.1.11.3 Costo de almacenamiento
  - 1.1.11.4 Costo global del mantenimiento
  - 1.1.11.5 Minimización del costo global con costo de falla
- 1.1.12 Frecuencia optima de inspecciones e intervenciones
  - 1.1.12.1 Frecuencia de inspección que minimice el costo global
  - 1.1.12.2 Frecuencia de inspección que aumente disponibilidad del equipo
- 1.2 Antecedentes Generales
- 1.3 Antecedentes Particulares
  - 1.3.1 Historial de duración de los motores MTU S-4000
  - 1.3.2 Historial de duración de los Motores Cummins QSK-60
  - 1.3.3 Costos de los Motores
    - 1.3.3.1 Consumo de combustible
    - 1.3.3.2 Valores equipo nuevo y costo de reparación mayor
  - 1.3.4 Mantenimiento actual de los motores Diesel
  - 1.3.5 Descripción del motor Diesel MTU S4000
    - 1.3.5.1 Componentes mecánicos del motor
    - 1.3.5.2 Descripción ubicación de los componentes
    - 1.3.5.3 Sensores del motor

1.3.5.4 Diagrama de entrada y salida del Motor C.I.

1.3.5.5 Diagrama funcional del Equipo:

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA**

2 Aplicación de la Teoría

2.1 Comparación de la vida útil de cada modelo de motor diésel

2.1.1 Vida útil Motor MTU S4000

2.1.2 Vida útil del Motor QSK60 Cummins

2.2 Comparación y selección del modelo de motor diésel con menor costo de ciclo de vida

2.3 Modelamiento de la confiabilidad de un motor MTU S4000

2.3.1 Axiomas del modelo

2.3.2 Uso del modelo de Weibull

2.3.2.1 Función densidad de falla  $f(t)$

2.3.2.2 Curva de confiabilidad  $R(t)$

2.3.2.3 Probabilidad acumulada de falla del componente

2.3.2.4 Función de tasa de falla  $\lambda(t)$

2.3.2.5 Tiempo medio entre falla (TMBF)

2.3.2.6 Número esperado de fallas en un intervalo  $T$

2.3.2.7 Tiempos promedios generales del motor

2.3.2.8 Disponibilidad del equipo

2.3.3 Validación del Modelo

2.4 Análisis de Costos

- 2.4.1 Costo de intervención
- 2.4.2 Costo de falla
- 2.4.3 Costo de almacenamiento
- 2.4.4 Costo de mantenimiento preventivo
- 2.4.5 Costo de emergencia
- 2.4.6 Costos de mantenimiento de emergencia por sistema
- 2.5 Selección de la estrategia de mantenimiento óptima
  - 2.5.1 Comparación entre estrategias de mantenimiento
- 2.6 Determinación de componentes Críticos
  - 2.6.1 Sistemas que más afecta al costo global de mantenimiento
  - 2.6.2 Sistemas que más afecta a la confiabilidad del equipo
  - 2.6.3 Sistemas que más afecta a la disponibilidad del equipo
  - 2.6.4 Matriz de decisión basado en la norma S.A.E. JA 1011-12
- 2.7 FMECA según el RCM
- 2.8 Definir la frecuencia optima de inspecciones
  - 2.8.1 Frecuencia óptima de inspecciones para minimizar el costo global
  - 2.8.2 Frecuencia óptima de inspecciones para aumentar la disponibilidad
- 2.9 Modificar pautas y mantenimiento preventivo
- 2.10 Definir criterios de reemplazo del componente
- 2.11 Gestión de repuestos
- 2.12 Directriz general para la implementación del TPM

## **CAPÍTULO 3: RESULTADOS**

- 3     Resultados
- 3.1   Selección del motor con menor costo de ciclo de vida
- 3.2   Modelamiento de la confiabilidad
- 3.3   Análisis de Costos
- 3.4   Selección de la estrategia de mantenimiento
- 3.5   Componentes Críticos
- 3.6   FMECA
- 3.7   Frecuencias óptimas de inspección o intervención
- 3.8   Reemplazo del componente
- 3.9   Gestión de repuestos
- 3.10   Beneficios económicos de la mejora

## **CAPÍTULO 4: DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- 4.1   Discusiones
- 4.2   Conclusiones:
- 4.3   Recomendaciones

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura I.1: Configuración Funcional en serie.

Figura I.2: Indisponibilidad no programada.

Figura 1.1 Mantenimiento dentro de la función de producción.

Figura 1.2: Evolución del alcance del TPM

Figura 1.3: Ciclo Reactivo del mantenimiento

Figura 1.4: Costo optimo del mantenimiento

Figura 1.5: Tipos de distribuciones estadísticas.

Figura 1.6: Lógica de selección del mantenimiento, según factibilidad técnica.

Figura 1.7: Lógica de selección del mantenimiento, según factibilidad económica.

Figura 1.8: Tiempo optimo entre mantenimiento.

Figura 1.9: Ejemplo diagrama de Pareto.

Figura 1.10: Ejemplo análisis de confiabilidad por componente

Figura 1.11: Ejemplo de análisis de disponibilidad por componente.

Figura 1.12: Disponibilidad Flota 830DC

Figura 1.13: M programado v/s M no programado 2016

Figura 1.14: Gráfico de indisponibilidad acumulada 830E-DC

Figura 1.15: Eventos acumulados 2016 flota de camiones 830E-DC

Figura 1.16: Gráfico indisponibilidad no programado flota 830E-DC.

Figura 1.17: Disponibilidad flota 830E-AC.

Figura 1.18: M programado v/s M no programado 2016

Figura 1.19: Gráfico de indisponibilidad acumulada 830E-AC

Figura 1.20: Eventos acumulados flota de camiones 830E-AC

Figura 1.21: Grafico indisponibilidad No programa flota 830E-AC

Figura 1.22: Motor Diesel MTU 16V S4000

Figura 1.23: Curva de motor MTU 16V S4000

Figura 1.24: Enumeración de los componentes

Figura 1.25: Mando del compresor de aire acondicionado

Figura 1.26: Bomba de alta presión de combustible

Figura 1.27: Válvula moduladora

Figura 1.28: Cabezal de filtros de aceite

Figura 1.29: Filtro centrifugo

Figura 1.30: Válvula del Rockford

Figura 1.31: Rockford

Figura 1.32: Caja de termostato de baja

Figura 1.33: Damper

Figura 1.34: Mando del alternador

Figura 1.35: Módulo de control electrónico (ECM)

Figura 1.36: Adaptador de intercooler

Figura 1.37: Bracket

Figura 1.38: Goma descarga de turbo

Figura 1.39: Turbo

Figura 1.40: Tapas de válvulas

Figura 1.41: Galería del common rail

Figura 1.42: Compresor de aire

Figura 1.43: Bomba de transferencia de combustible

Figura 1.44: Cabezal de combustible

Figura 1.45: Cáster

Figura 1.46: Múltiples de admisión

Figura 1.47: Cañerías de alta presión de combustible

Figura 1.48: Cañerías de retorno de combustible del inyector

Figura 1.49: Intercooler

Figura 1.50: Múltiple de refrigerante

Figura 1.51: Tubo de descarga de turbo

Figura 1.52: Tubo de escape (corrugado)

Figura 1.53: “Y” de escape

Figura 1.54: Múltiple de escape (Spider)

Figura 1.55: Carcasa enfriador de aceite

Figura 1.56: Caja de termostato de alta

Figura 1.57: Bomba principal de refrigerante

Figura 1.58: Bomba secundaria de refrigerante

Figura 1.59: Varilla de nivel y tapa de reposición de aceite

Figura 1.60: Ubicación general de sensores

Figura 1.61: Sensor de referencia de tiempo (TRS)

Figura 1.62: Sensor de temperatura de aire R1 (ATS R1)

Figura 1.63: Sensor de saturación de filtros de aceite

Figura 1.64: Sensor de presión barométrica

Figura 1.65: Sensor de presión de cárter (CPS)

Figura 1.66: Sensor de temperatura de refrigerante de intercooler (ICTS)

Figura 1.67: Sensor de presión de turbo (TBS)

Figura 1.68: Sensor de temperatura de aire (ATS)

Figura 1.69: Sensor de presión de refrigerante de intercooler R1 (ICPS)

Figura 1.70: Sensor de presión de refrigerante de motor (CPS)

Figura 1.71: Sensor de temperatura de refrigerante del motor (CTS)

Figura 1.72: Sensor de presión de aceite (OPS)

Figura 1.73: Sensor de presión de combustible (FPS)

Figura 1.74: Sensor de temperatura de combustible (FTS)

Figura 1.75: Sensor de alta presión de combustible (HPS)

Figura 1.76: Sensor de referencia sincrónica (SRS)

Figura 1.77: Sensor de temperatura de aceite (OTS)

Figura 1.78: Sensor de nivel de refrigerante (CLS)

Figura 1.79: Diagrama de entrada y salida del Motor C.I.

Figura 1.80: Diagrama de funcional del Equipo

Figura 2.1: Vida útil motores MTU (datos sin censurar)

Figura 2.2: Confiabilidad de motores MTU (datos sin censurar)

Figura 2.3: Vida útil motores MTU (datos censurados)

Figura 2.4: Confiabilidad de motores MTU (datos censurados)

Figura 2.5: Vida útil motores QSK-60 (datos sin censurar)

Figura 2.6: Confiabilidad de motores QSK-60 (datos sin censurar)

Figura 2.7: Costo ciclo de vida motor MTU

Figura 2.8: Costo ciclo de vida motor QSK-60

Figura 2.9: Comparación Costo ciclo de vida motores

Figura 2.10: Tendencia de fallas motor MTU

Figura 2.11: Parámetros de la distribución Weibull

Figura 2.12: Curva Función de densidad de falla

Figura 2.13: Curva de Confiabilidad

Figura 2.14: Curva de Probabilidad de falla acumulado

Figura 2.15: Curva de Tasa de falla

Figura 2.16: Número esperado de falla

Figura 2.17: Diagrama de Pareto valorizado de falla

Figura 2.18: Algoritmo de selección de estrategia según factibilidad técnica

Figura 2.19: Algoritmo de selección de estrategia según factibilidad económica

Figura 2.20: Modelamiento del costo de mantenimiento en función del tiempo de intervención

Figura 2.21: Comparación del costo entre las tácticas de mantenimiento en función del tiempo

Figura 2.22: Diagrama de Pareto valorizado del costo global de mantenimiento

Figura 2.23: Curva de Confiabilidad por sistema del equipo

Figura 2.24: Disponibilidad por sistema del equipo

Figura 2.25: Costos medios anuales

Figura 3.1: Comparación del Costo de ciclo de vida de los motores

Figura 3.2: Tendencia de fallas motor MTU

Figura 3.3: Curva de Confiabilidad en el tiempo, Motor MTU

Figura 3.4: Diagrama de Pareto valorizado del costo global de mantenimiento

Figura 3.5: Modelamiento del costo de mantenimiento en función del tiempo de intervención

Figura 3.6: Comparación del costo entre las tácticas de mantenimiento en función del tiempo

Figura 3.7: Curva de Confiabilidad por sistema del equipo

Figura 3.8: Disponibilidad por sistema del equipo

Figura 3.9: Costos medios anuales

Figura 3.10: Modelamiento del costo de mantenimiento en función del tiempo de intervención

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.1: Ejemplo de análisis de los costos de falla por componente.

Tabla 1.2: Criterios de frecuencias de fallas.

Tabla 1.3: Criterios de consecuencias de fallas.

Tabla 1.4: Valor Cuantitativo de Riesgo de Falla de la Matriz de Mantenimiento.

Tabla 1.5: Valor Cualitativo del Riesgo de Falla de la Matriz de Mantenimiento.

Tabla 1.6: Costos medios por períodos actualizados.

Tabla 1.7: Historial de duración motores MTU

Tabla 1.8: Cometarios de o.t. con menor duración a los 15.000 [hr]

Tabla 1.9: Tabla de frecuencia de datos no censurados

Tabla 1.10: Historial de duración motores QSK-60

Tabla 1.11: Comentaríos de o.t. con menor duración a los 15.000 [h]

Tabla 1.12: Consumo de combustible flota de camiones

Tabla 1.13: Consumo promedio por motor

Tabla 1.14: Costo de reparaciones de motor

Tabla 1.15: Costo de reparación promedio de motor

Tabla 1.16: Costo de equipo nuevos

Tabla 1.17: Tareas preventivas

Tabla 1.18: Tareas preventivas (Continuación)

Tabla 1.19: Datos Generales

Tabla 1.20: Configuración del motor

Tabla 1.21: Parámetros de funcionamiento del motor

Tabla 1.22: Enumeración de los componentes

Tabla 1.23: Enumeración de sensores

Tabla 2.1: Tabla de frecuencias de la vida útil del motor MTU

Tabla 2.2: Medidas de tendencia central del motor MTU

Tabla 2.3: Tabla de confiabilidad con datos no censurados motor MTU

Tabla 2.4: Tabla de frecuencias de la vida útil del motor MTU datos censurados

Tabla 2.5: Medidas de tendencia central del motor MTU datos censurados

Tabla 2.6: Tabla de confiabilidad con datos censurados motor MTU

Tabla 2.7: Tabla de frecuencias de la vida útil del motor QSK 60 datos sin censurar

Tabla 2.8: Medidas de tendencia central del motor QSK 60 datos sin censurar

Tabla 2.9: Tabla de confiabilidad con datos sin censurar motor QSK 60

Tabla 2.10: Valor de los motores nuevos

Tabla 2.11: Consumo promedio de combustible por motor

Tabla 2.12: Costo promedio de reparación por motor

Tabla 2.13: Costo de ciclo de vida por motor

Tabla 2.14: Historial de falla Motor MTU

Tabla 2.15: Costos relacionados a las fallas en el historial de motor

Tabla 2.16: Costos de Mantenimiento

Tabla 2.17: Tiempo óptimo de intervención

Tabla 2.18: Análisis de las señales débiles de los componentes y la técnica predictiva aplicable.

Tabla 2.19: Costos globales por sistema.

Tabla 2.20: Tasa de falla por sistema.

Tabla 2.21: Disponibilidad por sistema.

Tabla 2.22: Matriz de Mantenimiento

Tabla 2.23: Matriz de Mantenimiento (continuación)

Tabla 2.24: Matriz de Mantenimiento (continuación)

Tabla 2.25: Matriz de Mantenimiento (continuación)

Tabla 2.26: Matriz de Mantenimiento (continuación)

Tabla 2.27: Clasificación de Criticidad por matriz

Tabla 2.28: FMECA motor MTU

Tabla 2.29: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.30: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.31: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.32: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.33: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.34: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.35: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.36: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.37: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.38: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.39: FMECA motor MTU (continuación)

Tabla 2.40: Frecuencia de inspección para minimizar el costo global

Tabla 2.41: Frecuencia de inspección para aumentar la disponibilidad

Tabla 2.42: Pauta de mantenimiento preventivo.

Tabla 2.43: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

Tabla 2.44: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

Tabla 2.45: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

Tabla 2.46: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

Tabla 2.47: Tiempo óptimo de reemplazo.

Tabla 2.48: Gestión de repuestos.

Tabla 3.1: Costos de ciclo de vida por motor.

Tabla 3.2: Costos globales por sistema.

Tabla 3.3: Análisis de las señales débiles de los componentes y la técnica predictiva aplicable.

Tabla 3.4: Costos globales por sistema.

Tabla 3.5: Tasa de falla por sistema.

Tabla 3.6: Disponibilidad por sistema.

Tabla 3.7: Clasificación de Criticidad por matriz

Tabla 3.8: Frecuencia de inspección para minimizar el costo global

Tabla 3.9: Frecuencia de inspección para aumentar la disponibilidad

Tabla 3.10: Tiempo óptimo de reemplazo.

Tabla 3.11: Gestión de repuestos.

## **INTRODUCCIÓN**

En la industria minera, como cualquier otra industria intensa en activos físicos, es de suma importancia tener una gestión de activo que minimice el costo del ciclo de vida de sus equipos, con el fin de ser competitivo a nivel internacional. En vista de esto, La superintendencia de mantenimiento mina, de la faena minera “El Soldado” de la compañía internacional Angloamerican Chile S.A., define en su plan estratégico de operación, desarrollar planes de mantenimiento maestros con el fin de disminuir sus costos operaciones y es en ese marco donde desarrolla este estudio de optimización de mantenimiento de motores Diesel que busca abaratar los costos de movimiento de material en la mina rajo.

El encargado de transportar el material desde los 6 puntos de carguíos (\*valor máximo), hasta los botaderos en el caso de ser material de poca ley, o hacia la pila de stock o hacia la chancadora primaria si el material cumple con la ley mínima, es el proceso de transporte de material de la Superintendencia de Operaciones.

Para tal labor, en la actualidad se cuenta con 30 camiones de carga de marca Komatsu, de los cuales se pueden diferenciar en 3 modelos, la serie Komatsu 830E-DC, maquinaria con alrededor de 30 años de servicio y con una flota de 14 camiones, la serie Komatsu 830E-AC, maquinaria con alrededor de 15 años de servicio y con una flota de 7 camiones, y la serie Komatsu 830E-1AC, maquinaria nueva, puestas en servicio en el 2012 y con una flota de 9 camiones además de contar con el equipo de respaldo de 5 camiones catapillar 785B que se encuentran en stand by.

Los camiones Komatsu 830E están conformados por una serie de subsistemas, siendo los principales:

- Sistema de Dirección.
- Sistema de Frenos.
- Sistema de Suspensión.
- Sistema de Lubricación.
- Motor Diesel.

- Sistema Eléctrico 24 [V].
- Sistema Eléctrico Potencia.
- Neumáticos.
- Estructura.

La configuración funcional del camión está compuesta por una serie de subsistemas o componentes con distribución propia de falla. Como se puede apreciar en la figura I.1

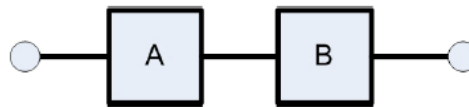


Figura I.1: Configuración Funcional en serie.

La confiabilidad del equipo es restringida por la confiabilidad de cada componente, es decir, solo hace falta que falle un componente principal para que falle el camión total, La confiabilidad del camión se define en función de la confiabilidad de sus subsistemas:

$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

$$R_s(t) = e^{-\int \lambda_s(t) dt} = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int \lambda_i(t) dt} = e^{-\int \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt}$$

Como se verá más adelante en el desarrollo del estudio, el componente con mayor ponderación en la indisponibilidad del equipo es el motor Diesel, Figura I.2:

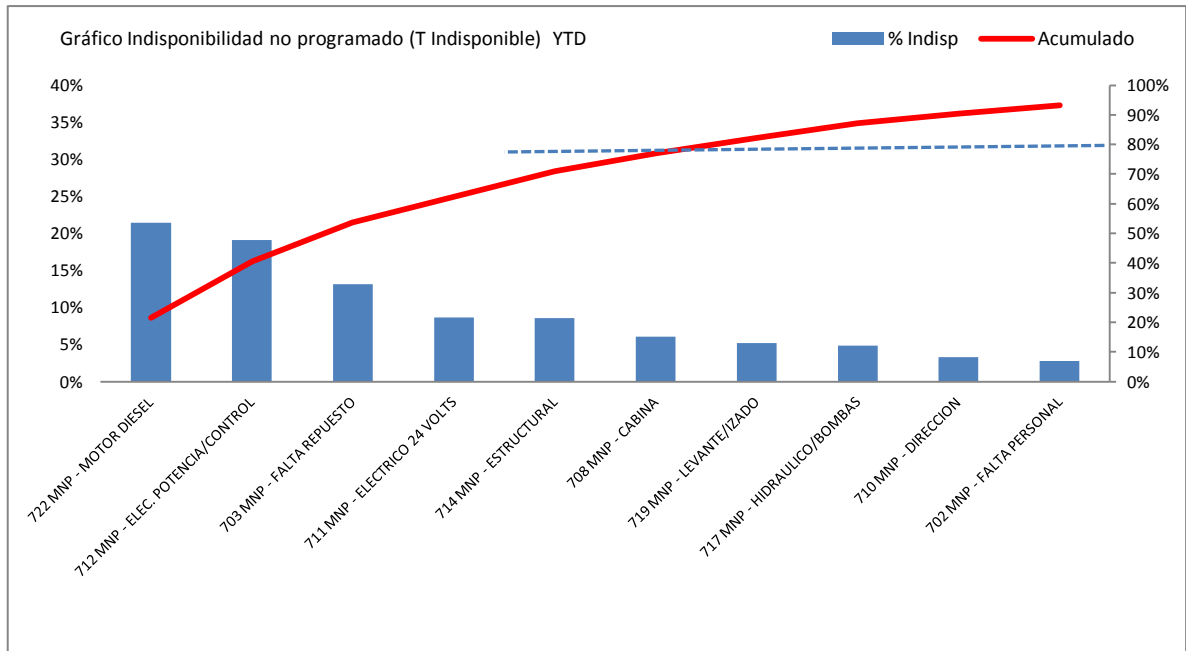


Figura I.2: Indisponibilidad no programada.

Por lo cual, para mejorar la seguridad operacional del equipo, es necesario realizar un estudio de optimización del mantenimiento de los motores Diesel, pero actualmente operan dos motores distinto en la flota de camiones de extracción, estos son:

- Modelo: QSK-60, Fabricante: Cummins, Representante: Cummins Chile S.A.
- Modelo: S4000 V16, Fabricante: MTU, Representante: Detroit Chile S.A.

Por lo tanto, se realiza una selección entre los dos actuales motores, escogiendo al que tiene mayores prestaciones, y posterior a esto, se realiza una optimización del plan maestro de mantenimiento en busca de aumentar la disponibilidad, la mantenibilidad y la confiabilidad, además de reducir los costos globales.

## Objetivo General

Seleccionar bajo el método del menor costo de ciclo de vida, el motor más rentable para la operación de traslado de materia, además de desarrollar un modelo de optimización que permita determinar el tipo, frecuencia y nivel óptimo de mantenimiento, teniendo en cuenta el tiempo operativo del activo, su confiabilidad en el periodo de vida, su respectiva función densidad de probabilidad de falla, por medio de un análisis RAM. Además de determinar la conveniencia económica de la implementación del modelo.

## Objetivos específicos

- Comparación y selección del modelo de motor diésel con menor costo de ciclo de vida.
- Descripción del funcionamiento del motor, señalando los sistemas que lo integran.
- Modelos de confiabilidad (Comportamiento estadístico de falla).
- Análisis de los costos de intervención y costos de falla.
- Determinación de la estrategia de mantenimiento que minimice el costo global del mantenimiento.
- Determinación de los componentes críticos.
- Realización de los cuadros de análisis de falla (FMECA).
- Definir la frecuencia optima de inspecciones.
- Modificar pautas y mantenimiento preventivo.
- Definir criterios de reemplazo del componente.
- Gestión de repuesto.
- Directriz general para la implementación del TPM

## **CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES**

## 1.1 Marco Teórico

A continuación, se presenta los conceptos claves sobre el mantenimiento, su gestión y su rol dentro de la empresa moderna.

### 1.1.1 Función Mantenimiento y sus tipos

Definición de mantenimiento: se define mantenimiento como el conjunto de actividades realizadas dentro de la función de producción (figura 1.1), encargada de mantener, cuidar y restablecer un sistema operativo para asegurar el servicio principal de este, con los niveles requeridos en los parámetros operacionales (calidad, velocidad de producción y seguridad), durante la vida útil del activo con un costo global mínimo.

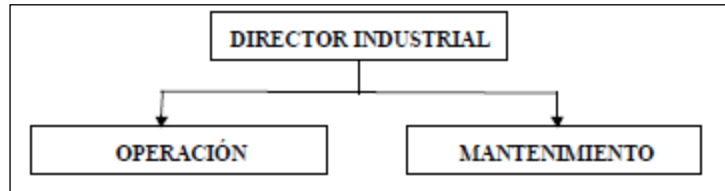


Figura 1.1 Mantenimiento dentro de la función de producción.

Tipos de mantenimiento: en grosso modo, se pueden clasificar en dos tipos de mantenimiento; post-falla y pre-falla.

- Mantenimiento post falla: se refiere a las tareas realizadas después que se presente la falla del componente o del equipo:
  - Correctivo o Reactivo: es el tipo de mantenimiento que se realiza después de la falla, el cual solo busca restablecer la funcionalidad del equipo.
  - Proactivo a la falla: es el tipo de mantenimiento que se realiza después de la falla, pero realiza un estudio de la causa que provoca la falla, busca corregir la causa raíz de la falla evitando que se repita en el tiempo.
- Mantenimiento pre falla: se refiere a las tareas realizadas antes que se presente la falla, las cuales buscan evitar que se presente, de modo simplista significa realizar un despiece de sistemas o subsistemas del equipo, en busca de componentes

- reemplazables (ejemplos: rodamientos, correas, engranajes, etc.) y definir una frecuencia de cambio:
  - Mantenimiento preventivo edad constante: son las tareas realizadas de recambio de componentes a edad constante, la frecuencia de cambio de los repuestos están basados principalmente en recomendaciones del fabricante o por mantenimiento genéricos (de equipos semejantes).
  - Mantenimiento basado en la condición: son las tareas realizadas después de la evaluación del estado del equipo, se caracteriza por utilizar inspecciones periódicas, donde se evalúa el estado del componentes pero no se realiza una estimación de vida útil residual, es decir, dependiendo del estado (condición) se decide el recambio del componente.
  - Mantenimiento sintomático: se basa en la detección de alguna señal débil del componente que se relacione con el estado del mismo, este mantenimiento no utiliza instrumentos para medir esta señal débil, pero si se estima la vida útil residual del componente en base a la experiencia del mantenedor o del operador.
  - Mantenimiento predictivo: es basa en la detección y medición de alguna señal débil del componente que se relacione con el estado del mismo, por lo cual, es necesario algún instrumento para medir dicha señal determinar el estado actual el componente y proyectar la vida útil residual.

### 1.1.2 Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad

A continuación se presenta y se define los principales indicadores del mantenimiento.

#### 1.1.2.1 Disponibilidad (Ai)

La disponibilidad refleja la posibilidad de utilización de una instalación desde el punto de vista técnico, es decir excluyendo las detenciones no originadas por falla del sistema. La

disponibilidad se define como la razón o cociente del tiempo en que la instalación se puede ocupar y el tiempo total que incluye al anterior más el tiempo de reparación.

De acuerdo a lo anterior, la disponibilidad viene dado por la relación porcentual entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo total. Lo que se puede expresar de la forma siguiente:

$$A = \frac{UT}{(UT + DT)}$$

Dónde:

UT (up – time): representa el tiempo en que el sistema está realmente disponible para el funcionamiento.

DT (down – time): representa el tiempo fuera de servicio imputable a causas técnicas.

También se puede definir la disponibilidad de un equipo, basándose en el MTBF y el MTTR:

$$A = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$$

Dónde:

MTBF: es el tiempo medio entre fallas.

MTTR: es el tiempo medio de reparación.

Cabe mencionar que en este indicador de disponibilidad está presente sólo el efecto de la falla del elemento. En el caso general, el tiempo fuera de servicio de una instalación industrial durante cierto período de tiempo es el resultado de la suma del tiempo debido a las intervenciones de mantenimiento preventivo y del tiempo debido a las operaciones de mantenimiento correctivo.

Disponibilidad de sistema:

Sistema en serie:

Para componentes en serie, la disponibilidad del sistema se representa con la siguiente formula:

$$A_s = \prod A_i$$

Dónde:

$A_s$ : es la disponibilidad del sistema en serie.

$A_i$ : es la disponibilidad de cada componente del sistema.

Sistema en paralelo:

Para componentes en paralelo, la disponibilidad del sistema se presenta con la siguiente formula:

$$A_s = 1 - \prod (1 - A_i)$$

Dónde:

$A_s$ : es la disponibilidad del sistema en paralelo.

$A_i$ : es la disponibilidad de cada componente del sistema.

#### 1.1.2.2 Confiabilidad $R(t)$

La confiabilidad de un elemento es la probabilidad de que éste funcione sin averiarse durante un cierto período  $t$  en relación a ciertas condiciones operacionales bien definidas. Al componente se le deberán asignar dos estados: el primero, de buen funcionamiento, el segundo, de mal funcionamiento. Luego se podrá asociar al elemento la probabilidad de que se produzca uno u otro de ambos estados. La confiabilidad, por lo tanto, es sinónimo de probabilidad de buen funcionamiento en el tiempo en las condiciones deseadas.

Por lo tanto, la Confiabilidad de un componente en el instante  $t$ ;  $R(t)$ ; es la probabilidad de que un ítem no falle en el intervalo  $(0; t)$ , dado que era nuevo o como nuevo en el instante  $t = 0$ . Un componente puede tener diferentes confiabilidades, asociadas a diferentes funciones.

Considere N componentes supuestamente idénticos (condiciones de operación idénticas), todos nuevos o como nuevos en  $t = 0$ . Sea  $N - n$  el número de componentes que fallan en el intervalo  $[0; t]$ .  $R(t)$  puede ser estimada a partir de:

$$R(t) = \frac{n(t)}{N}$$

#### 1.1.2.2.1 Probabilidad acumulada de falla $F(t)$

Es el área bajo la curva  $f(t)$  de 0 a  $t$ , es la acumulada de la probabilidad de falla de componente, en termino sencillos es la no confiabilidad de un componente, es decir, la probabilidad acumulada de falla  $F(t)$  se define como la probabilidad de que un ítem falle en el intervalo  $(0; t)$ . Entonces:

$$R(t) + F(t) = 1$$

Por lo tanto:

$$F(t) = \frac{N - n(t)}{N}$$

#### 1.1.2.2.2 Tasa de falla instantánea $\lambda(t)$

La tasa de falla instantánea, más conocida en la literatura de confiabilidad como la probabilidad condicional de falla  $\lambda(t)$ . Es la probabilidad de que el ítem falle en un intervalo de tiempo  $(t; t+\Delta t)$  dado de que no ha fallado hasta el momento  $t$ . Su grafica se asemeja a la forma de la curva de la función de riesgo de falla.

La tasa de falla instantánea (en inglés, Hazard rate),

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} \right] = \frac{f(t)}{R(t)}$$

También se define como el número de fallas por unidad de tiempo en el instante  $t$  dividido por el número de componentes operando en el instante  $t$ :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(t)\Delta t} \right]$$

#### 1.1.2.2.3 Densidad de probabilidad de falla f(t)

Como la densidad es igual a la masa por unidad de volumen, la densidad de probabilidad es la probabilidad de falla por unidad de tiempo, cuando es multiplicada por la longitud de un intervalo pequeño de tiempo  $\Delta T$  en el instante  $t$ , el producto es la probabilidad de falla en ese intervalo.

La densidad de probabilidad de falla ( $t$ ) es la descripción básica del tiempo a la falla de un ítem, y se define como la probabilidad instantánea de que un ítem que no ha fallado en el intervalo  $(0; t)$  falle en el intervalo  $(t; t+dt)$ . Se trata entonces de una probabilidad condicional (de que sobreviva hasta la edad  $t$  y de que falle en  $dt$ ):

$$f(t)dt = R(t)\lambda(t)dt$$

Por lo tanto;

$$f(t) = R(t)\lambda(t)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

$$dF(t) = (1 - F)\lambda(t)dt$$

$$\int \frac{1}{(1 - F)} dF = \int \lambda(t)dt$$

$$-\ln(R) = \int \lambda(t)dt$$

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

Lo que establece una relación entre la confiabilidad y la tasa de fallo instantánea en función de la edad  $t$  del componente, además todas las otras funciones relacionadas con la confiabilidad

de un ítem se pueden derivar de la PDF por ejemplo, el área  $\sum (\Delta T x f(t))$  debajo de la curva PDF entre 0 y el tiempo  $t_1$  es la probabilidad (acumulada)  $F(t)$  de que falle antes de  $t_1$ .

#### 1.1.2.2.4 Vida media MTTF

La vida media de un componente no reparable es el valor de tiempo esperado para que el componente falle. Más conocido como el tiempo medio para fallar, o MTTF

$$MTTF = \int_0^{\infty} t dF = \int_0^{\infty} t f dt$$

Al integrar por partes se tiene:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

#### 1.1.2.2.5 Tiempo medio entre fallas MTBF

Un indicador útil es el tiempo medio entre fallas (MTBF); o en otras palabras, el tiempo promedio en que el equipo no falla. Matemáticamente ello corresponde a la esperanza de  $T$  ( $T$  siendo el período entre 2 fallas), dada la función de distribución  $f(t)$

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Integrando por partes:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

\*cabe mencionar que esta fórmula es válido solo para mantenimiento correctivo y no para una estrategia de mantenimiento preventivo.

\*Solo se ocupa esta suposición, ya que, el mantenimiento aplicado a los componentes es el correctivo por su extremado valor.

### 1.1.2.3 Mantenibilidad $M(t)$

Las normas francesas X60-300 y X60-301 especifican 5 tipos de criterios de mantenibilidad.

El primer criterio se refiere al mantenimiento preventivo: para tales fines es conveniente conocer la accesibilidad de los componentes, su desmontabilidad, y su intercambiabilidad.

El segundo criterio se centra en el mantenimiento correctivo: implica el tiempo para buscar la falla, y el tiempo requerido para diagnosticar.

El tercer criterio se enfoca hacia la organización del mantenimiento a través de la periodicidad de las intervenciones preventivas, el agrupamiento de tareas similares (rutas e intervenciones oportunistas), la homogeneidad de la confiabilidad de los componentes, la presencia de indicadores y contadores y a la complejidad de las intervenciones.

El cuarto criterio se centra en la calidad de la documentación técnica: su profundidad, su disponibilidad, el modo de transmisión, y los principios generales de redacción y presentación de la documentación técnica.

El ultimo criterio tiene relación con el seguimiento del fabricante: evolución del fabricante, calidad del servicio post-venta, obtención de piezas de recambio.

(Labib, 1998)[19] caracteriza el intervalo de tiempo de parada correctiva en 3 fases principales: respuesta, diagnóstico, reparación. La fase de respuesta es el intervalo entre la ocurrencia de la falla y la toma de conocimiento por parte del ingeniero de mantenimiento. De acuerdo a Labib, este intervalo de tiempo debe ser eliminado y ello se facilita enormemente con la puesta a punto de un sistema de información que emita alarmas tan pronto la falla ocurre. La fase de diagnóstico puede ser reducida con capacitación adecuada y acceso rápido a información pertinente (historial de fallas, árboles de mantenimiento, árboles de falla, análisis de modos de falla, etc.). La fase de reparación puede ser minimizada con un sistema de gestión de repuestos y proveedores integrado en el sistema de información

En vista del gran número de factores que afectan el tiempo total de intervención, es conveniente definir mantenibilidad  $M(t)$  como la probabilidad de que la intervención se realice en un intervalo de duración  $t$ , luego

$$M(t) = \int_0^t t(t)dt$$

Donde  $f(t)$  es la función de densidad de probabilidad para el tiempo de reparación TTR. En forma similar a la confiabilidad, el valor esperado o *Mean Time To Repair* se calcula como:

$$MTTR = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

Para representar a la mantenibilidad podemos usar las mismas distribuciones empleadas para la confiabilidad. Una muy usada es la log-normal; ello se justifica pues el TTR se puede modelar en muchos casos como la suma de una distribución exponencial con otra normal. Tal suma es bien representada por una distribución log-normal.

#### 1.1.2.3.1 Tasa de reparación $\lambda_m(t)$

La tasa de reparación  $\lambda_m(t)$ , se define como la probabilidad por unidad de tiempo de que el componente sea reparado en el tiempo  $t$  siendo que el componente ha fallado en  $t = 0$  y no ha sido reparado en  $[0; t)$ .

#### 1.1.3 Mantenimiento centro en la confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) es un proceso desarrollado por la industria de la aviación civil en la USA. Su fin primordial es ayudar al personal de mantenimiento, a determinar las mejores prácticas para garantizar la confiabilidad de las funciones de los activos físicos, y para manejar las consecuencias de sus fallas.

El objetivo primario del RCM es conservar la función de sistema, antes que la función del equipo. La metodología lógica del RCM, que se deriva de múltiples investigaciones, se puede resumir en seis pasos:

- Identificar los principales sistemas de la planta y definir sus funciones.
- Identificar los modos de falla que puedan producir cualquier falla funcional.
- Jerarquizar las necesidades funcionales de los equipos usando Análisis de Criticidad.

- Determinar la criticidad de los efectos de las fallas funcionales.
- Emplear el diagrama de árbol lógico para establecer la estrategia de mantenimiento.
- Seleccionar las actividades preventivas u otras acciones que conserven la función del sistema.

El RCM es un enfoque sistémico para diseñar programas que aumenten la Confiabilidad de los equipos con un mínimo costo y riesgo; para ello combina aplicaciones técnicas de Mantenimiento Autónomo, Preventivo, Predictivos y Proactivo, mediante estrategias justificadas técnica y económicamente. La información almacenada en las hojas de trabajo de RCM minimiza los efectos de rotación de personal y de falta de experiencia.

Las premisas básicas para el diseño de cualquier proyecto de RCM que propenda por la optimización del mantenimiento, deben ser:

- Lo fundamental es la disponibilidad de los Equipos.
- El interés principal debe ser la función que estos desempeñan.
- Se debe cuestionar todo plan no sustentado por Análisis de Confiabilidad.
- El análisis debe ser sistemático, tanto en extensión como en profundidad.

De acuerdo con la norma SAE-JA 1011, editada en agosto de 1999, un programa de RCM debe asegurar que las siete preguntas básicas sean contestadas satisfactoriamente en la secuencia mostrada:

- ¿Cuáles son las funciones asociadas al activo en su actual contexto operacional (funciones)?
- ¿De qué manera puede no satisfacer sus funciones (fallas funcionales)?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional (modos de falla)?
- ¿Qué sucede cuando ocurren las diferentes fallas (efectos de las fallas)?
- ¿De qué manera afecta cada tipo de fallas (consecuencias de las fallas)?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir / predecir cada falla (tareas probables e intervalos de las tareas)?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada (acciones preestablecidas)?

El resultado de cada análisis de RCM, de un equipo, es una lista de responsabilidades de mantenimiento que permiten aumentar la Disponibilidad, Confiabilidad y rendimiento operativo del equipo, con un alto nivel de eficiencia en costos.

#### 1.1.4 Mantenimiento productivo total (TPM)

El mantenimiento Productivo Total (TPM) es un moderno sistema gerencial de soporte al desarrollo de la industria, que permite con la participación de todo el personal de la organización tener equipos de producción siempre listos. Su metodología, soportada por varias técnicas de gestión, establece algunas estrategias adecuadas para mejorar la productividad empresarial, con miras a lograr afrontar con éxito y competitividad, el proceso de globalización y apertura de la economía.

La filosofía del TPM hace parte del enfoque hacia la Calidad Total. Mientras la Calidad Total pasa de hacer énfasis en la inspección y selección, a hacer énfasis en la prevención; el TPM pasa del énfasis en la simple reparación al énfasis en la prevención y predicción de las averías y del mantenimiento de las maquinas.

El TPM incluye las cinco metas siguientes:

- Mejora de la Eficacia de los Equipos
- Mantenimiento Autónomo por operadores
- Planeación y programación óptima de un sistema Preventivo – Predictivo
- Mejoramiento de la habilidad operativa
- Gestión Temprana de Equipos para evitar problemas futuros

En el TPM todos los problemas de operación de los equipos se consideran perdidas de su función, las cuales deben ser monitoreadas y agrupadas en “LAS SEIS GRANDES PERDIDAS”:

- Pérdidas por Averías
- Pérdidas de Preparación y Ajustes
- Inactividad y Paradas Menores

- Pérdidas de Velocidad Reducida
- Pérdidas de Puesta en Marcha
- Defectos de Calidad y Reparación de Trabajos

El indicador de gestión clave del TPM es la Eficacia Global del Equipo (OEE), cuyo valor está definido como el producto de tres factores: la disponibilidad, el rendimiento del ciclo y la tasa de calidad. Los operarios y personal de mantenimiento se capacitan para identificar los problemas relacionados con la eficacia de los equipos y realizar análisis para determinar las pérdidas.

El alcance del TPM ha evolucionado ampliamente desde la década de los años setenta hasta el día de hoy, al punto que se le considera actualmente como un sistema de Innovación Empresarial, como se muestra en la figura, sobrepasando los modelos de mejoramiento industrial del final del siglo pasado.

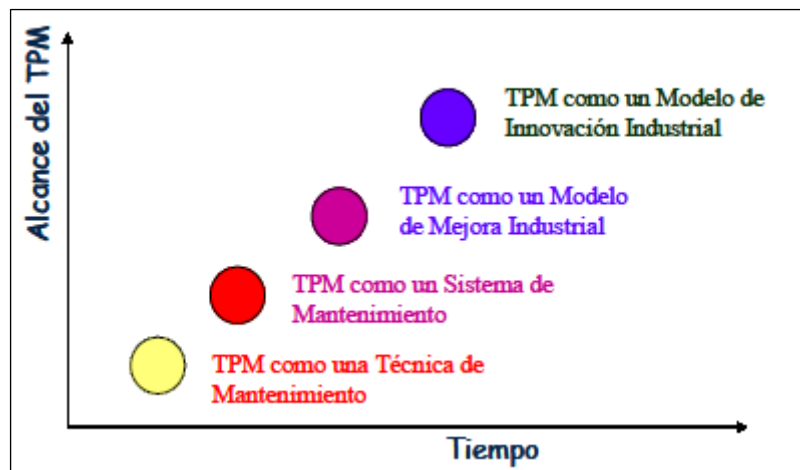


Figura 1.2: Evolución del alcance del TPM

Sintetizando los aportes del TPM a un sistema de mantenimiento óptimo podemos decir que:

- El TPM mejora la eficiencia y eficacia del Mantenimiento.
- El TPM trabaja para llevar al equipo a su condición de diseño.
- El TPM busca la gestión del equipo y la prevención de averías y pérdidas.

- El TPM requiere que el mantenimiento se lleva a cabo en cooperación activa con el personal de producción.
- El TPM necesita capacitación continua del personal.
- El TPM usa efectivamente las técnicas de mantenimiento Preventivo y Predictivo.
- El TPM mejora la moral del personal y crea un auténtico sentido de pertenencia.
- En el TPM el ciclo de vida útil del equipo se extiende, y se reducen los costos totales de operación.

#### 1.1.5 Optimización de mantenimiento preventivo (PMO)

El sistema de Optimización de Mantenimiento Preventivo (PMO) es un método diseñado para revisar los requerimientos de mantenimiento, el historial de fallas y la información técnica de los activos en operación. La teoría básica del PMO parte del análisis del Ciclo Reactivo del mantenimiento mostrado en la figura, adaptado por Steve Turner.



Figura 1.3: Ciclo Reactivo del mantenimiento

El proceso de Optimización del Mantenimiento Preventivo, facilita el diseño de un marco de trabajo racional y rentable, cuando un sistema de PM está consolidado y la planta está bajo control. Esto implica una buena experiencia en hacer mantenimiento planeado. A partir de ahí,

las mejoras se pueden alcanzar fácilmente con la adecuada asignación de recurso; y el personal de mantenimiento puede enfocar sus esfuerzos en los defectos de diseño de la planta, o en las limitaciones operativas.

Un sistema PMO es base para una Ingeniería de Confiabilidad efectiva, y para la adecuada eliminación de defectos, teniendo en cuenta que:

- Se reconocen y resuelven los problemas con la información exacta.
- Se logra un efectivo uso de los recursos.
- Se mejora la productividad de los operarios y del personal de mantenimiento.
- El sistema se adapta a las situaciones y los objetivos específicos de cada cliente.
- La optimización del PM motiva al personal.

Mientras que el PMO utiliza el historial de fallas existente como una entrada en la revisión de las actividades de PM, reconoce que en la gran mayoría de las empresas, la información contenida en sistemas CMMS, tiende a ser inexacta e incompleta, y busca corregirla. La fuerza fundamental de un programa de PMO es que todas las acciones de mantenimiento tienen valor agregado, y que el sistema motiva mejoras en muchos otros aspectos del manejo de los activos físicos de la empresa, aparte de los análisis básicos de mantenimiento.

El Análisis de Confiabilidad con base en el historial de fallas de los equipos, permite determinar el comportamiento real durante su vida útil, con el fin de:

- Diseñar las políticas de mantenimiento a utilizar en el futuro.
- Determinar las frecuencias óptimas de ejecución del mantenimiento preventivo.
- Optimizar el uso de los recursos físicos y del talento humano.
- Calcular intervalos óptimos de sustitución económica de equipos.
- Minimizar los costos del departamento.

#### 1.1.6 Costos del mantenimiento

##### 1.1.6.1 Costo de ciclo de vida del activo

El costo de ciclo de vida del activo, es el costo total que la empresa debe costear para utilizar el activo, es la suma de todos los costos que se realiza desde el momento de adquisición hasta el retiro del activo (según la norma Inglesa BS 3811:1993), y se presenta con la siguiente ecuación:

$$C_{lc} = C_a + C_o + C_s + C_u + C_{il} + C_m + C_t$$

Siendo:

Clc: Costo de ciclo de vida; Costo total de posesión del activo.

Ca: Costo de adquisición; Costo de inversión inicial, valor del activo, capacitaciones iniciales, montaje, etc.

Co: Costo de operación; Sueldos de operadores, sueldos de supervisores, combustible, etc.

Cs: Costo de apoyo logístico; Mantenimiento, insumos y consumibles (no combustible).

Cu: Costo de no disponibilidad; Lucro cesante, ingresos no percibidos.

Cil: Costo de pérdidas indirectas; Pérdida de calidad del producto terminado, reprocesamiento del producto.

Cm: Costo de modificaciones; Modificaciones para aumentar la tasa de producción.

Ct: Costo de retiro: Costo de retirar el activo, traslado y manejo de material reciclado.

Cabe mencionar que el costo de mantenimiento de un activo, se encuentra entre los costos de apoyo logístico y el costo de no disponibilidad del equipo, lo que normalmente en la industrial del mantenimiento se habla del costo global del mantenimiento.

#### 1.1.6.2 Costo global del mantenimiento:

Se define como costo global del mantenimiento, todos los costos relacionado directa o indirectamente con el mantenimiento de los equipos, siendo los siguientes los principales costos de mantenimiento:

$$Costo_{global} = C_{falla} + C_{intervención} + C_{almacenamiento} + C_{sobreinversión}$$

Siendo:

Costo de falla: son todos los costos asociados a la falla del equipo, siendo los principales; el ingreso perdido de producción (indisponibilidad del equipo), es decir, los ingresos – los costos variables, el otro costo. El otro costo de falla son las posibles consecuencias del impacto en la seguridad de las personal como del medio ambiente.

Costo de intervención: son todos los costos asociados a las intervenciones de mantenimiento que se realicen al equipos, siendo estas preventivas como correctivas, se considera el costo de h-h del mantenedor, supervisión y administración, repuestos e insumos, costo de energías asociadas a la intervención, y equipos auxiliares.

Costo de almacenamiento: son todos los costos asociados a mantener los repuestos en bodega, siendo los principales: El costo de oportunidad por tener el capital inmóvil y el costo de mantener la bodega operativa (costo de la instalación, personal, computadores (sistema de administración), equipos auxiliares (horquillas, elevadores), etc. Por razón práctica se utiliza un porcentaje del valor del repuesto, en este caso de estudio se considera un 15%.

Costo de sobreinversión: El costo de sobreinversión considera la sobre inversión hecha al escoger un equipo más caro en comparación con otro, evidentemente el equipo con mayor inversión inicial se justifica por tener una mayor seguridad operacional (mayor confiabilidad).

Cabe mencionar que estos 4 costos están relacionados entre sí, es decir, el aumento de unos de estos costo hace disminuir en parte los otros costos, un ejemplo trivial, es considerar que un aumento de los costos de intervención (mantenimiento más frecuentes), con lleva una disminución de los costos de falla, ya que habría una menor probabilidad de falla, y en cierta parte disminuye el costo de almacenamiento ya que se reduciría la rotación de los repuestos, en cambio una disminución de los costos de intervención (mantenimiento menos frecuentes o con menor intensidad) con lleva un aumento de los costos de falla, ya que aumenta la

probabilidad de falla, y en cierta parte aumenta el costo de almacenamiento, ya que es necesario tener un mayor stock de repuesto para mantener la seguridad operacional.

#### 1.1.6.3 Optimización de Costos de mantenimiento

El objetivo del proceso de optimización de los costos del mantenimiento, es determinar los intervalos óptimos de mantenimiento, para aumentar la productividad de los equipos y minimizar el costo total del departamento. Ahora bien, el nivel óptimo es el punto en el que los costos totales, que combinan costos directos, tiempo perdido y deterioro excesivo, son mínimo, como se muestra en la figura, lo cual se presenta cuando el costo directo se aproxima al costo indirecto.

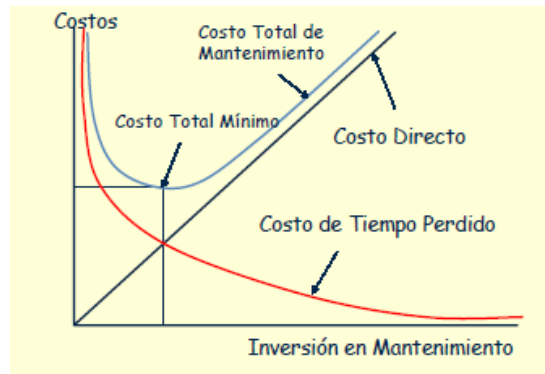


Figura 1.4: Costo optimo del mantenimiento

El análisis de los costos del mantenimiento programado y del no programado, sirve para resolver el problema de optimizar el proceso de mantenimiento, cuando se utiliza un sistema asistido por computador.

El costo del mantenimiento programado  $C_s(t)$  en un tiempo dado  $t_0$  se expresa como:

$$C_s(t) = t_0 \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{t_i} \right)$$

Donde el  $t_i$  es el término  $i$  del tiempo medio para falla, y el  $C_i$  es el término  $i$  de la acción de mantenimiento.

El costo de mantenimiento no programado  $C_u(t)$  se estima por:

$$C_u(t) = t/t_0 \sum_{i=1}^n (f_i * C_i)$$

Donde el  $f_i$  es el término  $i$  del periodo de acción de mantenimiento no programada durante el tiempo  $t_0$ .

Ambos la probabilidad de supervivencia de un equipo y la probabilidad de ocurrencias de fallas se presentan en el mismo tiempo. Con base en esta consideración, el costo total de mantenimiento  $C_m(t)$  asociado los dos tipos de mantenimiento puede determinarse por:

$$C_m(t) = C_s(t) + C_u(t)$$

El problema es minimizar  $C_m(t)$  para calcular el ciclo de mantenimiento óptimo  $t^*$ .

Este problema se puede resolver diferenciando  $C_m(t)$  con respecto a  $t$ , e igualando a cero. Esta ecuación para un periodo de estudio dado se puede generalizar, planteando que el ciclo de mantenimiento óptimo es igual a la frecuencia seleccionada por la raíz cuadrada de la razón de costos de mantenimiento programado sobre costos de mantenimiento no programado:

$$t^* = \sqrt{t_0 \left( \frac{C_s}{C_u} \right)}$$

El análisis de costos permite adicionalmente, realizar el estudio técnico – económico de los demás índices de gestión y determinar el nivel de mantenimiento óptimo para la operación económica de los equipos.

#### 1.1.7 Distribuciones estadísticas aplicadas al mantenimiento

En este ítem se presenta brevemente varios tipos de distribuciones utilizadas para determinar y analizar la confiabilidad del componente en función de su naturaleza (tasa de falla)

##### 1.1.7.1 Distribución de Poisson

Esta ley describe el número de ocurrencias de eventos aleatorios. Si el promedio de eventos en un intervalo de tiempo T se define como:

$$m = \lambda T$$

La ley entrega la probabilidad de que  $k$  eventos ocurran en el intervalo. Está descrita por:

$$P(x = k) = e^{-m} \frac{m^k}{k!}$$

Donde  $m = E(x) = \sigma^2(x)$  (nótese la igualdad entre la media y la varianza)

$$P(x \leq k) = \sum_{j=0}^k e^{-m} \frac{m^j}{j!}$$

#### 1.1.7.2 Teorema de Palm

Uno de los pilares de la teoría de inventarios de repuesto reparables es el teorema de colas de Palm. Su importancia deriva de su utilidad para estimar la distribución de probabilidad estacionaria del número de unidades en reparación a partir de la distribución del proceso de demandas y de la distribución del tiempo para reparar.

#### 1.1.7.3 Distribución de Geométrica

La distribución geométrica, tal como la de Poisson, es discreta y existe solo para valores enteros no negativos. Es útil para modelar el número de ensayos exitosos consecutivos al realizar ensayos independientes de un sistema.

$$f(x) = pq^x$$

Siendo  $x$  entero, no negativo y;

$$q = 1 - p$$

$$F(x) = \sum_{i=0}^x pq^i$$

El valor medio de la distribución es:

$$E(x) = \frac{q}{p}$$

p corresponde a la probabilidad de éxito en un ensayo.

#### 1.1.7.4 Distribución Gaussiana

La densidad de probabilidad está dada por:

$$f(t) = \phi(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma^2$  corresponden a la media y la varianza respectivamente. Por tanto:

$$F(t) = \Phi(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t)dt$$

La distribución normal no es la distribución más adecuada para análisis de confiabilidad, ya que, su variable ordenada está en el rango  $(-\infty, \infty)$ . Sin embargo, para valores usuales, la probabilidad de que la variable aleatoria tome valores negativos es despreciable.

#### 1.1.7.5 Distribución exponencial

Tal como la ley de Poisson, esta distribución describe la probabilidad de un número dado de eventos en un intervalo. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ para } t \geq 0$$

Con  $E(t) = 1/\lambda$ ,  $\sigma^2 = 1/\lambda^2$ .

Y;

$$F(t) = P(t \leq t_0) = \int_0^{t_0} f(t)dt = 1 - e^{-\lambda t}$$

En aplicaciones de confiabilidad,  $\lambda$  es la tasa de ocurrencia de fallas por unidad de tiempo y  $1/\lambda$  corresponde al tiempo medio entre fallas (MTBF)

#### 1.1.7.6 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es una función de estadística múltiple, cambia fácilmente, es asimétrica y presenta diferentes valores para la media y la mediana. Se presenta como una aproximación de la distribución normal, o como una representación de la tendencia exponencial.

La expresión matemática de la función que define la Confiabilidad  $R(t)$ , es complemento de la función de Probabilidad de falla  $F(t)$ . La expresión matemática recibe el nombre de distribución de tres parámetros:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - T_0}{\theta - T_0} \right)^\beta \right]$$

Estos parámetros son:

$\beta$  [Beta] = Parámetro de forma o geométrico ( $\beta > 0$ )

$\theta$  [Theta] = Parámetro de escala o valor característico ( $\theta \geq T_0$ )

$T_0$  = Parámetro de localización, que es el valor garantizado de  $t$  ( $T_0 \geq 0$ )

La distribución de Weibull está limitada por  $T_0$  en la cota inferior, que en el caso de la Confiabilidad significa el mínimo tiempo que el equipo funcionará con seguridad antes de fallar. La variable característica  $\theta$  es similar a la media y representa un valor de  $t$  debajo del cual se encuentra el 63.2% de los datos. El parámetro de forma o geométrico  $\beta$ , controla la simetría de la distribución.

Con frecuencia la teoría estadística que maneja la distribución Weibull, reemplaza el parámetro  $\theta$ , por su valor a partir del valor garantizado, y lo representa por  $\eta$  (Eta), es decir, se asigna como segundo parámetro de Weibull a este valor, que corresponde a:

$$\eta = \theta - T_0$$

Por lo cual la ecuación de Weibull para tres parámetros se convierte en:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-T_0}{\eta}\right)^\beta\right]$$

El Análisis de la Confiabilidad, basado en la distribución de Weibull, se obtiene de los datos históricos de fallas de los equipos, utilizando diversos programas de software, o mediante procedimiento gráficos con ayuda de Excel como el descrito en Shigley – Mischke. El objetivo final es relacionar la Confiabilidad de los equipos y predecir su comportamiento, con estos datos.

Esta distribución es usada en estudios de confiabilidad, especialmente de sistemas mecánicos. Tiene la ventaja de ser muy flexible, y adaptable a una variedad de observaciones experimentales.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Donde;

$t-\gamma \geq 0$ :

$\eta$  es el parámetro de escala:

$\beta$  es el parámetro de forma;

$\gamma$  es el parámetro de localización.

#### 1.1.7.7 Validación del modelo

Para poder describir la confiabilidad de los componentes, tomando un conjunto de observaciones y proponer una hipótesis de que la confiabilidad obedece cierto modelo de distribución en particular (Weibull), se debe realizar un proceso de validación que permita verificar la calidad de la hipótesis.

Por lo tanto una vez escogido el modelo de distribución (en este caso particular Weibull), se define la medida del nivel de confianza del modelo, en otras palabras la probabilidad de que el modelo sea erróneo.

Los métodos más utilizados para verificar el nivel de confianza de modelos de distribución los son:

- Test  $X^2$
- Test de Kolmogorv-Smirnov (KS)

Test de Kolmogorv – Smimov (KS)

Se escoge este Test para verificar la calidad del modelo (hipótesis), ya que, necesita poca cantidad de observaciones en comparación a las 50 observaciones agrupadas del Test  $X^2$ .

El test se basa en comparar la verdadera función de distribución con la dada por la ley propuesta (Weibull)

En este Test se usan los valores absolutos de las diferencia entre cada punto.

Sea  $\mathcal{F}(t)$  la verdadera distribución y  $F(t)$  la distribución propuesta. La discrepancia para ti es:

$$D_{ni} = \mathcal{F}(t) - F(t)$$

$\mathcal{F}(t)$  puede ser estimado por el método de los rangos medios

$$\mathcal{F}(t) = \frac{i}{n+1}$$

Puede demostrarse que la distribución de  $D_n = \max(D_{ni})$  depende solo de  $n$ ; y se puede escribir:

$$p\left(\max_i \left| \mathcal{F}(t) - F(t) \right| < D_{n,\alpha}\right) \leq 1 - \alpha$$

#### 1.1.7.8 Proceso homogéneo de Poisson (HPP) y el Proceso no homogéneo de Poisson

El Proceso homogéneo de Poisson (HPP) debe su nombre al matemático francés Simeón Denis Poisson (1781-1840). En un HPP los intervalos entre fallas son independientes e idénticamente distribuidos con distribución exponencial con parámetros  $\lambda$  constante.

El proceso de renovación es una generalización del HPP. En este caso los tiempos entre fallas son también independientes e idénticamente distribuidos pero la distribución no es necesariamente de tipo exponencial (usualmente se utiliza Weibull). En este caso, las reparaciones representan intervenciones perfectas que dejan el sistema como nuevo.

El Proceso No Homogéneo de Poisson (NHPP) difiere del HPP en que la tasa de ocurrencia de fallas varía en el tiempo. Los NHPP son usados usualmente en sistemas que reciben reparaciones mínimas, eso es, que dejan al sistema tan mal como antes de la ocurriese la falla.

#### 1.1.7.9 Aplicación de las Distribuciones en la ingeniería de mantenimiento

Toda maquinaria y sus componentes están destinados a fallar en algún momento, siendo todo un desafío para el ingeniero de confiabilidad predecir cuándo ocurrirá la falla, para lo cual se utiliza los datos históricos de fallas tanto del equipo o equipos similares operando en escenarios iguales (similares).

Esta técnica de predicción consta en buscar un modelo de distribución que mejor se asemeja a la realidad, dependiendo de distribución de la tasa de falla del componente se puede destacar las distribuciones aplicables al mantenimiento:

- distribución weibull; aplicado a componentes con tasa de falla variables y en función del tiempo (t) normalmente a componentes sometidos a desgastes como los mecanismos mecánicos, esta distribución es ocupada para representar la evolución de las fallas infantiles.
- distribución exponencial; aplicado a componentes con tasa de fallo constante (fallas aleatorias) normalmente usada

- distribución normal: aplicada a componentes con tasa de fallo creciente (envejecimiento), normalmente a componentes en fase de desgaste.

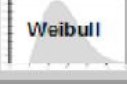
| Nombre                                                                                               | Función de densidad                                                                                                    | Distribución                                        | Parámetros                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|  <b>Normal</b>      | $f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$                                           | $F(t) = \int f(t) dt$                               | $\mu$ = Media<br>$\sigma$ = Desviación Estándar                            |
|  <b>Lognormal</b>   | $f(t) = \frac{1}{\sigma' \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(t)-\mu']^2}{2\sigma'^2}}$                           | $F(t) = \int f(t) dt$                               | $\mu'$ = Media de $\ln(t)$<br>$\sigma'$ = Desviación Estándar del $\ln(t)$ |
|  <b>Exponencial</b> | $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$                                                                            | $F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$                   | $\lambda$ = Inverso del promedio                                           |
|  <b>Gamma</b>       | $f(t) = \frac{1}{\beta \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot \left[\frac{t}{\beta}\right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}$ | $F(t) = \int f(t) dt$                               | $\alpha$ = Parámetro de forma<br>$\beta$ = Parámetro de escala             |
|  <b>Weibull</b>     | $f(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$                       | $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$ | $\beta$ = Parámetro de forma<br>$\eta$ = Parámetro de escala               |

Figura 1.5: Tipos de distribuciones estadísticas.

#### 1.1.8 Estrategias de mantenimiento

La gestión del mantenimiento ha cambiado fuertemente en los últimos años, en la década de los 50'se realizaba principalmente mantenimiento correctiva, durante la época de los 60'ingresa ampliamente el concepto de mantenimiento preventivo, basada en un tiempo de recambio predeterminado el que posteriormente fue fortalecido por el mantenimiento según condición o sintomática. Ya en la década del 80'aparece el concepto del mantenimiento productivo, que junto con el mantenimiento preventivo involucra el mejoramiento continuo.

En resumen, las estrategias de mantenimiento más utilizadas en la actualidad son:

- Correctivas: sustitución de elemento por falla.
- Preventivas: sustitución de elemento antes de falla.
- Predictivas: sustitución de elemento tras síntoma.

- Productivas: sustitución preventiva o predictiva más mejoramiento continuo.

La idea fundamental es presentar un modelo que permita analizar cuál es la mejor combinación de políticas de mantenimiento en una instalación industrial o en un equipo específico. La definición de las estrategias de mantenimiento requiere:

- La tasa de falla, entendida como modalidad y frecuencia.
- El costo global de la intervención preventiva, entendido como la suba del costo del repuesto más el costo del mantenimiento preventivo.
- El costo global de emergencia, entendido como la suba del costo del repuesto más el costo del lucro cesante.

La selección de la estrategia de mantenimiento, siempre debe buscar que la estrategia o conjunto de estrategias sea la que genere menor costo total de mantenimiento, pero a la vez ser factible de realizar.

Por lo cual la selección se basa en dos factores determinantes, siendo el primero la factibilidad técnica de la implementación, y el segundo factor es el económico, la estrategia de mantenimiento óptima debe minimizar el costo global del mantenimiento.

Factibilidad técnica; la estrategia se selecciona bajo el siguiente algoritmo:

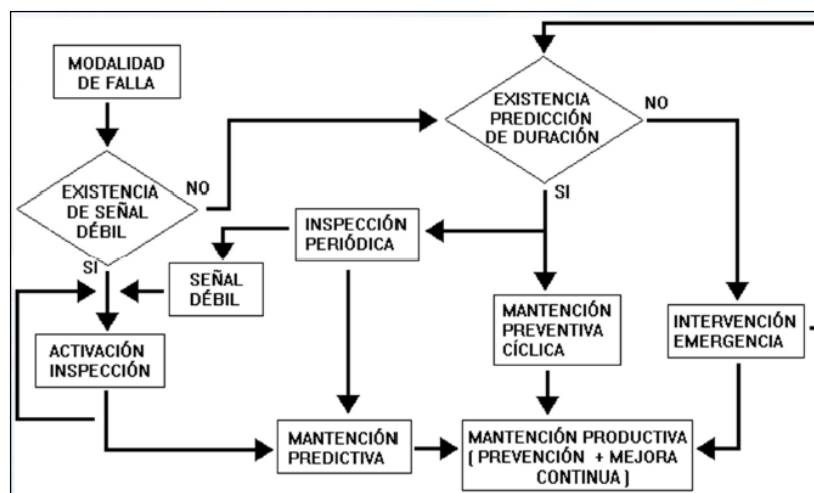


Figura 1.6: Lógica de selección del mantenimiento, según factibilidad técnica.

Esta lógica busca encontrar si el componente presenta alguna señal física (vibración, temperatura, desgaste, fisura, voltaje, corriente, etc.) que se pueda relacionar con el estado del componente con el fin de aplicar un mantenimiento pre falla, sea este preventivo o predictivo.

Y si no presenta alguna señal débil pero se tiene su historial de falla, por medios estadísticos se obtiene o mejor dicho se define el tiempo de cambio óptimo, con el fin de aplicar un mantenimiento pre falla, tipo preventivo.

Y si no existe forma de prever la falla, solo es aplicable el mantenimiento de emergencia tipo correctivo, con la salvedad (si amerita) de realidad una mejora en el equipo

Factor económico; la estrategia debe minimizar el costo global bajo la siguiente lógica:

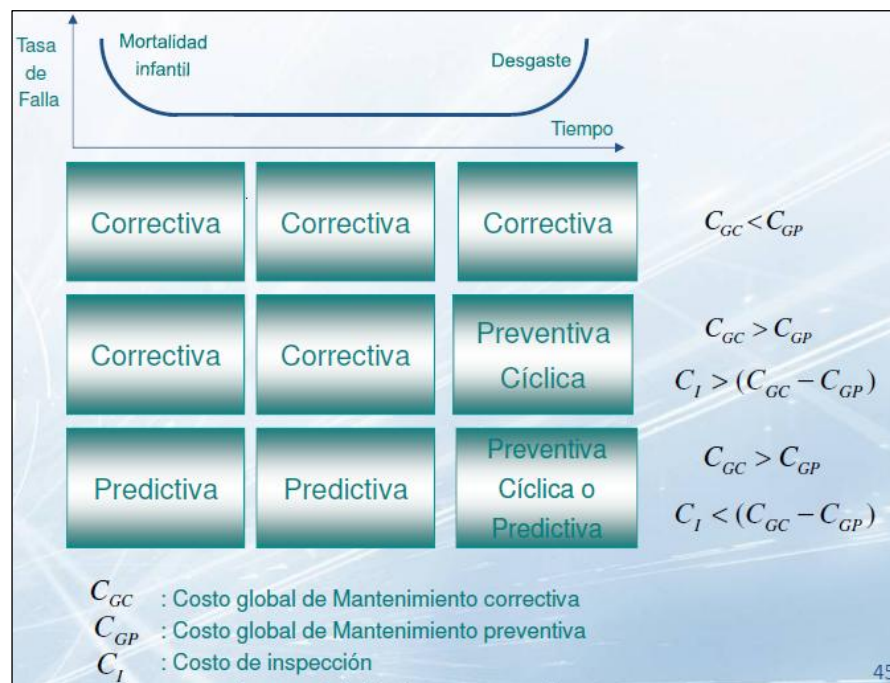


Figura 1.7: Lógica de selección del mantenimiento, según factibilidad económica.

Desde el punto de vista económico, la estrategia debe buscar minimizar el costo hora de mantenimiento considerando el comportamiento de la tasa de falla, es decir la edad del equipo. La estrategia debe “equilibrar” los dos costos más importantes del mantenimiento; el costo de emergencia y el costo de intervención preventiva:

$$Ec = \frac{Ce * F(t) + Cp * R(t)}{MTBM_t + MTTR_t}$$

Siendo:

$$MTBM_t = R(t) * T + F(t) * MTBF_t$$

$$MTTR_t = R(t) * MTTR_p + F(t) * MTTR_e$$

Quedando:

$$Ec = \frac{Ce * F(t) + Cp * R(t)}{[R(t) * T + F(t) * MTBF_t] + [R(t) * MTTR_p + F(t) * MTTR_e]}$$

Una vez que se encuentra el tiempo entre mantenimiento optimo (que genere menor costo global de mantenimiento) se evalúa cada técnica de mantenimiento por separado y se compara entre sí.

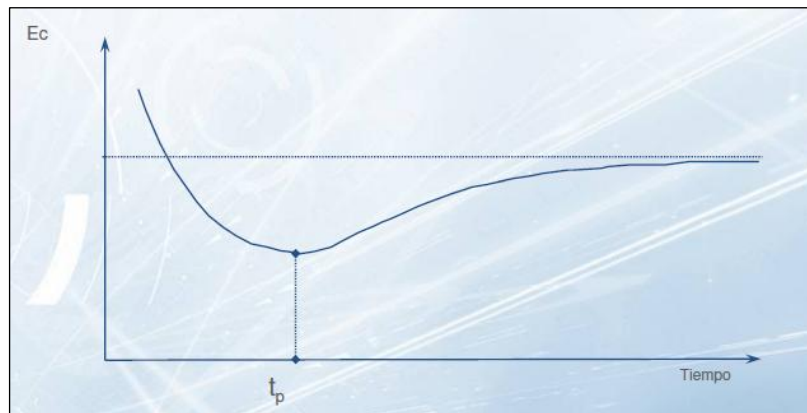


Figura 1.8: Tiempo optimo entre mantenimiento.

#### 1.1.8.1 Costos de las tácticas de mantenimiento

Mantenimiento correctivo: los costos de mantenimiento correctivo, se consideran como el costo de intervención más el costo de emergencia por cada número esperado de falla:

$$(T) = \frac{C_p + C_e * H(T)}{T}$$

Mantenimiento preventivo: los costos de mantenimiento preventivo, considera la probabilidad de costos de las intervenciones preventivas en el periodo de tiempo a evaluar, más la probabilidad de los costos de emergencias en el periodo:

$$C_{mp} = \frac{C_p * R(t) + C_e * (1 - R(t))}{T}$$

Mantenimiento predictivo: considera el costo de inspección y la probabilidad de costo de emergencia en el periodo de tiempo:

$$C_{predic.} = \frac{C_{pred} + C_e * (1 - R(t))}{T}$$

#### 1.1.9 Componentes críticos

Se define componente crítico, a todo componente que al momento de fallar comprometa la funcionalidad del equipo, o cuya falla genere un costo de reparación elevado o que la falla afecte la seguridad de las personas o del medio ambiente.

En la práctica, existen varios métodos para determinar la criticidad de los componentes de un equipo, siendo los principales métodos:

- Basado en los costos: Pareto valorizado
- Basado en la confiabilidad: análisis de confiabilidad
- Basado en la disponibilidad: análisis de disponibilidad
- Basado en la Norma S.A.E. JA 1011-12: Matriz de criticidad

##### 1.1.9.1 Pareto de valorizado

Este método es basa en valorizar las fallas de los componentes, considerando los costos de intervención, de falla y de almacenamiento, luego se realiza la priorización por medio del análisis ABC del diagrama Pareto.

Análisis de los costos de las fallas de los componentes:

| Sistema      | TTF (hr) | TTR (hr) | costos       |            |            |
|--------------|----------|----------|--------------|------------|------------|
|              |          |          | Intervención | Falla      | Emergencia |
| COMPONENTE 1 | 4792     | 108      | \$ 3.567     | \$ 129.600 | \$ 133.167 |
| COMPONENTE 2 | 4640     | 65       | \$ 10.371    | \$ 78.000  | \$ 88.371  |
| COMPONENTE 3 | 3336     | 55       | \$ 1.712     | \$ 66.000  | \$ 67.712  |
| COMPONENTE 4 | 3457     | 48       | \$ 4.328     | \$ 57.600  | \$ 61.928  |
| COMPONENTE 5 | 1638     | 16       | \$ 3.173     | \$ 19.200  | \$ 22.373  |
| COMPONENTE 6 | 591      | 14       | \$ 3.105     | \$ 16.800  | \$ 19.905  |
| COMPONENTE 7 | 5019     | 8        | \$ 269       | \$ 9.600   | \$ 9.869   |
| COMPONENTE 8 | 1077     | 4        | \$ 244       | \$ 4.800   | \$ 5.044   |

Tabla 1.1: Ejemplo de análisis de los costos de falla por componente.

Diagrama Pareto:

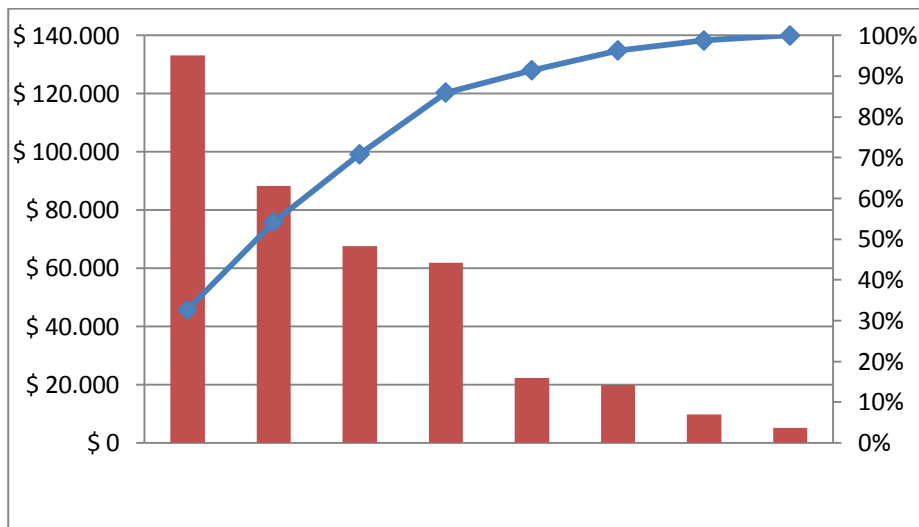


Figura 1.9: Ejemplo diagrama de Pareto.

#### 1.1.9.2 Análisis de la confiabilidad

Como los sistemas están en serie, la confiabilidad del equipo está condicionada con la confiabilidad de cada sistema:

$$Rs(t) = R_1(t) * R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n Ri(t)$$

$$Rs(t) = e^{-\int \lambda_s(t) dt} = \prod_{i=1}^n Ri(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int \lambda_i(t) dt} = e^{-\int \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt}$$

Por lo cual, se determina cual componente afecta más a la confiabilidad del equipo:

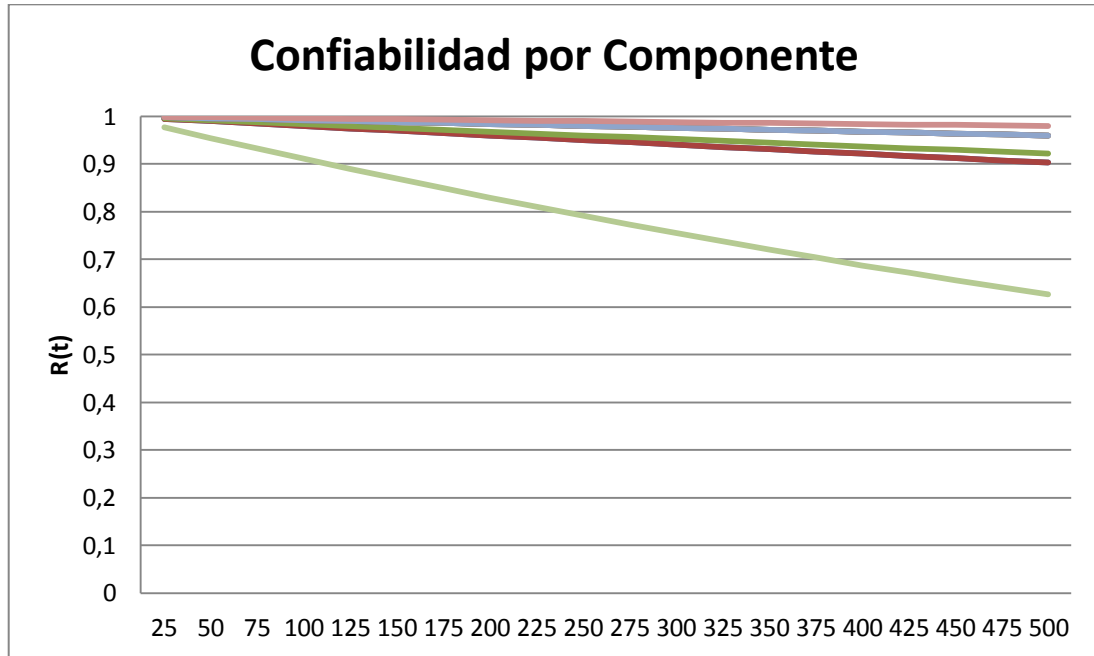


Figura 1.10: Ejemplo análisis de confiabilidad por componente.

### 1.1.9.3 Análisis de Disponibilidad

Como los sistemas están en serie, la disponibilidad del equipo está condicionada con la disponibilidad de cada sistema:

$$As(i) = A_1(i) * A_2(i) \dots A_n(i) = \prod_{i=1}^n Ai$$

Por lo cual, se determina cual componente afecta más a la disponibilidad del equipo:

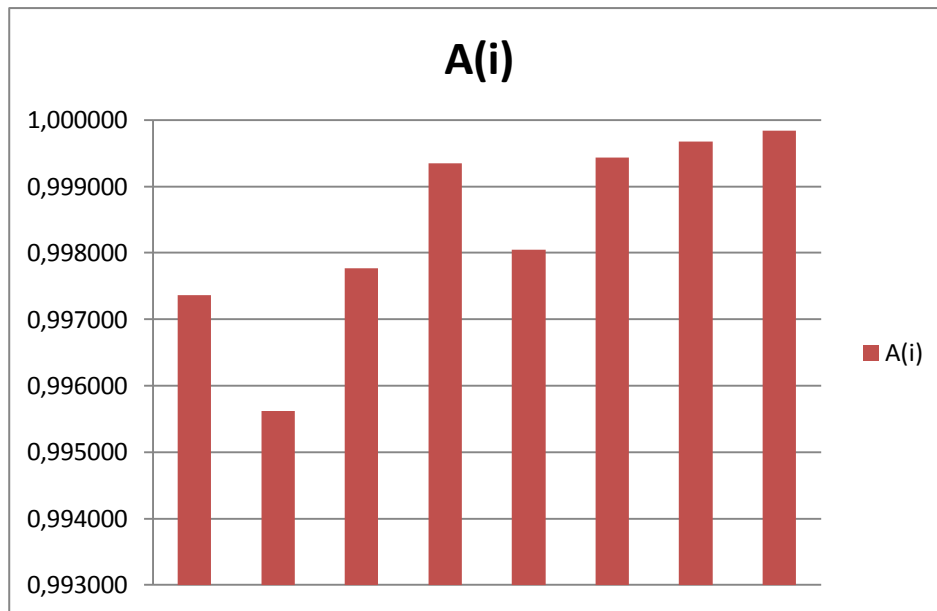


Figura 1.11: Ejemplo de análisis de disponibilidad por componente.

#### 1.1.9.4 Matriz de criticidad

La matriz de decisión utilizada para determinar los componentes o sistemas críticos está basada en la norma S.A.E. JA-1011, por lo cual, se define criticidad como la productoria entre la frecuencia y la consecuencia:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Se define consecuencia basado en la normal JA1011-12 como; El impacto que genera la falla en los siguientes ítems:

- Impacto operacional
- Costo de reparación
- En la seguridad

Además de lo anterior se considera el nivel de detención de la falla.

$$\text{Consecuencia} = (\text{Impacto Operacional} \times \text{Nivel De Detención}) + \text{Costo Mantenimiento} + \text{Impacto Seguridad y Medio Ambiente.}$$

### Cuantificación de los tópicos que se basa la matriz

- impacto operacional: serán la cantidad de hora de no operación de los equipos dividiéndose en cinco categorías:
  - categoría 5: falla que provoquen una parada mayor a 20 horas valor de la categoría: 10
  - categoría 4: falla que provoquen una parada menor a 20 y mayor de 15 horas valor de la categoría: 6
  - categoría 3: falla que provoquen una parada menor a 15 y mayor de 10 horas valor de la categoría: 4
  - categoría 2: falla que provoquen una parada menor a 10 y mayor de 5 horas valor de la categoría: 2
  - categoría 1: falla que provoquen una parada menor de 5 valor de la categoría: 1
- Nivel de detención: se define como la dificultad en determinar la falla y se considera cuatro categorías:
  - Categoría 4: tiempo de detención mayor a 10 horas; 4
  - Categoría 3: tiempo de detención  $5 < X < 10$  horas; 3
  - Categoría 2: tiempo de detención  $2 < X < 5$  horas; 2
  - Categoría 1: tiempo de detención  $X < 2$  horas; 1
- Costo mantenimiento: se considera solo el costo de intervención; costo del repuesto de bodega, mano de obra propio o contratista, insumo fungibles, costo de energía aplicado a la intervención, honorarios de especialistas, amortización de equipos auxiliares o arriendo de equipos. Se considera cuatro categorías:
  - Categoría 4: costo sobre los 40.000.000 valor categoría: 20
  - Categoría 3: costo menor de 40.000.000 y mayor a 25.000.000 valor categoría: 10
  - Categoría 2: costo menor a 25.000.000 y mayor a 15.000.000 valor categoría: 5
  - Categoría 1: costo menor a 15.000.000 valor de categoría: 1

- Impacto en la seguridad de la faena: enfocado a evaluar daños a; personal, equipos y/o infraestructura, material y al medio ambiente. Se considera cuatro categorías:
  - Categoría 4: Daño al personal en cualquier nivel. Valor categoría: 40
  - Categoría 3: Daño al medio ambiente en cualquier nivel. Valor categoría: 32
  - Categoría 2: Daño al equipo o a infraestructura. Valor categoría: 24
  - Categoría 1: pérdida del material (o calidad de este) transportado. Valor categoría: 16
- Frecuencia de falla: se considera el número de fallas en un periodo determinado (anual). Se considera cuatro categorías:
  - Alta: más de 6 fallas al año. Valor categoría: 4
  - Media: entre 3 a 6 fallas al año. Valor categoría: 3
  - Baja: entre 1 a 3 fallas al año. Valor categoría: 2
  - Ideal: menor a una falla al año. Valor categoría: 1

#### Criterios de valorización de riesgo.

A continuación se entregan los criterios cualitativos y su valorización en la matriz de mantenimiento

| Criterio              | Descripción de la ocurrencia                                | Valor |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Frecuencia (F)</b> | Frecuencia de falla mayor a 6 evento en el año              | 4     |
|                       | Frecuencia de falla menor a 6 y mayor de 3 evento en el año | 3     |
|                       | Frecuencia de falla menor a 3 y mayor a 1 evento en el año  | 2     |
|                       | Frecuencia de falla de al menos 1 evento anual              | 1     |

Tabla 1.2: Criterios de frecuencias de fallas.

| Criterio     | Descripción Lesiones - Daños                                                                                                                                                                                                                | Valor          |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| CONSECUENCIA | Muerte de una o más personas.<br>Incapacidad permanente.<br>Daño material irreparable y extenso.<br>Pérdidas de producción que afectan a los resultados comprometidos.<br>Detención de las operaciones que afectan la imagen de la empresa. | ALTA<br>65-100 |
|              | Lesiones con incapacidad temporal de una o más personas.<br>Daño material reparable y parcial.<br>Pérdidas de producción que requieren planes especiales para recuperarla                                                                   | MEDIA<br>30-65 |
|              | Lesiones no incapacitantes.<br>Daño Material que no afecta al proceso productivo.<br>Pérdidas mínimas de producción.<br>Recuperables en períodos cortos de tiempo.                                                                          | BAJA<br>1-30   |

Tabla 1.3: Criterios de consecuencias de fallas.

Valor Cuantitativo de riesgo de la Matriz de Mantenimiento

|                     |   | Consecuencia |    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|---|--------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     |   | 10           | 20 | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |
| Frecuencia de Falla | 1 | 10           | 20 | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |
|                     | 2 | 20           | 40 | 60  | 80  | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
|                     | 3 | 30           | 60 | 90  | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 |
|                     | 4 | 40           | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |

Tabla 1.4: Valor Cuantitativo de Riesgo de Falla de la Matriz de Mantenimiento.

Valor cualitativo del riesgo de la Matriz de Mantenimiento

| Clasificación | MR = F x C     |
|---------------|----------------|
| INACEPTABLE   | 200 < MR ≤ 400 |
| TOLERABLE     | 140 < MR ≤ 200 |
| MODERADO      | 80 < MR ≤ 140  |
| ACEPTABLE     | 10 < MR ≤ 80   |

Tabla 1.5: Valor Cualitativo del Riesgo de Falla de la Matriz de Mantenimiento.

### 1.1.10 Modelo de reemplazo de Equipo

El modelo de reemplazo de equipo busca minimizar el costo global, para tal fin, se considera el siguiente modelo:

- Horizontes infinitos, tiempo discreto: El procedimiento que se basa en los supuestos más realistas y por ende más utilizados en la industria es el de tiempo discreto y horizonte infinitos. En él se busca determinar cada cuantos períodos de tiempo será óptimo reemplazar el equipo. El procedimiento utilizado consiste en comparar los costos medios por períodos actualizados, suponiendo distintos números de períodos. Conociendo el valor de dichos costos para cada uno de los posibles períodos de renovación se realiza una comparación, siendo el período óptimo el que arroje el menor costo medio por período. El procedimiento resulta muy simple si se construye la siguiente tabla:

| años | C(t)       | f(t) | C(t) f(t)  | $\Sigma C(t) * f(t)$ | Q(t)         | FRC   | Cme(t)     |
|------|------------|------|------------|----------------------|--------------|-------|------------|
| 1    | \$ 86.297  | 0,87 | \$ 75.040  | \$ 75.040            | \$ 485.040   | 1,150 | \$ 557.797 |
| 2    | \$ 71.822  | 0,76 | \$ 54.308  | \$ 129.348           | \$ 539.348   | 0,615 | \$ 331.762 |
| 3    | \$ 64.971  | 0,66 | \$ 42.719  | \$ 172.067           | \$ 582.067   | 0,438 | \$ 254.932 |
| 4    | \$ 65.742  | 0,57 | \$ 37.588  | \$ 209.656           | \$ 619.656   | 0,350 | \$ 217.044 |
| 5    | \$ 315.581 | 0,50 | \$ 156.899 | \$ 366.555           | \$ 776.555   | 0,298 | \$ 231.658 |
| 6    | \$ 90.154  | 0,43 | \$ 38.976  | \$ 405.531           | \$ 815.531   | 0,264 | \$ 215.493 |
| 7    | \$ 113.795 | 0,38 | \$ 42.780  | \$ 448.310           | \$ 858.310   | 0,240 | \$ 206.304 |
| 8    | \$ 145.058 | 0,33 | \$ 47.420  | \$ 495.730           | \$ 905.730   | 0,223 | \$ 201.842 |
| 9    | \$ 183.945 | 0,28 | \$ 52.289  | \$ 548.019           | \$ 958.019   | 0,210 | \$ 200.776 |
| 10   | \$ 230.454 | 0,25 | \$ 56.965  | \$ 604.983           | \$ 1.014.983 | 0,199 | \$ 202.238 |

Tabla 1.6: Costos medios por períodos actualizados.

Procedimiento para realizar la tabla:

- 1) Se indican los períodos y los costos anuales C(t) para cada uno de los períodos t
- 2) Se calcula el factor de actualización para cada uno de los períodos utilizando:  $f(t) = 1/(1+i)^t$
- 3) Se llevan los costos anuales a valor presente:  $C(t) * f(t)$
- 4) Se acumulan los valores presentes hasta el período determinado:

$$\sum_{i=0}^t c(t) * f(t)$$

- 5) Se calcula la inversión inicial con los valores presentes acumulados, obteniendo los costos totales actualizados  $Q(t)$ .
- 6) Se calcula FRC para cada uno de los períodos:

$$FRC(t) = \frac{i * (1 + i)^t}{((1 + i)^t - 1)}$$

- 7) Se calcula el costo medio periódico multiplicado FRC por los costos totales actualizados:

$$Q(t) * FRC(t)$$

Por último se calcula el valor del costo medio por período especificado en la primera columna.

#### 1.1.11 Gestión de repuesto centrada en costos y confiabilidad

A continuación se presentan los criterios para fijar de manera óptima; el tamaños de pedido, periodo entre pedidos, puntos de reaprovisionamiento. Primero se define los tamaños de pedidos y periodo entre pedidos sin consideración del costo de falla y posteriormente se toma en consideración el costo de falla.

##### 1.1.11.1 Minimización del costo global sin demora en pedido (sin costo de falla)

Se trata de un modelo determinista y depende de los siguientes parámetros:

- $\lambda$ , la demanda estimada por unidad de tiempo [u/ut] (puede ser constante o fluctuante dependiendo de la naturales de la falla)

$$\lambda(t) = \lambda$$

- q, número de ítems ordenados en cada orden de compra (variable de decisión)

- f, número de pedidos por unidad de tiempo (o frecuencia de los pedidos);

$$f = \frac{\lambda}{q}$$

- pu, precio unitario del ítem
- i, tasa de descuento aplicada al promedio de inventario por unidad de tiempo
- Cad, costo de adquisición (um/pedido)
- T, el periodo entre pedidos

$$T = \frac{q}{\lambda}$$

#### 1.1.11.2 Costo de adquisición

Este costo está en función del número de comprar a un mismo proveedor, y de la cantidad de ítems solicitado en cada pedido. Los costos de adquisición se pueden subdividir en:

- Compras (costo de realizar la compra)
- Manejo de repuestos
- Recepción, control de calidad
- Almacenamiento
- Contabilidad
- Pago de agentes

Se considera;  $\lambda = qf$

El costo de adquisición por unidad de tiempo es:

$$c_{ad}(t) = \frac{C_{ad}}{T} = C_{ad} \frac{\lambda}{q}$$

\*costo anual de adquisición por componente mayor del proceso de transporte es de \$46.058 USD

#### 1.1.11.3 Costo de almacenamiento

Este costo indica los retornos financieros de una posible reducción de capital en bodega. Está compuesto por:

- Intereses sobre el capital
- Costos de almacenamiento: espacio físico, seguros, considerados por unidad de tiempo y por valor unitario.

Se asume que el consumo es regular y que se repone inventario en tanto se acaba, entonces el promedio de unidades en bodega es

$$\frac{1}{2}q$$

El valor promedio es de:

$$\frac{1}{2}qp_u$$

El costo de almacenamiento por unidad de tiempo es

$$\frac{1}{2}qp_u i$$

#### 1.1.11.4 Costo global del mantenimiento

De lo anterior, el costo global por unidad de tiempo (sin considerar el costo de falla, porque nunca hay déficit en este modelo) es:

$$cg = \lambda p_u + \frac{\lambda}{q} C_{ad} + \frac{1}{2} qp_u i \text{ um/ut}$$

O por periodo T,

$$C_g(T) = Tc_g$$

$$C_g(T) = \frac{q}{\lambda} c_g$$

$$C_g(T) = C_{ad} + p_u q + \frac{1p_u i}{2\lambda} q^2$$

Solo se puede reducir los costos de adquisición y de almacenamiento.

$$\frac{dc_g}{dq} = 0$$

Entonces;

$$-\lambda \frac{C_{ad}}{q^2} + \frac{1}{2} p_u i = 0$$

Se utiliza la fórmula de Wilson:

$$q_{wi} = \sqrt{\frac{2\lambda C_{ad}}{p_u i}}$$

Y el periodo entre pedidos:

$$T_{wi} = \frac{q_{wi}}{\lambda}$$

#### 1.1.11.5 Minimización del costo global con costo de falla

Este modelo determinista establece el nivel de servicio  $\alpha$  y el tamaño del pedido  $q$ . el Cf el costo de falla incurrido por la falta de un ítem en bodega, por unidad de tiempo. Este costo está compuesta (grosso modo) de:

- Pérdidas de producción
- Costos asociados a las acciones tomadas para compensar la ausencia del ítem.

Sean  $T_{wi}$  y  $q_{wi}$  el intervalo entre pedidos y la cantidad de ítems calculados a través de la fórmula de Wilson. Dado el nivel de servicio  $\alpha$ , una demanda puede ser satisfecha durante un tiempo  $\alpha T$ . El ítem está indisponible por  $T_r = (1-\alpha)T$ . asumiremos que los ítems solicitados durante el intervalo  $T_r$  son consumidos (e instalados) tan pronto llegan, en el instante  $T$ . dado que hemos asumido una tasa de consumo constante e igual a:

$$\lambda = \frac{q}{T}$$

Ello significa que durante  $T_r$  se consumen  $\lambda T_r$ ; con lo que el inventario sube a  $\alpha q$  cuando el nuevo pedido llega. Ello implica que el promedio del nivel de inventario en el intervalo  $T$  es de:

$$\frac{1}{2}\alpha^2 q$$

El número de demandas no satisfechas es 0 en  $\alpha T$  y  $(1-\alpha)T$ , dando un promedio de ítems de déficit de:

$$\frac{1}{2}(1-\alpha)^2 q$$

Para el periodo  $T$ .

Si el costo resultante de no disponer del ítem es  $c_f$  (um/u/ut), se tiene un costo de falla por unidad de tiempo.

$$\frac{1}{2}(1-\alpha)^2 q c_f$$

Por lo que la ecuación del costo global por unidad de tiempo (3.7.1.3) es modificada:

$$c_g(\alpha, q) = \lambda p_u + \frac{\lambda}{q} C_{ad} + \frac{1}{2}\alpha^2 q p_u i + \frac{1}{2}(1-\alpha)^2 q c_f$$

Derivando con respecto a  $\alpha$  e igualando a 0;

$$\alpha p_u i - (1-\alpha)c_f = 0$$

Lo que resulta en:

$$\alpha^* = \frac{c_f}{c_f + p_u i}$$

Dado este valor de  $\alpha$ , el costo es una función del tamaño de lote  $q$ ; para encontrar el óptimo, diferenciamos con respecto a  $q$ :

$$-\lambda \frac{C_{ad}}{q^2} + \frac{1}{2}\alpha^{*2} p_u i + \frac{1}{2}(1-\alpha^*)^2 c_f = 0$$

Entonces;

$$q^{*2} = \frac{2\lambda C_{ad}}{\alpha^{*2} p_u i + \frac{1}{2}(1-\alpha^*)^2 c_f}$$

Simplificando y sustituyendo:

$$q^* = \sqrt{\frac{1}{\alpha^*} \frac{2\lambda C_{ad}}{p_u i}}$$

#### 1.1.12 Frecuencia optima de inspecciones e intervenciones

El propósito básico de una inspección es determinar el estado del equipo, conociendo los síntomas o los parámetros operacionales (temperatura, nivel de vibración, etc.) se puede tomar acciones preventivas, según la condición del equipo.

Como se menciona anteriormente, existe la estrategia de mantenimiento predictivo, que permite realizar una intervención preventiva justo antes que ocurra la falla (caso ideal). Por lo cual es necesaria la frecuencia óptima para realizar inspecciones.

A continuación se presenta dos modelos para obtener la frecuencia óptima de inspección:

- Frecuencia de inspección que minimice el costo global
- Frecuencia de inspección que aumente disponibilidad del equipo

##### 1.1.12.1 Frecuencia de inspección que minimice el costo global

El siguiente modelo busca establecer el programa de inspecciones que asegure que el costo global del equipo sea minimizado en el largo plazo.

Para tal objetivo se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los equipos fallan de tiempo en tiempo, y su reparación requiere de mano de obra y materiales ( $C_i$ )
- Durante la reparación, la producción es afectada ( $C_f$ )
- Para reducir el número de fallas se puede implementar un programa de inspecciones periódicas

- Las inspecciones tienen costos por materiales y mano de obra ( $C_i$ ) y por la detención del equipo en horario de producción ( $C_f$ )
- Se considera una tasa de fallas constante  $\lambda$ ,

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

- Tiempo para reparación con distribución exponencial con media

$$MTTR = \frac{1}{\mu}$$

- Se espera conocer la tasa de inspecciones:  $f$  inspecciones/unidad de tiempo. El tiempo requerido para realizar una inspección tiene distribución exponencial con media

$$MTTI = \frac{1}{i}$$

- El tiempo detenido del equipo representa una pérdida neta de  $cf$  [um/ut]
- El costo de intervención de una inspección es

$$C_{ii} = c_{ii} * MTTI$$

- El costo de intervención de la reparación es

$$C_{ir} = c_{ir} * MTTR$$

- La tasa de fallas  $\lambda$  es una función de  $f$ , la frecuencia de inspección (inspecciones/unidad de tiempo)

$$\lambda = \lambda(t)$$

\*El efecto de realizar inspecciones es incrementar el MTBF

- El objetivo es seleccionar la tasa de inspecciones  $f$  para minimizar el costo global esperado por unidad de tiempo  $C_g(f)$

El costo global de mantenimiento por unidad de tiempo  $C_g$  que se obtiene del equipo es una función del número de inspecciones:

$$C_g = C_g(f)$$

$$C_g = C_{f,c} + C_{f,i} + C_{i,c} + C_{i,i} \text{ um/ut}$$

El costo de falla  $C_{f,c}$  considera el costo de falla por unidad de tiempo por número de fallas por unidad de tiempo por tiempo medio para reparar:

$$C_{f,c} = C_f * \lambda * MTTR = C_f * \frac{\lambda}{\mu} \text{ um/ut}$$

\* Nótese que  $\lambda/\mu$  es la fracción de tiempo en que el equipo está siendo reparado.

El costo de falla asociado a las inspecciones mismas considera el costo de no producir, el número de inspecciones por unidad de tiempo y el tiempo medio para inspeccionar:

$$C_{f,i} = C_f \frac{f}{i}$$

El costo de intervención de las reparaciones por unidad de tiempo  $C_{i,c}$  considera el costo de la reparación no interrumpida por unidad de tiempo, el número de fallas por unidad de tiempo y el tiempo medio para realizar las reparaciones:

$$C_{i,c} \frac{\lambda}{\mu}$$

El costo de intervención de las inspecciones por unidad de tiempo considera el costo de las inspecciones no interrumpidas por unidad de tiempo, el número de inspecciones por unidad de tiempo y el tiempo medio para inspeccionar:

$$C_{i,i} \frac{f}{i}$$

Según lo anterior;

$$C_g(f) = C_f \frac{\lambda}{\mu} + C_f \frac{f}{i} + C_{i,r} \frac{\lambda}{\mu} + C_{i,i} \frac{f}{i}$$

\* En este modelo el equipo solo es intervenido de manera correctiva, no se considera explícitamente que de una inspección puede nacer una orden de trabajo preventiva (costo de intervención preventivo) y que por lo tanto el equipo será detenido (costo de falla preventivo). Ello implica que  $C_{i,i}$  es el valor esperado de la inspección y posible intervención preventiva y MTTF es el valor esperado de inspección y posible intervención preventiva (NdP).

\* Dado que el análisis es por unidad de tiempo, está implícito que el equipo opera en régimen estacionario. O sea, no hay estacionalidad en los costos de falla.

Para encontrar el mínimo basta con derivar con respecto a  $f$  e igualar a 0:

$$\frac{dC_g(f)}{df} = C_f \frac{\lambda'(f)}{\mu} + \frac{C_f}{i} + C_{i,r} \frac{\lambda'(f)}{\mu} + C_{i,i} \frac{1}{i} = 0$$

Donde

$$\lambda'(f) = \frac{d\lambda}{df}(f)$$

Y se llega a la condición general;

$$\lambda'(f) = -\frac{\mu}{i} \left( \frac{Cf + Ci,i}{Cf + Ci,r} \right)$$

Si la tasa de fallas varía inversamente con el número de inspecciones

$$\lambda(f) = \frac{k}{f}$$

Para algún valor k, se tiene que;

$$\lambda'(f) = -\frac{k}{f^2}$$

Sustituyendo y despejando:

$$f = \sqrt{k \frac{i}{u} \left( \frac{Cf + Ci,r}{Cf + Ci,i} \right)}$$

\* k puede ser interpretada como la tasa de fallas cuando se realiza una inspección por unidad de tiempo (f=1)

\* f no depende directamente de la duración de las tareas de inspección y reparación sino de la razón entre ellas; i/u

#### 1.1.12.2 Frecuencia de inspección que aumente disponibilidad del equipo

Este modelo se caracteriza por determinar la cantidad óptima de inspecciones que se le deben hacer a un componente, considerando su tasa de falla ( $\lambda$ ), para minimizar el tiempo total de indisponibilidad por unidad de tiempo para el elemento (TDT), provocado por las detenciones por inspección.

El tiempo TDT se explica de la siguiente manera:

$$TDT(n) = DTr + DTi$$

$$TDT(n) = \frac{\lambda(n)}{\mu} + \frac{n}{\theta}$$

Dónde:

- TDT: Tiempo total de indisponibilidad por unidad de tiempo para el elemento
- DTi: Tiempo de indisponibilidad por inspección del elemento
- DTr: Tiempo de indisponibilidad por reparación del elemento
- n: Frecuencia de inspección
- $\lambda(n)$ : Tasa de falla del elemento
- $\mu(n)$ : Tasa de reparación del elemento
- $1/\theta$ : Promedio de la distribución exponencial de los tiempos de inspección

Para optimizar y resolver la función TDT(n) es necesario estimar  $\lambda(n)$ , la que usualmente se define como:

$$\lambda(n) = f e^{-n}$$

El valor de f, es la tasa de falla para n=0. De esta manera, se minimiza la función TDT(n), obteniendo un valor para n, que es la frecuencia de inspecciones.

$$n^* = \ln\left(\frac{f\theta}{\mu}\right)$$

Este  $n^*$  indica la cantidad de intervenciones que se le debe realizar al elemento, para aplicar un mantenimiento preventivo y que minimizan el tiempo total de detención por unidad de tiempo.

## 1.2 Antecedentes Generales

A continuación se presentan los indicadores de las dos flotas de camiones (DC & AC), con el fin de obtener un visión global del desempeño de la flota y de sus componentes.

Se presenta los indicadores claves (A(i), MTBF, MTTR) de la flota de camión 830E-DC; como se puede observar en la figura 1.20; la disponibilidad a tenido una tendencia positiva en los últimos 5 años llegando a un valor promedio de 82,7%

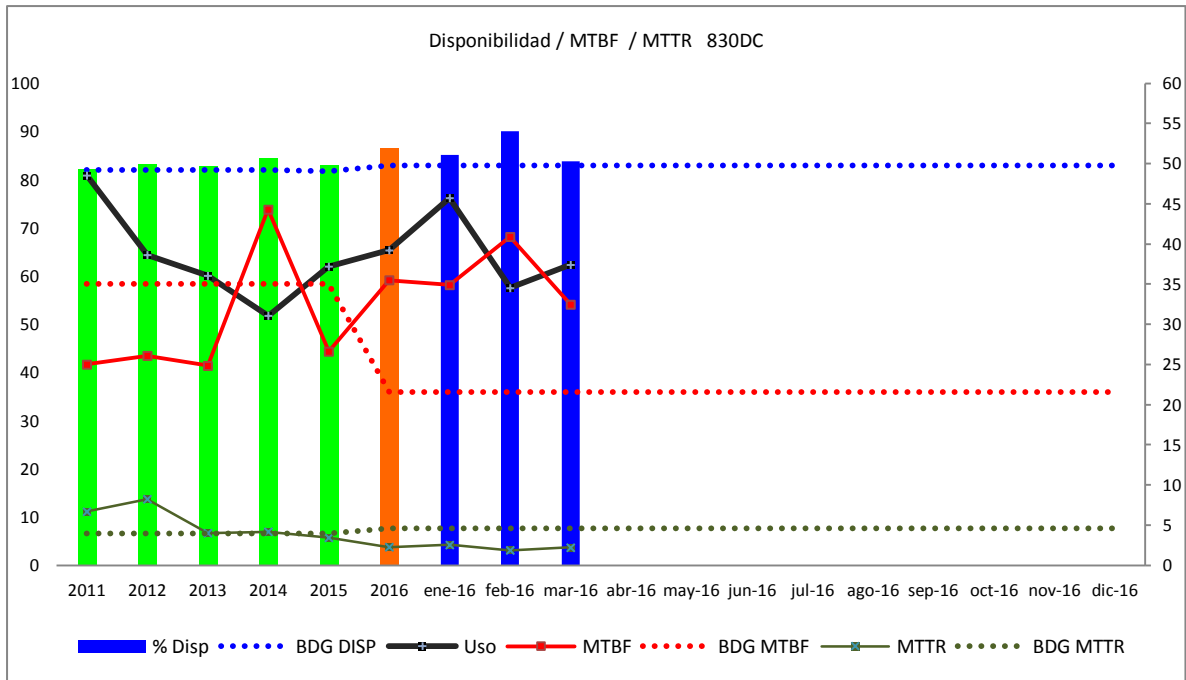


Figura 1.12: Disponibilidad Flota 830DC

En la figura 1.21, se presenta la fracción de los mantenimientos programados v/s los no programados, como se puede observar; casi se cumple con el ideal del 70-30.

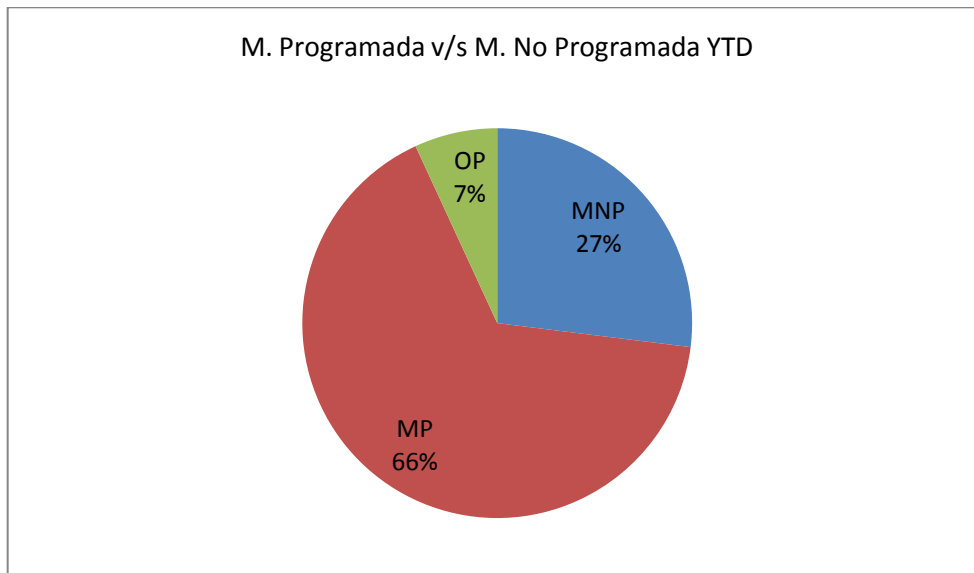


Figura 1.13: M programado v/s M no programado 2016

A continuación se presenta el diagrama de Pareto de la indisponibilidad acumulada (Figura 1.22), se observa que el mantenimiento preventivo del camión es el ítem con más impacto en la indisponibilidad seguido del mantenimiento preventivo de neumáticos.

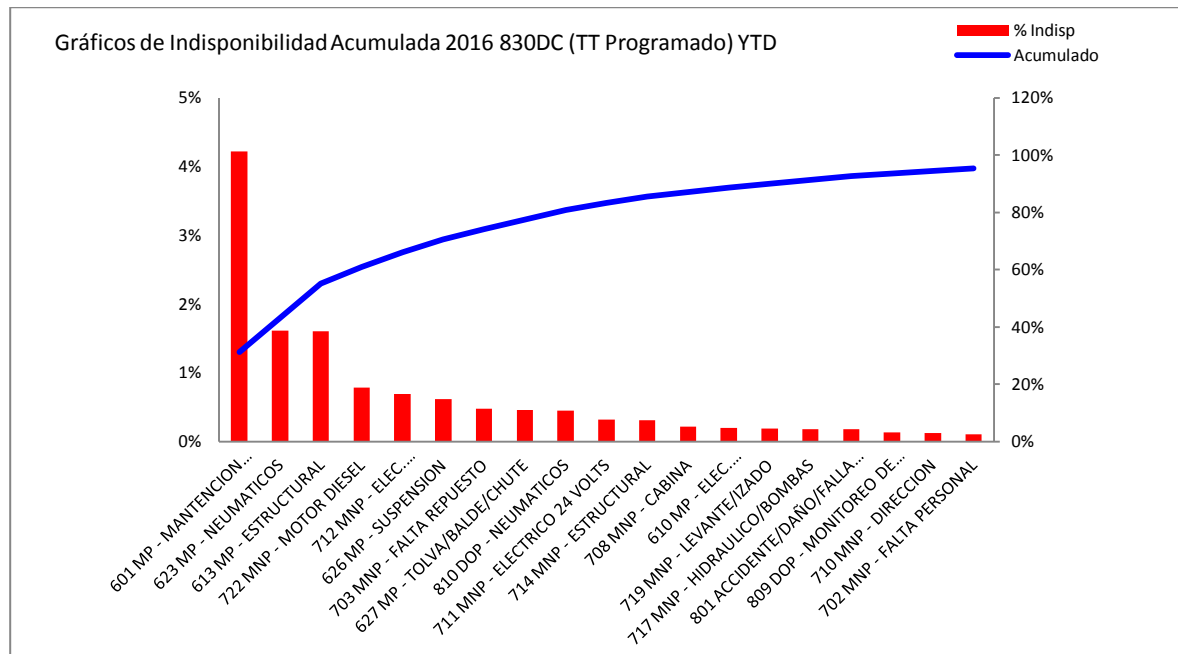


Figura 1.14: Gráfico de indisponibilidad acumulada 830E-DC

En la figura 1.23, se presentan los eventos no programados acumulados en la flota de camiones 830E-DC como se puede observar el sistema eléctrico de potencia tiene acumulado 92 eventos seguido por el motor Diesel con 61 eventos y en tercer lugar el sistema eléctrico de 24 [V] con 60 eventos.

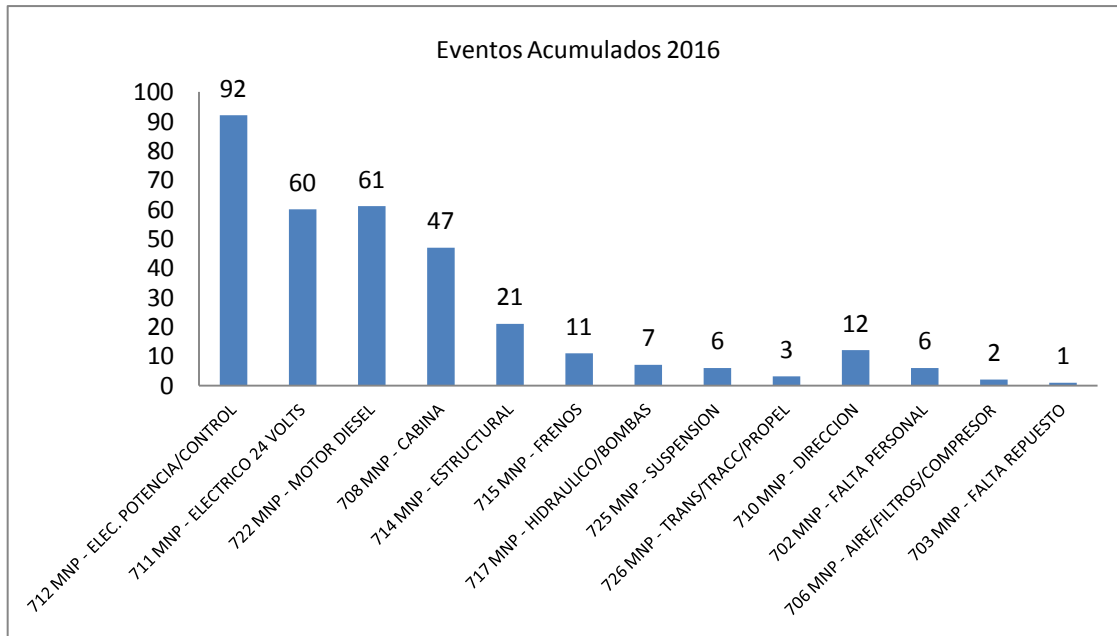


Figura 1.15: Eventos acumulados 2016 flota de camiones 830E-DC

En la figura 1.24 se observa el grafico de Pareto con la indisponibilidad No programa, se puede apreciar que el subsistema que más tiene ponderación en la indisponibilidad es el motor Diesel, siendo que no es el componente con más eventos, es el componente con mayor MTTR.

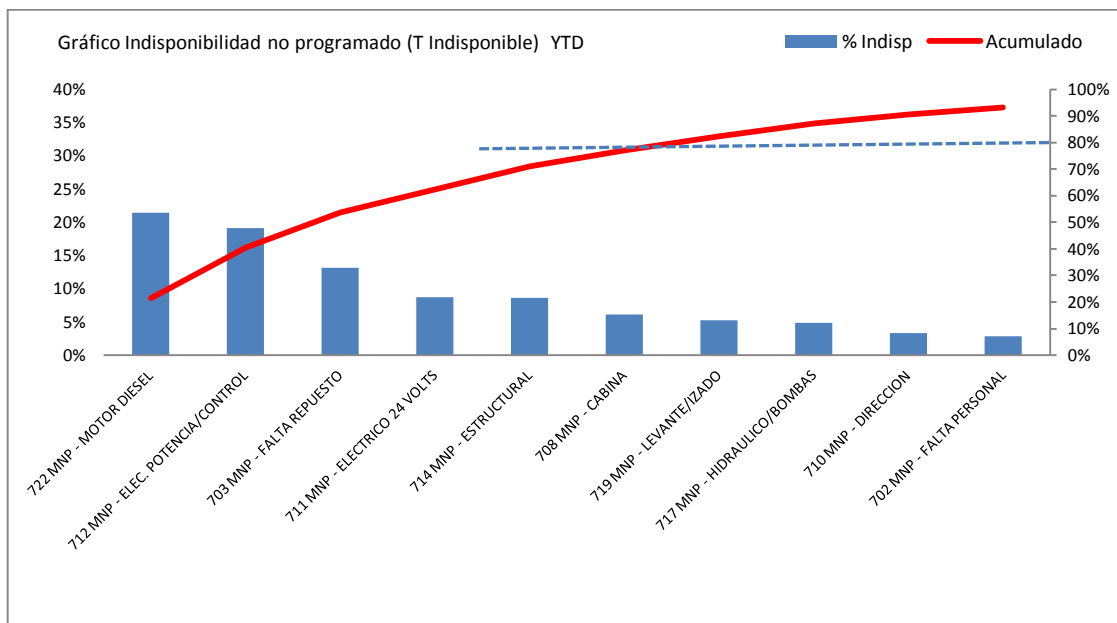


Figura 1.16: Gráfico indisponibilidad no programado flota 830E-DC.

Se presenta los indicadores claves (A(i), MTBF, MTTR) de la flota de camión 830E-AC; como se puede observar en la figura 1.25; la disponibilidad se ha mantenido constante en los últimos 5 años llegando a un valor promedio de 86,4%

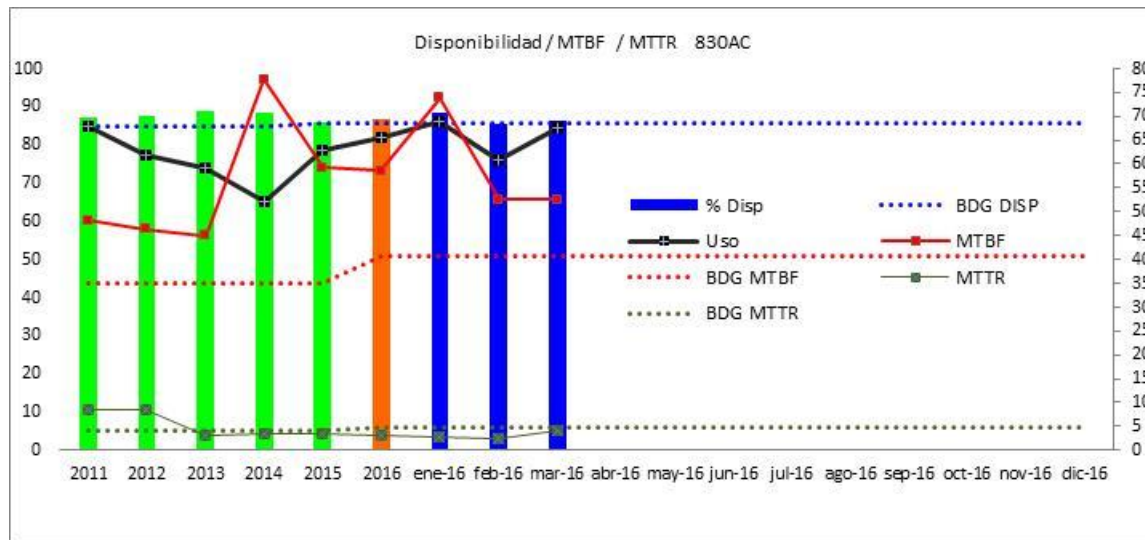


Figura 1.17: Disponibilidad flota 830E-AC.

En la figura 1.26, se presenta la fracción de los mantenimientos programados v/s los no programados, como se puede observar; que no se cumple con el ideal del 70-30, es más, la relación entre programado y no programado es casi 1:1, evidenciando el no control del proceso.

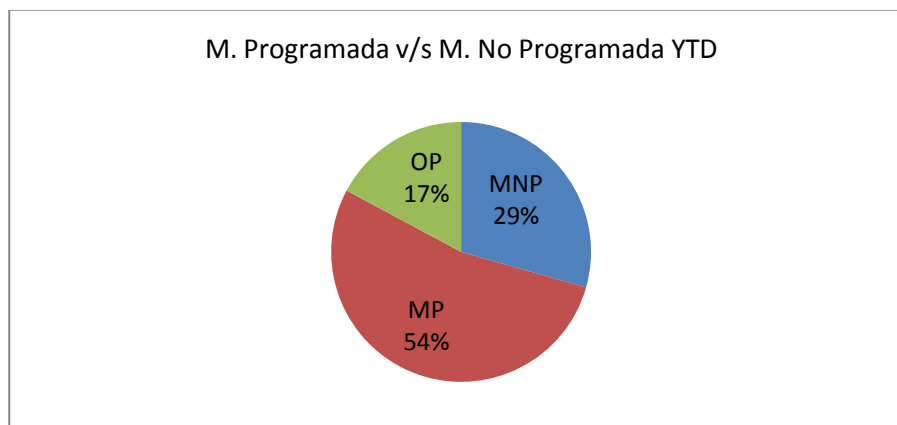


Figura 1.18: M programado v/s M no programado 2016

A continuación se presenta el diagrama de Pareto de la indisponibilidad acumulada (Figura 1.27), se observa que el mantenimiento preventivo del camión es el ítem con más impacto en la indisponibilidad seguido del mantenimiento preventivo de neumáticos al igual que en la flota 830E-DC.

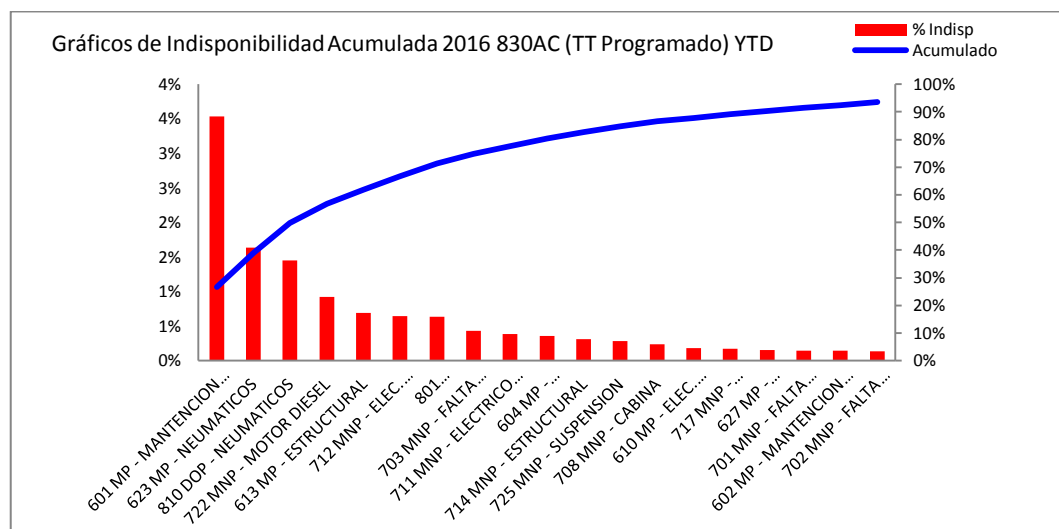


Figura 1.19: Gráfico de indisponibilidad acumulada 830E-AC

En la figura 1.28, se presentan los eventos no programados acumulados en la flota de camiones 830E-AC como se puede observar el motor Diesel tiene acumulado 91 eventos seguido por el sistema eléctrico de 24 [V] con 71 eventos y en tercer lugar el sistema eléctrico de potencia con 60 eventos.

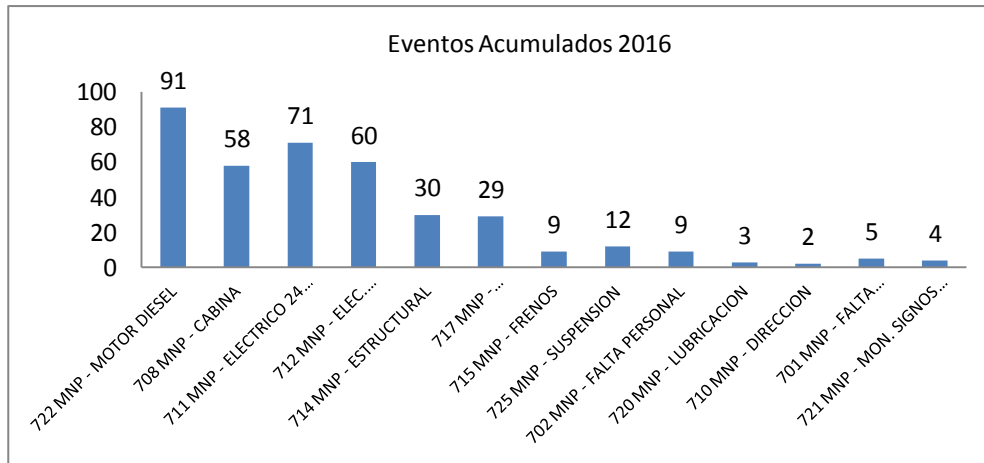


Figura 1.20: Eventos acumulados flota de camiones 830E-AC

En la figura 1.29 se observa el grafico de Pareto con la indisponibilidad No programa, se puede apreciar que el subsistema que más ponderación tiene en la indisponibilidad es el motor Diesel, esto se debe a que posee la mayor cantidad de eventos acumulado en el año además de su elevado MTTR.

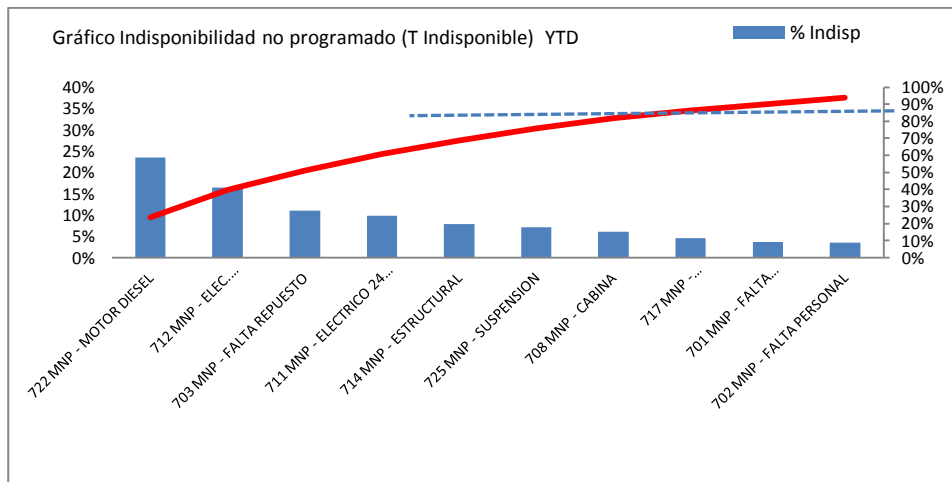


Figura 1.21: Grafico indisponibilidad No programa flota 830E-AC

### 1.3 Antecedentes Particulares

A continuación se presentan los antecedentes particulares de los motores utilizado en la flota de camiones de extracción mineros.

### 1.3.1 Historial de duración de los motores MTU S-4000

Se realiza un levantamiento del historial de cambio de los motores de la flota 830E-DC, observando 15 eventos:

| motores MTU |            |            |      |       |        |
|-------------|------------|------------|------|-------|--------|
| ítem        | Instalado  | retirado   | días | horas | O.T.   |
| 1           | 15-05-2006 | 05-01-2009 | 966  | 11587 | 219212 |
| 2           | 05-01-2009 | 26-05-2012 | 1237 | 14838 | 291054 |
| 3           | 15-06-2006 | 04-10-2011 | 1937 | 23235 |        |
| 4           | 05-10-2011 | 29-03-2012 | 176  | 2111  | 278284 |
| 5           | 02-08-2006 | 23-12-2011 | 1969 | 23619 |        |
| 6           | 05-10-2006 | 07-07-2012 | 2102 | 25214 |        |
| 7           | 21-10-2006 | 08-10-2012 | 2179 | 26138 |        |
| 8           | 21-11-2006 | 20-12-2012 | 2221 | 26641 |        |
| 9           | 31-12-2006 | 16-11-2012 | 2147 | 25754 |        |
| 10          | 20-01-2007 | 19-06-2013 | 2342 | 28093 |        |
| 11          | 20-06-2013 | 27-07-2013 | 37   | 444   | 315356 |
| 12          | 25-04-2008 | 21-08-2012 | 1579 | 18940 |        |
| 13          | 10-04-2007 | 16-03-2013 | 2167 | 25994 |        |
| 14          | 12-06-2007 | 20-11-2013 | 2353 | 28225 |        |
| 15          | 04-05-2010 | 04-11-2014 | 1645 | 19732 |        |

Tabla 1.7: Historial de duración motores MTU

Se observa que 4 motores duraron menos de 15.000 [hr] de uso (vida útil efectiva según fabricante), se revisa las O.T.'s:

| O.T.   | Comentarios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 219212 | sin data                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 291054 | Por horas de servicio y parámetros fuera de rango se debe cambiar módulo de potencia, Motor/ generador                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 278284 | falla de reparación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 315356 | Se revisa equipo en terreno fase # 3, detectando falla en generador defletado internamente, el generador presenta desprendimiento de material del rotor y estator, este generador fue reparado por A&T. Se toma la decisión de cambiar modulo con el objetivo de revisar volante y descanso axial de motor Diesel por el alto nivel de vibraciones provocado por el alternador principal. |

Tabla 1.8: Cometarios de o.t. con menor duración a los 15.000 [hr]

Se analiza los datos sin censura de los 4 motores con falla antes de los 15.000 [hr].

Tabla de frecuencia datos no censurados:

| Limite real inf | Limite real sup | Lim. aparente Inf | Lim. Aparente Sup | mi    | fi | fi/n | Fi | Fi/n |
|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|----|------|----|------|
| -0,5            | 5692,5          | 0                 | 5692              | 2846  | 2  | 13,3 | 2  | 13   |
| 5691,5          | 11384,5         | 5692              | 11384             | 8538  | 0  | 0,0  | 2  | 13   |
| 11383,5         | 17076,5         | 11384             | 17076             | 14230 | 2  | 13,3 | 4  | 27   |
| 17075,5         | 22768,5         | 17076             | 22768             | 19922 | 2  | 13,3 | 6  | 40   |
| 22767,5         | 28460,5         | 22768             | 28460             | 25614 | 9  | 60,0 | 15 | 100  |
|                 |                 |                   |                   |       | 15 |      |    |      |

Tabla 1.9: Tabla de frecuencia de datos no censurados

### 1.3.2 Historial de duración de los Motores Cummins QSK-60

Se realiza un levantamiento del historial de cambio de los motores de la flota 830E-AC, observando 20 eventos:

| Motores Cummins |            |            |      |       |        |
|-----------------|------------|------------|------|-------|--------|
| ítem            | Instalado  | retirado   | días | horas | O.T.   |
| 1               | 01-01-2008 | 19-08-2011 | 1326 | 20108 |        |
| 2               | 13-01-2008 | 23-12-2009 | 710  | 10767 | 352387 |
| 3               | 24-12-2009 | 20-01-2016 | 2218 | 33634 |        |
| 4               | 01-01-2007 | 14-09-2012 | 2083 | 31587 |        |
| 5               | 01-01-2009 | 06-01-2013 | 1466 | 22231 |        |
| 6               | 13-01-2010 | 30-03-2012 | 807  | 12238 | 288161 |
| 7               | 02-04-2012 | 04-05-2017 | 1858 | 28175 |        |
| 8               | 25-02-2010 | 06-12-2011 | 649  | 9842  | 283288 |
| 9               | 17-03-2010 | 13-11-2014 | 1702 | 25809 |        |
| 10              | 25-04-2010 | 28-06-2015 | 1890 | 28660 |        |
| 11              | 01-02-2011 | 20-01-2012 | 353  | 5353  | 283414 |
| 12              | 21-01-2012 | 26-11-2013 | 675  | 10236 | 323484 |
| 13              | 23-01-2011 | 24-10-2015 | 1735 | 26310 |        |
| 14              | 24-10-2015 | 09-02-2017 | 474  | 7188  | 401483 |
| 15              | 12-02-2011 | 23-04-2016 | 1897 | 28767 |        |
| 16              | 26-02-2011 | 26-01-2012 | 334  | 5065  | 283953 |
| 17              | 27-01-2012 | 01-08-2012 | 187  | 2836  | 294766 |
| 18              | 02-08-2012 | 27-05-2014 | 663  | 10054 | 333659 |
| 19              | 20-02-2011 | 25-10-2011 | 247  | 3746  | 279655 |
| 20              | 29-03-2012 | 17-08-2016 | 1602 | 24293 |        |

Tabla 1.10: Historial de duración motores QSK-60

Se observa que 10 motores que duraron menos de 15.000 [hr] de uso (vida útil efectiva según fabricante), se revisa las O.T. 's:

| O.T.   | Comentarios                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 352387 | sin datos                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 288161 | SE DEBE CAMBIAR MOTOR DIESEL POR FALLA EN INVESTIGACION, MOTOR E ENCUENTRA TRANCADO. SE DEBE CAMBIAR MODULO COMPLETO PREPARADO                                                                                                                                                                         |
| 283288 | Falla en la unidad 7L, se deberá evaluar daños para reparar Se repite falla efectuada con OT-282106 DEFINITIVO, SE REPARA MOTOR PARA TRASLADAR Y LUEGO SE RETIRA MODULO PARA CAMBIAR.                                                                                                                  |
| 283414 | Se debe revisar y evaluar motor para ver si es posible repararlo o cambiarlo, esta decisión deberá tomarla Cummins                                                                                                                                                                                     |
| 323484 | MOTOR PRESENTA TRASPASO DE AGUA AL CARTER POR ROTURA UNIDAD DE FUERZA 7R, EQUIPO QUEDA EN B-07 PARA SU REPARACION. PERSONAL CUMMINS EVALÚA MOTOR. 01-12-13 DEBIDO A LA INSPECCION DE LAS ULTIMAS INSPECCIONES DE LAS OTRAS UNIDADES QUE TIENEN SERIOS DEFECTOS QUE SE RESUELVE CAMBIAR EL MOTOR DIESEL |
| 401483 | MOTOR DIESEL UNIDAD DE FUERZA Quebrado Inspección Falla de motor diésel block quebrado                                                                                                                                                                                                                 |
| 283953 | Falla en la unidad 7L, se deberá evaluar daños para reparar                                                                                                                                                                                                                                            |
| 294766 | MOTOR DIESEL // SE DESMONTA CULATA 4R LADO DERECHO // PISTON PERFORADO corte de válvula y pistón perforado unidad de fuerza 4R                                                                                                                                                                         |
| 333659 | Se debe chequear motor diésel por aumento de gases en Carter POR PLANIFICACION SE DECIDE CAMBIAR MOTOR DIESEL YA QUE SE ENCUENTRAN CUATRO UNIDADES MALAS                                                                                                                                               |
| 279655 | Por falla catastrófica del motor diésel (fundido), la causa se encuentra en investigación se debe cambiar modulo completo volviendo a instalar el modulo del motor QSK60 (cummins)                                                                                                                     |

Tabla 1.11: Comentarios de o.t. con menor duración a los 15.000 [h]

\* Según O.T. 401483: no se hace efectiva la garantía por tener índice de sílice alto en aceite de motor.

### 1.3.3 Costos de los Motores

A continuación se presenta los costos de operación de los motores, basado en el método del LCC.

#### 1.3.3.1 Consumo de combustible

Se realiza un levantamiento del consumo de combustible por flota de motores;

En resumen por camión:

| Equipo   | Consumo [l] | horas | Consumo específico [l/hr] |
|----------|-------------|-------|---------------------------|
| CAM83008 | 39524       | 370   | 106,8                     |
| CAM83009 | 36228       | 365   | 99,2                      |
| CAM83010 | 35660       | 354   | 100,8                     |
| CAM83011 | 38454       | 357   | 107,8                     |
| CAM83012 | 28122       | 291   | 96,8                      |
| CAM83013 | 37191       | 362   | 102,8                     |
| CAM83014 | 29663       | 311   | 95,5                      |
| CAM83015 | 37051       | 368   | 100,7                     |
| CAM83016 | 34865       | 342   | 101,9                     |
| CAM83017 | 37819       | 372   | 101,7                     |
| CAM83018 | 35610       | 351   | 101,4                     |
| CAM83019 | 30206       | 294   | 102,8                     |
| CAM83020 | 32262       | 318   | 101,3                     |
| CAM83021 | 28733       | 256   | 112,2                     |
| CAM83022 | 61261       | 451   | 135,7                     |
| CAM83023 | 61290       | 457   | 134,2                     |
| CAM83024 | 59027       | 438   | 134,7                     |
| CAM83025 | 62752       | 453   | 138,5                     |
| CAM83026 | 63600       | 460   | 138,3                     |
| CAM83027 | 59700       | 445   | 134,2                     |
| CAM83028 | 69118       | 458   | 151,0                     |
| CAM83029 | 53398       | 432   | 123,6                     |
| CAM83030 | 59072       | 442   | 133,7                     |
| CAM83031 | 63843       | 471   | 135,6                     |
| CAM83032 | 62611       | 461   | 135,9                     |
| CAM83033 | 61335       | 456   | 134,4                     |
| CAM83034 | 58995       | 448   | 131,7                     |
| CAM83035 | 62827       | 470   | 133,6                     |
| CAM83036 | 60585       | 445   | 136,3                     |
| CAM83037 | 66429       | 481   | 138,2                     |

Tabla 1.12: Consumo de combustible flota de camiones

Resumen por flota de motores:

| consumo promedio por motor [l/hr] |       |
|-----------------------------------|-------|
| S4000                             | 102,2 |
| QK60                              | 135,6 |

Tabla 1.13: Consumo promedio por motor

### 1.3.3.2 Valores equipo nuevo y costo de reparación mayor

Como recomendación del fabricante, solo se realiza una reparación mayor del motor (overhaul) en la vida del motor, después de este mantenimiento mayor, el equipo vuelve a cero su horometro, teniendo la misma confiabilidad que un motor nuevo, bajo esta primicia se realiza un levantamiento de las últimas reparaciones mayores realizadas a los motores:

| DESCRIPCIÓN COMPONENTE       | PROVEEDOR     | COSTO MANO OBRA REPARACIÓN | COSTO REPUESTO | COSTO TOTAL REPARACIÓN |
|------------------------------|---------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 24.156.431              | \$ 196.895.168 | \$ 221.051.599         |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 19.316.407              | \$ 155.407.447 | \$ 174.723.854         |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 24.498.520              | \$ 0           | \$ 24.498.520          |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 19.665.911              | \$ 132.853.044 | \$ 152.518.955         |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 21.780.036              | \$ 154.065.521 | \$ 175.845.557         |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 21.857.302              | \$ 171.137.619 | \$ 192.994.921         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 19.070.500              | \$ 179.698.456 | \$ 198.768.956         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 27.355.618              | \$ 196.985.952 | \$ 224.341.570         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 38.164.597              | \$ 195.556.781 | \$ 233.721.378         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 31.041.770              | \$ 186.123.672 | \$ 217.165.442         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 194.193.264             | \$ 0           | \$ 194.193.264         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 45.100.188              | \$ 157.484.907 | \$ 202.585.095         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 38.342.545              | \$ 123.639.538 | \$ 161.982.083         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 17.092.725              | \$ 180.742.040 | \$ 197.834.765         |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 29.038.664              | \$ 49.888.351  | \$ 78.927.015          |

Tabla 1.14: Costo de reparaciones de motor

\* Nota: La política actual de reemplazo de equipo de Angloamerican, limita la reparación mayor de un componente al costo de dicha reparación, si la reparación tiene un valor igual o mayor al 60% del valor del activo nuevo.

En Resumen:

| VALORES PROMEDIOS            |               |                                  |                      |                              |
|------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------|------------------------------|
| DESCRIPCIÓN COMPONENTE       | PROVEEDOR     | COSTO MANO OBRA REPARACIÓN [USD] | COSTO REPUESTO [USD] | COSTO TOTAL REPARACIÓN [USD] |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 36.465                        | \$225.100            | \$ 261.565                   |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 81.370                        | \$ 235.207           | \$ 316.578                   |

Tabla 1.15: Costo de reparación promedio de motor

\*costos en CLP

Costo de equipos nuevos:

| MOTOR            | VALOR NUEVO (USD) |
|------------------|-------------------|
| QSK60 SS TIER II | \$ 490.000        |
| MTU 16V / S4000  | \$ 410.000        |

Tabla 1.16: Costo de equipo nuevos

#### 1.3.4 Mantenimiento actual de los motores Diesel

El plan de mantenimiento actual se basa principalmente en mantenimiento preventivo a edad constante, basado en planes genéricos y en recomendaciones del fabricante, no están definidos los TBO de los componentes críticos, estos se cambian a la falla.

Además de lo anterior, se aplica mantenimiento predictivo, específicamente en:

- Mediciones del juego axial del motor, proyectando la vida residual por medio de la proyección del desgaste.
- Análisis del aceite de lubricación, midiendo la composición y la cantidad de particulado, proyectando el tiempo (según la tendencia) en alcanzar los límites

- condensatorios, estos límites condensatorios se definen en bases a las especificaciones del fabricante, que a su vez es base en los códigos de limpieza ISO.
- Sistema electrónico de falla, el motor posee un módulo electrónico de diagnóstico, el cual arroja los códigos de falla presente del motor.

Tareas preventivas:

|              |                                                                             | Frecuencia horas |    |     |     |     |      |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-----|-----|-----|------|
|              |                                                                             | diaria           | 50 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
| PRE-TRABAJOS | Tarea                                                                       |                  |    |     |     |     |      |
|              | REPORTE DEL OPERADOR                                                        | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | LAVADO DE MOTOR                                                             |                  |    | X   | X   | X   | X    |
| IMPECCIONES  | NIVEL DE ACEITE CARTER                                                      | X                | X  |     |     |     |      |
|              | NIVEL DE REFRIGERANTE                                                       | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | MANGUERAS, CORREAS Y ABRAZADERAS                                            | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | FUGAS DE REFRIGERANTE, ACEITE, COMBUSTIBLE, AIRE ADMISION Y GASES DE ESCAPE | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | HARNESES Y CONECTORES                                                       | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | EVALUAR ESTADO DE PERNOS DE CATRIDGE A CARACOLA DE ESCAPE                   |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|              | CONDICIÓN RODILLO TENSOR CORREA VENTILADOR                                  |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | DUCTOS, GOMAS Y TENSORES DE ADMISION ( O.E.M. )                             | X                |    | X   | X   | X   | X    |
|              | SISTEMA DE PROTECCION DEL MOTOR (ALARMAS)                                   | X                |    | X   | X   | X   | X    |
|              | EVALUAR PERNOS DE FIJACION DE LOS ESCAPES                                   |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|              | BELLOWS Y ABRAZADERAS DE ESCAPE                                             | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | CONDICIÓN Y TENSIÓN CORREA VENTILADOR                                       |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | CONDICIÓN Y TENSIÓN CORREA ALTERNADOR                                       |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | RUIDOS ANORMALES                                                            | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|              | FILTROS DE ACEITE                                                           |                  | X  |     |     |     |      |
|              | EVALUAR ESTADO DE LOS RESTRICTORES DE LOS FILTROS DE AIRE                   |                  |    | X   | X   | X   | X    |

Tabla 1.17: Tareas preventivas

|                              |                                                                                                     | Frecuencia horas |    |     |     |     |      |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-----|-----|-----|------|
| Tarea                        |                                                                                                     | diaria           | 50 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
| MEDICIONES                   | MEDIR CONCENTRACION DEL LIQUIDO REFRIGERANTE (DCA)                                                  |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | SISTEMA PRELUB ( REALIZAR MOMITOREO DE RPM V/E PRISION DE ACEITE)                                   | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|                              | RESTRICCION FILTROS DE AIRE ( MAXIMO 12" H <sub>2</sub> O )                                         | X                | X  | X   | X   | X   | X    |
|                              | REALIZAR PRUEBA POTENCIA (EVALUAR CONDICION DE MOTOR)                                               |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|                              | OBTENCION Y EVALUACION DE IMAGEN MOTOR (CENSE)                                                      |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|                              | TOMAR MUESTRA DE ACEITE PARA ANALISIS                                                               |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
| EJECUCIONES                  | ENGRASE SOPORTE DELANTERO MOTOR                                                                     |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | LIMPIEZA DE COLECTORES DE POLVO                                                                     |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | APRIETE DE PERNOS EN GENERAL Y REPOSICIÓN                                                           |                  |    |     |     |     | X    |
|                              | TORQUE PERNOS DE SOPORTE DE FAN A BLOCK                                                             |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|                              | TORQUE PERNOS SOPORTE VENTILADOR A FAN                                                              |                  | X  | X   | X   | X   | X    |
|                              | DRENAR FILTROS DE COMBUSTIBLE                                                                       | X                |    |     |     |     |      |
|                              | DRENAR ESTANQUES DE COMBUSTIBLE ( O.E.M. )                                                          | X                |    |     |     |     |      |
| CAMBIOS DE FILTROS Y ACEITES | FILTRO DE COMBUSTIBLE                                                                               |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | FILTRO DE REFRIGERANTE                                                                              |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | FILTROS DE ACEITE                                                                                   |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | CAMBIO DE ACEITE MOTOR                                                                              |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | CAMBIO FILTROS DE AIRE PRIMARIO                                                                     |                  |    | X   | X   | X   | X    |
|                              | CAMBIO FILTROS DE AIRE SECUNDARIO                                                                   |                  |    |     |     |     | X    |
| TEST DE SENSORES Y ALARMAS   | SOLO CONTACTO, CONECTOR DEL SENSOR ABIERTO                                                          |                  |    |     |     |     |      |
|                              | TEMPOCUPLA; ANOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN              |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | PRE FILTRO; ANOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN              |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | POST FILTRO; ANOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN             |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | PRESIÓN DEL TURBO DI; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN     |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | NIVEL DE DE REFRIGERANTE; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | NIVEL DE ACEITE; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN          |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | SENSOR DE BLOWBY; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN         |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | MOTOR CORRIENDO Y CONECTOR DEL SENSOR ABIERTO                                                       |                  |    |     |     |     |      |
|                              | TEMPOCUPLA; ANOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN              |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | PRE FILTRO; ANOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN              |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | POST FILTRO; ANOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN             |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | PRESIÓN DEL TURBO DI; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN     |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | NIVEL DE DE REFRIGERANTE; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | NIVEL DE ACEITE; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN          |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | SENSOR DE BLOWBY; NOTE; CODIGO PRESENTE EN PROLINK, CODIGO EN CABINA Y TIEMPO DE ACTIVACIÓN         |                  |    |     | X   |     | X    |
|                              | MOTOR CORRIENDO Y CONECTOR DEL SENSOR ABIERTO                                                       |                  |    |     | X   |     | X    |

Tabla 1.18: Tareas preventivas (Continuación)

### 1.3.5 Descripción del motor Diesel MTU S4000

El motor MTU 16V S4000, es una relación de estrategia tecnológica de dos grandes marcas, DDC (Detroit diesel corporation) y MTU (motoren and turbinen union), para satisfacer una gama de motores que tenían que estar entre los 2000 y 3000 [HP].



Figura 1.22: Motor Diesel MTU 16V S4000

La tecnología utilizada es un ciclo de cuatro tiempos, controlado electrónicamente por el sistema DDEC IV y un avanzado sistema de combustible common rail.

En el mercado nacional su mayor aplicación es en la minería, la mayor cantidad de motores están instalados en los camiones Komatsu 830E.

## Datos generales

|   | ESPECIFICACIONES       | VALORES            |
|---|------------------------|--------------------|
| 1 | POTENCIA NETA          | 2500 BHP           |
| 2 | VELOCIDAD MÁXIMA       | 1900 RPM           |
| 3 | NUMERO DE CILINDROS    | 16                 |
| 4 | DESPLAZAMIENTO TOTAL   | 3967 in3 -<br>65 l |
| 5 | RELACIÓN DE COMPRESIÓN | 14:1               |
| 6 | COMBUSTIBLE            | DIESEL             |

Tabla 1.19: Datos Generales

## Configuración del motor

|    | ESPECIFICACIONES                  | VALORES      |
|----|-----------------------------------|--------------|
| 1  | DIÁMETRO DEL CILINDRO             | 165 [mm]     |
| 2  | CARRERA DEL PISTÓN                | 190 [mm]     |
| 3  | CICLO DE FUNCIONAMIENTO           | 4 TIEMPO     |
| 4  | ANGULO DE BANCADAS                | 90°          |
| 5  | VÁLVULAS DE ADMISIÓN POR CILINDRO | 2            |
| 6  | VÁLVULAS DE ESCAPE POR CILINDRO   | 2            |
| 7  | TIPO DE INYECCIÓN                 | DIRECTA      |
| 8  | SOBREALIMENTACIÓN                 | 4 TURBOS     |
| 9  | SISTEMA DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA  | COMMON RAIL  |
| 10 | SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO    | DDEC. IV     |
| 11 | LARGO                             | 3008 [mm]    |
| 12 | ANCHO                             | 1588 [mm]    |
| 13 | ALTO                              | 1735 [mm]    |
| 14 | PESO                              | 7083 [kg]    |
| 15 | CONSUMO ESPECIFICO A 1600 RPM     | 139 gr/cv*hr |

Tabla 1.20: Configuración del motor

## Curvas del motor MTU 16V S4000

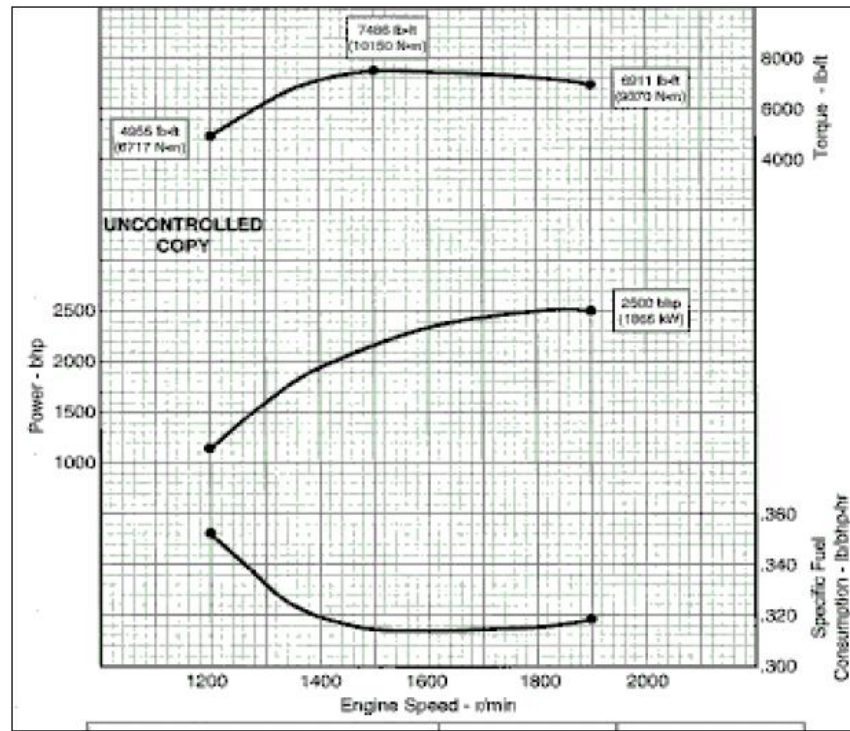


Figura 1.23: Curva de motor MTU 16V S4000

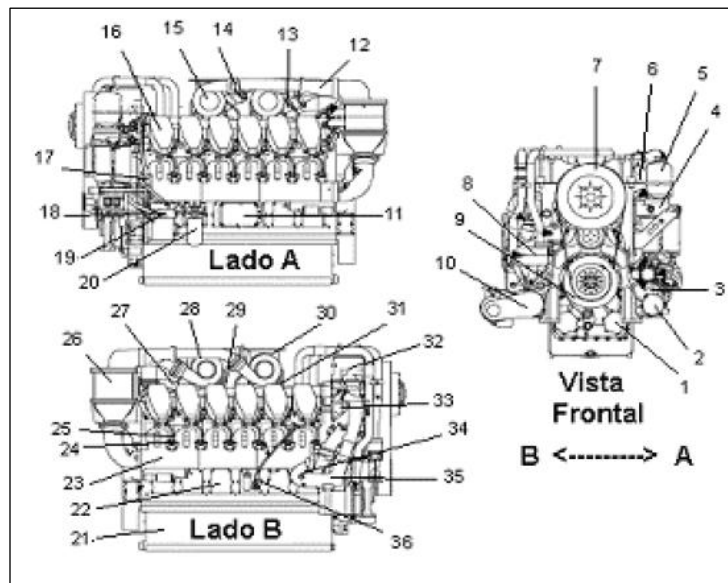
De la figura 3.2, se puede apreciar que el máximo torque generado por el motor es a 1500 [rpm] con un valor de 7486 [lb\*ft], en el que desarrolla una potencia de 2150 [bhp] con un consumo específico de combustible de 0,314 [lb/bhp\*hr]. Además se aprecia que la máxima potencia generada por el motor (2500 [bhp]) se produce a las 1900 [rpm], produciendo un torque de 6911 [lb\*ft] con un consumo específico de combustible de 0,318 [lb/bhp\*hr]. También se puede apreciar que la curva de torque tiene un comportamiento casi lineal en los rangos de funcionamiento de 1500 [rpm] hasta las 1900 [rpm].

## Parámetros de funcionamiento del motor

|    | NOMENCLATURAS   | PARÁMETROS               | CHAPA | RALENTÍ   | VACÍO    | POTENCIA      |
|----|-----------------|--------------------------|-------|-----------|----------|---------------|
| 1  | ENGINE RPM      | RPM MOTOR                | 0     | 600       | 1920     | 1900          |
| 2  | PULSEWIDTH      | ANCHO DEL PULSO          | 0     | 0,1       | 1,4      | 4,9           |
| 3  | R1 PW           | ANCHO DEL PULSO          | 0     | 0,1       | 1,4      | 4,9           |
| 4  | BOOST PSI       | PRESIÓN DE TURBO         | 0     | 0         | 2,3      | 24 A 26       |
| 5  | R1 BOOST PSI    | PRESIÓN DE TURBO         | 0     | 0         | 2,3      | 24 A 26       |
| 6  | ENG LOAD PCT    | % DE CARGA               | 0%    | 10%       | 7%       | 100%          |
| 7  | TORQUE (LB-FT)  | TORQUE MOTOR             | 0     | 289       | 540      | 6905          |
| 8  | VSG SET RPM     | RPM REQUERIDAS           | 900   | 600       | 1910     | 1910          |
| 9  | R1 OIL TEMP     | TEMPERATURA ACEITE       | 146 F | 165 F     | 162 F    | 175 F A 185 F |
| 10 | COOLANT TEMP    | TEMPERATURA REFRIGERANTE | 143 F | 165 F     | 153 F    | 175 F A 185 F |
| 11 | FUEL TEMP       | TEMPERATURA COMBUSTIBLE  | 67 F  | 70 F      | 77 F     | 90 F          |
| 12 | AMB. AIR TEMP   | T° AIRE AMBIENTE         | 75 F  | 87 F      | 90 F     | 78 F          |
| 13 | AIR INLET TEMP  | T° AIRE ADMISIÓN         | 73 F  | 86 F      | 89 F     | 113 F         |
| 14 | R1 INLET TEMP   | T° AIRE ADMISIÓN         | 74 F  | 86 F      | 88 F     | 113 F         |
| 15 | INTERCOOL TEMP  | T° INTERCOOLER           | 74 F  | 90 F      | 92 F     | 139 F         |
| 16 | OIL PRS PSI     | PRESIÓN DE ACEITE        | 0     | 30 A 40   | 90       | 80            |
| 17 | FUEL PRS PSI    | PRESIÓN DE COMBUSTIBLE   | 1     | 75 A 85   | 90 A 100 | 90 A 100      |
| 18 | AIR INLET PSI   | PRESIÓN AIRE Y ADM.      | 10,2  | 8,5       | 11       | 31,5          |
| 19 | R1 INLET PSI    | PRESIÓN AIRE Y ADM.      | 10,5  | 8,5       | 11       | 31,5          |
| 20 | BARO PRS PSI    | PRESIÓN BAROMÉTRICA      | 10,2  | 8,5       | 11       | 9,7           |
| 21 | BARO PSI        | PRESIÓN BAROMÉTRICA      | 10,4  | 8,5       | 11       | 9,7           |
| 22 | CRNKCE "H2O     | PRESIÓN DE CARTER        | -0,3  | -0,1      | 0,1      | 4 (MAX 13,12) |
| 23 | COOLANT PRS PSI | PRESIÓN DE REFRIGERANTE  | 11,6  | 20        | 31,9     | 31,9          |
| 24 | R1 COOL PSI     | PRESIÓN DE REFRIGERANTE  | 11,5  | 19,5      | 31,9     | 31,9          |
| 25 | COOL LEVEL      | NIVEL DE REFRIGERANTE    | FULL  | FULL      | FULL     | FULL          |
| 26 | INJEC PRS KSI   | PRESIÓN DE INYECCIÓN     | 0     | 6 A 8     | 8 A 9    | 12,7          |
| 27 | INT PUMP USAGE  | % USO DE BOMBA           | 100%  | 20% A 30% | 30%      | 60%           |
| 28 | ECM VOLTS       | VOLTAJE ECM MASTER       | 24,5  | 27,5      | 27,5     | 27,5          |
| 29 | R1 ECM VOLT     | VOLTAJE ECM RECEIVER     | 24,5  | 27,5      | 27,5     | 27,5          |
| 30 | SRS RECEIVED    | SEÑAL SRS                | NO    | YES       | YES      | YES           |
| 31 | R1 SRS RECEIVED | SEÑAL SRS                | NO    | YES       | YES      | YES           |
| 32 | ADLE SPD RPM    | RPM PROGRAMAS            | 900   | 600       | 1910     | 1910          |
| 33 | ENG GOVR        | SEÑAL GOBERNADOR         | NONE  | IDLE      | VSG      | NONE          |
| 34 | HALF ENGINE     | SEÑAL ECONOMIZADOR       | NO    | YES       | YES      | NONE          |
| 35 | FUEL RATE GNP   | CONSUMO COMBUSTIBLE      | 0     | 1,2       | 19,5     | 116,6         |
| 36 | PWM # 2         | % USO VENTILADOR (FAN)   | 80%   | 80%       | 80%      | 80%           |
| 37 | PWM # 3         | % USO DE LA BOMBA        | 4%    | 18%       | 18 A 20% | 14%           |

Tabla 1.21: Parámetros de funcionamiento del motor

### 1.3.5.1 Componentes mecánicos del motor



Enumeración de los componentes

|    |                                     |    |                                                 |
|----|-------------------------------------|----|-------------------------------------------------|
| 1  | MANDO DEL COMPRESOR                 | 19 | BOMBA DE TRANSFERENCIA                          |
| 2  | BOMBA DE ALTA                       | 20 | CABEZAL DE COMBUSTIBLE                          |
| 3  | VÁLVULA MODULADORA                  | 21 | CARTER DE ACEITE                                |
| 4  | CABEZAL DE ACEITE                   | 22 | TAPA DE INSPECCIÓN                              |
| 5  | FILTRO CENTRIFUGO                   | 23 | MÚLTIPLE DE ADMISIÓN                            |
| 6  | VÁLVULA DEL ROCKFORD                | 24 | CAÑERÍA DE ALTA PRESIÓN DE COMB.                |
| 7  | ROCKFORD                            | 25 | CAÑERÍA DE RETORNO DE COMB.                     |
| 8  | CAJA DE THERMOSTATOS DE BAJA        | 26 | INTERCOOLER                                     |
| 9  | DAMPER                              | 27 | MÚLTIPLE DE REFRIGERANTE                        |
| 10 | MANDO DEL ALTERNADOR                | 28 | TUBO DE DESCARGA DE TURBO                       |
| 11 | MODULO DE CONTROL ELECTRÓNICO (ECM) | 29 | TUBO DE ESCAPE                                  |
| 12 | ADAPTADOR DE INTERCOOLER            | 30 | Y DE ESCAPE                                     |
| 13 | BRACKET                             | 31 | MÚLTIPLE DE ESCAPE                              |
| 14 | GOMA DESCARGA DE TURBO              | 32 | ENFRIADOR DE ACEITE                             |
| 15 | TURBO                               | 33 | CAJA DE THERMOSTATOS DE ALTA                    |
| 16 | TAPA DE VÁLVULAS                    | 34 | BOMBA SECUNDARIA DE REFRIGERANTE                |
| 17 | GALERÍA DEL COMMON RAIL             | 35 | BOMBA PRINCIPAL DE REFRIGERANTE                 |
| 18 | COMPRESOR                           | 36 | VARILLA DE NIVEL Y TAPA DE REPOSICIÓN DE ACEITE |

Tabla 1.22: Enumeración de los componentes

### 1.3.5.2 Descripción ubicación de los componentes

A continuación se dará a conocer la ubicación de los componentes más relevantes del motor y una breve descripción de la función del componente.

Mando del compresor de aire acondicionado



Figura 1.25: Mando del compresor de aire acondicionado

Ubicación: Este mando se encuentra ubicado en la carcasa delantera del motor en el lado A del motor, debajo de la bomba de combustible de alta.

Función: Tiene que transmitir el giro de los engranajes del motor hacia el compresor de aire acondicionado del equipo, por medio de una correa.

Bomba de alta presión de combustible

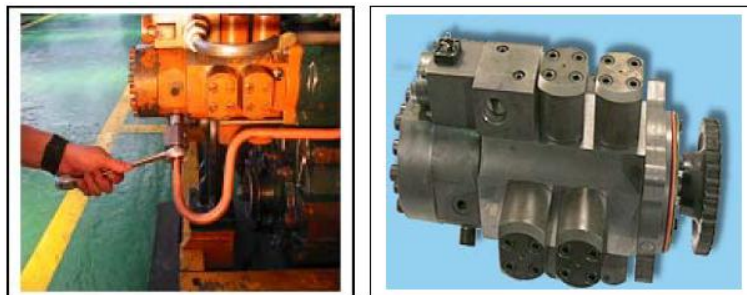


Figura 1.26: Bomba de alta presión de combustible

Ubicación: Está ubicada bajo el cabezal de filtros de aceite en el lado A del motor.

Función: es la encargada de enviar el caudal al common rail del sistema de inyección con el objetivo de crear una presión necesaria según los requerimientos del motor.

#### Válvula moduladora

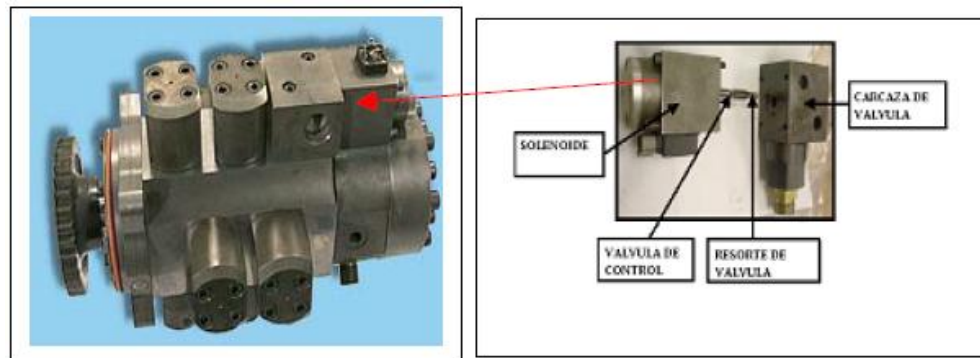


Figura 1.27: Válvula moduladora

Ubicación Está ubicada en la parte superior de la bomba de alta presión de combustible.

Función: Tiene la función de modular el paso de combustible hacia la bomba de alta presión de combustible en todo rango de funcionamiento del motor.

#### Cabezal de filtros de aceite

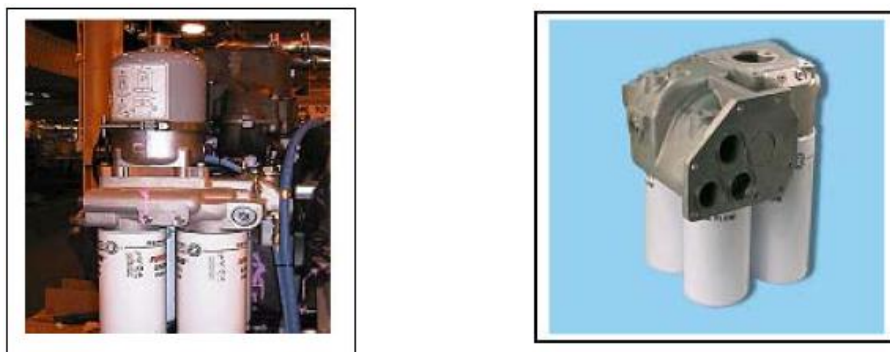


Figura 1.28: Cabezal de filtros de aceite

Ubicación: Está ubicada en la parte superior de la carcasa delantera en el lado A del motor.

Función: Dirigir el aceite a los canales correspondientes del sistema de lubricación, además de tener el alojamiento para los filtros de aceite.

#### Filtro centrífugo

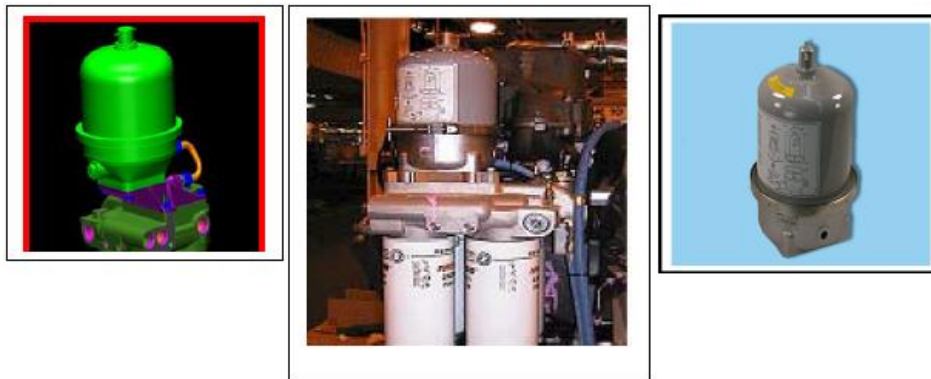


Figura 1.29: Filtro centrífugo

Ubicación: Está ubicado sobre el cabezal de filtros de aceite por el lado A del motor.

Función: Separar el material particulado contenido en el aceite del motor, mediante la fuerza centrífuga, \* Nota: Existen de 2 y de 4 [L], es vital un buen mantenimiento y limpieza de estos filtros ya que con ellos se puede predecir algún desgaste excesivo según el espesor del papel filtro al sacarlo.

#### Válvula del Rockford

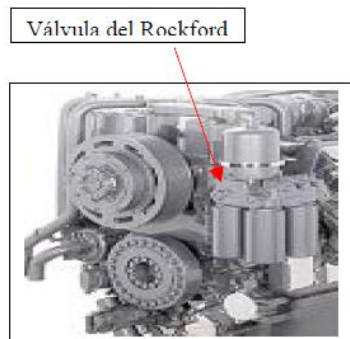


Figura 1.30: Válvula del Rockford

Ubicación: Está ubicada detrás del filtro centrifugo de aceite por el lado A del motor.

Función: Tiene la finalidad de modular el paso de aceite para acoplar el Rockford, dependiendo de la temperatura del motor.

Rockford

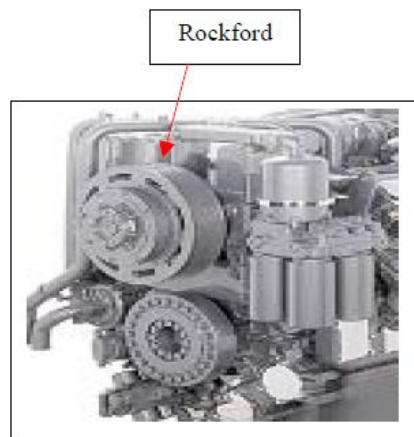


Figura 1.31: Rockford

Ubicación: Está Ubicado en el frontis del motor un poco más arriba del damper del motor.

Función: Transmitir el giro que proviene desde el damper por medio de una correa, hacia al aspa de ventilación del motor y refrigeración del radiador.

Caja de termostato de baja

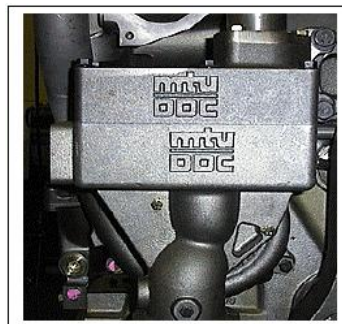


Figura 1.32: Caja de termostato de baja

Ubicación: Está ubicado en el lado B del motor, al lado izquierdo del motor (mirando de frente).

Función: Es la encargada de alojar los dos termostatos de baja que trabajan con el circuito de refrigeración del intercooler.

#### Damper

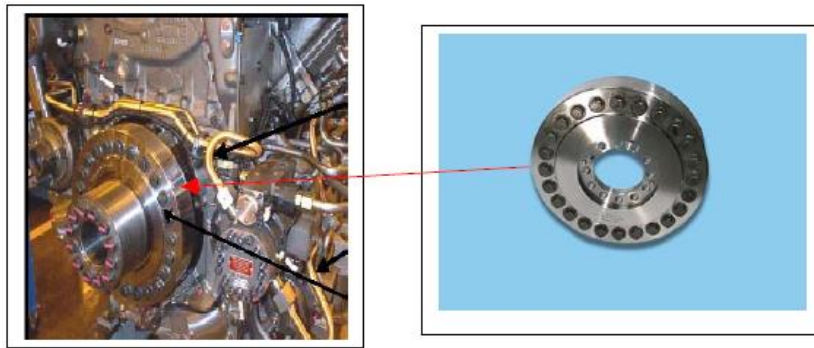


Figura 1.33: Damper

Ubicación: Está en el frontis del motor, en el extremo del cigüeñal.

Función: Amortiguar las fuerzas de inercias producidas en el cigüeñal, disminuyendo las vibraciones y los esfuerzos torsionales (provocados por las fuerzas de inercia)

#### Mando del alternador

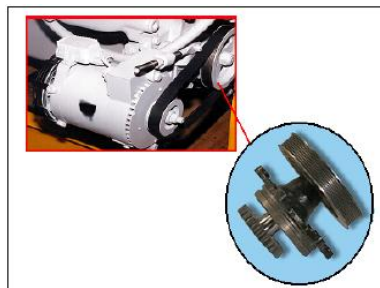


Figura 1.34: Mando del alternador

Ubicación: Está en el frontis del motor debajo de la bomba de agua del circuito del intercooler.

Función: Tiene la finalidad de entregar el giro al alternador de 24 [V], por medio de una correa.

### Módulo de control electrónico (ECM)

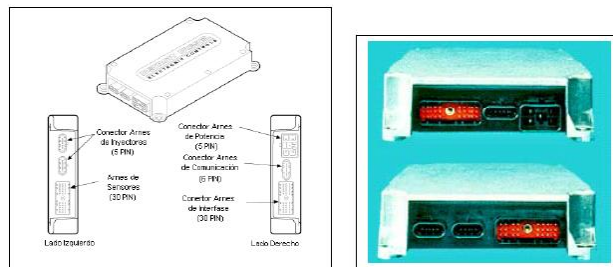


Figura 1.35: Módulo de control electrónico (ECM)

Ubicación: Estos se encuentran debajo del múltiple de admisión del lado A del motor, después del cabezal de combustible.

Función: Controlan el sistema electrónico del motor, interactuando con los sensores y componentes para el buen funcionamiento del equipo, \* Nota: Es de vital importancia un buen cheque y mantenimiento de éstos, especialmente con los distintos enchufes que poseen, ya que un mal mantenimiento o instalación produciría una falla en cualquiera de los sistemas del motor.

### Adaptador de intercooler



Figura 1.36: Adaptador de intercooler

Ubicación: Está ubicado en la parte trasera del motor, uno en cada extremo del intercooler lado A y B.

Función: Permite la entrada de aire al intercooler desde los turbo delanteros y traseros del motor.

Bracket

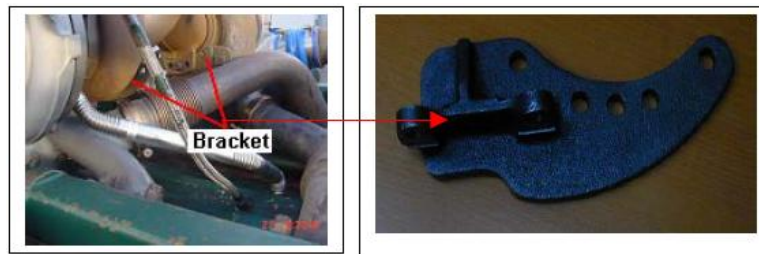


Figura 1.37: Bracket

Ubicación: Se ubican entre las bases de cada turbo y los extremos de la “Y” de escape.

Función: Cumplen la función de central las “Y” de escape con los dos turbos, evitando el exceso de vibración y desgaste.

Goma descarga de turbo



Figura 1.38: Goma descarga de turbo

Ubicación: Está se encuentra en la salida del caracol (carcasa) de admisión de cada turbo y a la entrada de los adaptadores del intercooler.

Función: Proporcionar una unión flexible entre el caracol de admisión del turbo y el adaptador de intercooler \* Nota: Es muy importante un buen chequeo visual de las gomas de descarga y sus abrazaderas, ya que un mal estado de éstas puede producir una pérdida de aire, lo que ocasiona una baja potencia del motor.

## Turbo



Figura 1.39: Turbo

Ubicación: Estos se ubican en la parte superior del motor, en los dos bancos (A y B) del motor.

Función: Sobre alimentar de aire a los múltiples de admisión con el objetivo de aumentar la combustión (aumentando la mezcla aire-combustible) y por la tanto aumentar la potencia del motor.

## Tapas de válvulas



Figura 1.40: Tapas de válvulas

Ubicación: Están ubicadas sobre las culatas en las dos bancadas (A y B) del motor.

Función: Tiene como función de sellar el sistema de distribución o los accesorios del motor ubicados en las culatas del motor.

#### Galería del common rail



Figura 1.41: Galería del common rail

Ubicación: Están ubicados por debajo de los múltiples de admisión, por ambos lados del motor.

Función: Tiene la función de acumular el combustible a alta presión que es suministrado por la bomba de alta presión de combustible con esto se asegura que permanezca constante y sin variar la presión de inyección al abrir el inyector en cualquier condición de operación.

#### Compresor de aire

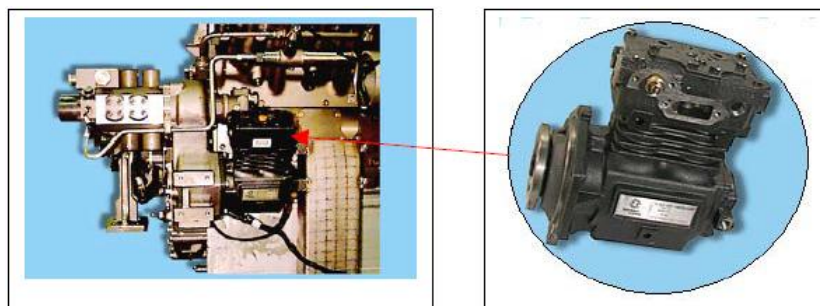


Figura 1.42: Compresor de aire

Ubicación: Se encuentra en el lado A del motor, debajo del primer cuerpo del múltiple de admisión.

Función: Abastecer con aire comprimido al sistema neumático del camión, para los requerimientos de este.

#### Bomba de transferencia de combustible

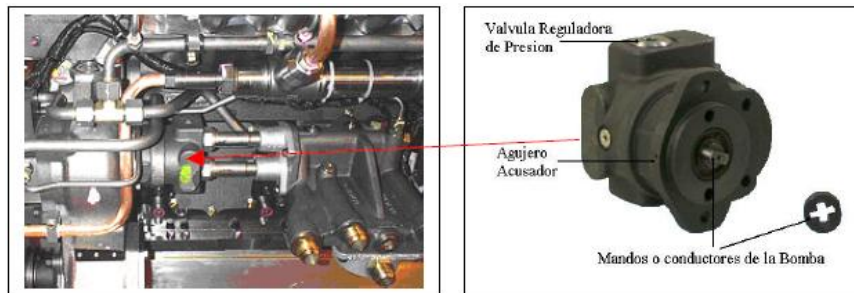


Figura 1.43: Bomba de transferencia de combustible

Ubicación: Está ubicada en la carcasa delantera detrás de la bomba de combustible de alta y debajo de los filtros de aceite.

Función: Es la encargada de bombear el combustible desde el estanque de combustible hasta la bomba de alta, pasando por los filtros de combustible y la válvula moduladora.

#### Cabezal de combustible



Figura 1.44: Cabezal de combustible

Ubicación: Se encuentra debajo del múltiple de admisión, después de la bomba de transferencia en el lado A del motor.

Función: Encargado de distribuir el combustible, que llega desde los filtros hacia la bomba de alta.

### Cárter

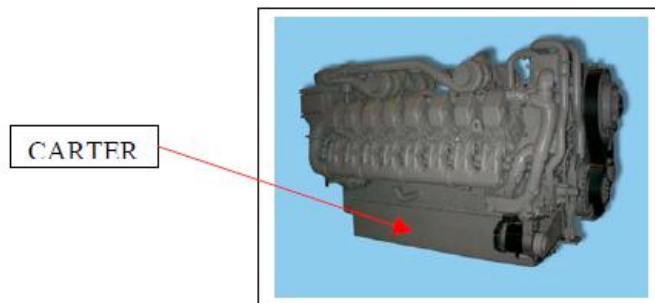


Figura 1.45: Cárter

Ubicación: Está ubicado en la parte inferior del block

Función: Contener el aceite que es utilizado en el sistema de lubricación del motor.

### Múltiples de admisión

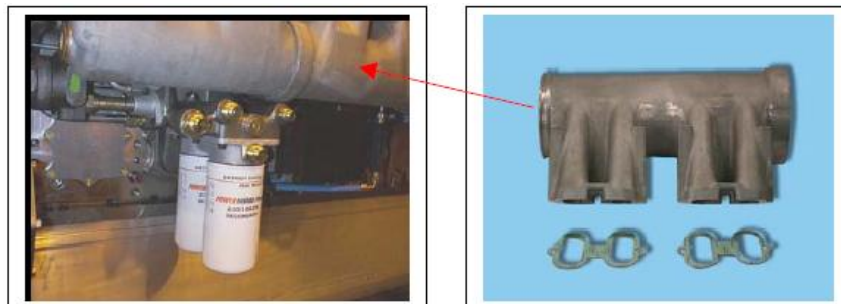


Figura 1.46: Múltiples de admisión

Ubicación: Se encuentran en ambos lados del motor (A y B), debajo de las culatas.

Función: Cumplen con la finalidad de dirigir el aire de admisión provenientes del intercooler, hacia la admisión de las culatas y cilindros, \* Nota; un mal montaje de la empaquetadura, provoca fuga de aire y por lo tanto perdida de potencia del motor.

#### Cañerías de alta presión de combustible

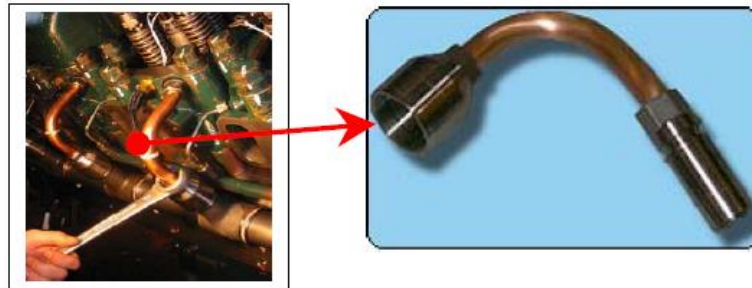


Figura 1.47: Cañerías de alta presión de combustible

Ubicación: Estas cañerías se ubican sobre los múltiples de admisión entre el common rail de combustible y la culata.

Función: Comunica el combustible que está en el common rail a alta presión, hacia los inyectores alojados en la culata.

#### Cañería de retorno de combustible del inyector

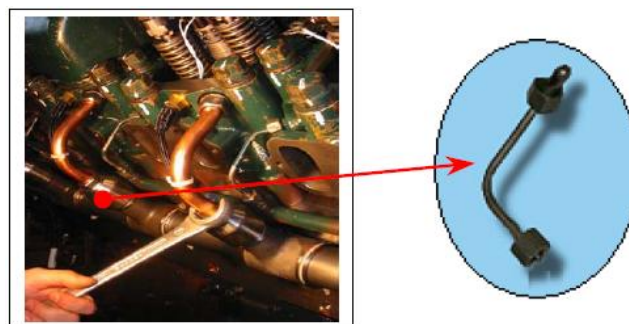


Figura 1.48: Cañerías de retorno de combustible del inyector

Ubicación: Esta cañería se ubica a un costado de las culatas, sobre el common rail de combustible.

Función: Es la de drenar el combustible de retorno que viene desde el inyector hacia un riel común de retorno.

### Intercooler



Figura 1.49: Intercooler

Ubicación: Está ubicado en la parte superior trasera del motor.

Función: Es el encargado de bajar la temperatura al aire que viene desde los turbos hacia el múltiple de admisión.

### Múltiple de refrigerante



Figura 1.50: Múltiple de refrigerante

Ubicación: En la parte superior del motor, sobre las culatas del motor, por ambos lados (A y B) del motor.

Función: Dirigir el líquido refrigerante a las culatas.

Tubo de descarga de turbo

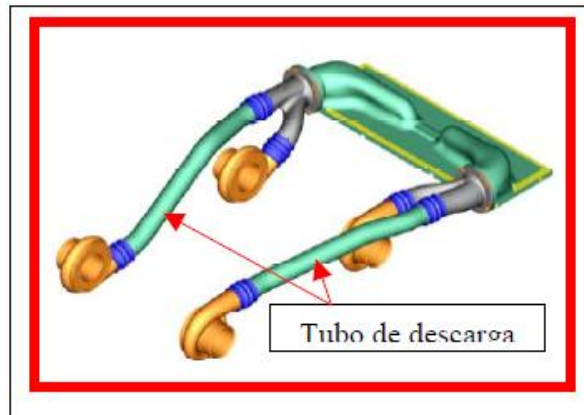


Figura 1.51: Tubo de descarga de turbo

Ubicación: En la parte superior del motor, ambos lados (A y B) del motor.

Función: Permite la conexión del suministro de aire generado por los turbos delantero hacia el intercooler.

Tubo de escape (corrugado)

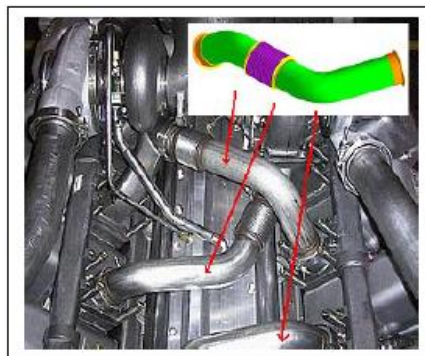


Figura 1.52: Tubo de escape (corrugado)

Ubicación: En la parte superior del motor, ambos lados (A y B).

Función: Dirigen los gases de escape desde las culatas hacia los múltiples de escape para hacer girar la turbina de escape de los turbos, \* Nota: la parte corrugada sirve para adsorber las dilataciones térmicas provocadas por las altas temperaturas de escape.

“Y” de escape

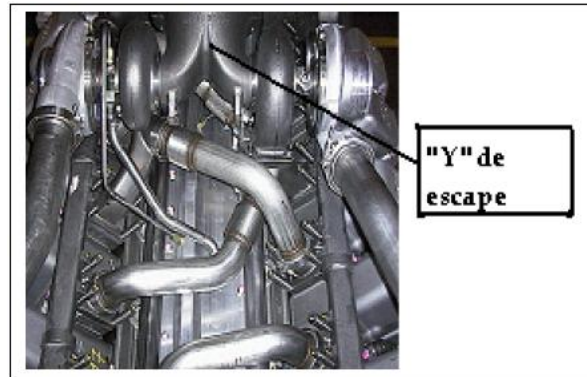


Figura 1.53: “Y” de escape

Ubicación: Estás se encuentran en la parte superior del motor, una entre los turbos delanteros y la otra en los traseros.

Función: Son las encargadas de dirigir los gases de escape que salen de los turbos, hacia los tubos de escape del camión.

Múltiple de escape (Spider)



Figura 1.54: Múltiple de escape (Spider)

Ubicación: En la parte superior del motor, debajo de cada turbo.

Función: Soportar el turbo y dirigir los gases de escape provenientes desde 4 culatas, hacia el turbo, \* Nota; Hay 4 múltiples de escape en el motor.

Carcasa enfriador de aceite

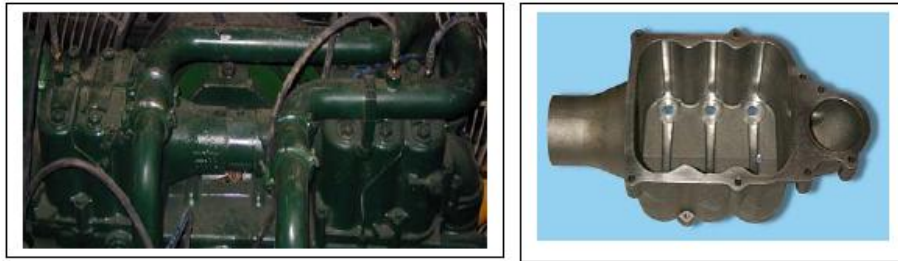


Figura 1.55: Carcasa enfriador de aceite

Ubicación: En la parte frontal del motor, en la carcasa delantera en su parte superior.

Función: Es el encargado de mantener el líquido refrigerante que circula por la parte exterior de los enfriadores de aceite.

Caja de termostato de alta

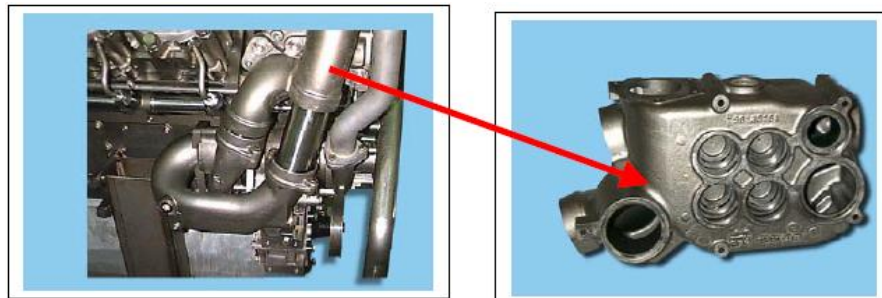


Figura 1.56: Caja de termostato de alta

Ubicación: Ubicada en la carcasa delantera en el lado B del motor, sobre la bomba de agua principal.

Función: Es la encargada de alojar los 4 termostatos de alta y posee los canales de distribución de refrigerante del motor.

### Bomba principal de refrigerante

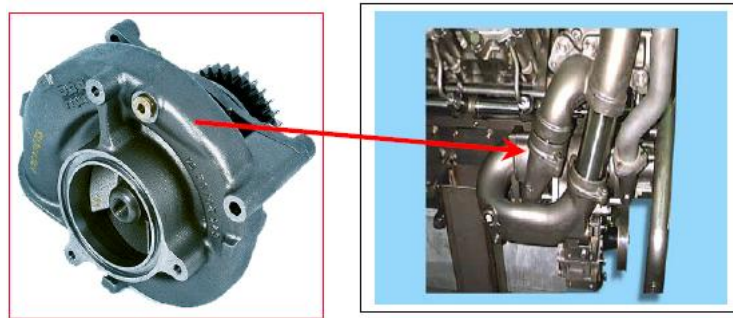


Figura 1.57: Bomba principal de refrigerante

Ubicación: Se encuentra detrás de la bomba de agua secundaria en el lado B del motor.

Función: Es la encargada de hacer circular el refrigerante desde el radiador al circuito de refrigeración del motor.

### Bomba secundaria de refrigerante

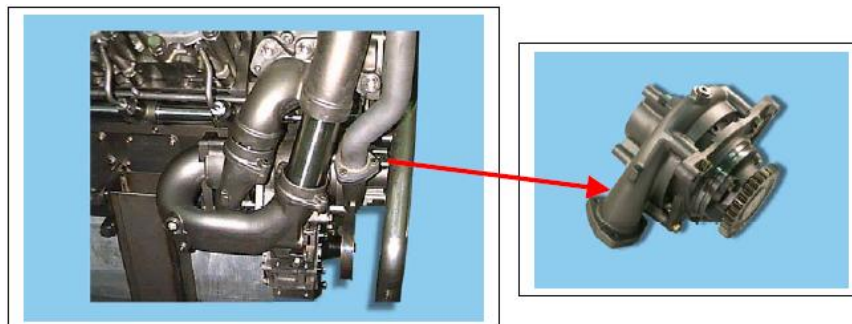


Figura 1.58: Bomba secundaria de refrigerante

Ubicación: Se encuentra en el frontis del motor por el lado B, debajo de la caja de termostato de baja.

Función: Es la encargada de hacer circular el refrigerante desde el radiador al circuito de refrigeración del intercooler.

### Varilla de nivel y tapa de reposición de aceite



Figura 1.59: Varilla de nivel y tapa de reposición de aceite

Ubicación: Se encuentra en el lado B del motor, debajo de los múltiples de admisión.

Función: Es visualizar el estado del nivel de aceite y reponer aceite a través del ducto de la tapa de aceite.

### 1.3.5.3 Sensores del motor

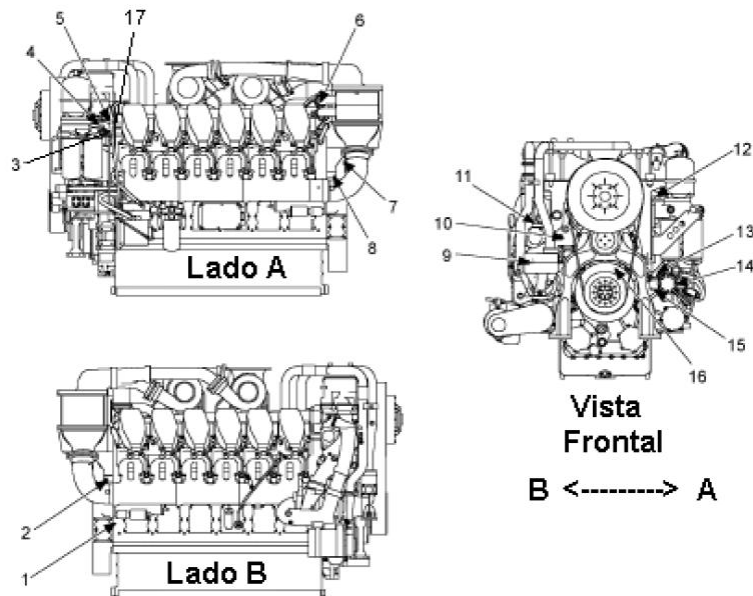


Figura 1.60: Ubicación general de sensores

|   |                                           |    |                                       |
|---|-------------------------------------------|----|---------------------------------------|
| 1 | SENSOR DE REFERENCIA DE TIEMPO            | 10 | SENSOR DE PRESIÓN DE REFRIGERANTE     |
| 2 | SENSOR DE TEMPERATURA DE AIRE R1          | 11 | SENSOR DE TEMPERATURA MOTOR           |
| 3 | SENSOR DE SATURACIÓN DE FILTROS DE ACEITE | 12 | SENSOR DE PRESIÓN DE ACEITE           |
| 4 | SENSOR DE PRESIÓN BAROMÉTRICA             | 13 | SENSOR DE PRESIÓN DE COMBUSTIBLE      |
| 5 | SENSOR DE PRESIÓN DE CÁRTER               | 14 | SENSOR DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE  |
| 6 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL INTERCOOLER     | 15 | SENSOR DE ALTA PRESIÓN DE COMBUSTIBLE |
| 7 | SENSOR DE PRESIÓN DE TURBO                | 16 | SENSOR DE REFERENCIA SINCRÓNICA       |
| 8 | SENSOR DE TEMPERATURA DE AIRE             | 17 | SENSOR DE TEMPERATURA DE ACEITE       |
| 9 | SENSOR DE PRESIÓN DE INTERCOOLER          | 18 | SENSOR DE NIVEL DE REFRIGERANTE       |

Tabla 1.23: Enumeración de sensores

### Sensor de referencia de tiempo (TRS)

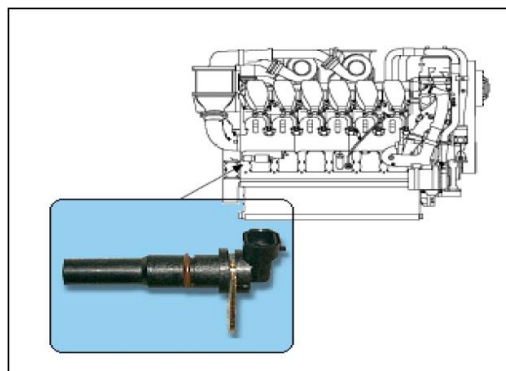


Figura 1.61: Sensor de referencia de tiempo (TRS)

Ubicación: En la carcasa trasera del motor lado B, debajo del motor de arranque.

Función: Enviar una señal eléctrica a los ECM producto de la inducción que se genera al enfrentarse con los dientes de un plato instalado en el cigüeñal, de esta señal los ECM obtienen las RPM del motor lo que activa el programa de tiempo y el punto de inyección para que el motor empiece a funcionar regularmente, \* Nota: Es fundamental una buena inspección del sensor y el arnés, ya que cualquier anomalía produce un funcionamiento irregular del motor.

### Sensor de temperatura de aire R1 (ATS R1)

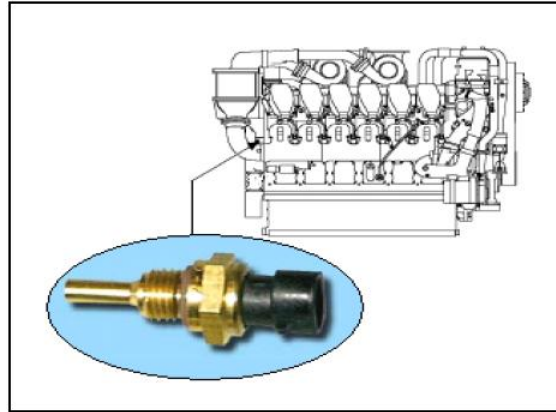


Figura 1.62: Sensor de temperatura de aire R1 (ATS R1)

Ubicación: En el codo del múltiple de admisión del lado B del motor, debajo del intercooler.

Función: Es el encargado de medir la temperatura del aire que ingresa al motor por el lado B,  
 \* Nota; Pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser causa de la activación del sistema RampDown (CEL).

Sensor de saturación de filtros de aceite

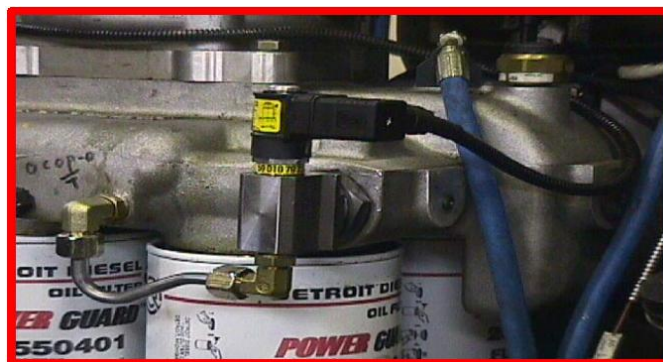


Figura 1.63: Sensor de saturación de filtros de aceite

Ubicación: En el frontis del cabezal de filtros de aceite por el lado A del motor.

Función: Activar la alarma que indica que ha subido la presión en los filtros de aceite, \* Nota; El Switch activa la SEL o luz de advertencia antes que los filtros de aceite se saturen.

### Sensor de presión barométrica

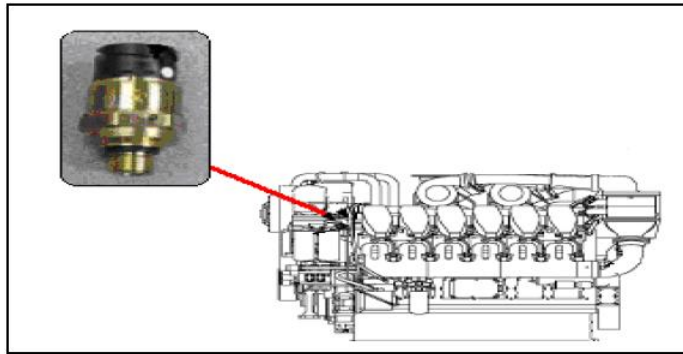


Figura 1.64: Sensor de presión barométrica

Ubicación: En el frontis del cabezal de filtros de aceite por el lado A del motor, a un costado del sensor de presión de cárter.

Función: medir la presión atmosférica del lugar en que se encuentra trabajando el motor

### Sensor de presión de cárter (CPS)

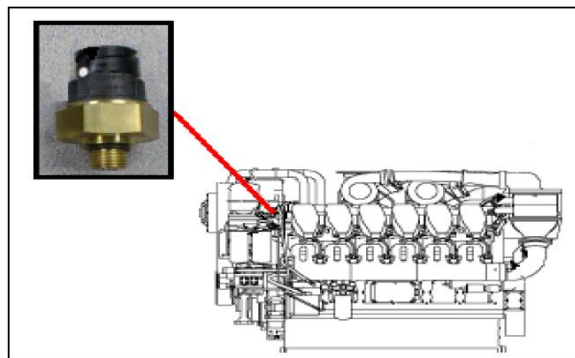


Figura 1.65: Sensor de presión de cárter (CPS)

Ubicación: Está ubicado en el cabezal de filtros de aceite, a un costado derecho del filtro centrífugo mirando desde el lado A del motor.

Función: Medir la presión existente en el cárter en todo régimen de funcionamiento del motor,

\* Nota; Este sensor pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual, es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser causa de la activación del sistema RampDown.

### Sensor de temperatura de refrigerante de intercooler (ICTS)

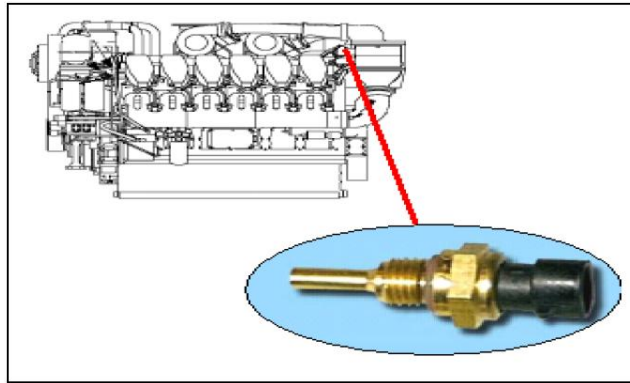


Figura 1.66: Sensor de temperatura de refrigerante de intercooler (ICTS)

Ubicación: En el lado A del motor, en la cañería de salida de refrigerante del intercooler.

Función: Medir la temperatura del refrigerante del intercooler, en todo rango de funcionamiento del motor, \* Nota; Este sensor pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser causa de la activación del sistema RampDown (CEL).

### Sensor de presión de turbo (TBS)

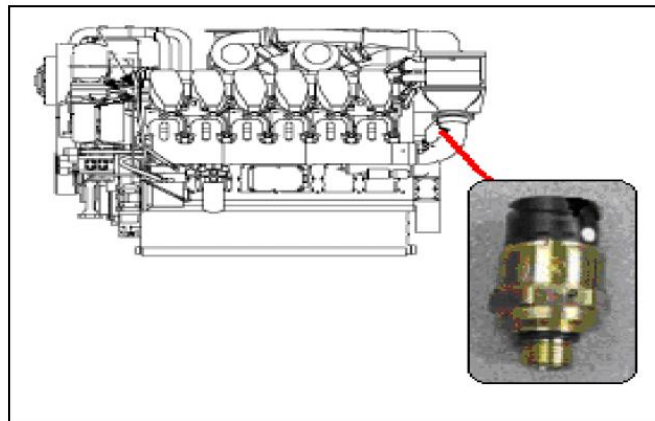


Figura 1.67: Sensor de presión de turbo (TBS)

Ubicación: En el codo del múltiple de admisión del lado A, más arriba que el sensor de temperatura de aire.

Función: De medir la presión existente en el múltiple de admisión, generada por los turbos.

#### Sensor de temperatura de aire (ATS)

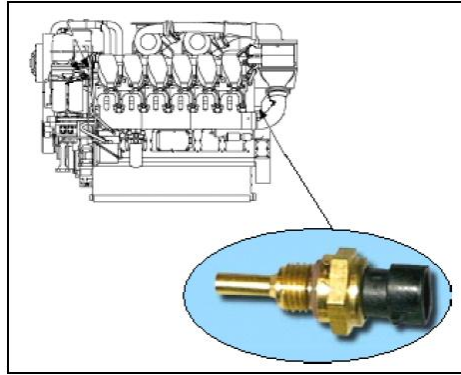


Figura 1.68: Sensor de temperatura de aire (ATS)

Ubicación: En el codo del múltiple de admisión del lado A, debajo del intercooler.

Función: Encargado de medir la temperatura del aire que ingresa al motor, \* Nota; Este sensor pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo tanto es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser causa de la activación del sistema RampDown (SEL).

#### Sensor de presión de refrigerante de intercooler R1 (ICPS)

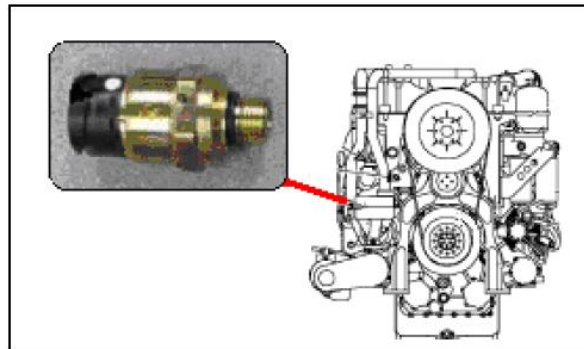


Figura 1.69: Sensor de presión de refrigerante de intercooler R1 (ICPS)

Ubicación: En el frontis del motor en el lado B del motor, en la cañería que sale de la caja de termostatos de baja.

Función: De medir la presión de refrigerante del intercooler del motor en todo régimen de trabajo, \* Nota; Esté sensor pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser cauda de la activación del sistema RampDown (CEL).

Sensor de presión de refrigerante de motor (CPS)

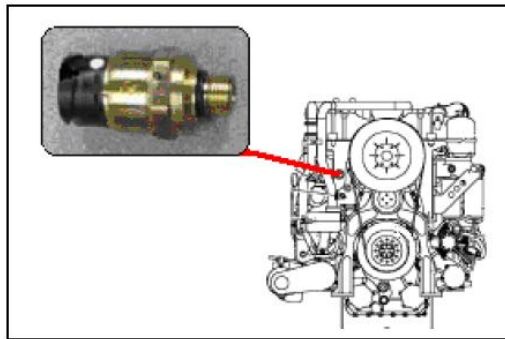


Figura 1.70: Sensor de presión de refrigerante de motor (CPS)

Ubicación: En el frontis de la carcasa delantera por el lado B del motor.

Función: Medir la presión de refrigerante en todo rango de funcionamiento del motor, \* Nota; Este sensor pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser cauda de la activación del sistema RampDown (CEL).

Sensor de temperatura de refrigerante del motor (CTS)

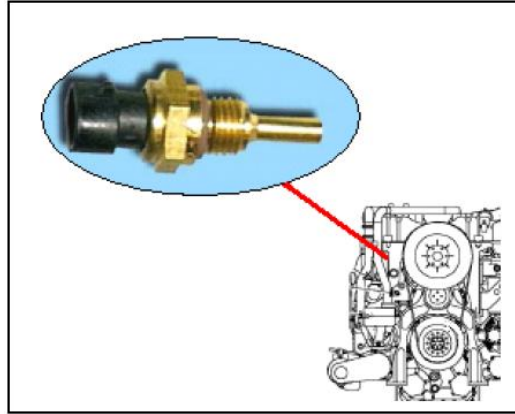


Figura 1.71: Sensor de temperatura de refrigerante del motor (CTS)

Ubicación: En el frontis de la carcasa delantera, un poco más arriba del sensor de presión de refrigerante, en el lado B del motor.

Función: Medir la temperatura del refrigerante en todo rango de funcionamiento del motor, \*

Nota; Este sensor pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual es muy importante una buena inspección de éste, ya que cualquier anomalía en él podría ser causa de la activación del sistema RampDown (CEL).

Sensor de presión de aceite (OPS)

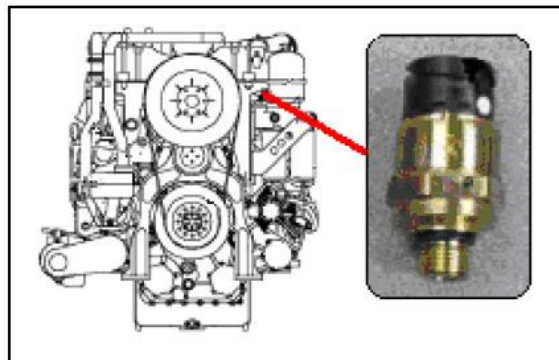


Figura 1.72: Sensor de presión de aceite (OPS)

Ubicación: En el frontis del motor en el lado A, en el cabezal de filtros de aceite detrás del filtro centrifugo.

Función: Medir y entregar los valores de presión de aceite del motor a los ECM en todo rango de funcionamiento del motor, \* Nota; Es de vital importancia una buena inspección de este sensor ya que éste pertenece a la gama de los sensores de protección del motor, ya que al detectar una baja presión de aceite de motor; bajo los límites de seguridad, los ECM activan el sistema de RAMPDOWN (sistema que consiste en una alarma roja y amarilla en el tablero del operador y automáticamente el motor queda funcionando en ralentí).

Sensor de presión de combustible (FPS)

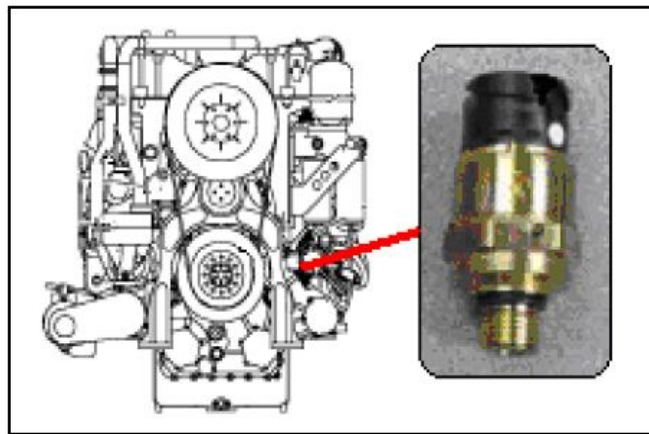


Figura 1.73: Sensor de presión de combustible (FPS)

Ubicación: En el cuerpo de la válvula moduladora que está instalada en la parte superior de la bomba de alta.

Función: Entregar los valores de presión de transferencia de combustible con que se alimenta a la bomba de alta.

Sensor de temperatura de combustible (FTS)

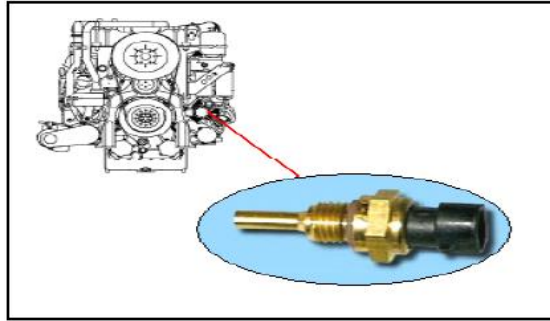


Figura 1.74: Sensor de temperatura de combustible (FTS)

Ubicación: En el cuerpo de la bomba de combustible de alta, debajo de la válvula moduladora.

Función: Medir la temperatura del combustible antes de ingresar al sistema de inyección, con este sensor puede verse la efectividad del sistema de refrigeración del petróleo.

Sensor de alta presión de combustible (HPS)

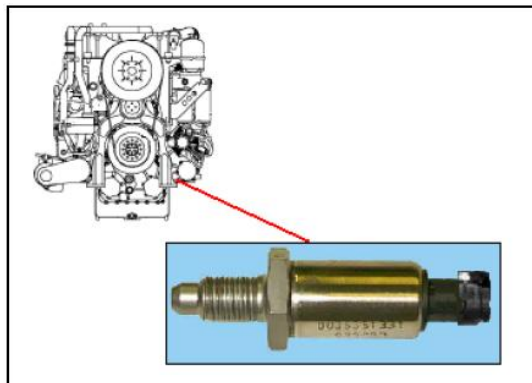


Figura 1.75: Sensor de alta presión de combustible (HPS)

Ubicación: En el cuerpo de la bomba de combustible de alta, en la parte de atrás.

Función: Medir la presión de inyección entregada por la bomba de alta en todo rango de funcionamiento del motor, \* Nota; La inspección de este sensor debe ser cautelosa y eficaz, ya que cualquier anomalía en éste podría producir una baja potencia del motor.

Sensor de referencia sincrónica (SRS)

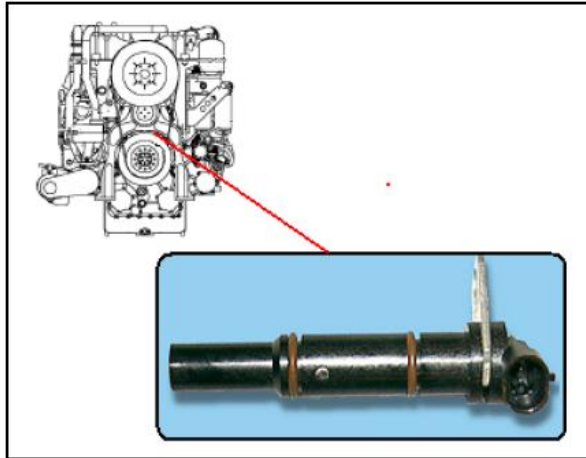


Figura 1.76: Sensor de referencia sincrónica (SRS)

Ubicación: En la carcasa delantera del motor a un costado izquierdo de la bomba de combustible de alta.

Función: Enviar una señal eléctrica a los ECM producto de la inducción que se genera al enfrentarse con el diente de un plato instalado en el cigüeñal. De esta señal los ECM señalan la posición 1ª en el motor, lo que activa el programa de orden de inyección del motor para que este empiece a funcionar, \* Nota; Es fundamental una buena inspección del sensor y el arnés, ya que cualquier anomalía produce un funcionamiento irregular del motor.

Sensor de temperatura de aceite (OTS)

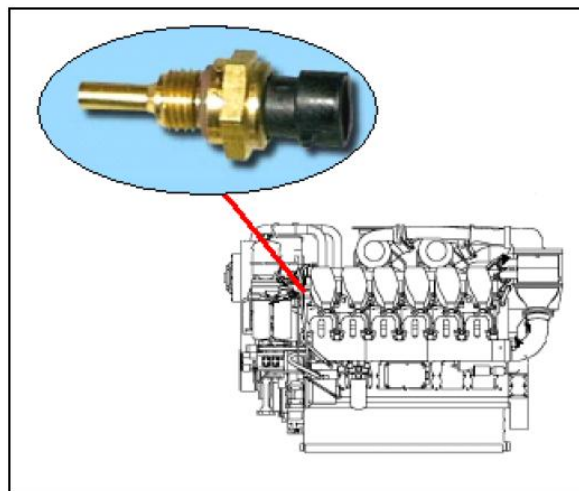


Figura 1.77: Sensor de temperatura de aceite (OTS)

Ubicación: En el frontis del motor en el lado A, en el cabezal de filtros de aceite detrás del filtro centrífugo, al costado derecho de este.

Función: De entregar los valores de temperatura de aceite del motor a los ECM en todo rango de funcionamiento de éste, \* Nota; Al igual que el sensor de presión de aceite, este pertenece a la gama de los sensores de protección del motor, y es de vital importancia una buena inspección de este sensor, ya que al detectar un alza de temperatura de aceite de motor, sobre los límites de seguridad, los ECM activan el sistema RAMPDOWN.

#### Sensor de nivel de refrigerante (CLS)

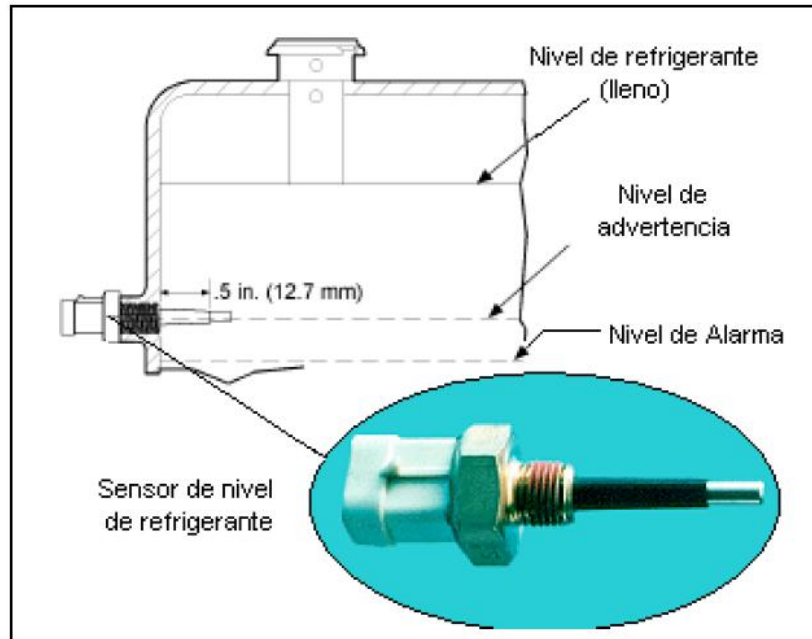


Figura 1.78: Sensor de nivel de refrigerante (CLS)

Ubicación: En el estanque de expansión del radiador.

Función: Cuando el nivel del refrigerante del estanque de expansión del radiador está por debajo de la ubicación del sensor, este envía una señal que se interpreta como falta de refrigerante, \* Nota: Se recomienda hacer una buena inspección del sensor, ya que éste pertenece a la familia de los sensores de protección del motor, por lo cual, podría activarse el sistema RAMPDOWN (SEL).

#### 1.3.5.4 Diagrama de entrada y salida del Motor C.I.

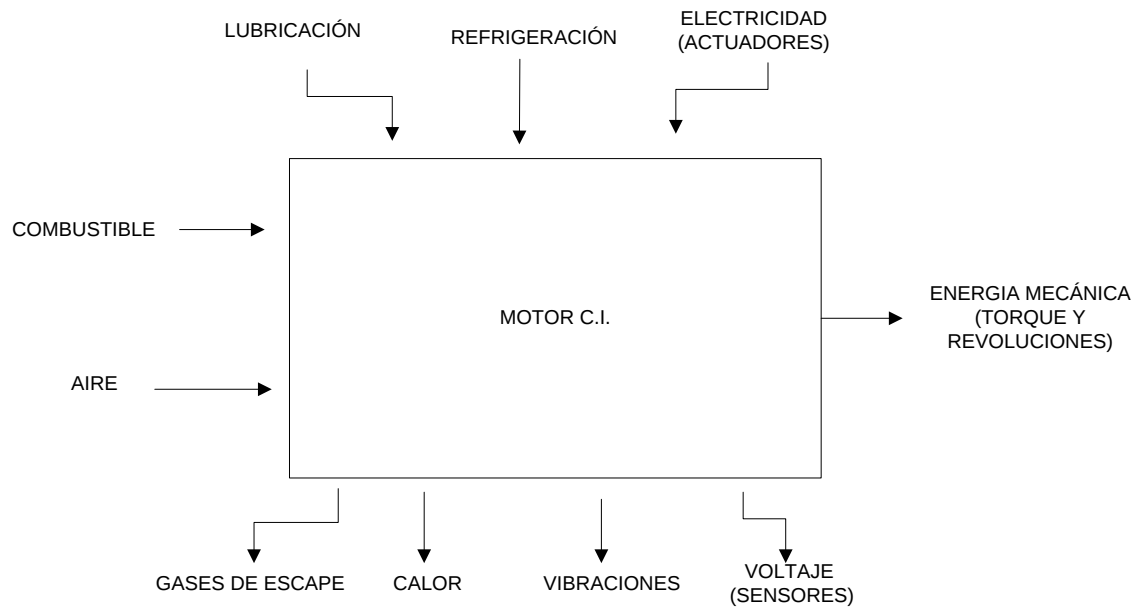


Figura 1.79: Diagrama de entrada y salida del Motor C.I.

### 1.3.5.5 Diagrama funcional del Equipo:

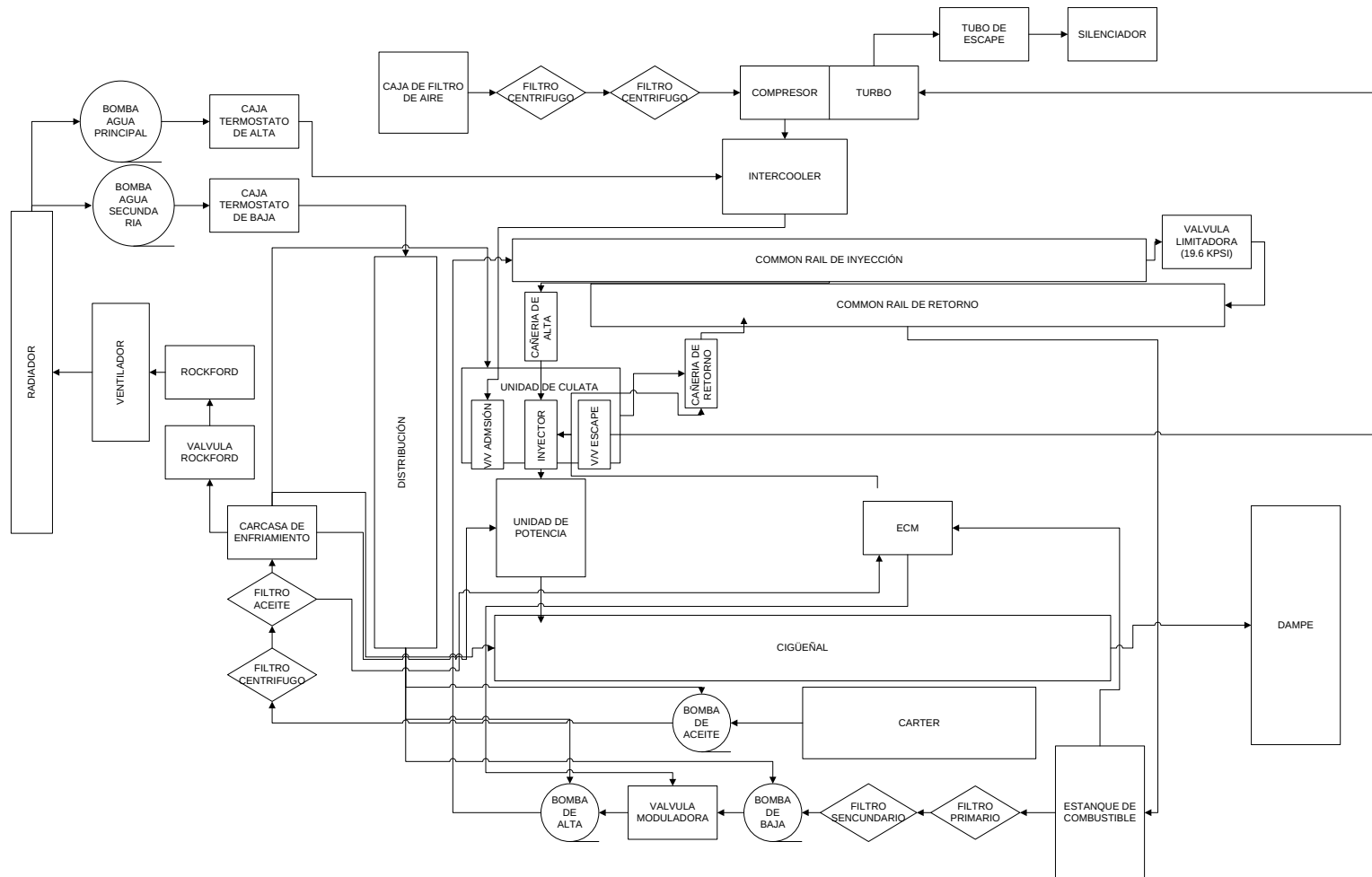


Figura 1.80: Diagrama de funcional del Equipo.

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA**

## 2 Aplicación de la Teoría

A continuación, se presenta lo aprendido en la investigación realiza, solucionando la problemática de la optimización del plan de mantenimiento de los motores Diesel.

### 2.1 Comparación de la vida útil de cada modelo de motor diésel

Se realiza una comparación entre la duración de cada motor, verificando cual tiene mayor confiabilidad.

#### 2.1.1 Vida útil Motor MTU S4000

Del levantamiento de la vida útil del motor MTU S4000, se obtiene la siguiente tabla:

| Limite real inf | Limite real sup | Lim. aparente Inf | Lim. Aparente Sup | mi    | fi | fi/n | Fi | Fi/n |
|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|----|------|----|------|
| -0,5            | 5692,5          | 0                 | 5692              | 2846  | 2  | 13,3 | 2  | 13   |
| 5691,5          | 11384,5         | 5692              | 11384             | 8538  | 0  | 0,0  | 2  | 13   |
| 11383,5         | 17076,5         | 11384             | 17076             | 14230 | 2  | 13,3 | 4  | 27   |
| 17075,5         | 22768,5         | 17076             | 22768             | 19922 | 2  | 13,3 | 6  | 40   |
| 22767,5         | 28460,5         | 22768             | 28460             | 25614 | 9  | 60,0 | 15 | 100  |
|                 |                 |                   |                   |       | 15 |      |    |      |

Tabla 2.1: Tabla de frecuencias de la vida útil del motor MTU

\*NOTA: Se observa que el 60% de los motores fallan en el periodo de 22700 a 28460 [hr].

Se realiza las medidas de tendencia central, obteniendo:

|                     |         |
|---------------------|---------|
| duración mayor      | 28225   |
| duración menor      | 444     |
| promedio            | 20038   |
| mediana             | 23619   |
| desviación estándar | 9006,87 |
| Coe. Variación      | 44,95%  |

Tabla 2.2: Medidas de tendencia central del motor MTU.

Se puede observar que la diferencia entre el mayor y la menor vida útil (27781 [hr]) es mayor incluso que la media, y que el coeficiente de variación es de 44.95%, es decir que la desviación estándar es el 44.95% de la media, esta dispersión se debe principalmente a los 4 motores que no alcanzaron a durar las 15.000[hr].

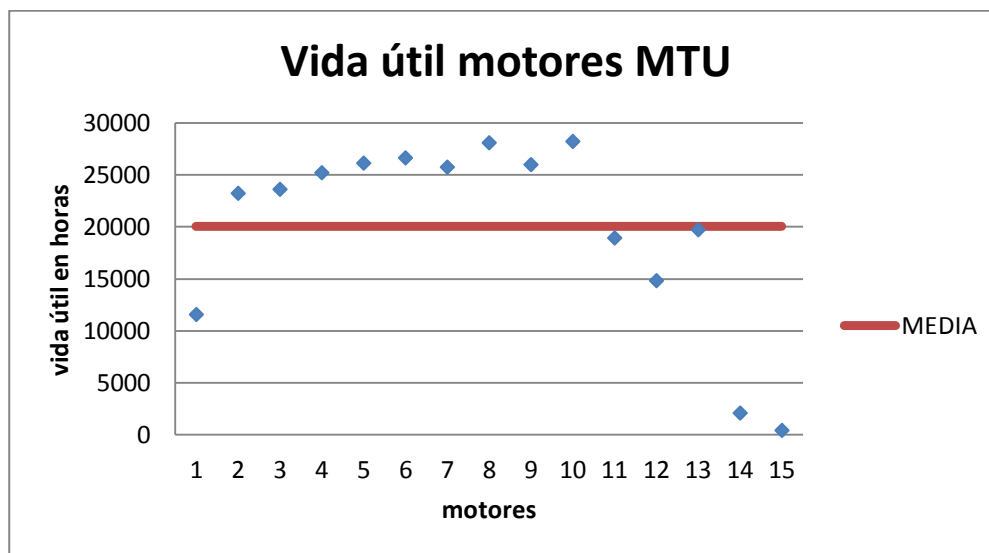


Figura 2.1: Vida útil motores MTU (datos sin censurar)

Se realiza un análisis de la confiabilidad de los motores sin censura de los datos:

| Confiabilidad con dato no censurados |             |    |       |       |       |           |
|--------------------------------------|-------------|----|-------|-------|-------|-----------|
| t                                    | hr          | n  | f     | F     | R     | $\lambda$ |
| 3000                                 | 0-3000      | 2  | 0,133 | 0,133 | 0,867 | 0,15      |
| 6000                                 | 3000-6000   | 0  | 0,000 | 0,133 | 0,867 | 0,00      |
| 9000                                 | 6000-9000   | 0  | 0,000 | 0,133 | 0,867 | 0,00      |
| 12000                                | 9000-12000  | 1  | 0,067 | 0,200 | 0,800 | 0,08      |
| 15000                                | 12000-15000 | 1  | 0,067 | 0,267 | 0,733 | 0,09      |
| 18000                                | 15000-18000 | 0  | 0,000 | 0,267 | 0,733 | 0,00      |
| 21000                                | 18000-21000 | 2  | 0,133 | 0,400 | 0,600 | 0,22      |
| 24000                                | 21000-24000 | 2  | 0,133 | 0,533 | 0,467 | 0,29      |
| 27000                                | 24000-27000 | 5  | 0,333 | 0,867 | 0,133 | 2,50      |
| 30000                                | 27000-30000 | 2  | 0,133 | 1,000 | 0,000 | 0,00      |
|                                      |             | 15 |       |       |       |           |

Tabla 2.3: Tabla de confiabilidad con datos no censurados motor MTU

Se verifica que el 60% de los camiones sobreviven a las 21.000[hr].

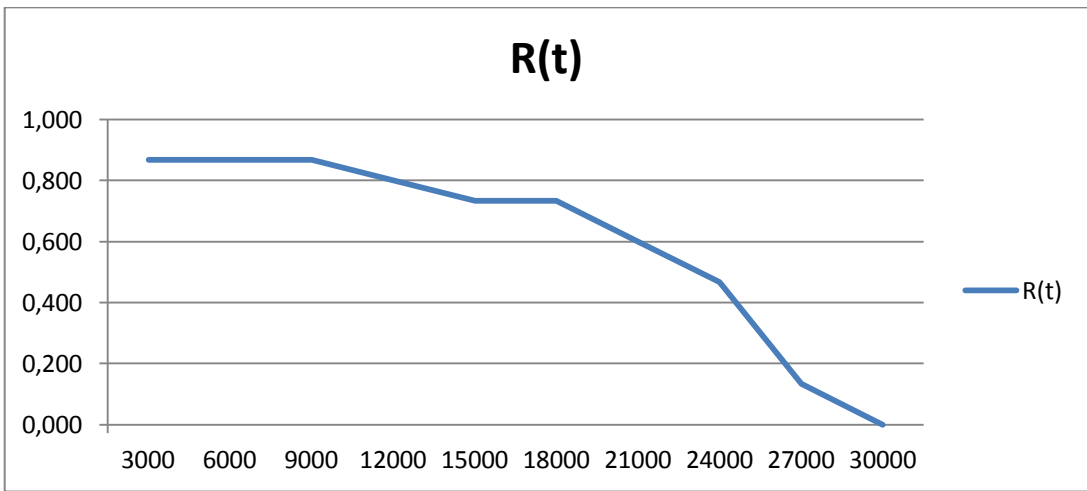


Figura 2.2: Confiabilidad de motores MTU (datos sin censurar)

Es preciso realizar una censura a los datos, específicamente a los 4 motores que no alcanzaron a durar 15.000 [hr], para observar el comportamiento de la tendencia.

Tabla de frecuencia datos censurados:

| Limite real inf | Limite real sup | Lim aparente Inf | Lim. Aparente Sup | mi    | fi | fi/n | Fi | Fi/n |
|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|-------|----|------|----|------|
| 18939,9         | 21033,9         | 18940            | 21033             | 19987 | 2  | 18,2 | 2  | 18   |
| 21032,9         | 23126,9         | 21033            | 23126             | 22080 | 0  | 0,0  | 2  | 18   |
| 23125,9         | 25219,9         | 23126            | 25219             | 24173 | 3  | 27,3 | 5  | 45   |
| 25218,9         | 27312,9         | 25219            | 27312             | 26266 | 4  | 36,4 | 9  | 82   |
| 27311,9         | 29405,9         | 27312            | 29405             | 28359 | 2  | 18,2 | 11 | 100  |
|                 |                 |                  |                   |       | 11 |      |    |      |

Tabla 2.4: Tabla de frecuencias de la vida útil del motor MTU datos censurados

Se realiza las medidas de tendencia central, obteniendo:

|                     |         |
|---------------------|---------|
| duración mayor      | 28225   |
| duración menor      | 18940   |
| promedio            | 24689   |
| mediana             | 25754   |
| desviación estándar | 3065,71 |
| Coe. Variación      | 12,42%  |

Tabla 2.5: Medidas de tendencia central del motor MTU datos censurados

Se puede observar que la diferencia entre el mayor y la menor vida útil (9285 [hr]) es mucho menor que en el caso anterior, siendo un 37,6% del promedio, y que el coeficiente de variación es de 12.42%, es decir que la desviación estándar es el 12.412% de la media.

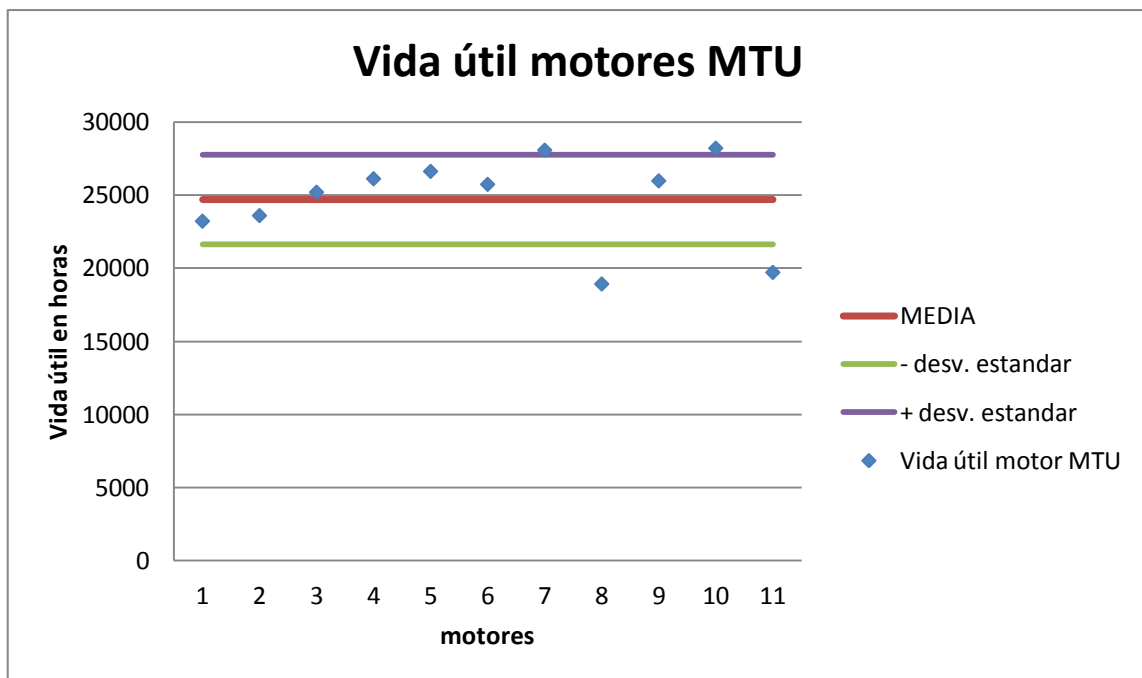


Figura 2.3: Vida útil motores MTU (datos censurados)

\*Como se puede observar en la figura, si se considera 2 desviaciones (una por lado), se engloba el 81,8% de los motores, cabe mencionar que una desviación equivale a 7 meses.

Se realiza un análisis de la confiabilidad de los motores con censura de los datos:

| Confiabilidad con dato censurados |             |   |       |       |       |           |
|-----------------------------------|-------------|---|-------|-------|-------|-----------|
| t                                 | hr          | n | f     | F     | R     | $\lambda$ |
| 3000                              | 0-3000      | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,00      |
| 6000                              | 3000-6000   | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,00      |
| 9000                              | 6000-9000   | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,00      |
| 12000                             | 9000-12000  | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,00      |
| 15000                             | 12000-15000 | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,00      |
| 18000                             | 15000-18000 | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,00      |
| 21000                             | 18000-21000 | 2 | 0,133 | 0,133 | 0,867 | 0,15      |
| 24000                             | 21000-24000 | 2 | 0,133 | 0,267 | 0,733 | 0,18      |
| 27000                             | 24000-27000 | 5 | 0,333 | 0,600 | 0,400 | 0,83      |
| 30000                             | 27000-30000 | 2 | 0,133 | 0,733 | 0,267 | 0,00      |

Tabla 2.6: Tabla de confiabilidad con datos censurados motor MTU

\*Se observa que el 100% de los motores llega a las 18.000 [hr] y que un 73,3% de los motores llega a las 24.000[hr]

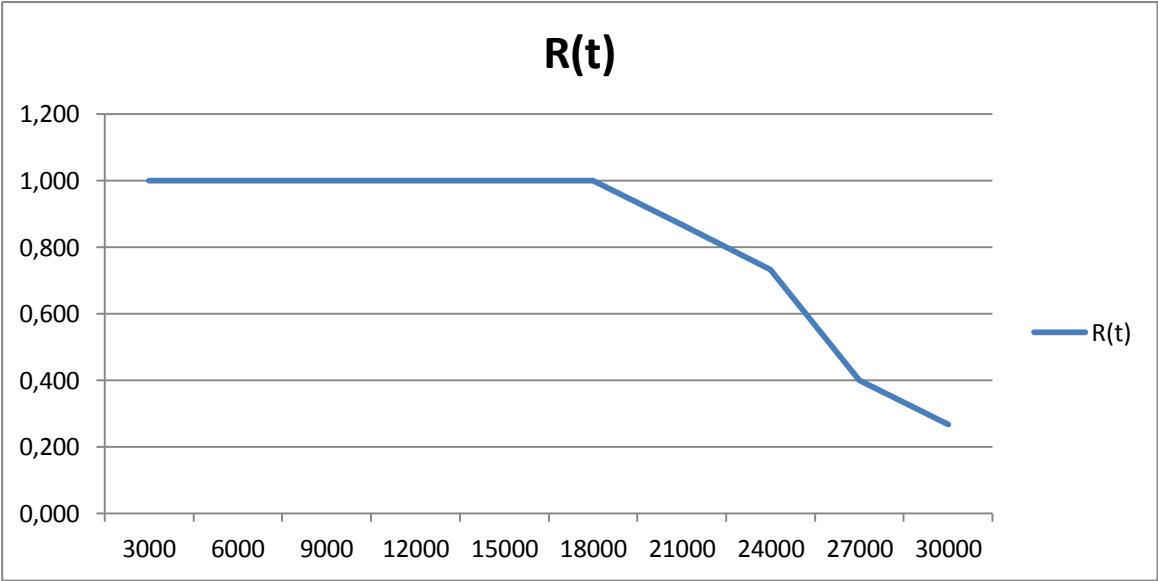


Figura 2.4: Confiabilidad de motores MTU (datos censurados)

### 2.1.2 Vida útil del Motor QSK60 Cummins

Del levantamiento de la vida útil del motor QSK 60, se obtiene la siguiente tabla:

| Limite real inf | Limite real sup | Lim aparente Inf | Lim. Aparente Sup | mi      | fi | fi/n | Fi | Fi/n |
|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|---------|----|------|----|------|
| -0,5            | 5819,5          | 0                | 5819              | 2909,5  | 4  | 20   | 4  | 20   |
| 5818,5          | 11638,5         | 5819             | 11638             | 8728,5  | 5  | 25   | 9  | 45   |
| 11637,5         | 17457,5         | 11638            | 17457             | 14547,5 | 1  | 5    | 10 | 50   |
| 17456,5         | 23276,5         | 17457            | 23276             | 20366,5 | 2  | 10   | 12 | 60   |
| 23275,5         | 29095,5         | 23276            | 29095             | 26185,5 | 6  | 30   | 18 | 90   |
| 29094,5         | 34914,5         | 29095            | 34914             | 32004,5 | 2  | 10   | 20 | 100  |
|                 |                 |                  |                   |         | 20 |      |    |      |

Tabla 2.7: Tabla de frecuencias de la vida útil del motor QSK 60 datos sin censurar

\*NOTA: Se observa que el 55% de los motores fallan en el periodo de 17457 a 23276 [hr].

Se realiza las medidas de tendencia central, obteniendo:

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| duración mayor      | 33634     |
| duración menor      | 2836      |
| promedio            | 17345     |
| mediana             | 16173     |
| desviación estándar | 10509,035 |
| Coe. Variación      | 61%       |

Tabla 2.8: Medidas de tendencia central del motor QSK 60 datos sin censurar

Se puede observar que la diferencia entre el mayor y la menor vida útil (30798 [hr]) es mayor incluso que la media, y que el coeficiente de variación es de 61%, es decir que la desviación estándar es el 61% de la media, esta dispersión se debe principalmente a los 10 motores que no alcanzaron a durar las 15.000[hr].

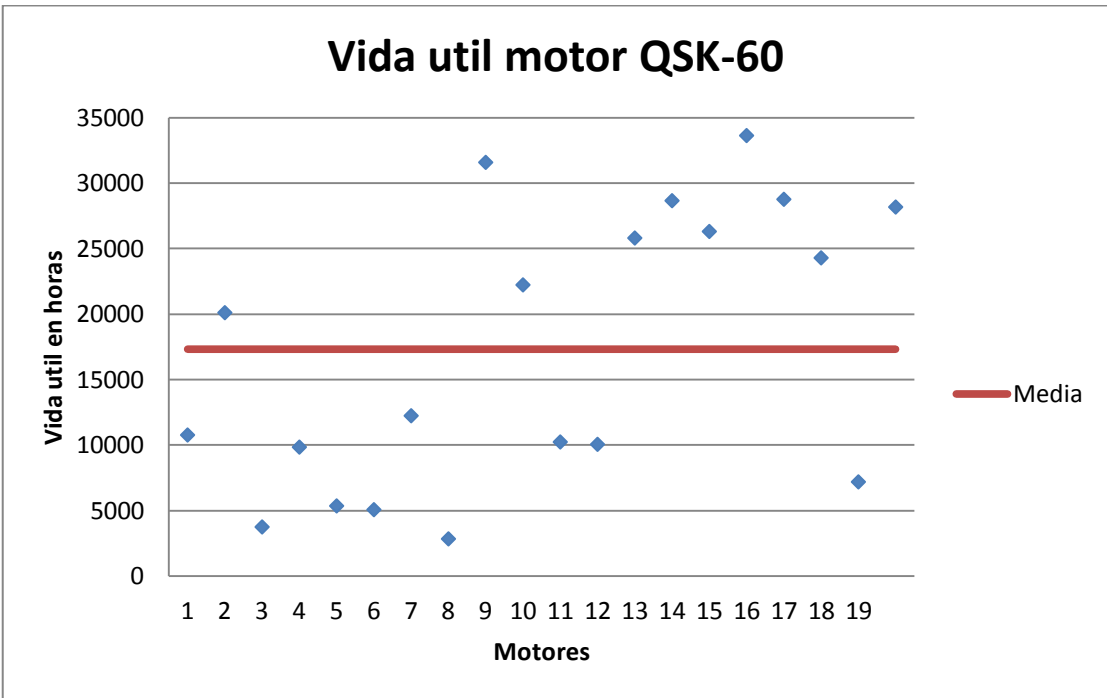


Figura 2.5: Vida útil motores QSK-60 (datos sin censurar)

Se realiza un análisis de la confiabilidad de los motores sin censura de los datos:

| Confiabilidad con dato no censurados |             |    |       |       |       |           |
|--------------------------------------|-------------|----|-------|-------|-------|-----------|
| t                                    | hr          | n  | f     | F     | R     | $\lambda$ |
| 3000                                 | 0-3000      | 1  | 0,050 | 0,050 | 0,950 | 0,05      |
| 6000                                 | 3000-6000   | 3  | 0,150 | 0,200 | 0,800 | 0,19      |
| 9000                                 | 6000-9000   | 1  | 0,050 | 0,250 | 0,750 | 0,07      |
| 12000                                | 9000-12000  | 4  | 0,200 | 0,450 | 0,550 | 0,36      |
| 15000                                | 12000-15000 | 1  | 0,050 | 0,500 | 0,500 | 0,10      |
| 18000                                | 15000-18000 | 0  | 0,000 | 0,500 | 0,500 | 0,00      |
| 21000                                | 18000-21000 | 1  | 0,050 | 0,550 | 0,450 | 0,11      |
| 24000                                | 21000-24000 | 1  | 0,050 | 0,600 | 0,400 | 0,13      |
| 27000                                | 24000-27000 | 3  | 0,150 | 0,750 | 0,250 | 0,60      |
| 30000                                | 27000-30000 | 3  | 0,150 | 0,900 | 0,100 | 1,50      |
| 33000                                | 30000-33000 | 1  | 0,050 | 0,950 | 0,050 | 1,00      |
| 36000                                | 33000-36000 | 1  | 0,050 | 1,000 | 0,000 | 0,00      |
|                                      |             | 20 |       |       |       |           |

Tabla 2.9: Tabla de confiabilidad con datos sin censurar motor QSK 60

Se verifica que el 45% de los camiones sobreviven a las 21.000[hr].

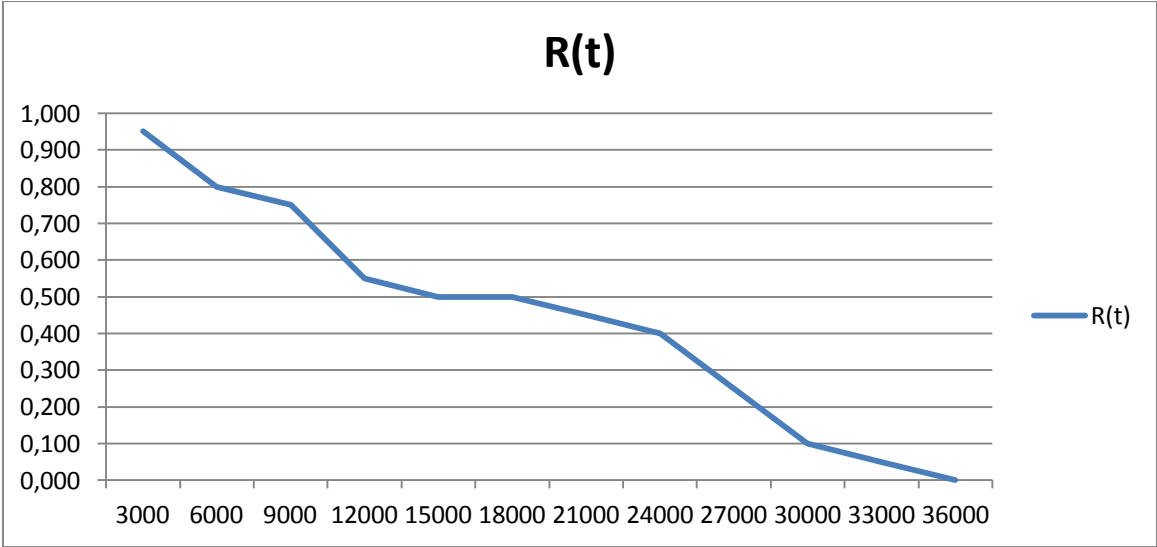


Figura 2.6: Confiabilidad de motores QSK-60 (datos sin censurar)

En caso particular no es necesario censurar datos, ya que se debería censurar el 50% de las observación (los motores que no llegaron a las 15.000 [hr]).

## 2.2 Comparación y selección del modelo de motor diésel con menor costo de ciclo de vida

A continuación se realiza el estudio, para escoger el modelo de motor con mejor costo de ciclo de vida con el fin de realizar la optimización de mantenimiento solamente a este.

Para tal objetivo, se utiliza el método LCCA basa en la norma británica BS 3811: 1993, cuyo modelo matemático es:

$$C_{lc} = C_a + C_o + C_s + C_u + C_{il} + C_m + C_t$$

Siendo:

Clc: Costo de ciclo de vida; Costo total de posesión del activo.

Ca: Costo de adquisición; Costo de inversión inicial, valor del activo, capacitaciones iniciales, montaje, etc.

Co: Costo de operación; Sueldos de operadores, sueldos de supervisores, combustible, etc.

Cs: Costo de apoyo logístico; Mantenimiento, insumos y consumibles (no combustible).

Cu: Costo de no disponibilidad; Lucro cesante, ingresos no percibidos.

Cil: Costo de pérdidas indirectas; Pérdida de calidad del producto terminado, reprocesamiento del producto.

Cm: Costo de modificaciones; Modificaciones para aumentar la tasa de producción.

Ct: Costo de retiro: Costo de retirar el activo, traslado y manejo de material reciclado.

En este estudio, solo se considera los costos diferenciales, los que efectivamente son diferentes en cada motor, por lo cual la ecuación anterior se modifica:

$$C_{lc} = C_a + C_o + C_s + C_u$$

Siendo:

Clc: Costo de ciclo de vida; Costo total de posesión del activo.

Ca: Costo de adquisición; Valor del activo, capacitaciones iniciales, montaje, etc.

Co: Costo de operación; Combustible.

Cs: Costo de apoyo logístico; Mantenimiento (Reparación mayor).

Cu: Costo de no disponibilidad; Lucro cesante, ingresos no percibidos.

Ca = Costo de valor del motor:

| MOTOR            | VALOR NUEVO (USD) |
|------------------|-------------------|
| QSK60 SS TIER II | \$ 490.000        |
| MTU 16V / S4000  | \$ 410.000        |

Tabla 2.10: Valor de los motores nuevos

La vida promedio de los motores (sin censura):

- MTU = 20.038 [hr]
- QSK60 = 17.345 [hr]

Co = Costo de operación; Combustible:

| consumo promedio por motor [l/hr] |       |
|-----------------------------------|-------|
| S4000                             | 102,2 |
| QK60                              | 135,6 |

Tabla 2.11: Consumo promedio de combustible por motor

Cs = Costo de apoyo logístico; Mantenimiento (Reparación mayor):

| VALORES PROMEDIOS            |               |                            |                  |                        |
|------------------------------|---------------|----------------------------|------------------|------------------------|
| DESCRIPCIÓN COMPONENTE       | PROVEEDOR     | COSTO MANO OBRA REPARACIÓN | COSTO REPUESTO   | COSTO TOTAL REPARACIÓN |
| MOTOR DIESEL MTU 16V / S4000 | DETROIT CHILE | \$ 33.660 [USD]            | \$ 207.784 [USD] | \$ 241.444 [USD]       |
| MOTOR QSK60 SS TIER II       | CUMMINS CHILE | \$ 75.111 [USD]            | \$ 217.114 [USD] | \$ 292.225 [USD]       |

Tabla 2.12: Costo promedio de reparación por motor

Cu = Costo de no disponibilidad; Lucro cesante, ingresos no percibidos:

Indisponibilidad asociada a cada motor:

- MTU = 0,78%
- QSK 60 = 0,92%

El valor de lucro cesante por hora = \$1.200 [USD/hr]

Costo de ciclo de vida por motor:

\* Se evalúa en un periodo de 20.000 hr

-MTU:

$$C_{lc} = 410.000 [USD] + \left( 102,2 \left[ \frac{l}{hr} \right] * 20.000 [hr] * 0,415 \left[ \frac{USD}{l} \right] \right) + 241.444 [USD] + \left( 0,078 * 20.000 [hr] * 1.200 \left[ \frac{USD}{hr} \right] \right) = \$3.371.704 [USD]$$

Costo ciclo de vida en el tiempo:

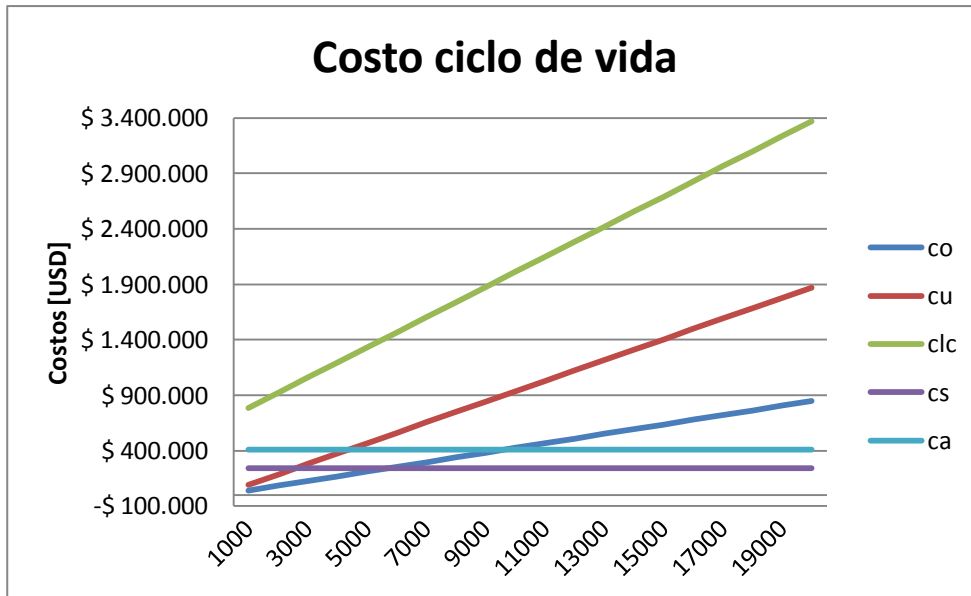


Figura 2.7: Costo ciclo de vida motor MTU

-QSK60:

$$C_{lc} = 490.000 [USD] * 1,16 + \left( 135,6 \left[ \frac{l}{hr} \right] * 20.000 [hr] * 0,415 \left[ \frac{USD}{l} \right] \right) + 292.225 [USD] + \left( 0,092 * 20.000 [hr] * 1.200 \left[ \frac{USD}{hr} \right] \right) = \$4.194.105 [USD]$$

Costo ciclo de vida en el tiempo:

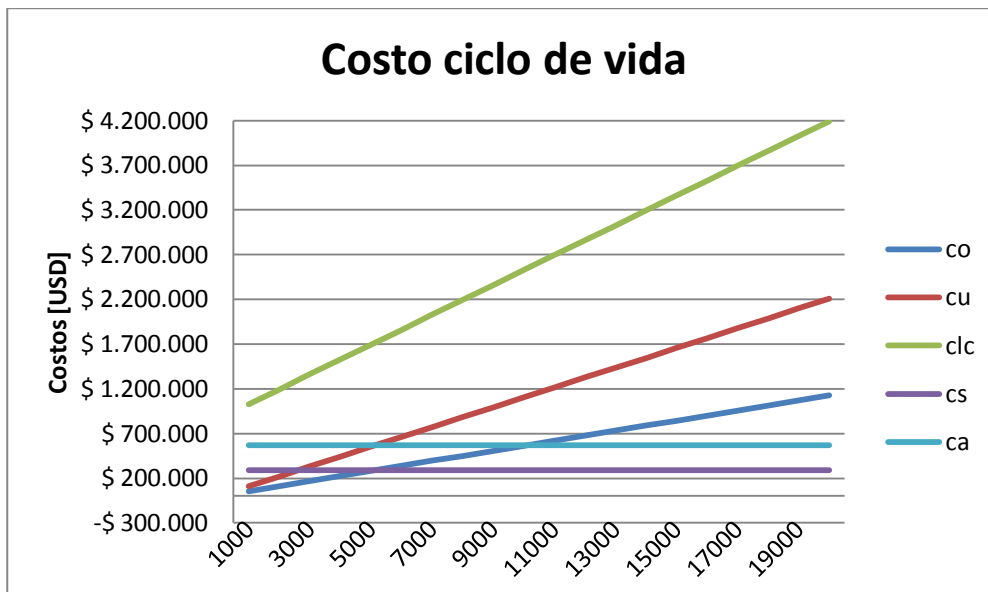


Figura 2.8: Costo ciclo de vida motor QSK-60

Selección del motor:

Se observa que el motor MTU S4000 tiene un costo de ciclo de vida 20% menor que el motor QSK-60, por lo cual se recomienda el uso del motor MTU S4000

| Motor     | Costo de ciclo de vida |
|-----------|------------------------|
| MTU S4000 | \$ 3.371.704           |
| QSK-60    | \$ 4.194.105           |

Tabla 2.13: Costo de ciclo de vida por motor

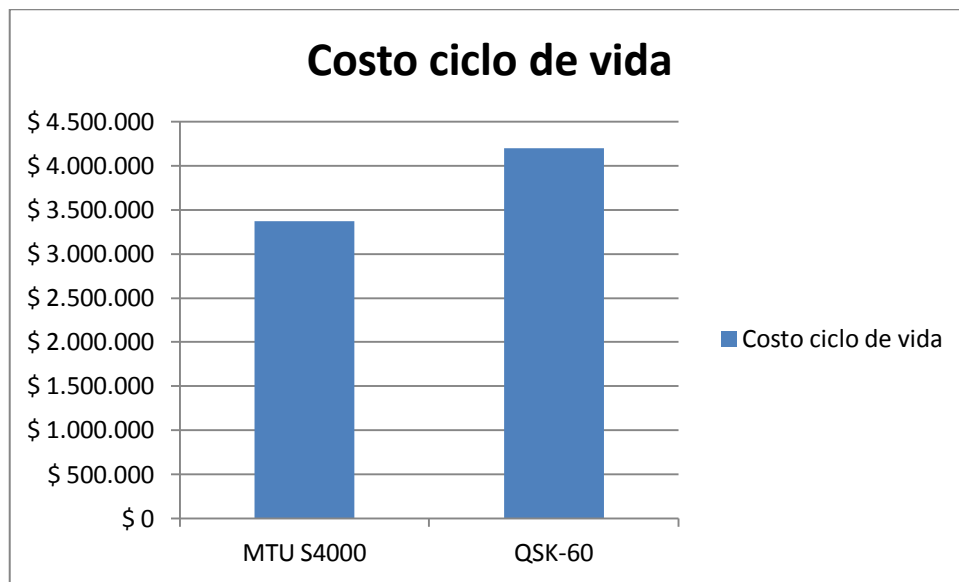


Figura 2.9: Comparación Costo ciclo de vida motores

### 2.3 Modelamiento de la confiabilidad de un motor MTU S4000

Se realiza un levantamiento de las fallas historia del motor con mayo vida útil instalado de la flota de motores MTU 16V S4000.

| t     | O.T.   | Fecha      | TTF<br>(hr) | TTR<br>(hr) | Descripción                              | Sistema             |
|-------|--------|------------|-------------|-------------|------------------------------------------|---------------------|
|       |        | 17-10-2011 |             |             |                                          |                     |
| 3200  | 290941 | 15-05-2012 | 3200        | 17          | CHEQUEAR PARAMETROS MOTOR DIESEL         | CONTROL ELECTRONICO |
| 4276  | 294734 | 25-07-2012 | 1077        | 4           | MOTOR ARRANQUE                           | ELECTRICO           |
| 6278  | 302364 | 04-12-2012 | 2002        | 48          | RVS. TEMPERATURA DE ACEITE M. DIESEL     | LUBRICACIÓN         |
| 6384  | 302589 | 11-12-2012 | 106         | 2           | BAJAR DATOS DE MOTOR DIESEL              | CONTROL ELECTRONICO |
| 7233  | 305726 | 05-02-2013 | 849         | 2           | RVS. P° TURBO BANCO IZQUIERDO            | SENSORES            |
| 7870  | 308533 | 19-03-2013 | 637         | 4           | AUMENTO EN DIFERENCIA DE T° DE ESCAPES   | ESCAPE              |
| 7976  | 308804 | 26-03-2013 | 106         | 5           | TEMPERATURA DE ACEITE MOTOR ERRATICA     | SENSORES            |
| 8355  | 310292 | 20-04-2013 | 379         | 16          | CAMBIAR BOMBA PRELUBE                    | LUBRICACIÓN         |
| 8841  | 312095 | 22-05-2013 | 485         | 30          | T° DE ACEITE MOTOR TENDENCIA A LA BAJA   | LUBRICACIÓN         |
| 9038  | 312606 | 04-06-2013 | 197         | 6           | INCREMENTO EN LA PRESION DE BLOW BY      | SENSORES            |
| 9842  | 315830 | 27-07-2013 | 804         | 16          | CMB VALVULAS CALEFACCION MOTOR DIESEL    | REFRIGERANCION      |
| 9872  | 315889 | 29-07-2013 | 30          | 6           | RVS.SISTEMA/COMBUSTIBLE POR BAJA VISCOSI | COMBUSTIBLE         |
| 9887  | 315983 | 30-07-2013 | 15          | 32          | REVISAR PARAMETROS MOTOR DIESEL          | CONTROL ELECTRONICO |
| 10448 | 318792 | 05-09-2013 | 561         | 2           | RVS M.DIESEL POR PLOMO EN ALZA           | LUBRICACIÓN         |
| 11813 | 323855 | 04-12-2013 | 1365        | 12          | RVS M.DIESEL POR PLOMO EN ALZA           | LUBRICACIÓN         |
| 14558 | 334115 | 03-06-2014 | 2745        | 36          | REVISAR T° ESCAPES. 3,4,5,6 L            | SENSORES            |
| 15301 | 337110 | 22-07-2014 | 743         | 16          | REVISAR T° ESCAPES. 3,4,5,6 IZQ. Y DER.  | SENSORES            |
| 17954 | 347439 | 13-01-2015 | 2654        | 32          | CMB DE ASPA VENTILADOR                   | REFRIGERANCION      |
| 17970 | 347511 | 14-01-2015 | 15          | 4           | REVISION MOTOR DIESEL                    | CONTROL ELECTRONICO |
| 22716 | 369065 | 23-11-2015 | 4746        | 6           | FUGA DE ACEITE MOTOR                     | ESTRUCTURAL         |
| 23277 | 372038 | 30-12-2015 | 561         | 8           | LUZ AMBAR DE MOTOR DIESEL CMB ACTUADORES | COMBUSTIBLE         |
| 23550 | 373443 | 17-01-2016 | 273         | 2           | CAMBIO EMPAQUETADURA CARTER              | ESTRUCTURAL         |
| 24551 | 378628 | 23-03-2016 | 1001        | 12          | CAMBIO MANGUITO DESCARGA TURBO           | ESCAPE              |

Tabla 2.14: Historial de falla Motor MTU

A continuación se presenta la tendencia de las fallas en el tiempo:

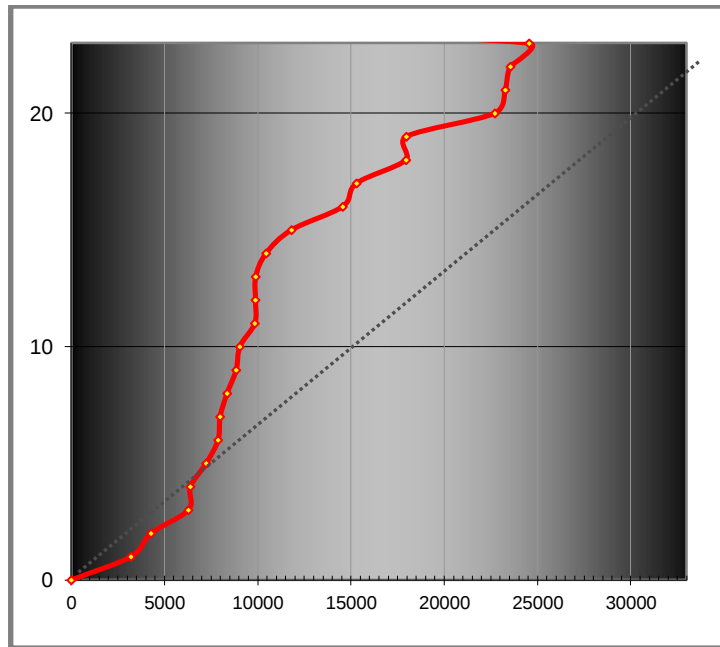


Figura 2.10: Tendencia de fallas motor MTU

\* Se observa que a los 7500 [hr] aumenta dramáticamente la pendiente de la tendencia de falla (tasa de falla  $[\Delta \text{falla} / \Delta t]$ ).

### 2.3.1 Axiomas del modelo

Para modelar la distribución se define ciertas restricciones:

- El estado del componente es binario (operando o con falla)
- La tasa de fallas solo depende del tiempo desde la última intervención
- Los costos pueden ser estimados o conocidos hasta el nivel del componente
- No hay restricciones acerca de cuándo se pueda realizar las intervenciones (equipo redundantes)
- Los componentes están bajo la estrategia de mantenimiento correctivo (post-falla)
- La intervención dejan el componente como nuevo
- El horizonte del análisis es infinito

- No se considera el valor del dinero en el tiempo (sin depreciación)

### 2.3.2 Uso del modelo de Weibull

El estudio para establecer los parámetros de weibull nos permite estimar una expresión de su tasa de fallas y de su función de confiabilidad. Esta última permite establecer tiempos entre inspecciones al fijar niveles basales de confiabilidad. El valor de  $\beta$  nos muestra en que parte de la curva de la bañera se encuentra el componente para un modo de falla dada. Si  $\beta < 1$  el componente está en el área de falla temprana, si  $\beta = 1$  el componente está en el área de falla normal y si el  $\beta > 1$  el componente esta envejecido.

Se utiliza el programa estadístico minitab 17, para parametrizar la distribución Weibull:

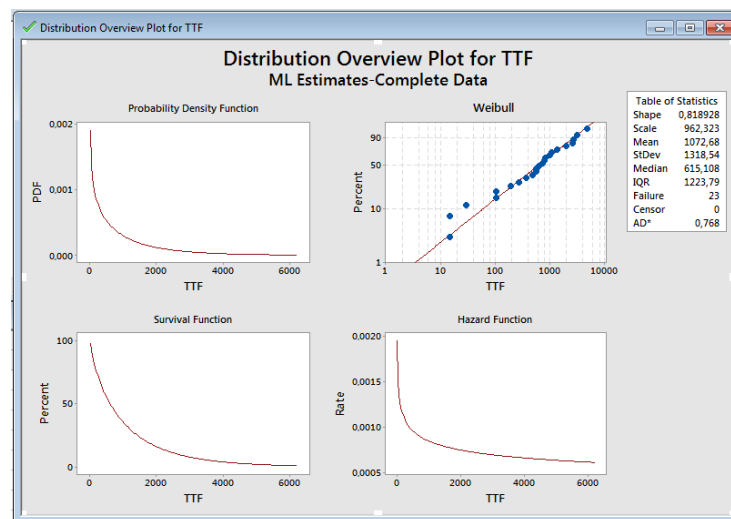


Figura 2.11: Parámetros de la distribución Weibull

Obteniendo los siguientes parámetros:

- Parámetro de forma;  $\beta = 0,652094$
- Factor de escala;  $\eta = 1059,880461$
- Media aritmética;  $\mu = 1442,9410$

- Desviación estándar;  $\sigma = 2292,3418$
- Parámetro de localización;  $\gamma = 0$

### 2.3.2.1 Función densidad de falla f(t)

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} & t > \gamma \\ 0 & - \end{cases}$$

Dónde:

- $\beta = 0,652094$
- $\eta = 1059,880461$
- $\gamma = 0$

$$f(t) = \frac{0,652094}{1059,880461} * \left( \frac{t-0}{1059,880461} \right)^{0,652094-1} * e^{-\left( \frac{t-0}{1059,880461} \right)^{0,652094}}$$

Grafica de densidad de falla:

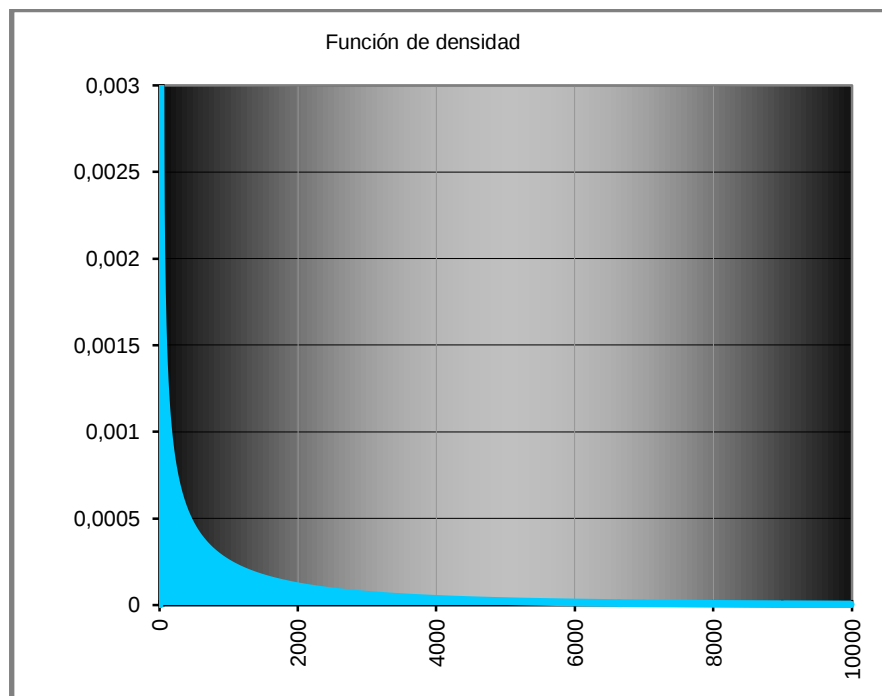


Figura 2.12: Curva Función de densidad de falla

### 2.3.2.2 Curva de confiabilidad R(t)

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} & t > \gamma \\ 1 & - \end{cases}$$

Dónde:

- $\beta = 0,652094$
- $\eta = 1059,880461$
- $\gamma = 0$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-0}{1059,880461}\right)^{0,652094}}$$

Grafica de curva de confiabilidad:

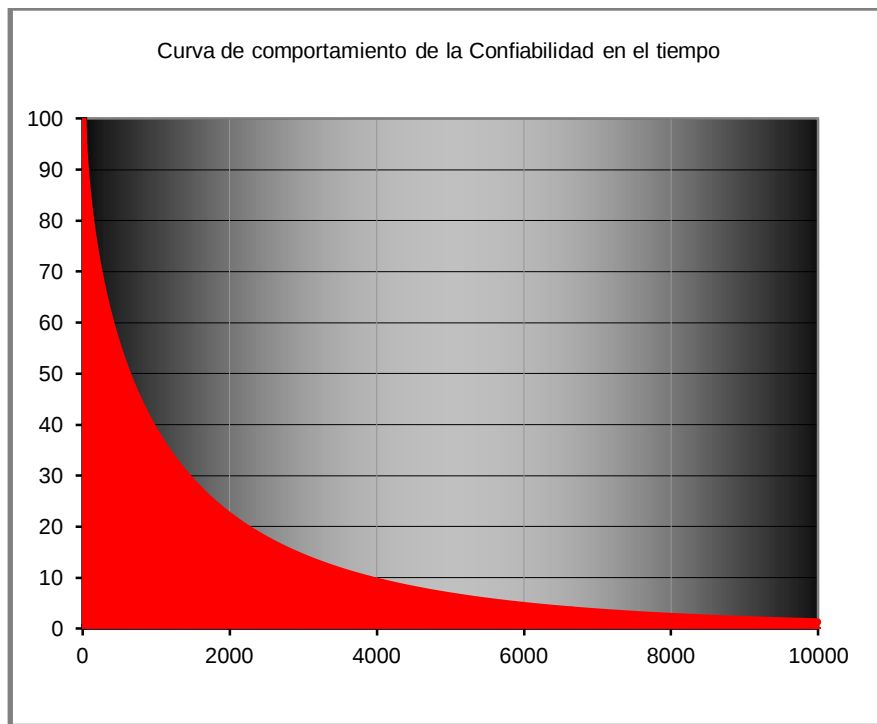


Figura 2.13: Curva de Confiabilidad

### 2.3.2.3 Probabilidad acumulada de falla del componente

$$F(t) = 1 - R(t)$$
$$= \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} & t > \gamma \\ 0 & - \end{cases}$$

Dónde:

- $\beta = 0,652094$
- $\eta = 1059,880461$
- $\gamma = 0$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-0}{1059,880461}\right)^{0,652094}}$$

Grafica de curva de Probabilidad:

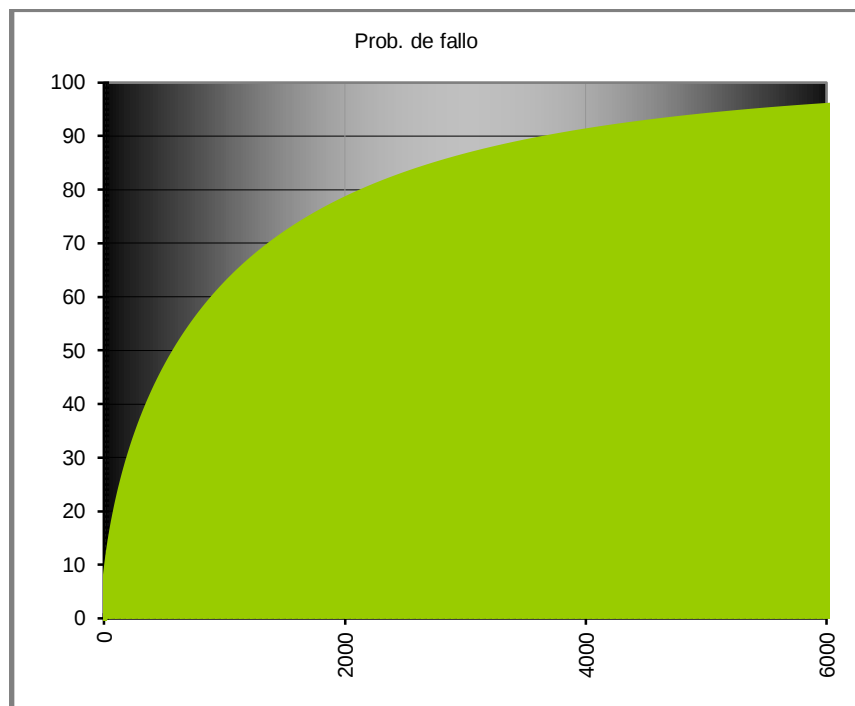


Figura 2.14: Curva de Probabilidad de falla acumulado

#### 2.3.2.4 Función de tasa de falla $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$
$$= \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} & t > \gamma \\ 0 & - \end{cases}$$

Dónde:

- $\beta = 0,652094$
- $\eta = 1059,880461$
- $\gamma = 0$

$$\lambda(t) = \frac{0,652094}{1059,8804} * \left(\frac{t - 0}{1059,8804}\right)^{0,65094-1}$$

Grafica de curva de Tasa de falla:

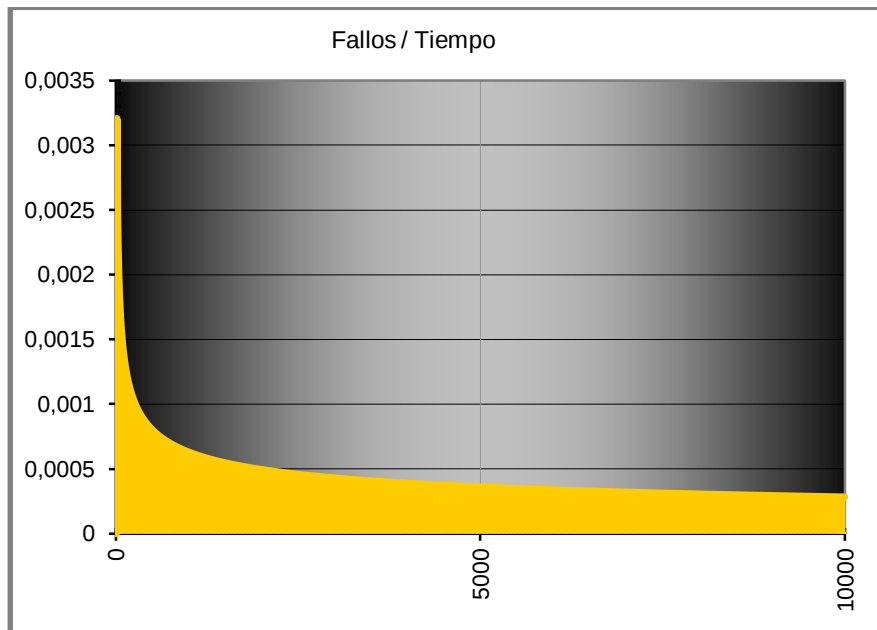


Figura 2.15: Curva de Tasa de falla

\* Se Observa que la tasa de falla es decreciente tendiendo a ser constante en el tiempo.

Notas:

- Para el caso  $\gamma=0$ ,  $\beta=1$  la ley de weibull se reduce a la ley exponencial con parámetro  $\lambda=1/\eta$ . Para  $\beta>3$  la ley converge hacia la distribución normal.
- El tiempo característico  $\eta$  representa la duración esperado en 63.2% de los casos.
- $\gamma$  positivo es la vida asegurada,  $\gamma$  negativo es el predesgaste del componente.

#### 2.3.2.5 Tiempo medio entre falla (TMBF)

El tiempo medio entre falla, es el promedio de los tiempos operativos entre fallas, estadísticamente el TMBF es igual a la esperanza de vida  $E(t)$ .

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Dónde:

- $\beta = 0,652094$
- $\eta = 1059,880461$
- $\gamma = 0$

$$MTBF = 0 + 1059,88 * \Gamma\left(1 + \frac{1}{0,652094}\right)$$

$$MTBF = 1442,94 \text{ [hr]}$$

La confiabilidad en el tiempo MTBF;  $R(1443) = 29,44 \%$

#### 2.3.2.6 Número esperado de fallas en un intervalo T

A continuación se entrega el numero esperado de falla a los largo del tiempo útil  $n(t)$  obtenido por la integral de la función de riesgo de falla  $\lambda(t)$ . La tabla muestra los datos obtenidos de en la integración de la función de riesgo de falla por cada periodo y la figura representa la función de cantidad de falla a lo largo de la vida útil del componente.

El número esperado de fallas en un intervalo  $T$ ;

$$n(T) = \int_0^T \lambda(t) dt$$

$$n(t) = \begin{cases} \left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta & T > \gamma \\ 0 & - \end{cases}$$

Dónde:

- $\beta = 0,652094$
- $\eta = 1059,880461$
- $\gamma = 0$

$$n(t) = \left(\frac{T-0}{1059,88}\right)^{0,652094}$$

Grafica del número de fallas:

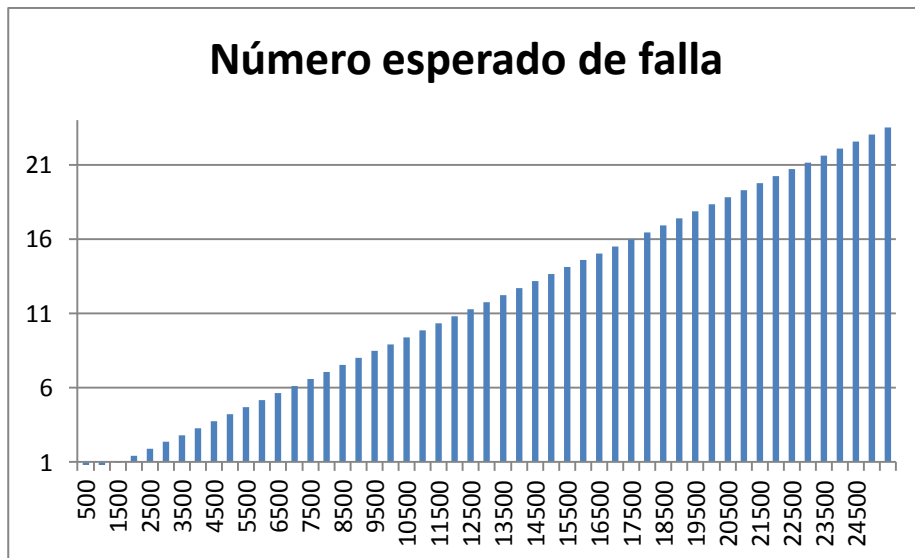


Figura 2.16: Número esperado de falla

### 2.3.2.7 Tiempos promedios generales del motor

Tiempos promedios generales del motor:

- Tiempo promedio para fallar (MTTF) = 1067,428
- Tiempo promedio de reposición (MTTR) = 13,826
- Tiempo promedio entre falla (MTBF) = 1081,254
- Tiempo total operativo = 24550,853
- Tiempo total fuera de servicio = 318

### 2.3.2.8 Disponibilidad del equipo

Disponibilidad del equipo:

$$A(i) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{1067,428}{1067,428 + 13,826} = 0,9872 \approx 98,72\%$$

### 2.3.3 Validación del Modelo

Se realiza la prueba de validación Kolmogorov-Smirnov en las distintas distribuciones:

- Gamma; Test K-S: 0,0865; No rechazada.
- Exponencial; Test K-S: 0,1227; No rechazada.
- Lognormal; Test K-S: 0,1178; No rechazada.
- Weibull; Test K-S: 0,1032; No rechazada.

No obstante, en el caso particular de este trabajo se utiliza la distribución de Weibull, por dos razones fundamentales, la primera porque la tasa de falla es decreciente y según la literatura especializada es la distribución más usada, la segunda razón es que todos los modelos matemáticos de optimización estudiados para realizar este trabajo se basan en la distribución de Weibull.

## 2.4 Análisis de Costos

Se realiza un levantamiento de los costos [USD] relacionados a las fallas en el historial de motor, obteniendo la siguiente tabla.

| t     | Work Order | Fecha      | TTF (hr) | TTR (hr) | Intervención [USD] | Falla [USD] | Sistema             |
|-------|------------|------------|----------|----------|--------------------|-------------|---------------------|
|       |            | 17-10-2011 |          |          |                    |             |                     |
| 3200  | 290941     | 15-05-2012 | 3200     | 17       | \$ 350             | \$ 20.400   | CONTROL ELECTRONICO |
| 4276  | 294734     | 25-07-2012 | 1077     | 4        | \$ 244             | \$ 4.800    | ELECTRICO           |
| 6278  | 302364     | 04-12-2012 | 2002     | 48       | \$ 1.315           | \$ 57.600   | LUBRICACIÓN         |
| 6384  | 302589     | 11-12-2012 | 106      | 2        | \$ 477             | \$ 2.400    | CONTROL ELECTRONICO |
| 7233  | 305726     | 05-02-2013 | 849      | 2        | \$ 49              | \$ 2.400    | SENSORES            |
| 7870  | 308533     | 19-03-2013 | 637      | 4        | \$ 1.810           | \$ 4.800    | ESCAPE              |
| 7976  | 308804     | 26-03-2013 | 106      | 5        | \$ 1.855           | \$ 6.000    | SENSORES            |
| 8355  | 310292     | 20-04-2013 | 379      | 16       | \$ 703             | \$ 19.200   | LUBRICACIÓN         |
| 8841  | 312095     | 22-05-2013 | 485      | 30       | \$ 718             | \$ 36.000   | LUBRICACIÓN         |
| 9038  | 312606     | 04-06-2013 | 197      | 6        | \$ 4.703           | \$ 7.200    | SENSORES            |
| 9842  | 315830     | 27-07-2013 | 804      | 16       | \$ 417             | \$ 19.200   | REFRIGERANCIÓN      |
| 9872  | 315889     | 29-07-2013 | 30       | 6        | \$ 122             | \$ 7.200    | COMBUSTIBLE         |
| 9887  | 315983     | 30-07-2013 | 15       | 32       | \$ 776             | \$ 38.400   | CONTROL ELECTRONICO |
| 10448 | 318792     | 05-09-2013 | 561      | 2        | \$ 534             | \$ 2.400    | LUBRICACIÓN         |
| 11813 | 323855     | 04-12-2013 | 1365     | 12       | \$ 296             | \$ 14.400   | LUBRICACIÓN         |
| 14558 | 334115     | 03-06-2014 | 2745     | 36       | \$ 3.385           | \$ 43.200   | SENSORES            |
| 15301 | 337110     | 22-07-2014 | 743      | 16       | \$ 378             | \$ 19.200   | SENSORES            |
| 17954 | 347439     | 13-01-2015 | 2654     | 32       | \$ 3.911           | \$ 38.400   | REFRIGERANCIÓN      |
| 17970 | 347511     | 14-01-2015 | 15       | 4        | \$ 110             | \$ 4.800    | CONTROL ELECTRONICO |
| 22716 | 369065     | 23-11-2015 | 4746     | 6        | \$ 122             | \$ 7.200    | ESTRUCTURAL         |
| 23277 | 372038     | 30-12-2015 | 561      | 8        | \$ 2.983           | \$ 9.600    | COMBUSTIBLE         |
| 23550 | 373443     | 17-01-2016 | 273      | 2        | \$ 147             | \$ 2.400    | ESTRUCTURAL         |
| 24551 | 378628     | 23-03-2016 | 1001     | 12       | \$ 1.364           | \$ 14.400   | ESCAPE              |

Tabla 2.15: Costos relacionados a las fallas en el historial de motor

#### 2.4.1 Costo de intervención

Se realizar el levantamiento histórico de las intervenciones en el registro de órdenes de trabajos, para obtener el costo de intervención, considerando el costo de h-h y el costo del repuesto cambiado.

#### 2.4.2 Costo de falla

Antes de todo, se comenta que el costo de falla, relacionado a la perdida de producción o lucro cesante, es la diferencia entre los ingreso y los costos variables, esta diferencia es compleja de calcular, ya que la detención de un camión no necesariamente representa un perdida de producción, ya que la proyección de producción se realizó con un factor de servicio que considera la indisponibilidad de los equipos, es decir, en el caso de la faena del soldado, con 30 camiones disponible, solo son necesarios 26 camiones para cumplir con el plan minero, es decir de debe calcular la probabilidad de que fallen 4 camiones simultáneamente, durante esa fracción de tiempo se puede considera como perdida de producción, no obstante de lo anterior, la operación cuenta con un stock de material cerca de la alimentación de la chancadora con el fin de mitigar la perdida de producción, es decir, la operación cuenta con un “pulmón”, esta pila de stock es suficientemente grande para alimentar a la chancadora durante la fracción de tiempo que se demora en reparar y poner en servicio los camiones, por lo cual el costo de falla para el proceso de traslado de material es el costo de reponer el nivel de la pila de stock.

Visto lo anterior, el costo de falla por hora, fue entregado por la superintendencia de operaciones, el cual tiene un valor de 1200 [USD/hr].

Al realizar el levantamiento de las órdenes de trabajos, se identifica el tiempo de reparación (TTR) y se multiplica por el costo de falla por hora (1200[USD/hr]).

#### 2.4.3 Costo de almacenamiento

Para el estudio de este caso, se considera el 15% del costo de intervención como costo de almacenamiento.

#### 2.4.4 Costo de mantenimiento preventivo

Los costos de mantenimiento preventivo, son todos los costos que se realizan en la intervención preventiva del equipo, considerando la h-h, apl (repuestos), e insumos. Se consideran los siguientes ítems:

- Lubricante; 316 x 6 = 1896
- H-H mantenedor; 8 x 40 = 320
- Filtros combustible; 4 x 20 = 54
- Filtros aceite; 4 x 20 = 80
- Filtro centrifugo; 1 x 8 = 8
- Equipos auxiliares; 50 = 50

Costo de mantenimiento preventiva = 2408 [USD]

El costo de intervención preventiva es la sumatoria de los costos de mantenimiento preventiva, más el costo de intervención (valor del repuesto cambiado)

#### 2.4.5 Costo de emergencia

El costo de emergencia, se considera como el costo realizado en una intervención de emergencia, es decir, es la sumatoria entre el costo de intervención y el costo de falla.

#### 2.4.6 Costos de mantenimiento de emergencia por sistema

Se realiza un levantamiento de los costos de intervención (repuestos y h-h) y de los costos de falla (lucro cesante):

| Sistema             | TTF<br>(hr) | TTR<br>(hr) | Costos [USD] |            |            |
|---------------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|
|                     |             |             | Intervención | Falla      | Emergencia |
| LUBRICACIÓN         | 4792        | 108         | \$ 3.567     | \$ 129.600 | \$ 133.167 |
| SENSORES            | 4640        | 65          | \$ 10.371    | \$ 78.000  | \$ 88.371  |
| CONTROL ELECTRONICO | 3336        | 55          | \$ 1.712     | \$ 66.000  | \$ 67.712  |
| REFRIGERACIÓN       | 3457        | 48          | \$ 4.328     | \$ 57.600  | \$ 61.928  |
| ESCAPE              | 1638        | 16          | \$ 3.173     | \$ 19.200  | \$ 22.373  |
| COMBUSTIBLE         | 591         | 14          | \$ 3.105     | \$ 16.800  | \$ 19.905  |
| ESTRUCTURAL         | 5019        | 8           | \$ 269       | \$ 9.600   | \$ 9.869   |
| ELECTRICO           | 1077        | 4           | \$ 244       | \$ 4.800   | \$ 5.044   |

Tabla 2.16: Costos de Mantenimiento

Se realiza un diagrama de Pareto valorizado:

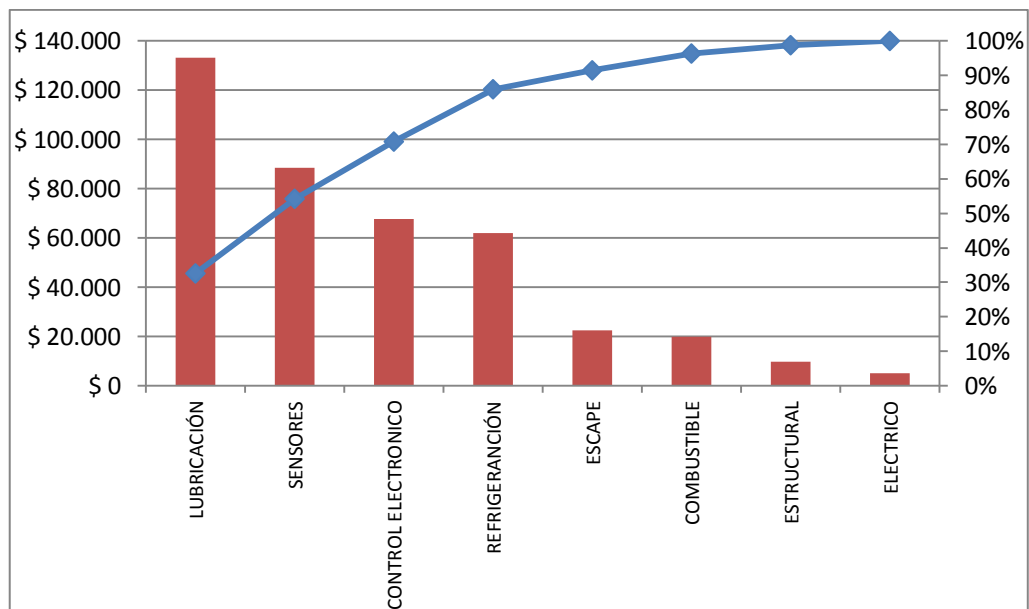


Figura 2.17: Diagrama de Pareto valorizado de falla

## 2.5 Selección de la estrategia de mantenimiento óptima

En resumen, las estrategias de mantenimiento más utilizadas en la actualidad son:

- Correctivas: sustitución de elemento por falla.
- Preventivas: sustitución de elemento antes de falla.
- Predictivas: sustitución de elemento tras síntoma.
- Productivas: sustitución preventiva o predictiva más mejoramiento continuo.

La idea fundamental es presentar un modelo que permita analizar cuál es la mejor combinación de políticas de mantenimiento en una instalación industrial o en un equipo específico. La definición de las estrategias de mantenimiento requiere:

- La tasa de falla, entendida como modalidad y frecuencia.
- El costo global de la intervención preventiva, entendido como la suba del costo del repuesto más el costo del mantenimiento preventivo.
- El costo global de emergencia, entendido como la suba del costo del repuesto más el costo del lucro cesante.

La selección de la estrategia de mantenimiento, siempre debe buscar que la estrategia o conjunto de estrategias sea la que genere menor costo total de mantenimiento, pero a la vez ser factible de realizar.

Por lo cual la selección se basa en dos factores determinantes, siendo el primero la factibilidad técnica de la implementación, y el segundo factor es el económico, la estrategia de mantenimiento óptima debe minimizar el costo global del mantenimiento.

Factibilidad técnica; la estrategia se selecciona bajo el siguiente algoritmo:

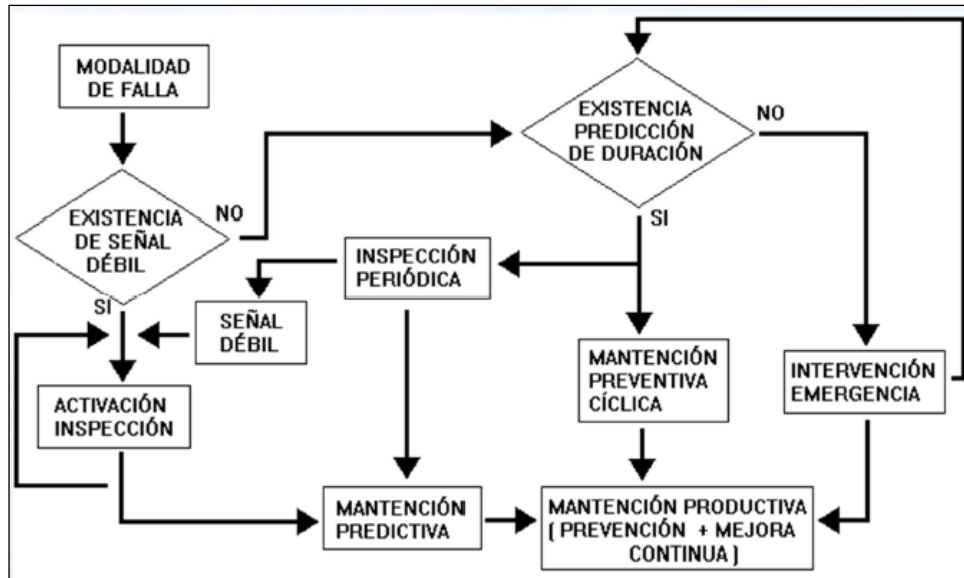


Figura 2.18: Algoritmo de selección de estrategia según factibilidad técnica

Esta lógica busca encontrar si el componente presenta alguna señal física (vibración, temperatura, desgaste, fisura, voltaje, corriente, etc.) que se pueda relacionar con el estado del componente con el fin de aplicar un mantenimiento pre falla, sea este preventivo o predictivo.

Y si no presenta alguna señal débil pero se tiene su historial de falla, por medios estadísticos se obtiene o mejor dicho es define el tiempo de cambio óptimo, con el fin de aplicar un mantenimiento pre falla, tipo preventivo.

Y si no existe forma de prever la falla, solo es aplicable el mantenimiento de emergencia tipo correctivo, con la salvedad (si amerita) de realidad una mejora en el equipo

Factor económico; la estrategia debe minimizar el costo global bajo la siguiente lógica:

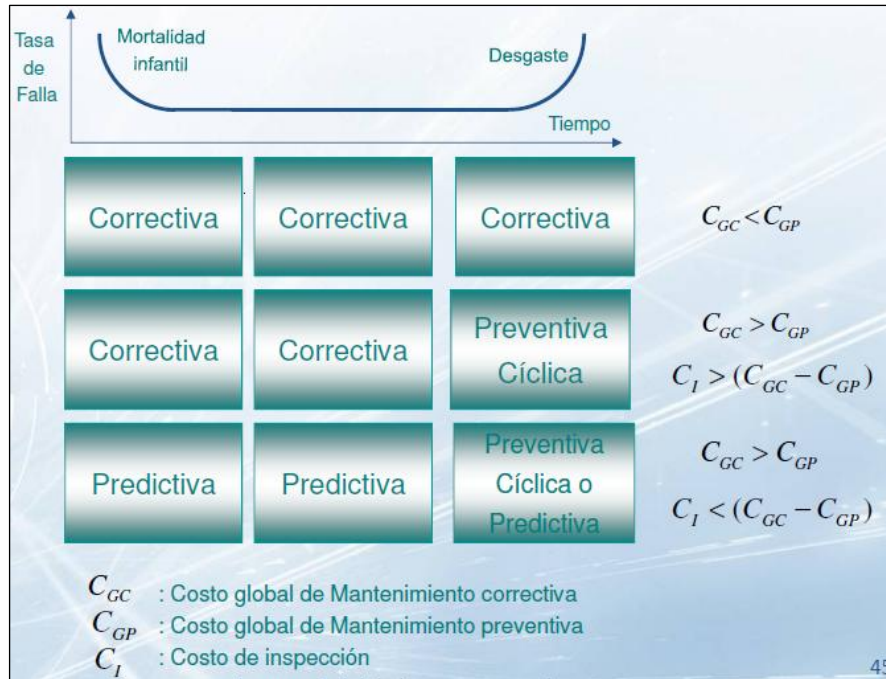


Figura 2.19: Algoritmo de selección de estrategia según factibilidad económica

Desde el punto de vista económico, la estrategia debe buscar minimizar el costo hora de mantenimiento considerando el comportamiento de la tasa de falla, es decir la edad del equipo. La estrategia debe “equilibrar” los dos costos más importantes del mantenimiento; el costo de emergencia y el costo de intervención preventiva:

$$Ec = \frac{Ce * F(t) + Cp * R(t)}{MTBM_t + MTTR_t}$$

Siendo:

$$MTBM_t = R(t) * T + F(t) * MTBF_t$$

$$MTTR_t = R(t) * MTTR_p + F(t) * MTTR_e$$

Quedando:

$$Ec = \frac{Ce * F(t) + Cp * R(t)}{[R(t) * T + F(t) * MTBF_t] + [R(t) * MTTR_p + F(t) * MTTR_e]}$$

Se realiza el modelamiento:

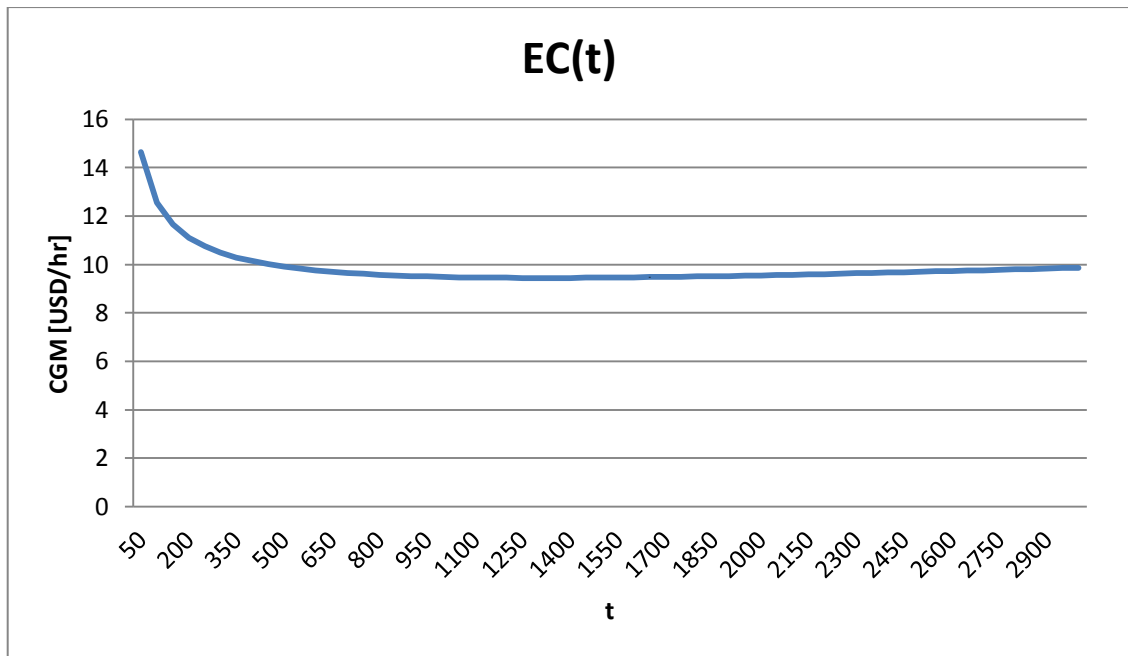


Figura 2.20: Modelamiento del costo de mantenimiento en función del tiempo de intervención

Se observa que el costo global de mantenimiento se obtiene en 1300 [hr], no obstante el comportamiento de la curva de costo es casi constante entre las 950 y 1850 [hr], por lo cual es factible moverse entre esos dos valores.

| t    | f(t)     | F(t)     | R(t)     | $\lambda(t)$ | n(t)     | Ec       |
|------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| 1300 | 0,000183 | 0,680959 | 0,319041 | 0,000573     | 1,142436 | 9,447723 |

Tabla 2.17: Tiempo óptimo de intervención

\* Este tiempo óptimo está condicionado a la factibilidad técnica, específicamente al periodo de cambio de filtros (combustible, aceite y aire) como de aceite de lubricación.

### 2.5.1 Comparación entre estrategias de mantenimiento

A continuación, se evalúa económicamente la implementación de las estrategias de mantenimiento entre las 950 y 1850 [hr].

Mantenimiento correctivo: los costos de mantenimiento correctivo, se consideran como el costo de intervención más el costo de emergencia por cada número esperado de falla:

$$C(T) = \frac{C_p + C_e * H(T)}{T}$$

Mantenimiento preventivo: los costos de mantenimiento preventivo, considera la probabilidad de costos de las intervenciones preventivas en el periodo de tiempo a evaluar, más la probabilidad de los costos de emergencias en el periodo:

$$C_{mp} = \frac{C_p * R(t) + C_e * (1 - R(t))}{T}$$

Mantenimiento predictivo: considera el costo de inspección y la probabilidad de costo de emergencia en el periodo de tiempo:

$$C_{predic.} = \frac{C_{pred} + C_e * (1 - R(t))}{T}$$

Se evalúa en el periodo 950 a 1850 [hr], obteniendo la siguiente gráfica:

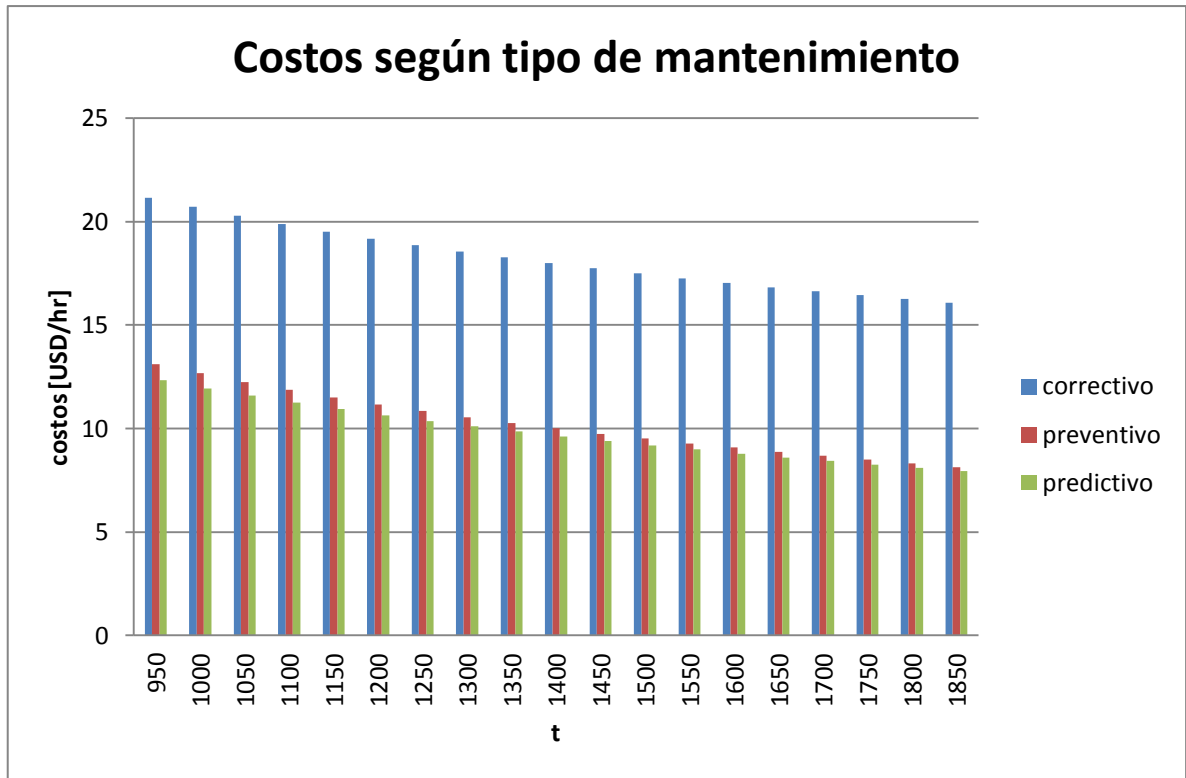


Figura 2.21: Comparación del costo entre las tácticas de mantenimiento en función del tiempo

Se observa que los costos en los tres tipos de mantenimiento disminuyen con el tiempo, siendo su mínimo (en los tres casos) a los 1850 [hr]:

| t    | f(t)    | F(t)     | R(t)     | $\lambda(t)$ | n(t)     | Ec       | C.c      | C.p      | C.predic |
|------|---------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1850 | 0,00012 | 0,762592 | 0,237408 | 0,000507     | 1,437975 | 9,516041 | 16,06947 | 8,140754 | 7,939846 |

Además se observa que:

$$C_{correctivo} > C_{preventivo} \rightarrow 16,07 > 8,14$$

$$C_{predictivo} < (C_{correctivo} - C_{preventivo}) \rightarrow 7,97 < (16,07 - 8,14) \rightarrow 7,97 < 7,93$$

Siguiendo la lógica (aunque estando al límite), se recomienda realizar mantenimiento predictivo hasta que la tasa de falla del equipo aumente.

A continuación se realiza un breve análisis de las señales débiles de los componentes y la técnica predictiva aplicable:

| Sistema             | Señal débil                              | Registro de falla | técnica predictiva                                                                                                             |
|---------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LUBRICACIÓN         | Presión, Temperatura, Particulado        | Si                | Análisis de aceite, parámetros del ECM (temperatura y presión)                                                                 |
| SENSORES            | Resistencia eléctrica                    | No                | Medición de la resistencia eléctrica y trazado de tendencia (proyección de vida)                                               |
| CONTROL ELECTRONICO | Código de falla                          | Si                | Condiciona al código de falla                                                                                                  |
| REFRIGERANCION      | Presión, Temperatura, análisis de acidez | Si                | Análisis del refrigerante, parámetros del ECM (temperatura y presión) fotografía térmica a la bomba de refrigerante            |
| ESCAPE              | Temperatura                              | Si                | fotografía térmica a turbos compresores                                                                                        |
| COMBUSTIBLE         | Presión, Temperatura                     | Si                | Parámetros del ECM (temperatura y presión), fotografía térmica a la bomba de combustible                                       |
| ESTRUCTURAL         | desgaste (juego mecánico) / vibraciones  | No                | Medición del juego axial (tendencia y proyección de vida) medición de vibraciones global (sin FFT)                             |
| ELECTRICO           | Resistencia eléctrica, Voltaje, Amperaje | Si                | Medición de la resistencia eléctrica, medición del voltaje de salida del alternador, amperaje de arranque del motor de partida |

Tabla 2.18: Análisis de las señales débiles de los componentes y la técnica predictiva aplicable.

## 2.6 Determinación de componentes Críticos

La determinación de los componentes críticos se basa en cuatro criterios:

- Sistemas que más afecta al costo global de mantenimiento
- Sistemas que más afecta a la confiabilidad del equipo
- Sistemas que más afecta a la disponibilidad del equipo

- Matriz de decisión basado en la norma S.A.E. JA 1011-12

### 2.6.1 Sistemas que más afecta al costo global de mantenimiento

Los sistemas que más afecta al costo global de mantenimiento:

| Sistema             | TTF (hr) | TTR (hr) | Costos [USD] |            |            |
|---------------------|----------|----------|--------------|------------|------------|
|                     |          |          | Intervención | Falla      | Emergencia |
| LUBRICACIÓN         | 4792     | 108      | \$ 3.567     | \$ 129.600 | \$ 133.167 |
| SENSORES            | 4640     | 65       | \$ 10.371    | \$ 78.000  | \$ 88.371  |
| CONTROL ELECTRONICO | 3336     | 55       | \$ 1.712     | \$ 66.000  | \$ 67.712  |
| REFRIGERANCIÓN      | 3457     | 48       | \$ 4.328     | \$ 57.600  | \$ 61.928  |
| ESCAPE              | 1638     | 16       | \$ 3.173     | \$ 19.200  | \$ 22.373  |
| COMBUSTIBLE         | 591      | 14       | \$ 3.105     | \$ 16.800  | \$ 19.905  |
| ESTRUCTURAL         | 5019     | 8        | \$ 269       | \$ 9.600   | \$ 9.869   |
| ELECTRICO           | 1077     | 4        | \$ 244       | \$ 4.800   | \$ 5.044   |

Tabla 2.19: Costos globales por sistema.

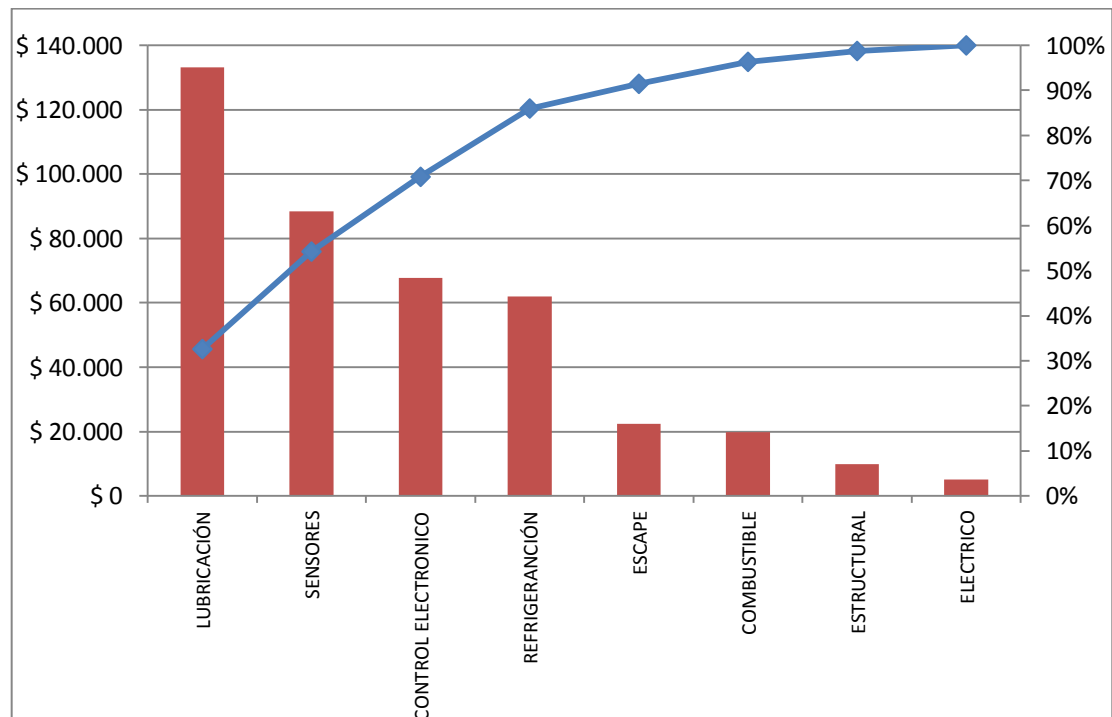


Figura 2.22: Diagrama de Pareto valorizado del costo global de mantenimiento

## 2.6.2 Sistemas que más afecta a la confiabilidad del equipo

Los sistemas que más afecta la confiabilidad del equipo:

| Sistema             | MTBF (hr) | MTTR (hr) | $\lambda$ |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| SENSORES            | 4910      | 13        | 0,000204  |
| LUBRICACIÓN         | 4910      | 22        | 0,000204  |
| CONTROL ELECTRONICO | 6138      | 14        | 0,000163  |
| ESCAPE              | 12275     | 8         | 0,000081  |
| REFRIGERACIÓN       | 12275     | 24        | 0,000081  |
| COMBUSTIBLE         | 12275     | 7         | 0,000081  |
| ESTRUCTURAL         | 12275     | 4         | 0,000081  |
| ELECTRICO           | 24551     | 4         | 0,000041  |

Tabla 2.20: Tasa de falla por sistema.

Como los sistemas están en serie, la confiabilidad del equipo está condicionada con la confiabilidad de cada sistema:

$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

$$R_s(t) = e^{-\int \lambda_s(t) dt} = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int \lambda_i(t) dt} = e^{-\int \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt}$$

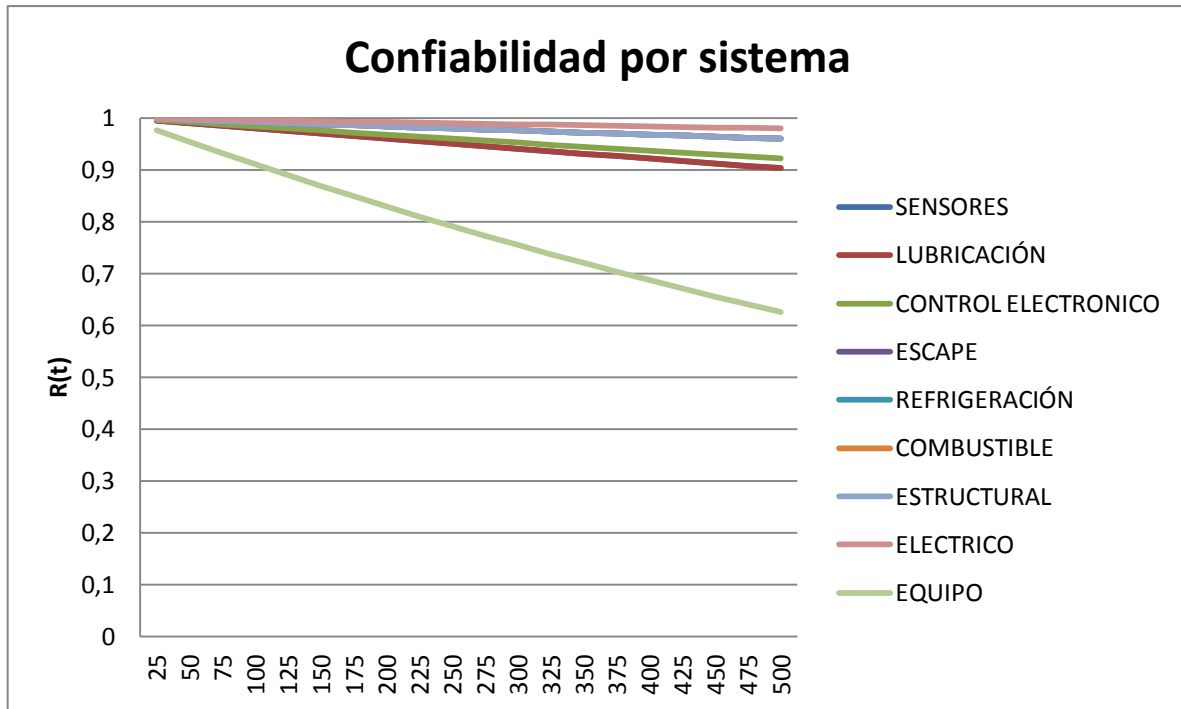


Figura 2.23: Curva de Confiabilidad por sistema del equipo

### 2.6.3 Sistemas que más afecta a la disponibilidad del equipo

Los sistemas que más afecta la disponibilidad del equipo:

| Sistema             | MTBF (hr) | MTTR (hr) | A(i)     |
|---------------------|-----------|-----------|----------|
| SENSORES            | 4910      | 13        | 0,997359 |
| LUBRICACIÓN         | 4910      | 22        | 0,995620 |
| CONTROL ELECTRONICO | 6138      | 14        | 0,997765 |
| ESCAPE              | 12275     | 8         | 0,999349 |
| REFRIGERANCIÓN      | 12275     | 24        | 0,998049 |
| COMBUSTIBLE         | 12275     | 7         | 0,999430 |
| ESTRUCTURAL         | 12275     | 4         | 0,999674 |
| ELECTRICO           | 24551     | 4         | 0,999837 |
| EQUIPO              |           |           | 0,987149 |

Tabla 2.21: Disponibilidad por sistema.

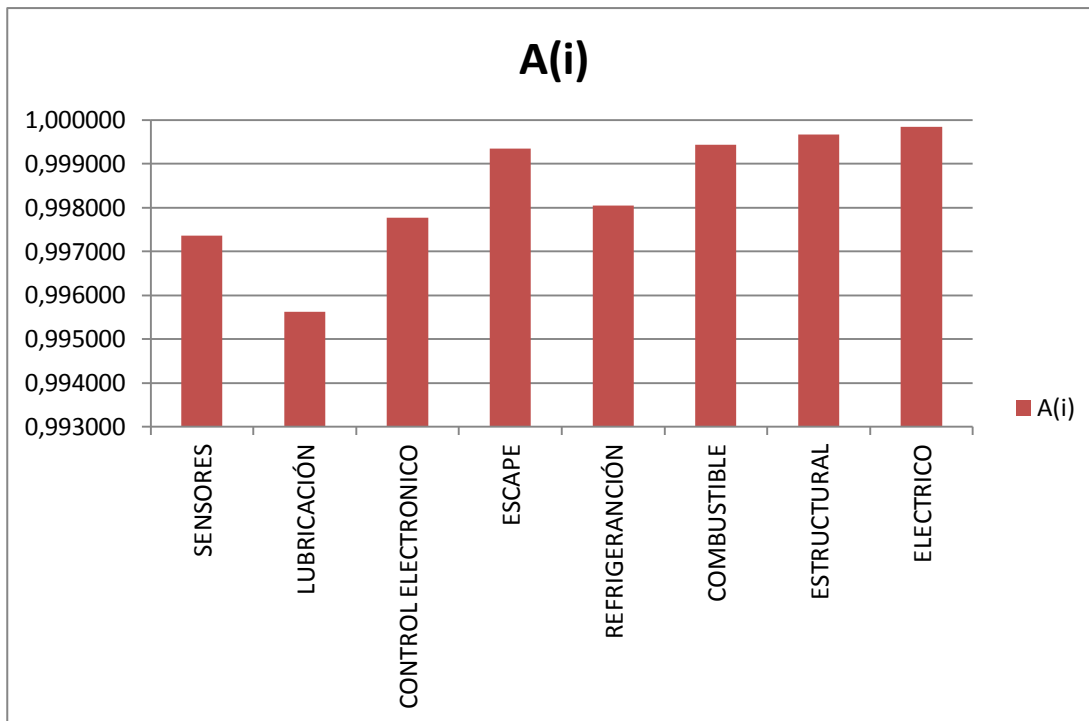


Figura 2.24: Disponibilidad por sistema del equipo

\* Se sugiere para aumentar la disponibilidad del equipo, realizar un cuadro de análisis de falla a los sensores, con el fin de disminuir el tiempo de diagnóstico, y así disminuir el MTTR.

## 2.6.4 Matriz de decisión basado en la norma S.A.E. JA 1011-12

Tabla 2.22: Matriz de Mantenimiento

| MATRIZ DE MANTENIMIENTO<br>Equipo de Apoyo. |                                 |                     |                    |                        |                                |          |                           |       |              |            |                     |
|---------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|----------|---------------------------|-------|--------------|------------|---------------------|
| Sistema                                     | Componente                      | Impacto operacional | Nivel de Detención | Costo De Mantenimiento | Efecto de impacto en seguridad |          |                           |       | Criticidad   |            |                     |
|                                             |                                 |                     |                    |                        | Ítem                           |          |                           | Total | Consecuencia | Frecuencia | Calificación del MR |
|                                             |                                 |                     |                    |                        | Personas                       | Ambiente | Equipos o infraestructura |       |              |            |                     |
| Sensores                                    | referencia de tiempo            | 2                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 21           | 1          | 21                  |
|                                             | temperatura de aire r1          | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                                             | saturación de filtros de aceite | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | presión barométrica             | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                                             | presión de cárter               | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | temperatura del intercooler     | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | presión de turbo                | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|                                             | temperatura de aire             | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | presión de intercooler          | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | presión de refrigerante         | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | temperatura motor               | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | presión de aceite               | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | presión de combustible          | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|                                             | temperatura de combustible      | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | alta presión de combustible     | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|                                             | referencia sincrónica           | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                                             | temperatura de aceite           | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                                             | nivel de refrigerante           | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |

Fuente: elaboración propia en base la política interna de mantenimiento en la superintendencia y a la Norma SAE JA 1011-12

Tabla 2.23: Matriz de Mantenimiento (continuación)

| Sistema             | Componente                                | Impacto operacional | Nivel de Detención | Costo De Mantenimiento | Efecto de impacto en seguridad |          |                           |       | Criticidad   |            |                     |
|---------------------|-------------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|----------|---------------------------|-------|--------------|------------|---------------------|
|                     |                                           |                     |                    |                        | Item                           |          |                           | Total | Consecuencia | Frecuencia | Calificación del MR |
|                     |                                           |                     |                    |                        | Personas                       | Ambiente | Equipos o infraestructura |       |              |            |                     |
| Lubricación         | Cabezal de Aceite                         | 2                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 21           | 1          | 21                  |
|                     | Filtro centrifugo                         | 2                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 19           | 2          | 38                  |
|                     | carter de aceite                          | 2                   | 1                  | 1                      |                                | 32       | 16                        | 48    | 51           | 1          | 51                  |
|                     | varilla de nivel                          | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                     | tapa de reposición aceite                 | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                     | bomba de aceite                           | 4                   | 3                  | 2                      |                                |          | 24                        | 24    | 38           | 1          | 38                  |
|                     | carcas de enfriador de aceite             | 4                   | 3                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 29           | 1          | 29                  |
|                     | sensor de saturación de filtros de aceite | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                     | sensor de presión de turbo                | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|                     | sensor de presión de aceite               | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|                     | sensor de temperatura de aceite           | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
| Control Electrónico | sensor de referencia de tiempo            | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                     | sensor de referencia sincrónica           | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|                     | válvula moduladora                        | 2                   | 4                  | 3                      |                                |          | 16                        | 16    | 27           | 1          | 27                  |
|                     | módulo de control electrónico (ECM)       | 10                  | 4                  | 4                      |                                |          | 24                        | 24    | 68           | 1          | 68                  |

Fuente: elaboración propia en base la política interna de mantenimiento en la superintendencia y a la Norma SAE JA 1011-12

Tabla 2.24: Matriz de Mantenimiento (continuación)

| Sistema       | Componente                            | Impacto operacional | Nivel de Detención | Costo De Mantenimiento | Efecto de impacto en seguridad |          |                           |       | Criticidad   |            |                     |
|---------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|----------|---------------------------|-------|--------------|------------|---------------------|
|               |                                       |                     |                    |                        | Item                           |          |                           | Total | Consecuencia | Frecuencia | Calificación del MR |
|               |                                       |                     |                    |                        | Personas                       | Ambiente | Equipos o infraestructura |       |              |            |                     |
| Escape        | goma descarga de turbo                | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|               | turbo                                 | 3                   | 2                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 24           | 2          | 48                  |
|               | tubo de descarga de turbo             | 3                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 20           | 1          | 20                  |
|               | tubo de escape                        | 3                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 20           | 1          | 20                  |
|               | y de escape                           | 3                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 20           | 1          | 20                  |
|               | múltiple de escape                    | 3                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 20           | 1          | 20                  |
|               | silenciadores                         | 2                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 19           | 1          | 19                  |
| Refrigeración | sensor de presión de turbo            | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|               | sensor de temperatura del intercooler | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|               | sensor de presión de intercooler      | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|               | sensor de presión de refrigerante     | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|               | sensor de nivel de refrigerante       | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|               | caja de tesmostatos de baja           | 4                   | 2                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 26           | 1          | 26                  |
|               | intercooler                           | 5                   | 3                  | 3                      |                                |          | 16                        | 16    | 34           | 2          | 68                  |
|               | múltiple de refrigerante              | 2                   | 2                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 22           | 1          | 22                  |
|               | caja de tesmostatos de alta           | 4                   | 2                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 26           | 1          | 26                  |
|               | bomba secundaria de refrigerante      | 3                   | 3                  | 2                      |                                |          | 24                        | 24    | 35           | 1          | 35                  |
|               | bomba principal de refrigerante       | 3                   | 3                  | 2                      |                                |          | 24                        | 24    | 35           | 2          | 70                  |
|               | válvula rockford                      | 2                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 21           | 1          | 21                  |
|               | rockford                              | 2                   | 3                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 24           | 1          | 24                  |

Fuente: elaboración propia en base la política interna de mantenimiento en la superintendencia y a la Norma SAE JA 1011-12

Tabla 2.25: Matriz de Mantenimiento (continuación)

| Sistema     | Componente                             | Impacto operacional | Nivel de Detención | Costo De Mantenimiento | Efecto de impacto en seguridad |          |                           |       | Criticidad   |            |                     |
|-------------|----------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|----------|---------------------------|-------|--------------|------------|---------------------|
|             |                                        |                     |                    |                        | Item                           |          |                           | Total | Consecuencia | Frecuencia | Calificación del MR |
|             |                                        |                     |                    |                        | Personas                       | Ambiente | Equipos o infraestructura |       |              |            |                     |
| Combustible | inyector                               | 1                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 19           | 4          | 76                  |
|             | bomba de alta                          | 4                   | 4                  | 3                      |                                |          | 16                        | 16    | 35           | 3          | 105                 |
|             | válvula moduladora                     | 3                   | 4                  | 3                      |                                |          | 16                        | 16    | 31           | 1          | 31                  |
|             | galería del common rail                | 3                   | 3                  | 2                      |                                |          | 24                        | 24    | 35           | 1          | 35                  |
|             | bomba de transferencia                 | 4                   | 3                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 30           | 2          | 60                  |
|             | cabezal de combustible                 | 3                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 23           | 1          | 23                  |
|             | cañería de alta presión de combustible | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 24                        | 24    | 26           | 4          | 104                 |
|             | cañería de retorno de combustible      | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 24                        | 24    | 26           | 3          | 78                  |
|             | sensor de presión de combustible       | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|             | sensor de temperatura de combustible   | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
| Estructural | sensor de alta presión de combustible  | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|             | sensor presión de carter               | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 2          | 36                  |
|             | damper                                 | 4                   | 1                  | 2                      |                                |          | 24                        | 24    | 30           | 1          | 30                  |
|             | tapa de inspección                     | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|             | curata                                 | 4                   | 3                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 30           | 2          | 60                  |
|             | unidad de potencia (camisa)            | 5                   | 3                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 32           | 2          | 64                  |
|             | válvulas de culata (admisión y escape) | 3                   | 3                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 26           | 2          | 52                  |
|             | cigüeñal                               | 5                   | 4                  | 4                      |                                |          | 24                        | 24    | 48           | 1          | 48                  |
|             | biela                                  | 5                   | 2                  | 1                      |                                |          | 24                        | 24    | 35           | 1          | 35                  |
|             | rodamiento cigüeñal                    | 5                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 27           | 1          | 27                  |
|             | block                                  | 5                   | 1                  | 4                      |                                |          | 24                        | 24    | 33           | 1          | 33                  |

Fuente: elaboración propia en base la política interna de mantenimiento en la superintendencia y a la Norma SAE JA 1011-12

Tabla 2.26: Matriz de Mantenimiento (continuación)

| Sistema   | Componente                          | Impacto operacional | Nivel de Detención | Costo De Mantenimiento | Efecto de impacto en seguridad |          |                           |       | Criticidad   |            |                     |
|-----------|-------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|----------|---------------------------|-------|--------------|------------|---------------------|
|           |                                     |                     |                    |                        | Ítem                           |          |                           | Total | Consecuencia | Frecuencia | Calificación del MR |
|           |                                     |                     |                    |                        | Personas                       | Ambiente | Equipos o infraestructura |       |              |            |                     |
| Electrico | mando del alternador                | 2                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 21           | 3          | 63                  |
|           | arnes eléctrico                     | 2                   | 4                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 25           | 3          | 75                  |
|           | modulo de control electrónico (ECM) | 1                   | 4                  | 4                      |                                |          | 24                        | 24    | 32           | 1          | 32                  |
| Admisión  | filtro primario                     | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|           | filtro secundario                   | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|           | caja de filtros                     | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|           | ductos de admisión                  | 2                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 19           | 1          | 19                  |
|           | turbocompresor                      | 3                   | 3                  | 2                      |                                |          | 16                        | 16    | 27           | 3          | 81                  |
|           | adaptador de intercooler            | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 3          | 54                  |
|           | intercooler                         | 5                   | 3                  | 3                      |                                |          | 16                        | 16    | 34           | 2          | 68                  |
|           | multiple de admisión                | 3                   | 2                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 23           | 1          | 23                  |
|           | sensor de temperatura de aire r1    | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|           | sensor de presión barométrica       | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |
|           | sensor de temperatura de aire       | 1                   | 1                  | 1                      |                                |          | 16                        | 16    | 18           | 1          | 18                  |

Fuente: elaboración propia en base la política interna de mantenimiento en la superintendencia y a la Norma SAE JA 1011-12

La matriz de decisión basada en la norma SAE JA1011-12, arroja los siguientes componentes críticos:

| Componente Criticos del Equipo  |                                           |                     |
|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| Sistema                         | Componente                                | Calificación del MR |
| Combustible                     | bomba de alta                             | 105                 |
| Combustible                     | cañería de alta presión de combustible    | 104                 |
| Admisión                        | turbocompresor                            | 81                  |
| Combustible                     | cañería de retorno de combustible         | 78                  |
| Combustible                     | inyector                                  | 76                  |
| Eléctrico                       | arnés eléctrico                           | 75                  |
| Refrigeración                   | bomba principal de refrigerante           | 70                  |
| Admisión / Refrigeración        | intercooler                               | 68                  |
| Control Electrónico             | módulo de control electrónico (ECM)       | 68                  |
| Estructural                     | unidad de potencia (camisa)               | 64                  |
| Eléctrico                       | mando del alternador                      | 63                  |
| Combustible                     | bomba de transferencia                    | 60                  |
| Estructural                     | curata                                    | 60                  |
| Admisión                        | adaptador de intercooler                  | 54                  |
| Combustible / Sensores          | sensor de alta presión de combustible     | 54                  |
| Combustible / Sensores          | sensor de presión de combustible          | 54                  |
| Escape / Lubricación / Sensores | sensor de presión de turbo                | 54                  |
| Escape                          | goma descarga de turbo                    | 54                  |
| Estructural                     | válvulas de culata (admisión y escape)    | 52                  |
| Lubricación                     | Carter de aceite                          | 51                  |
| Escape                          | turbo                                     | 48                  |
| Estructural                     | cigüeñal                                  | 48                  |
| Lubricación                     | Filtro centrífugo                         | 38                  |
| Lubricación                     | bomba de aceite                           | 38                  |
| Combustible / Sensores          | sensor de temperatura de combustible      | 36                  |
| Estructural / Sensores          | sensor presión de carter                  | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de temperatura del intercooler     | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de presión de intercooler          | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de presión de refrigerante         | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de nivel de refrigerante           | 36                  |
| Lubricación / Sensores          | sensor de saturación de filtros de aceite | 36                  |
| Lubricación / Sensores          | sensor de presión de aceite               | 36                  |
| Lubricación / Sensores          | sensor de temperatura de aceite           | 36                  |
| Sensores                        | temperatura motor                         | 36                  |
| Combustible                     | galería del common rail                   | 35                  |
| Refrigeración                   | bomba secundaria de refrigerante          | 35                  |
| Estructural                     | biela                                     | 35                  |
| Estructural                     | block                                     | 33                  |
| Eléctrico                       | módulo de control electrónico (ECM)       | 32                  |

| Componente Críticos del Equipo |                                  |                     |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Sistema                        | Componente                       | Calificación del MR |
| Combustible                    | válvula moduladora               | 31                  |
| Estructural                    | dámper                           | 30                  |
| Lubricación                    | carcas de enfriador de aceite    | 29                  |
| Control Electrónico            | válvula moduladora               | 27                  |
| Estructural                    | rodamiento cigüeñal              | 27                  |
| Refrigeración                  | caja de termostatos de alta      | 26                  |
| Refrigeración                  | caja de termostatos de baja      | 26                  |
| Refrigeración                  | Rockford                         | 24                  |
| Combustible                    | cabezal de combustible           | 23                  |
| Admisión                       | múltiple de admisión             | 23                  |
| Refrigeración                  | múltiple de refrigerante         | 22                  |
| Sensores                       | referencia de tiempo             | 21                  |
| Lubricación                    | Cabezal de Aceite                | 21                  |
| Refrigeración                  | válvula rockford                 | 21                  |
| Escape                         | tubo de descarga de turbo        | 20                  |
| Escape                         | tubo de escape                   | 20                  |
| Escape                         | y de escape                      | 20                  |
| Escape                         | múltiple de escape               | 20                  |
| Escape                         | silenciadores                    | 19                  |
| Admisión                       | ductos de admisión               | 19                  |
| Sensores                       | temperatura de aire r1           | 18                  |
| Sensores                       | presión barométrica              | 18                  |
| Sensores                       | referencia sincrónica            | 18                  |
| Admisión                       | sensor de temperatura de aire r1 | 18                  |
| Admisión                       | sensor de presión barométrica    | 18                  |
| Admisión / Sensores            | sensor de temperatura de aire    | 18                  |
| Lubricación                    | varilla de nivel                 | 18                  |
| Lubricación                    | tapa de reposición aceite        | 18                  |
| Control Electronico            | sensor de referencia de tiempo   | 18                  |
| Control Electronico            | sonsor de referencia sincrónica  | 18                  |
| Estructural                    | tapa de inspección               | 18                  |
| Admisión                       | caja de filtros                  | 18                  |
| Admisión                       | filtro primario                  | 18                  |
| Admisión                       | filtro secundario                | 18                  |

Tabla 2.27: Clasificación de Criticidad por matriz

## 2.7 FMECA según el RCM

De acuerdo con la norma SAE-JA 1011, editada en agosto de 1999, un programa de RCM debe asegurar que las siete preguntas básicas sean contestadas satisfactoriamente en la secuencia mostrada:

- ¿Cuáles son las funciones asociadas al activo en su actual contexto operacional (funciones)?
- ¿De qué manera puede no satisfacer sus funciones (fallas funcionales)?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional (modos de falla)?
- ¿Qué sucede cuando ocurren las diferentes fallas (efectos de las fallas)?
- ¿De qué manera afecta cada tipo de fallas (consecuencias de las fallas)?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir / predecir cada falla (tareas probables e intervalos de las tareas)?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada (acciones preestablecidas)?

En línea de lo anterior, se realiza un FMECA respondiendo las siete preguntas básicas del RCM:

| Sistema     | componente        | Función                                                                                                                                 | Fallas Funcionales "Síntoma"       | Causa Posible (Modos de falla)                        | Método de detección                                                            | Acción Correctiva Sugerida    | Acción preventiva o predictiva                           | Consecuencia de la falla |       |       |
|-------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    |                                                       |                                                                                |                               |                                                          | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Lubricación | Cabezal de Aceite | Dirigir el aceite a los canales correspondientes del sistema de lubricación, además de tener el alojamiento para los filtros de aceite. | Alta temperatura                   | Saturación de filtros de cartuchos                    | instale filtros nuevos y verifique la temperatura de nuevo                     | cambiar los filtros de aceite | cambio periódicos de los filtros de aceite               | 21                       | 1     | 21    |
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    | válvula limitadora mal regulada                       | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión              | cambiar la válvula limitadora | inspecciones periódica de la válvula                     |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         | Fuga externa por filtros           | Mal apriete de los filtros                            | verificar apriete de los filtros                                               | apretar los filtros           | verificar periódicamente el apriete de los filtros       |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    | O´ring de junta entre cabezal de filtro mal instalado | desinstalar los filtros y verificar el estado del O´ring                       | cambiar el O´ring             | verificar el estado del O´ring periódicamente            |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         | Bajo caudal de salida              | Obstrucción de canales internos                       | instale filtros nuevos y mida el diferencial de presión (entrada y salida)     | Cambiar el cabezal de aceite  | Mediciones periódicas después de cambiar los filtros     |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    | Saturación de filtros de cartuchos                    | instale filtros nuevos y verifique la temperatura de nuevo                     | cambiar los filtros de aceite | cambio periodicos de los filtros de aceite               |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         | Presión baja de salida de aceite   | válvula limitadora mal regulada                       | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión              | cambiar la válvula limitadora | inspecciones periodica de la válvula                     |                          |       |       |
|             | Filtro centrifugo | Separar el material particulado contenido en el aceite del motor, mediante la fuerza centrífuga                                         | Fuga externa del filtro            | Mal apriete del filtro                                | verificar apriete del filtro                                                   | apretar el filtro             | verificar periodicamente el apriete del filtro           | 19                       | 2     | 38    |
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    | O´ring de la junta de la campana mal instalado / roto | verificar el estado del O´ring                                                 | cambiar el O´ring             | verificar el estado del O´ring periodicamente            |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         | Bajo caudal de salida              | Obstrucción de canales internos                       | instale papel filtro nuevo y mida el diferencial de presión (entrada y salida) | Cambiar filtro centrifugo     | Mediciones periodicas después de cambiar el papel filtro |                          |       |       |
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    | papel de filtro saturado o desarmado                  | verificar estado del papel filtro                                              | Cambiar papel filtro          | cambio periodico del papel filtro                        |                          |       |       |
|             | carter de aceite  | Contener el aceite que es utilizado en el sistema de lubricación                                                                        | Fuga externa del carter            | empaquetadura dañada                                  | inspección visual de la junta del carter                                       | cambiar empaquetadura         | inspecciones periodica de la junta                       | 51                       | 1     | 51    |
|             |                   |                                                                                                                                         |                                    | fisura del carter                                     | inspección visual del carter                                                   | cambiar el carter             | inspecciones periodicas del carter                       |                          |       |       |
|             | varilla de nivel  | Es visualizar el estado del nivel de aceite y reponer aceite a través del ducto de la tapa de aceite                                    | incapacidad de visualizar el nivel | varilla fracturada o doblada                          | inspección visual de la varilla                                                | cambiar la varilla            | inspecciones periodicas de la varilla                    | 18                       | 1     | 18    |

Tabla 2.28: FMECA motor MTU

| Sistema     | componente                                | Función                                                                                                             | Fallas Funcionales "Síntoma" | Causa Posible (Modos de falla)                             | Método de detección                                                    | Acción Correctiva Sugerida                    | Acción preventiva o predictiva                   | Consecuencia de la falla |       |       |
|-------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|             |                                           |                                                                                                                     |                              |                                                            |                                                                        |                                               |                                                  | Cons e.                  | Frec. | Crit. |
| Lubricación | bomba de aceite                           | Es la encargada de hacer circular el aceite para lubricar el motor                                                  | Baja presión de salida       | válvula limitadora mal regulada                            | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión      | cambiar la válvula limitadora                 | inspecciones periodica de la válvula             | 38                       | 1     | 38    |
|             |                                           |                                                                                                                     |                              | Carcasa con fuga hacia cárter                              | desmonte carter y inspección estado de la carcasa y pernos de sujeción | Cambiar bomba                                 | Inspección periodica de bomba (desmontar carter) |                          |       |       |
|             |                                           |                                                                                                                     | Alta temperatura del aceite  | Bajo nivel de aceite                                       | revise el nivel de aceite                                              | rellenar aceite                               | inspecciones periodica del nivel de aceite       |                          |       |       |
|             |                                           |                                                                                                                     | Bajo caudal de salida        | Carcasa con fuga hacia cárter                              | desmonte carter y inspección estado de la carcasa y pernos de sujeción | Cambiar bomba                                 | Inspección periodica de bomba (desmontar carter) |                          |       |       |
|             |                                           |                                                                                                                     |                              | perdida del rendimiento volumétrico de la bomba            | desarme bomba y revise estado de los engranajes                        | Cambiar bomba                                 | Inspección periodica de bomba (desmontar carter) |                          |       |       |
|             |                                           |                                                                                                                     | Ruido anormal                | Bajo nivel de aceite                                       | revise el nivel de aceite                                              | rellenar aceite                               | inspecciones periodica del nivel de aceite       |                          |       |       |
|             |                                           |                                                                                                                     |                              | rodamiento del toma fuerza de la bomba malo (distribución) | desconecte la bomba y pruebe giro                                      | cambiar bomba y/o toma fuerza                 | Inspección periodica de bomba (desmontar carter) |                          |       |       |
|             | carcas de enfriador de aceite             | Es el encargado de mantener el líquido refrigerante que circula por la parte exterior de los enfriadores de aceite. | Alta temperatura del aceite  | Obstrucción de canales internos                            | desarme el enfriador e inspeccione                                     | limpieza del enfriador o cambio               | limpieza periodica del enfriador                 | 29                       | 1     | 29    |
|             |                                           |                                                                                                                     | aceite emulsionado           | traspaso de refrigerante al aceite                         | verifique hermeticidad de los canales internos                         | cambie el enfriador                           | analisis periodico del aceite                    |                          |       |       |
|             | sensor de saturación de filtros de aceite | Activar la alarma que indica que ha subido la presión en los filtros de aceite                                      | Sin señal de salida          | Sin alimentación                                           | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación                      | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes            | 18                       | 2     | 36    |
|             |                                           |                                                                                                                     |                              | Sensor en corte o aislado internamente                     | Mida resistencia del sensor                                            | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico                    |                          |       |       |
|             | sensor de presión de aceite               | Medir y entregar los valores de presión de aceite del motor a los ECM en todo rango de funcionamiento               | Sin señal de salida          | Sin alimentación                                           | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación                      | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes            | 18                       | 2     | 36    |
|             |                                           |                                                                                                                     |                              | Sensor en corte o aislado internamente                     | Mida resistencia del sensor                                            | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico                    |                          |       |       |
|             | sensor de temperatura de aceite           | De entregar los valores de temperatura de aceite del motor a los ECM en todo rango de funcionamiento                | Sin señal de salida          | Sin alimentación                                           | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación                      | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes            | 18                       | 2     | 36    |
|             |                                           |                                                                                                                     |                              | Sensor en corte o aislado internamente                     | Mida resistencia del sensor                                            | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico                    |                          |       |       |

Tabla 2.29: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema             | componente                          | Función                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Fallas Funcionales "Síntoma"   | Causa Posible (Modos de falla)                                      | Método de detección                                      | Acción Correctiva Sugerida                          | Acción preventiva o predictiva                                           | Consecuencia de la falla |       |       |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|                     |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                |                                                                     |                                                          |                                                     |                                                                          | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Control Electrónico | sensor de referencia de tiempo      | Enviar una señal eléctrica a los ECM producto de la inducción que se genera al enfrentarse con los dientes de un plato instalado en el cigüeñal, de esta señal los ECM obtienen las RPM del motor lo que activa el programa de tiempo y el punto de inyección para que el motor empiece a funcionar regularmente | Sin señal de salida            | Sin alimentación                                                    | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación        | Verifique estado del arnes eléctrico y repare       | Inspeccion visual de estado del arnes                                    | 18                       | 1     | 18    |
|                     |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                | Sensor en corte o aislado internamente                              | Mida resistencia del sensor                              | cambie el sensor                                    | Inspeccion o cambio periodico                                            |                          |       |       |
|                     | sensor de referencia sincrónica     | Enviar una señal eléctrica a los ECM producto de la inducción que se genera al enfrentarse con el diente de un plato instalado en el cigüeñal. De esta señal los ECM señal le indica (posición 1ª en el motor), lo que activa el programa de orden de inyección del motor para que este empiece a funcionar      | Sin señal de salida            | Sin alimentación                                                    | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación        | Verifique estado del arnes eléctrico y repare       | Inspeccion visual de estado del arnes                                    | 18                       | 1     | 18    |
|                     |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                | Sensor en corte o aislado internamente                              | Mida resistencia del sensor                              | cambie el sensor                                    | Inspeccion o cambio periodico                                            |                          |       |       |
|                     | válvula moduladora                  | Tiene la función de modular el paso de combustible hacia la bomba de alta presión de combustible en todo rango de funcionamiento del motor                                                                                                                                                                       | sin salida hacia bomba de alta | contrapresión interna, válvulas antiretorno (internas) defectuosas  | mida presión de retorno de la válvula moduladora         | cambie válvula moduladora                           | Inspecciones periodicas a la válvula moduladora                          | 27                       | 1     | 27    |
|                     |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | sin presión de alimentación    | la bomba de baja no alimenta con la presión necesaria (65 - 85 PSI) | mida presión de salida de la bomba de baja               | cambie la válvula limitadora de la bomba o la bomba | Inspección periodica de la presión de alimentación                       |                          |       |       |
|                     |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | sin señal del ECM              | ECM no comanda la válvula moduladora                                | verifique voltaje de entrada hacia la válvula moduladora | Cambie el ECM                                       | Inspecciones periodicas a la líneas electricas de la válvula moduladoras |                          |       |       |
|                     | módulo de control electrónico (ECM) | Controlan el sistema electrónico del motor, interactuando con los sensores y componentes para el buen funcionamiento del equipo                                                                                                                                                                                  | Sin funcionamiento             | ECM defectuosa                                                      | Verifique codigo de falla                                | Cambie el ECM                                       | lectura periodica de codigos de falla del ECM                            | 68                       | 1     | 68    |

Tabla 2.30: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema | componente             | Función                                                                                                                                                                             | Fallas Funcionales "Sintoma" | Causa Posible (Modos de falla)                    | Método de detección                                                        | Acción Correctiva Sugerida                                     | Acción preventiva o predictiva                                                                                     | Consecuencia de la falla |       |       |
|---------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              |                                                   |                                                                            |                                                                |                                                                                                                    | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Escape  | goma descarga de turbo | Proporcionar una unión flexible entre el caracol de admisión del turbo y el adaptador de intercooler                                                                                | Fuga externa de gases        | abrazadera mal montada                            | apriete de la abrazadera                                                   | cambiar abrazadera                                             | Inspecciones periódicas                                                                                            | 18                       | 3     | 54    |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              | fisura de la goma                                 | inspección visual                                                          | cambiar la goma                                                | Inspecciones periódicas                                                                                            |                          |       |       |
|         | turbo                  | Sobre alimentar de aire a los múltiples de admisión con el objetivo de aumentar la combustión (aumentando la mezcla aire-combustible) y por la tanto aumentar la potencia del motor | alta temperatura             | restricción en filtros de aires                   | verifique que la presión de admisión se la correcta                        | camobie filtros                                                | cambio periodico de los filtros de aire                                                                            | 24                       | 2     | 48    |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              | baja presión de aceite de lubricación             | tome la presión del aceite lubricante                                      | verifique estados de las lineas de lubricación por obstrucción | cambio periodico de las lineas de lubricación                                                                      |                          |       |       |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              | alta temperatura de refrigerante                  | verifique la temperatura del radiador                                      | verifique el buen funcionamiento del ventiladora               | inspecciones periodicas del buen funcionamiento del ventilador (válvula rockford, rockford y aspas del ventilador) |                          |       |       |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              | elemento extraño en la entrada de gases de escape | desmonte el turno y observe por elementos extraños en la entrada del turbo | cambie el turno y verifique estado de la válvula de escape     | inspecciones periodicas del funcionamiento del turno, uso de camara termograficas                                  |                          |       |       |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     | Ruido anormal                | baja presión de aceite de lubricación             | tome la presión del aceite lubricante                                      | verifique estados de las lineas de lubricación por obstrucción | cambio periodico de las lineas de lubricación                                                                      |                          |       |       |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              | elemento extraño en la entrada de gases de escape | desmonte el turno y observe por elementos extraños en la entrada del turbo | cambie el turno y verifique estado de la válvula de escape     | inspecciones periodicas del funcionamiento del turno, uso de camara termograficas                                  |                          |       |       |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     | fuga                         | junta metalica en mal estado                      | inspección visual                                                          | cambio de la junta metalica                                    | inspecciones periodicas de las junta                                                                               |                          |       |       |
|         |                        |                                                                                                                                                                                     |                              |                                                   |                                                                            |                                                                |                                                                                                                    |                          |       |       |

Tabla 2.31: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema | componente                | Función                                                                                                                                                                                                                                                  | Fallas Funcionales "Sintoma" | Causa Posible (Modos de falla) | Método de detección      | Acción Correctiva Sugerida | Acción preventiva o predictiva | Consecuencia de la falla |       |       |
|---------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|         |                           |                                                                                                                                                                                                                                                          |                              |                                |                          |                            |                                | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Escape  | tubo de descarga de turbo | Permite la conexión del suministro de aire generado por los turbos delantero hacia el intercooler                                                                                                                                                        | Fuga externa de gases        | abrazadera mal montada         | apriete de la abrazadera | cambiar abrazadera         | Inspecciones periódicas        | 20                       | 1     | 20    |
|         |                           |                                                                                                                                                                                                                                                          |                              | fisura de la goma              | inspección visual        | cambiar la goma            | Inspecciones periódicas        |                          |       |       |
|         | tubo de escape            | Dirigen los gases de escape desde las culatas hacia los múltiple de escape para hacer girar la turbina de escape de los turbos, * Nota: la parte corrugada sirve para adsorber las dilataciones térmicas provocadas por las altas temperaturas de escape | Fuga externa de gases        | abrazadera mal montada         | apriete de la abrazadera | cambiar abrazadera         | Inspecciones periódicas        | 20                       | 1     | 20    |
|         |                           |                                                                                                                                                                                                                                                          |                              | fisura de la goma              | inspección visual        | cambiar la goma            | Inspecciones periódicas        |                          |       |       |
|         | y de escape               | Son las encargadas de dirigir los gases de escape que salen de los turbos, hacia los tubos de escape del camión                                                                                                                                          | Fuga externa de gases        | abrazadera mal montada         | apriete de la abrazadera | cambiar abrazadera         | Inspecciones periódicas        | 20                       | 1     | 20    |
|         |                           |                                                                                                                                                                                                                                                          |                              | fisura de la goma              | inspección visual        | cambiar la goma            | Inspecciones periódicas        |                          |       |       |
|         | múltiple de escape        | Soportar el turbo y dirigir los gases de escape provenientes desde 4 culatas, hacia el turbo                                                                                                                                                             | Fuga externa de gases        | abrazadera mal montada         | apriete de la abrazadera | cambiar abrazadera         | Inspecciones periódicas        | 20                       | 1     | 20    |
|         |                           |                                                                                                                                                                                                                                                          |                              | fisura de la goma              | inspección visual        | cambiar la goma            | Inspecciones periódicas        |                          |       |       |
|         | silenciadores             | Silenciar los gases de escape                                                                                                                                                                                                                            | Fuga externa de gases        | abrazadera mal montada         | apriete de la abrazadera | cambiar abrazadera         | Inspecciones periódicas        | 19                       | 1     | 19    |
|         |                           |                                                                                                                                                                                                                                                          |                              | fisura de la goma              | inspección visual        | cambiar la goma            | Inspecciones periódicas        |                          |       |       |

Tabla 2.32: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema       | componente                                      | Función                                                                                                                                                                               | Fallas Funcionales "Sintoma"      | Causa Posible (Modos de falla)         | Método de detección                                            | Acción Correctiva Sugerida                    | Acción preventiva o predictiva              | Consecuencia de la falla |       |       |
|---------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   |                                        |                                                                |                                               |                                             | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Refrigeración | sensor de temperatura del intercooler           | Medir la temperatura del refrigerante del intercooler, en todo rango de funcionamiento del motor                                                                                      | Sin señal de salida               | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación              | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes       | 18                       | 2     | 36    |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                                    | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico               |                          |       |       |
|               | sensor de presión de intercooler                | De medir la presión de refrigerante del intercooler del motor en todo régimen de trabajo                                                                                              | Sin señal de salida               | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación              | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes       | 18                       | 2     | 36    |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                                    | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico               |                          |       |       |
|               | sensor de presión de refrigerante               | Medir la presión de refrigerante en todo rango de funcionamiento del motor                                                                                                            | Sin señal de salida               | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación              | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes       | 18                       | 2     | 36    |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                                    | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico               |                          |       |       |
|               | sensor de nivel de refrigerante                 | Cuando el nivel del refrigerante del estanque de expansión del radiador está por debajo de la ubicación del sensor, este envía una señal que se interpreta como falta de refrigerante | Sin señal de salida               | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación              | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes       | 18                       | 2     | 36    |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                                    | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico               |                          |       |       |
|               | Sensor de temperatura de refrigerante del motor | Medir la temperatura del refrigerante en todo rango de funcionamiento del motor                                                                                                       | Sin señal de salida               | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación              | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes       | 18                       | 2     | 36    |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                                    | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico               |                          |       |       |
|               | caja de tesmortatos de baja                     | Es la encargada de alojar los dos termostatos de baja que trabajan con el circuito de refrigeración del intercooler                                                                   | Sin recirculación de refrigerante | termostatos no abren                   | Desarme caja de tesmortatos y revise estado de los tesmortatos | cambiar tesmortatos                           | revisión periodica de los tesmortatos       | 26                       | 1     | 26    |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       |                                   | ductos internos tapados                | desarme caja de tesmortatos , revise y limpie ductos internos  | limpiar ductos                                | Revisión periodica de la caja de tesmortato |                          |       |       |
|               |                                                 |                                                                                                                                                                                       | termostatos siempre abierto       | termostatos deficientes                | Desarme caja de tesmortatos y revise estado de los tesmortatos | cambiar tesmortatos                           | revisión periodica de los tesmortatos       |                          |       |       |

Tabla 2.33: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema       | componente                       | Función                                                                                                           | Fallas Funcionales "Sintoma"             | Causa Posible (Modos de falla)                             | Método de detección                                                 | Acción Correctiva Sugerida                   | Acción preventiva o predictiva                              | Consecuencia de la falla |       |       |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|               |                                  |                                                                                                                   |                                          |                                                            |                                                                     |                                              |                                                             | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Refrigeración | intercooler                      | Es el encargado de bajar la temperatura al aire que viene desde los turbos hacia el múltiple de admisión          | transpaso de refrigerante hacia admisión | ductos internos erosionados (con fuga interna)             | desmante el múltiple de admisión y revise presencia de refrigerante | cambiar intercooler                          | inspecciones periodicas al acusete del múltiple de admisión | 34                       | 2     | 68    |
|               |                                  |                                                                                                                   | alta temperatura                         | sin recirculación de refrigerante                          | revise la caja tesmotatos / radiador                                | Cambiar o limpiar caja tesmotatos / radiador | inspecciones periodica de caja tesmotatos / radiador        |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   | fuga externa                             | fisura externa, perdida de refrigerante                    | inspección visual en busca de fuga / fisura                         | cambiar intercooler                          | inspecciones periodicas al intercooler                      |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   | baja presión de aire                     | fuga por manguito de goma de admisión hacia intercooler    | revisar apriete y/o estado de las abrazaderas                       | cambiar abrazadera y/o manguito de goma      | inspecciones periodicas a los manguitos de goma             |                          |       |       |
|               | múltiple de refrigerante         | Dirigir el líquido refrigerante a las culatas                                                                     | Fuga externa                             | fisura externa, perdida de refrigerante                    | inspección visual en busca de fuga / fisura                         | cambiar múltiple de refrigerate              | Inspecciones periodicas                                     | 22                       | 1     | 22    |
|               |                                  |                                                                                                                   |                                          | abrazadera mal montada                                     | apriete de la abrazadera                                            | cambiar abrazadera                           | Inspecciones periodicas                                     |                          |       |       |
|               | caja de termostatos de alta      | Es la encargada de alojar los 4 termostatos de alta y posee los canales de distribución de refrigerante del motor | Sin recirculación defrigerante           | tesmortatos no abren                                       | Desarme caja de tesmortatos y revise estado de los tesmortatos      | cambiar tesmortatos                          | revisión periodica de los tesmortatos                       | 26                       | 1     | 26    |
|               |                                  |                                                                                                                   |                                          | ductos internos tapados                                    | desarme caja de tesmortatos , revise y limpie ductos internos       | limpiar ductos                               | Revisión periodica de la caja de tesmortato                 |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   | tesmortatos siempre abierto              | tesmortatos deficientes                                    | Desarme caja de tesmortatos y revise estado de los tesmortatos      | cambiar tesmortatos                          | revisión periodica de los tesmortatos                       |                          |       |       |
|               | bomba secundaria de refrigerante | Es la encargada de hacer circular el refrigerante desde el radiador al circuito de refrigeración del intercooler  | Baja presión de salidad                  | Carcasa con fuga                                           | revisar por fuga en las juntas de la bomba y el acusete de la bomba | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                               | 35                       | 1     | 35    |
|               |                                  |                                                                                                                   | Alta temperatura                         | sin recirculación de refrigerante                          | revise la caja tesmotatos / radiador                                | Cambiar o limpiar caja tesmotatos / radiador | inspecciones periodica de caja tesmotatos / radiador        |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   | Bajo caudal de salida                    | Carcasa con fuga                                           | revisar por fuga en las juntas de la bomba y el acusete de la bomba | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                               |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   |                                          | perdida del rendimiento volumetrico de la bomba            | revise acuse de la bomba por fuga                                   | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                               |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   | Ruido anormal                            | alabes de la bomba desgastados                             | desarme bomba y revise estado de los alabes                         | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                               |                          |       |       |
|               |                                  |                                                                                                                   |                                          | rodamiento del toma fuerza de la bomba malo (distribución) | desconecte la bomba y pruebe giro                                   | cambiar bomba y/o toma fuerza                | Inspección periodica de bomba                               |                          |       |       |

Tabla 2.34: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema       | componente                      | Función                                                                                                                                      | Fallas Funcionales "Síntoma"                       | Causa Posible (Modos de falla)                             | Método de detección                                                     | Acción Correctiva Sugerida                   | Acción preventiva o predictiva                        | Consecuencia de la falla |       |       |
|---------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|               |                                 |                                                                                                                                              |                                                    |                                                            |                                                                         |                                              |                                                       | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Refrigeración | bomba principal de refrigerante | Es la encargada de hacer circular el refrigerante desde el radiador al circuito de refrigeración del motor                                   | Baja presión de salidad                            | Carcasa con fuga                                           | revisar por fuga en las juntas de la bomba y el acusete de la bomba     | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                         | 35                       | 2     | 70    |
|               |                                 |                                                                                                                                              | Alta temperatura                                   | sin recirculación de refrigerante                          | revise la caja tesmotatos / radiador                                    | Cambiar o limpiar caja tesmotatos / radiador | inspecciones periodica de caja tesmortatos / radiador |                          |       |       |
|               |                                 |                                                                                                                                              | Bajo caudal de salida                              | Carcasa con fuga                                           | revisar por fuga en las juntas de la bomba y el acusete de la bomba     | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                         |                          |       |       |
|               |                                 |                                                                                                                                              |                                                    | perdida del rendimiento volumetrico de la bomba            | revise acuse de la bomba por fuga                                       | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                         |                          |       |       |
|               |                                 |                                                                                                                                              | Ruido anormal                                      | alabes de la bomba desgastados                             | desarme bomba y revise estado de los alabes                             | Cambiar bomba                                | Inspección periodica de bomba                         |                          |       |       |
|               |                                 |                                                                                                                                              |                                                    | rodamiento del toma fuerza de la bomba malo (distribución) | desconecte la bomba y pruebe giro                                       | cambiar bomba y/o toma fuerza                | Inspección periodica de bomba                         |                          |       |       |
|               | válvula rockford                | Tiene la finalidad de modular el paso de aceite para acoplar el Rockford, dependiendo de la temperatura del motor                            | Sin alimentación de aceite                         | linea de alimentación defectuosa                           | mida presión de aceite a la linea de entrada de la válvula rockford     | cambiar linea de alimentación                | inspección visual                                     | 21                       | 1     | 21    |
|               |                                 |                                                                                                                                              | sin alimentación en las solenoides de las válvulas | EMC defectuosa / arnes a masa                              | mida voltaje en la alimentación de la solenoides                        | buscar y repara arnes                        | inspección visual                                     |                          |       |       |
|               |                                 |                                                                                                                                              | Sin salida de aceite hacia la rockford             | Solenoides o spool de válvula pegada                       | mida presión de aceite en la linea de salida                            | cambiar válvula rockford                     | cambiar válvula periodicamente                        |                          |       |       |
|               | rockford                        | Transmitir el giro que proviene desde el damper por medio de una correa, hacia al aspa de ventilación del motor y refrigeración del radiador | Si acople hacia ventilador                         | falla interna del spool                                    | verifique la alimentación y si acopla la rockford a hacia el ventilador | cambiar rockford                             | inspección periodica del funcionamiento               | 24                       | 1     | 24    |

Tabla 2.35: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema     | componente         | Función                                                                                                                                                       | Fallas Funcionales "Sintoma"                     | Causa Posible (Modos de falla)                                      | Método de detección                                               | Acción Correctiva Sugerida                          | Acción preventiva o predictiva                                           | Consecuencia de la falla |       |       |
|-------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|             |                    |                                                                                                                                                               |                                                  |                                                                     |                                                                   |                                                     |                                                                          | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Combustible | Inyector           | inyectar combustible pulverizado a la camara de combustión, controlando el tiempo de inyección y la cantidad de combustible                                   | Excesivo consumo de combustible y exceso de humo | Tobera de inyección fuera de tolerancia                             | desarmar inyector y medir con calibre la tobera                   | cambiar inyector                                    | inspección periodica                                                     | 19                       | 4     | 76    |
|             |                    |                                                                                                                                                               | Tiempo de respuesta largo                        | bobina del inyector defectuosa                                      | medir resistencia de la bobina                                    | cambiar inyector                                    | medición periodica                                                       |                          |       |       |
|             |                    |                                                                                                                                                               |                                                  | arnes de alimentación a masa                                        | inspeccionar el arnes en busca del contacto con la masa           | reparar o cambiar arnes                             | inspección periodica                                                     |                          |       |       |
|             | bomba de alta      | es la encargada de enviar el caudal al common rail del sistema de inyección con el objetivo de crear una presión necesaria según los requerimientos del motor | Baja presión de salida                           | válvula limitadora mal regulada                                     | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión | cambiar la válvula limitadora                       | inspecciones periodica de la válvula                                     | 35                       | 3     | 105   |
|             |                    |                                                                                                                                                               |                                                  | Carcasa con fuga                                                    | Inspección visual                                                 | Cambiar bomba                                       | Inspección periodica de bomba                                            |                          |       |       |
|             |                    |                                                                                                                                                               | Alta temperatura                                 | Desgaste interno de la bomba                                        | Desarmar y evaluar bomba                                          | Cambiar boma                                        | Inspecciones periodicas de temperatura                                   |                          |       |       |
|             |                    |                                                                                                                                                               |                                                  | Carcasa con fuga                                                    | Inspección visual                                                 | Cambiar bomba                                       | Inspección periodica de bomba                                            |                          |       |       |
|             |                    |                                                                                                                                                               | Bajo caudal de salida                            | perdida del rendimiento volumetrico de la bomba                     | desarme bomba y revise estado de los cilindros                    | Cambiar bomba                                       | Medir periodicamente el caudal y presión de salida                       |                          |       |       |
|             |                    |                                                                                                                                                               | Ruido anormal                                    | rodamiento del toma fuerza de la bomba malo (distribución)          | desconecte la bomba y pruebe giro                                 | cambiar bomba y/o toma fuerza                       | Inspección periodica de bomba                                            |                          |       |       |
|             | válvula moduladora | Tiene la función de modular el paso de combustible hacia la bomba de alta presión de combustible en todo rango de funcionamiento del motor                    | sin salida hacia bomba de alta                   | contrapresión interna, válvulas antiretorno (internas) defectuosas  | mida presión de retorno de la válvula moduladora                  | camбие válvula moduladora                           | Inspecciones periodicas a la válvula moduladora                          | 31                       | 1     | 31    |
|             |                    |                                                                                                                                                               | sin presión de alimentación                      | la bomba de baja no alimenta con la presión necesaria (65 - 85 PSI) | mida presión de salida de la bomba de baja                        | cambie la válvula limitadora de la bomba o la bomba | Inspección periodica de la presión de alimentación                       |                          |       |       |
|             |                    |                                                                                                                                                               | sin señal del ECM                                | ECM no comanda la válvula moduladora                                | verifique voltaje de entrada hacia la válvula moduladora          | Cambie el ECM                                       | Inspecciones periodicas a la lineas electricas de la válvula moduladoras |                          |       |       |

Tabla 2.36: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema     | componente             | Función                                                                                     | Fallas Funcionales "Sintoma"     | Causa Posible (Modos de falla)                         | Método de detección                                                        | Acción Correctiva Sugerida         | Acción preventiva o predictiva                       | Consecuencia de la falla |       |       |
|-------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|             |                        |                                                                                             |                                  |                                                        |                                                                            |                                    |                                                      | Conse.                   | Frec. | Crit. |
| Combustible | cabezal de combustible | Encargado de distribuir el combustible, que llega desde los filtros hacia la bomba de alta. | Alta temperatura                 | Saturación de filtros de cartuchos                     | instale filtros nuevos y verifique la temperatura de nuevo                 | cambiar los filtros de combustible | cambio periodicos de los filtros de combustible      | 23                       | 1     | 23    |
|             |                        |                                                                                             |                                  | válvula limitadora mal regulada                        | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión          | cambiar la válvula limitadora      | inspecciones periodica de la válvula                 |                          |       |       |
|             |                        |                                                                                             | Fuga externa por filtros         | Mal apriete de los filtros                             | verificar apriete de los filtros                                           | apretar los filtros                | verificar periodicamente el apriete de los filtros   |                          |       |       |
|             |                        |                                                                                             |                                  | O ´ring de junta entre cabezal de filtro mal instalado | desinstalar los filtros y verificar el estado del O ´ring                  | cambiar el O ´ring                 | verificar el estado del O ´ring periodicamente       |                          |       |       |
|             |                        |                                                                                             | Bajo caudal de salida            | Obstrucción de canales internos                        | instale filtros nuevos y mida el diferencial de presión (entrada y salida) | Cambiar el cabezal de aceite       | Mediciones periodicas despues de cambiar los filtros |                          |       |       |
|             |                        |                                                                                             |                                  | Saturación de filtros de cartuchos                     | instale filtros nuevos y verifique la temperatura de nuevo                 | cambiar los filtros de combustible | cambio periodicos de los filtros de combustible      |                          |       |       |
|             |                        |                                                                                             | Presión baja de salida de aceite | válvula limitadora mal regulada                        | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión          | cambiar la válvula limitadora      | inspecciones periodica de la válvula                 |                          |       |       |
|             |                        |                                                                                             |                                  |                                                        |                                                                            |                                    |                                                      |                          |       |       |

Tabla 2.37: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema     | componente              | Función                                                                                                                                                                                                                                                               | Fallas Funcionales "Síntoma" | Causa Posible (Modos de falla)                             | Método de detección                                               | Acción Correctiva Sugerida    | Acción preventiva o predictiva                     | Consecuencia de la falla |       |       |
|-------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                              |                                                            |                                                                   |                               |                                                    | Cons.                    | Frec. | Crit. |
| Combustible | galería del common rail | Tiene la función de acumular el combustible a alta presión que es suministrado por la bomba de alta presión de combustible con esto se asegura que permanezca constante y sin variar la presión de inyección al abrir el inyector en cualquier condición de operación | Fuga externa                 | fisura externa, pérdida de combustible                     | inspección visual en busca de fuga / fisura                       | Cambiar common rail           | Inspecciones periódicas                            | 35                       | 1     | 35    |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                              | niple de cañería defectuoso                                | Apriete de niple de cañería                                       | Cambiar cañería               | Inspecciones periódicas                            |                          |       |       |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       | Baja presión de inyección    | válvula limitadora mal regulada                            | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión | cambiar la válvula limitadora | inspecciones periódica de la válvula               |                          |       |       |
|             | bomba de transferencia  | Es la encargada de bombear el combustible desde el estanque de combustible hasta la bomba de alta, pasando por los filtros de combustible y la válvula moduladora.                                                                                                    | Baja presión de salida       | válvula limitadora mal regulada                            | regular válvula limitadora y comprobar la variación de la presión | cambiar la válvula limitadora | inspecciones periódica de la válvula               | 30                       | 2     | 60    |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                              | Carcasa con fuga                                           | Inspección visual                                                 | Cambiar bomba                 | Inspección periódica de bomba                      |                          |       |       |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       | Alta temperatura             | Desgaste interno de la bomba                               | Desarmar y evaluar bomba                                          | Cambiar boma                  | Inspecciones periódicas de temperatura             |                          |       |       |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       | Bajo caudal de salida        | Carcasa con fuga                                           | Inspección visual                                                 | Cambiar bomba                 | Inspección periódica de bomba                      |                          |       |       |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                              | pérdida del rendimiento volumétrico de la bomba            | desarme bomba y revise estado de los cilindros                    | Cambiar bomba                 | Medir periódicamente el caudal y presión de salida |                          |       |       |
|             |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                       | Ruido anormal                | rodamiento del toma fuerza de la bomba malo (distribución) | desconecte la bomba y pruebe giro                                 | cambiar bomba y/o toma fuerza | Inspección periódica de bomba                      |                          |       |       |

Tabla 2.38: FMECA motor MTU (continuación)

| Sistema     | componente                             | Función                                                                                                                                                              | Fallas Funcionales "Sintoma" | Causa Posible (Modos de falla)         | Método de detección                               | Acción Correctiva Sugerida                    | Acción preventiva o predictiva        | Consecuencia de la falla |       |       |
|-------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|             |                                        |                                                                                                                                                                      |                              |                                        |                                                   |                                               |                                       | Cons.                    | Frec. | Crit. |
| Combustible | cañería de alta presión de combustible | Comunica el combustible que está en el common rail a alta presión, hacia los inyectores alojados en la culata                                                        | Fuga externa                 | fisura externa, pérdida de combustible | inspección visual en busca de fuga / fisura       | Cambiar cañería                               | Inspecciones periódicas               | 26                       | 4     | 104   |
|             |                                        |                                                                                                                                                                      |                              | niple de cañería defectuoso            | Apriete de niple de cañería                       | Cambiar cañería                               | Inspecciones periódicas               |                          |       |       |
|             | cañería de retorno de combustible      | Es la de drenar el combustible de retorno que viene desde el inyector hacia un riel común de retorno.                                                                | Fuga externa                 | fisura externa, pérdida de combustible | inspección visual en busca de fuga / fisura       | Cambiar cañería                               | Inspecciones periódicas               | 26                       | 3     | 78    |
|             |                                        |                                                                                                                                                                      |                              | niple de cañería defectuoso            | Apriete de niple de cañería                       | Cambiar cañería                               | Inspecciones periódicas               |                          |       |       |
|             | sensor de presión de combustible       | Entregar los valores de presión de combustible con que se alimenta a la bomba de alta                                                                                | Sin señal de salidad         | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes | 18                       | 3     | 54    |
|             |                                        |                                                                                                                                                                      |                              | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                       | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico         |                          |       |       |
|             | sensor de temperatura de combustible   | Medir la temperatura del combustible antes de ingresar al sistema de inyección, con este sensor puede verse la efectividad del sistema de refrigeración del petróleo | Sin señal de salidad         | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes | 18                       | 2     | 36    |
|             |                                        |                                                                                                                                                                      |                              | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                       | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico         |                          |       |       |
|             | sensor de alta presión de combustible  | Medir la presión de inyección entregada por la bomba de alta en todo rango de funcionamiento del motor                                                               | Sin señal de salidad         | Sin alimentación                       | Verifique presencia de los 24 [V] de alimentación | Verifique estado del arnes eléctrico y repare | Inspeccion visual de estado del arnes | 18                       | 3     | 54    |
|             |                                        |                                                                                                                                                                      |                              | Sensor en corte o aislado internamente | Mida resistencia del sensor                       | cambie el sensor                              | Inspeccion o cambio periodico         |                          |       |       |

Tabla 2.39: FMECA motor MTU (continuación)

## 2.8 Definir la frecuencia optima de inspecciones

Se define la frecuencia óptima de inspecciones bajo dos modelos:

- Minimizar el costo global de mantenimiento
- Aumentar la disponibilidad del componente

### 2.8.1 Frecuencia óptima de inspecciones para minimizar el costo global

A continuación se presenta las frecuencias óptimas para cada sistema del motor:

|       |     |
|-------|-----|
| horas |     |
| mes   | 414 |

| SISTEMAS               | MTBF | MTTR | T.<br>inspección | C.<br>predictivo | C.<br>reparación | C. falla | $\lambda(n)$ | $f(n)$ | i     | u     | n    | frecuencia<br>inspección |
|------------------------|------|------|------------------|------------------|------------------|----------|--------------|--------|-------|-------|------|--------------------------|
| LUBRICACIÓN            | 958  | 21,6 | 4                | 200              | 3567             | 25920    | 0,0010       | 0,432  | 103,6 | 19,2  | 1,62 | 255                      |
| SENSORES               | 928  | 13   | 3                | 200              | 10371            | 15600    | 0,0011       | 0,446  | 138,1 | 31,9  | 1,78 | 232                      |
| CONTROL<br>ELECTRONICO | 834  | 13,7 | 3                | 200              | 1712             | 16500    | 0,0012       | 0,497  | 138,1 | 30,13 | 1,58 | 263                      |
| ESTRUCTURAL            | 2510 | 4    | 2                | 200              | 4328             | 4800     | 0,0004       | 0,165  | 207,2 | 103,6 | 0,78 | 534                      |
| COMBUSTIBLE            | 296  | 7    | 4                | 200              | 3173             | 8400     | 0,0034       | 1,401  | 103,6 | 59,2  | 1,82 | 228                      |
| REFRIGERACIÓN          | 1729 | 24   | 4                | 200              | 3105             | 28800    | 0,0006       | 0,240  | 103,6 | 17,3  | 1,26 | 329                      |
| ESCAPE                 | 819  | 8    | 2                | 200              | 269              | 9600     | 0,0012       | 0,506  | 207,2 | 51,8  | 1,43 | 290                      |
| ELECTRICO              | 1077 | 4    | 3                | 200              | 244              | 4800     | 0,0009       | 0,385  | 138,1 | 103,6 | 0,72 | 576                      |

Tabla 2.40: Frecuencia de inspección para minimizar el costo global

## 2.8.2 Frecuencia óptima de inspecciones para aumentar la disponibilidad

A continuación se presenta las frecuencias óptimas para cada sistema del motor:

|       |         |
|-------|---------|
| horas |         |
| mes   | 414,348 |

| SISTEMAS               | MTBF | MTTR  | T.<br>inspección | $\lambda(n)$ | $f(n)$  | $\mu(n)$ | $\theta(n)$ | n        | frecuencia de<br>inspección |
|------------------------|------|-------|------------------|--------------|---------|----------|-------------|----------|-----------------------------|
| LUBRICACIÓN            | 958  | 21,6  | 4                | 0,001043     | 0,43234 | 19,2     | 103,6       | 0,84786  | 489                         |
| SENSORES               | 928  | 13    | 3                | 0,001077     | 0,44647 | 31,9     | 138,1       | 0,65996  | 628                         |
| CONTROL<br>ELECTRONICO | 834  | 13,75 | 3                | 0,001199     | 0,49680 | 30,1     | 138,1       | 0,82286  | 504                         |
| ESTRUCTURAL            | 2510 | 4     | 2                | 0,000398     | 0,16510 | 103,6    | 207,2       | -1,10806 | 374                         |
| COMBUSTIBLE            | 296  | 7     | 4                | 0,003381     | 1,40123 | 59,2     | 103,6       | 0,89697  | 462                         |
| REFRIGERANCIÓN         | 1729 | 24    | 4                | 0,000578     | 0,23968 | 17,3     | 103,6       | 0,36333  | 1140                        |
| ESCAPE                 | 819  | 8     | 2                | 0,001221     | 0,50600 | 51,8     | 207,2       | 0,70508  | 588                         |
| ELECTRICO              | 1077 | 4     | 3                | 0,000928     | 0,38485 | 103,6    | 138,1       | -0,66723 | 621                         |

Tabla 2.41: Frecuencia de inspección para aumentar la disponibilidad

## 2.9 Modificar pautas y mantenimiento preventivo

Por medio del FMECA, se obtienen las tareas preventivas que evitan las posibles fallas del motor, y con el análisis de las frecuencias óptimas de inspección y/o intervención, se obtienen las frecuencias de las tareas preventivas, y con el conjunto de tareas y frecuencias se desarrolla la siguiente pauta de mantenimiento preventivo:

| Sistema      | componente                                | Acción preventiva o predictiva                                                                        | Frecuencias x1000 |      |     |      |   |   |
|--------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-----|------|---|---|
|              |                                           |                                                                                                       | check list        | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 6 |
| Pre Trabajos |                                           | Realizar prueba de potencia, evaluar condición del motor                                              |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Obtención y evaluación de los parametros del motor                                                    |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Lavado del motor                                                                                      |                   |      | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Engrase del soporte delantero del motor                                                               |                   |      | X   |      | X | X |
| Lubricación  | Cabezal de Aceite                         | cambio periodicos de los filtros de aceite cartuchos                                                  |                   |      | X   |      | X | X |
|              |                                           | inspecciones periodica de la válvula limitadora                                                       |                   |      |     |      | X | X |
|              |                                           | verificar periodicamente el apriete de los filtros                                                    |                   | X    |     | X    |   |   |
|              |                                           | verificar el estado del O ´ ring periodicamente                                                       |                   |      | X   |      | X | X |
|              |                                           | Mediciones periodicas despues de cambiar los filtros                                                  |                   |      | X   |      | X | X |
|              | Filtro centrifugo                         | verificar periodicamente el apriete del filtro (abrazadera)                                           |                   | X    |     | X    |   |   |
|              |                                           | verificar el estado del O ´ ring periodicamente                                                       |                   |      | X   |      | X | X |
|              |                                           | Mediciones periodicas del diferencia de presión (entrada y salida) despues de cambiar el papel filtro |                   |      | X   |      | X | X |
|              |                                           | cambio periodico del papel filtro                                                                     |                   |      | X   |      | X | X |
|              | carter de aceite                          | inspecciones periodica de la junta del carte, en busca de fugas                                       |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Cambio de aceite                                                                                      |                   |      | X   |      | X | X |
|              |                                           | inspecciones periodicas del carter en busca de fisuras                                                |                   |      | X   |      | X | X |
|              | varilla de nivel                          | inspecciones periodicas del estado de la varilla                                                      | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|              | bomba de aceite                           | inspecciones periodica de la válvula limitadora                                                       |                   |      |     |      | X | X |
|              |                                           | Inspección periodica de bomba (desmontar carter)                                                      |                   |      |     |      |   | X |
|              |                                           | inspecciones periodica del nivel de aceite                                                            | X                 | X    |     | X    |   |   |
|              | carcas de enfriador de aceite             | limpieza periodica del enfriador de aceite                                                            |                   |      |     |      |   | X |
|              |                                           | analisis periodico del aceite                                                                         |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              | sensor de saturación de filtros de aceite | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                                         |                   |      | X   |      | X |   |
|              |                                           | Inspeccion periodico del sensor de saturación                                                         |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Cambio periodico del sensor de saturación                                                             |                   |      |     |      |   | X |
|              | sensor de presión de aceite               | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                                         |                   |      | X   |      | X | X |
|              |                                           | Inspeccion periodico del sensor de presión                                                            |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Cambio periodico del sensor de presión                                                                |                   |      |     |      |   | X |
|              | sensor de temperatura de aceite           | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                                         |                   |      | X   |      | X |   |
|              |                                           | Inspeccion periodico del sensor de temperatura                                                        |                   | X    | X   | X    | X | X |
|              |                                           | Cambio periodico del sensor de temperatura                                                            |                   |      |     |      |   | X |

Tabla 2.42: Pauta de mantenimiento preventivo.

| Sistema             | componente                      | Acción preventiva o predictiva                                                                                     | Frecuencias x1000 |      |     |      |   |   |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-----|------|---|---|
|                     |                                 |                                                                                                                    | check list        | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 6 |
| Electrico           | Alternador                      | inspecciones del estado y tensión correa alternador                                                                |                   | X    | X   | X    | X | X |
|                     |                                 | Medición del voltaje de salida                                                                                     |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Medición de la aislación                                                                                           |                   |      | X   |      | X | X |
| Control Electrónico | sensor de referencia de tiempo  | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                                                      |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspeccion periodico del sensor de referencia de tiempo                                                            |                   | X    | X   | X    | X |   |
|                     |                                 | Cambio periodico del sensor de referencia de tiempo                                                                |                   |      |     |      |   | X |
|                     | sensor de referencia sincrónica | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                                                      |                   |      | X   |      | X |   |
|                     |                                 | Inspeccion periodico del sensor de referencia sincrónica                                                           |                   | X    | X   | X    | X | X |
|                     |                                 | Cambio periodico del sensor de referencia sincrónica                                                               |                   |      |     |      |   | X |
|                     | válvula moduladora              | Inspecciones periodicas a la válvula moduladora                                                                    |                   |      |     |      | X | X |
|                     |                                 | Inspección periodica de la presión de alimentación                                                                 |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a la líneas electricas de la válvula moduladoras                                           |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | Módulo c.l electrónico          | lectura periodica de codigos de falla del ECM                                                                      |                   | X    | X   | X    | X | X |
| Escape              | goma descarga de turbo          | Inspecciones periodicas de las abrazaderas de las gomas de descarga de turbo                                       |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a las gomas descarga de turbo                                                              |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | turbo                           | cambio periodico de los filtros de aire                                                                            |                   | X    | X   | X    | X | X |
|                     |                                 | cambio periodico de las líneas de lubricación del turbo                                                            |                   |      |     |      |   | X |
|                     |                                 | inspecciones periodicas del buen funcionamiento del ventilador (válvula rockford, rockford y aspas del ventilador) |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | inspecciones periodicas del funcionamiento del turno, uso de camara termograficas                                  |                   | X    | X   | X    | X | X |
|                     |                                 | inspecciones periodicas de las junta del turbo                                                                     |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | tubo de descarga de turbo       | Inspecciones periodicas y apriete de abrazaderas del tubo de descarga de turbo                                     |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a las gomas de tubo de descarga de turbo                                                   |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | tubo de escape                  | Inspecciones periodicas y apriete de abrazaderas del tubo de escape                                                |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a las gomas de tubo de escape                                                              |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | y de escape                     | Inspecciones periodicas y apriete de abrazaderas de la Y de escape                                                 |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a las gomas de la Y de escape                                                              |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | múltiple de escape              | Inspecciones periodicas y apriete de abrazaderas del múltiple de escape                                            |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a las gomas del multiple de escape                                                         |                   |      | X   |      | X | X |
|                     | silenciadores                   | Inspecciones periodicas y apriete de abrazaderas del silenciador                                                   |                   |      | X   |      | X | X |
|                     |                                 | Inspecciones periodicas a las gomas del silenciador                                                                |                   |      | X   |      | X | X |

Tabla 2.43: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

| Sistema       | componente                                      | Acción preventiva o predictiva                                 | Frecuencias x1000 |      |     |      |     |
|---------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|------|-----|------|-----|
|               |                                                 |                                                                | check list        | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 6 |
| Refrigeración | sensor de temperatura del intercooler           | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor  |                   |      | X   |      | X X |
|               |                                                 | Inspeccion periodico del sensor de temperatura del intercooler |                   | X    | X   | X    | X   |
|               |                                                 | Cambio periodico del sensor de temperatura del intercooler     |                   |      |     |      | X   |
|               | sensor de presión de intercooler                | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor  |                   |      | X   |      | X X |
|               |                                                 | Inspeccion periodico del sensor de presión del intercooler     |                   | X    | X   | X    | X   |
|               |                                                 | Cambio periodico del sensor de presión del intercooler         |                   |      |     |      | X   |
|               | sensor de presión de refrigerante               | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor  |                   |      | X   |      | X X |
|               |                                                 | Inspeccion periodico del sensor de presión de refrigerante     |                   | X    | X   | X    | X X |
|               |                                                 | Cambio periodico del sensor de presión de refrigerante         |                   |      |     |      | X   |
|               | sensor de nivel de refrigerante                 | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor  |                   |      | X   |      | X X |
|               |                                                 | Inspeccion periodico del sensor de nivel de refrigerante       |                   | X    | X   | X    | X   |
|               |                                                 | Cambio periodico del sensor de nivel de refrigerante           |                   |      |     |      | X   |
|               | Sensor de temperatura de refrigerante del motor | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor  |                   |      | X   |      | X X |
|               |                                                 | Inspeccion periodico del sensor de temperatura de refrigerante |                   | X    | X   | X    | X   |
|               |                                                 | Cambio periodico del sensor de temperatura de refrigerante     |                   |      |     |      | X   |
|               | caja de tesmostatos de baja                     | revisión periodica de los tesmortatos de baja                  |                   |      |     |      | X X |
|               |                                                 | Revisión periodica de la caja de tesmortato de baja            |                   |      |     |      | X X |
|               | intercooler                                     | inspecciones periodicas al acuse de admisión                   | X                 | X    | X   | X    | X X |
|               |                                                 | inspecciones periodica de caja tesmortatos / radiador          |                   |      |     |      | X X |
|               |                                                 | inspecciones periodicas al intercooler                         |                   |      |     |      | X X |
|               |                                                 | inspecciones periodicas a los manguitos de goma                |                   | X    | X   | X    | X X |
|               | Radiador / Ventilador                           | inspecciones periodicas del nivel de refrigerante              | X                 | X    | X   | X    | X X |
|               |                                                 | inspecciones periodicas por fuga del radiador                  |                   |      | X   |      | X X |
|               |                                                 | inspección del rodillo tensor correa ventilador                |                   | X    | X   | X    | X X |
|               |                                                 | inspección estado y tensión correa de ventilador               | X                 | X    | X   | X    | X X |
|               | múltiple de refrigerante                        | Inspecciones periodicas del múltiple de refrigerante           |                   | X    | X   | X    | X X |
|               |                                                 | Inspecciones periodicas y apriete a abrazadera                 |                   | X    | X   | X    | X X |

Tabla 2.44: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

| Sistema       | componente                       | Acción preventiva o predictiva                                             | Frecuencias x1000 |      |     |      |   |   |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-----|------|---|---|
|               |                                  |                                                                            | check list        | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 6 |
| Refrigeración | caja de tesmostatos de alta      | revisión periodica de los tesmortatos de alta                              |                   |      |     |      | X | X |
|               |                                  | Revisión periodica de la caja de tesmortato de alta                        |                   |      |     |      | X | X |
|               | bomba secundaria de refrigerante | Inspección periodica de bomba secundaria de refrigerante                   |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | inspecciones periodica de caja tesmortatos / radiador                      |                   |      |     |      | X | X |
|               | bomba principal de refrigerante  | Inspección periodica de bomba principal de refrigerante                    |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | Inspección periodica de bomba principal de refrigerante (desarme)          |                   |      |     |      | X | X |
|               | válvula rockford                 | inspección visual a las lineas de aceite de la válvula rockford            |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | inspección visual al arnes del conector de la válvula solenoide            |                   |      | X   |      | X | X |
|               |                                  | cambiar válvula rockford periodicamente                                    |                   |      |     |      | X | X |
|               | rockford                         | inspección periodica del funcionamiento de la rockford                     |                   |      | X   |      | X | X |
| Combustible   | Inyector                         | inspección periodica el estado de la tobera                                |                   |      |     |      | X | X |
|               |                                  | medición periodica de la resistencia de la bobina                          |                   |      | X   |      | X | X |
|               |                                  | inspección periodica del arnes de alimentación                             |                   |      | X   |      | X | X |
|               | bomba de alta                    | inspecciones periodica de la válvula limitadora                            |                   |      | X   |      | X | X |
|               |                                  | Inspección periodica de bomba de alta                                      |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | Inspecciones periodicas de temperatura (camara termografica)               |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | Medir periodicamente el caudal y presión de salida                         |                   |      | X   |      | X | X |
|               | válvula moduladora               | Inspecciones periodicas a la válvula moduladora                            |                   |      | X   |      | X | X |
|               |                                  | Inspección periodica de la presión de alimentación                         |                   |      | X   |      | X | X |
|               |                                  | Inspecciones periodicas a la lineas electricas de la válvula moduladoras   |                   |      | X   |      | X | X |
|               | galería del common rail          | Inspecciones periodicas al common rail, por fugas                          | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | Inspecciones periodicas a los niples de cañerías                           | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | inspecciones periodica de la válvula limitadora de presión del common rail |                   |      | X   |      | X | X |
|               | bomba de tranferencia            | inspecciones periodica de la válvula limitadora de presión                 |                   |      | X   |      | X | X |
|               |                                  | Inspección periodica de bomba de transferencia en busca de fuga            |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | Inspecciones periodicas de temperatura (camara termografica)               |                   | X    | X   | X    | X | X |
|               |                                  | Medir periodicamente el caudal y presión de salida                         |                   |      | X   |      | X | X |

Tabla 2.45: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

| Sistema     | componente                             | Acción preventiva o predictiva                                                        | Frecuencias x1000 |      |     |      |   |   |
|-------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-----|------|---|---|
|             |                                        |                                                                                       | check list        | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 6 |
| Combustible | cabezal de combustible                 | cambio periodicos de los filtros de combustible                                       |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | inspecciones periodica de la válvula limitadora de presión                            |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | verificar periodicamente el apriete de los filtros                                    |                   | X    |     | X    |   |   |
|             |                                        | verificar el estado del O´ring periodicamente                                         |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | Mediciones periodicas de presión despues de cambiar los filtros                       |                   |      | X   |      | X | X |
|             | cañería de alta presión de combustible | Inspecciones periodicas de la cañería de alta presión de combustible en busca de fuga | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|             |                                        | Inspecciones periodicas a los niples de cañerías en busca de fugas                    | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|             | cañería de retorno de combustible      | Inspecciones periodicas de la cañería de retorno de combustible en busca de fugas     | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|             |                                        | Inspecciones periodicas a los niples de cañeria de retorno en busca de fugas          | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|             | sensor de presión de combustible       | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                         |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | Inspeccion periodico del sensor de presión de combustible                             |                   | X    | X   | X    | X |   |
|             |                                        | Cambio periodico del sensor de presión de combustible                                 |                   |      |     |      |   | X |
|             | sensor de temperatura de combustible   | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                         |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | Inspeccion periodico del sensor de temperatura de combustible                         |                   | X    | X   | X    | X |   |
|             |                                        | Cambio periodico del sensor de temperatura de combustible                             |                   |      |     |      |   | X |
|             | sensor de alta presión de combustible  | Inspeccion visual de estado del arnes del conector del sensor                         |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | Inspeccion periodico del sensor de alta presión                                       |                   | X    | X   | X    | X |   |
|             |                                        | Cambio periodico del sensor de alta presión                                           |                   |      |     |      |   | X |
| Admisión    | Caja de filtros de aire                | Evaluar estado de los restrictores de los filtros de aire                             |                   | X    | X   | X    | X | X |
|             |                                        | Limpieza de colectores de plover                                                      | X                 | X    | X   | X    | X | X |
|             |                                        | Cambio de filtros de aire primarios                                                   |                   | X    | X   | X    | X | X |
|             |                                        | Cambio de filtros de aire secundarios                                                 |                   |      | X   |      | X | X |
|             | Ductos de admisión                     | Inspecciones periodicas Gomas de unión                                                |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | Inspecciones periodicas de los ductos de admisión en busca de fugas                   |                   |      | X   |      | X | X |
|             |                                        | Inspecciones periodicas de las barras de soporte (barras y roturas                    |                   |      | X   |      | X | X |

Tabla 2.46: Pauta de mantenimiento preventivo (continuación).

## 2.10 Definir criterios de reemplazo del componente

### Modelo de reemplazo de Equipo:

El modelo de reemplazo de equipo busca minimizar el costo global, para tal fin, se considera el siguiente modelo:

Modelo de horizonte infinitos, tiempo discreto: El procedimiento que se basa en los supuesto más realistas y por ende más utilizados en la industria es el de tiempo discreto y horizonte infinitos. En él se busca determinar cada cuantos períodos de tiempo será óptimo reemplazar el equipo. El procedimiento utilizado consiste en comparar los costos medios por períodos actualizados, suponiendo distintos números de períodos. Conociendo e valor de dichos costos para cada uno de los posibles períodos de renovación se realiza una comparación, siendo el período óptimo el que arroje el menor costo medio por período. El procedimiento resulta muy simple si se construye la siguiente tabla:

| años | C(t)       | f(t) | C(t) f(t)  | $\Sigma C(t) * f(t)$ | Q(t)         | FRC   | Cme(t)     |
|------|------------|------|------------|----------------------|--------------|-------|------------|
| 1    | \$ 86.297  | 0,87 | \$ 75.040  | \$ 75.040            | \$ 485.040   | 1,150 | \$ 557.797 |
| 2    | \$ 71.822  | 0,76 | \$ 54.308  | \$ 129.348           | \$ 539.348   | 0,615 | \$ 331.762 |
| 3    | \$ 64.971  | 0,66 | \$ 42.719  | \$ 172.067           | \$ 582.067   | 0,438 | \$ 254.932 |
| 4    | \$ 65.742  | 0,57 | \$ 37.588  | \$ 209.656           | \$ 619.656   | 0,350 | \$ 217.044 |
| 5    | \$ 315.581 | 0,50 | \$ 156.899 | \$ 366.555           | \$ 776.555   | 0,298 | \$ 231.658 |
| 6    | \$ 90.154  | 0,43 | \$ 38.976  | \$ 405.531           | \$ 815.531   | 0,264 | \$ 215.493 |
| 7    | \$ 113.795 | 0,38 | \$ 42.780  | \$ 448.310           | \$ 858.310   | 0,240 | \$ 206.304 |
| 8    | \$ 145.058 | 0,33 | \$ 47.420  | \$ 495.730           | \$ 905.730   | 0,223 | \$ 201.842 |
| 9    | \$ 183.945 | 0,28 | \$ 52.289  | \$ 548.019           | \$ 958.019   | 0,210 | \$ 200.776 |
| 10   | \$ 230.454 | 0,25 | \$ 56.965  | \$ 604.983           | \$ 1.014.983 | 0,199 | \$ 202.238 |

Tabla 2.47: Tiempo óptimo de reemplazo.

### Procedimiento:

- 1) Se indican los períodos y los costos anuales C(t) para cada uno de los períodos t

- 2) Se calcula el factor de actualización para cada uno de los períodos utilizando:  $f(t) = 1/(1+i)^t$
- 3) Se llevan los costos anuales a valor presente:  $C(t) * f(t)$
- 4) Se acumulan los valores presentes hasta el período determinado:

$$\sum_{i=0}^t c(t) * f(t)$$

- 5) Se calcula la inversión inicial con los valores presentes acumulados, obteniendo los costos totales actualizados  $Q(t)$ .
- 6) Se calcula FRC para cada uno de los períodos:

$$FRC(t) = \frac{i * (1 + i)^t}{((1 + i)^t - 1)}$$

- 7) Se calcula el costo medio periódico multiplicado FRC por los costos totales actualizados:

$$Q(t) * FRC(t)$$

Por último se calcula el valor del costo medio por período especificado en la primera columna:

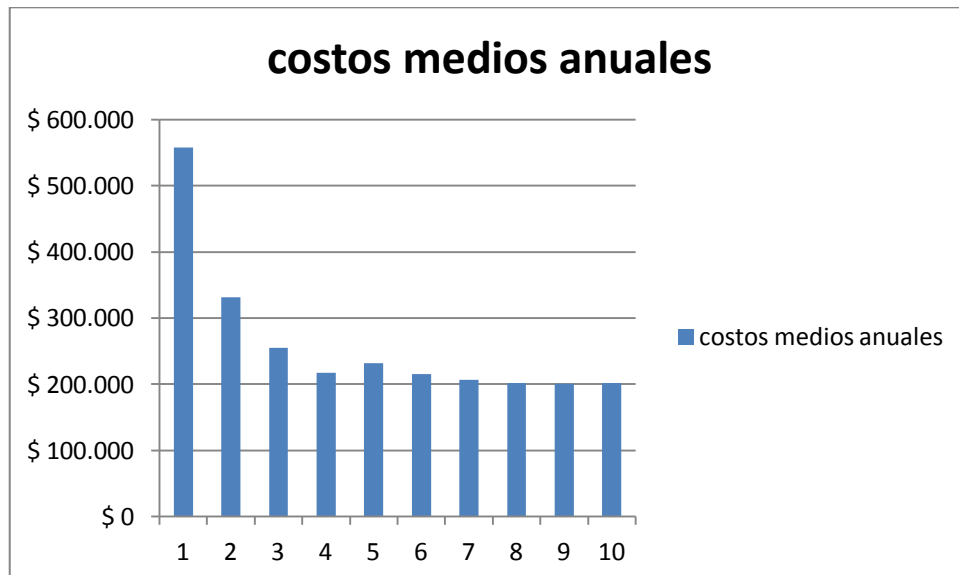


Figura 2.25: Costos medios anuales

Se observa que bajo este modelo, se considera un mantenimiento mayor al quinto año (24000 [hr]), el modelo converge con la política actual de reemplazo de equipo:

- Se compra el motor nuevo, se realiza un mantenimiento mayor a las 24000, luego se instala para operar por un periodo más, después del segundo período de uso, se da de baja.

## 2.11 Gestión de repuestos

Al momento de realizar el estudio, no se tiene la demanda de los repuestos, por lo cual se considera la tasa de falla de los sistemas como la demanda de los repuestos y se utiliza el modelo que considera el costo de falla.

|     |     |
|-----|-----|
| mes | 414 |
|-----|-----|

| ítem              | nivel de servicio | MTBF | $\lambda$ (un/mes) | q (un) | f (1/mes) | pu (USD) | Cf (USD) | i     | Cad (USD) | T (mes) |
|-------------------|-------------------|------|--------------------|--------|-----------|----------|----------|-------|-----------|---------|
| Lubricación       | 0,9979            | 958  | 0,4322             | 2      | 0,21      | 3567     | 25920    | 0,015 | 250       | 4,65    |
| Sensores          | 0,9901            | 928  | 0,4461             | 1      | 0,37      | 10371    | 15600    | 0,015 | 250       | 2,70    |
| Control eléctrico | 0,9984            | 834  | 0,4964             | 3      | 0,16      | 1712     | 16500    | 0,015 | 250       | 6,27    |
| Estructural       | 0,9867            | 2510 | 0,1649             | 1      | 0,15      | 4328     | 4800     | 0,015 | 250       | 6,88    |
| Combustible       | 0,9944            | 296  | 1,3986             | 4      | 0,36      | 3173     | 8400     | 0,015 | 250       | 2,75    |
| Refrigeración     | 0,9984            | 1729 | 0,2394             | 2      | 0,15      | 3105     | 28800    | 0,015 | 250       | 6,70    |
| Escape            | 0,9996            | 819  | 0,5055             | 8      | 0,06      | 269      | 9600     | 0,015 | 250       | 15,66   |
| Electrico         | 0,9992            | 1077 | 0,3844             | 7      | 0,05      | 244      | 4800     | 0,015 | 250       | 18,86   |

Tabla 2.48: Gestión de repuestos.

## 2.12 Directriz general para la implementación del TPM

Como el TPM es un modelo de sistema gerencial, utilizado para el mejoramiento continuo que permite la participación de todo el personal de la organización, las directrices generales para la implementación se fundamente en dos pilares:

- Participación del operario en las actividades de mantenimiento, específicamente en la inspección del equipo, por medio de un check list (desarrollado en el ítem de modificación de pauta).

\* para tal fin, es necesario realizar capacitaciones a los operarios con el fin de que tenga las habilidades suficientes para identificar un posible problema.

- La creación de comités de mejoramiento continuo, donde los participantes sean los mismo mantenedores que ayudado por un supervisor, realicen propuestas de mejoramiento tanto en los métodos actuales de trabajos como mejoras en los equipos mismos.

### **CAPÍTULO 3: RESULTADOS**

### 3 Resultados

A continuación se presenta los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo

#### 3.1 Selección del motor con menor costo de ciclo de vida

En la selección del motor, se observa que el motor MTU S4000 tiene un costo de ciclo de vida 20% menor que el motor QSK-60, por lo cual se recomienda el uso del motor MTU S4000

| Motor     | Costo de ciclo de vida |
|-----------|------------------------|
| MTU S4000 | \$ 3.371.704           |
| QSK-60    | \$ 4.194.105           |

Tabla 3.1: Costos de ciclo de vida por motor.

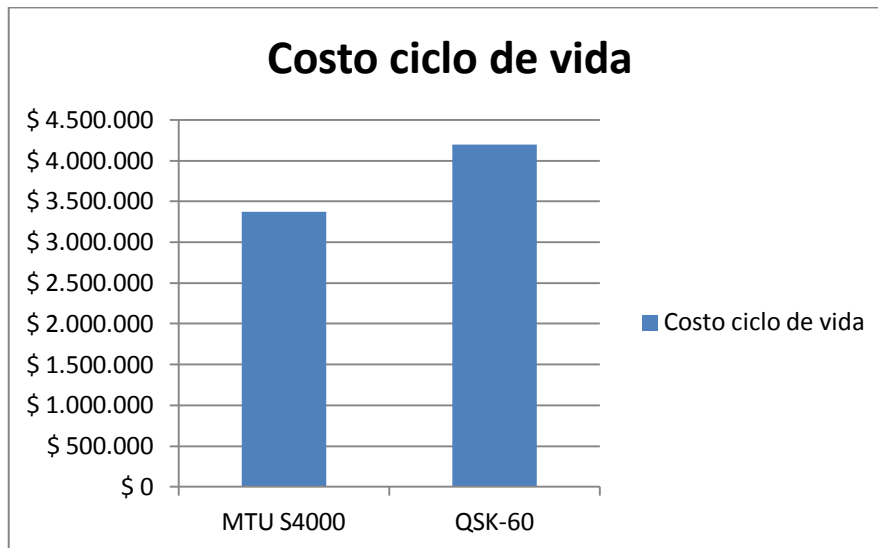


Figura 3.1: Comparación del Costo de ciclo de vida de los motores

Esta diferencia de costo se presenta principalmente en el costo de combustible, el valor del motor nuevo, el costo de reparación y por último el costo de falla; lucro cesante, ya que el motor MTU tiene una disponibilidad mayor.

### 3.2 Modelamiento de la confiabilidad

En primer lugar, se observa que la pendiente de falla (tasa de falla [ $\Delta \text{falla} / \Delta t$ ]) aumenta a los 7500 [hr]

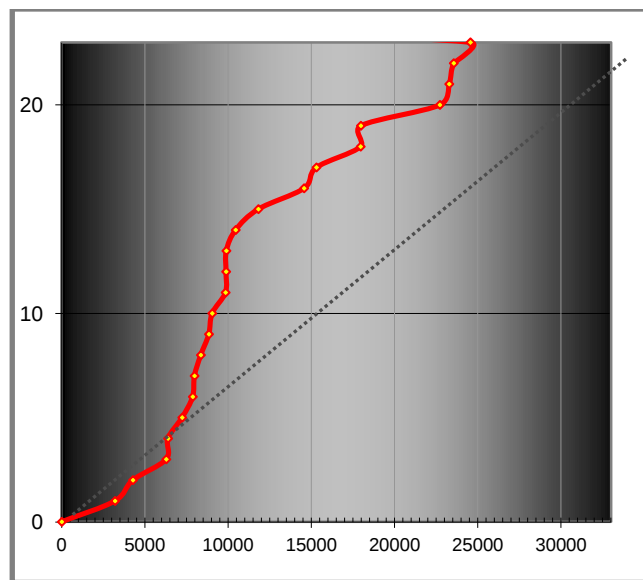


Figura 3.2: Tendencia de fallas motor MTU

En segundo lugar se observa que la confiabilidad en el tiempo MTBF es de 29,44%

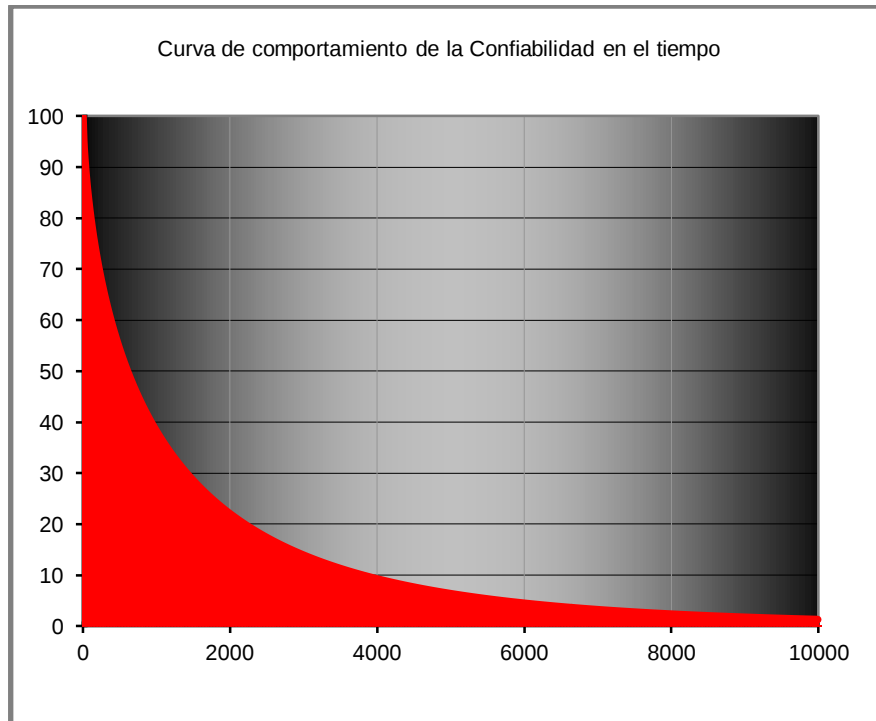


Figura 3.3: Curva de Confiabilidad en el tiempo, Motor MTU

En tercer lugar, se observa que la tasa de falla es levemente decreciente con un  $\beta < 1$ , pero con tendencia a ser constante, lo que significa que el equipo está saliendo de la zona infantil y entrando a la zona adulta (fallas aleatorias) y se correcto utilizar la distribución exponencial para simplificar los cálculos.

Y por último, se observa que a disponibilidad del motor es de 98,72%

$$A(i) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{1067,428}{1067,428 + 13,826} = 0,9872 \approx 98,72\%$$

### 3.3 Análisis de Costos

En el análisis de costos se observa que entre los principales costos del mantenimiento, el costo más importante (el mayor) es el costo de falla o de lucro cesante.

Entre los sistemas, el sistema con mayor costo de emergencia es el sistema de lubricación:

| Sistema             | TTF<br>(hr) | TTR<br>(hr) | costos       |            |            |
|---------------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|
|                     |             |             | Intervención | Falla      | Emergencia |
| LUBRICACIÓN         | 4792        | 108         | \$ 3.567     | \$ 129.600 | \$ 133.167 |
| SENSORES            | 4640        | 65          | \$ 10.371    | \$ 78.000  | \$ 88.371  |
| CONTROL ELECTRONICO | 3336        | 55          | \$ 1.712     | \$ 66.000  | \$ 67.712  |
| REFRIGERANCIÓN      | 3457        | 48          | \$ 4.328     | \$ 57.600  | \$ 61.928  |
| ESCAPE              | 1638        | 16          | \$ 3.173     | \$ 19.200  | \$ 22.373  |
| COMBUSTIBLE         | 591         | 14          | \$ 3.105     | \$ 16.800  | \$ 19.905  |
| ESTRUCTURAL         | 5019        | 8           | \$ 269       | \$ 9.600   | \$ 9.869   |
| ELECTRICO           | 1077        | 4           | \$ 244       | \$ 4.800   | \$ 5.044   |

Tabla 3.2: Costos globales por sistema.

Se realiza un diagrama de Pareto valorizado:

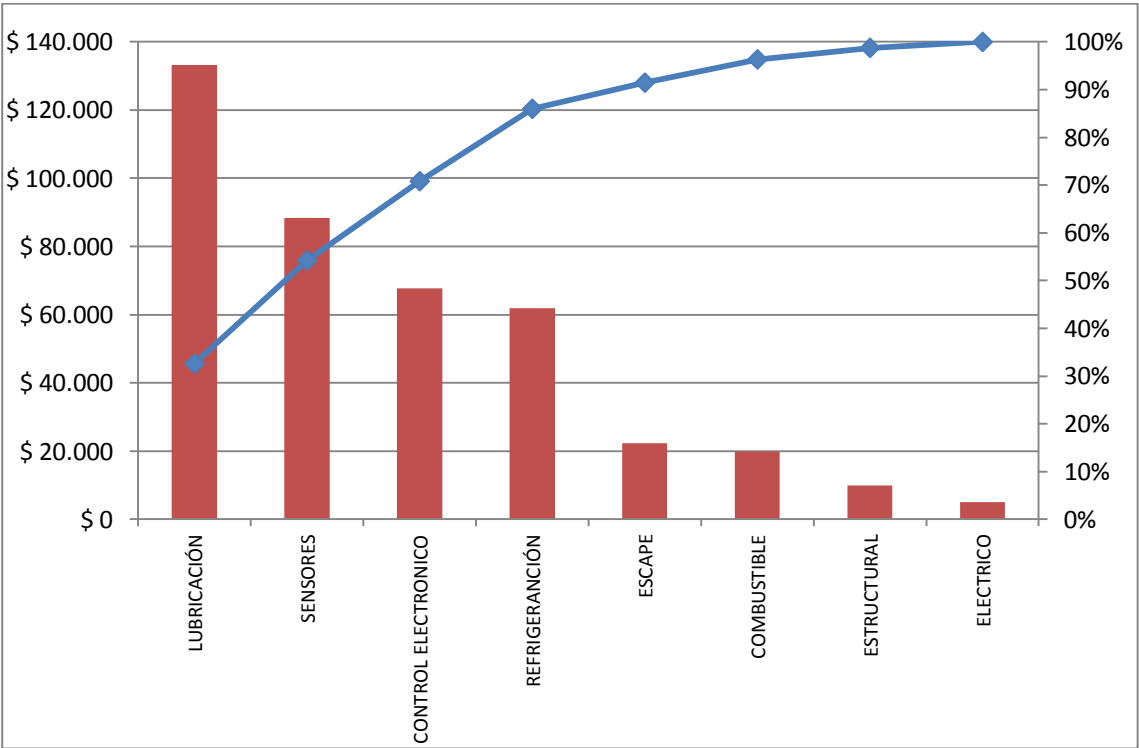


Figura 3.4: Diagrama de Pareto valorizado del costo global de mantenimiento

Esto se debe, principalmente a que si falla el sistema de lubricación, el motor tiene un desgaste catastrófico, provocando un alto costo de reparación.

### 3.4 Selección de la estrategia de mantenimiento

Se observa que el menor costo de mantenimiento se genera en el periodo 650 a 2300 [hrs], variando muy poco en ese conjunto de tiempo, lo que representa a primera vista que el mantenimiento óptimo no es el correctivo.

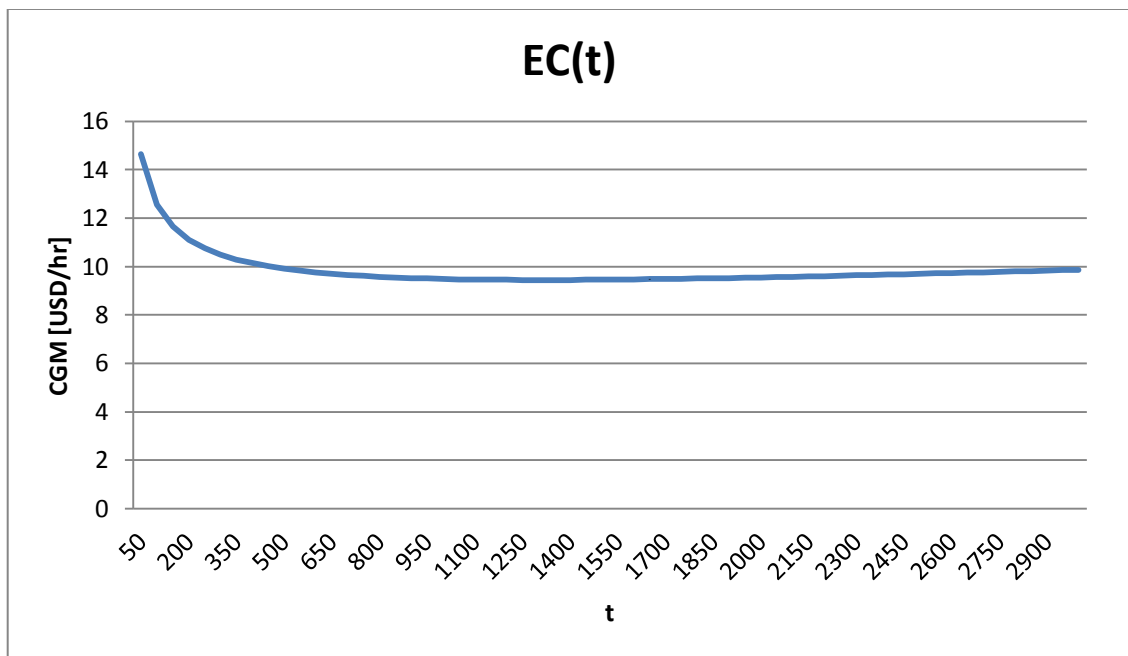


Figura 3.5: Modelamiento del costo de mantenimiento en función del tiempo de intervención

Al momento de evaluar en ese periodo de tiempo, los tres tipos de mantenimientos aplicables al equipo, se obtiene que el mantenimiento predictivo genera el menor costo global de mantenimiento:

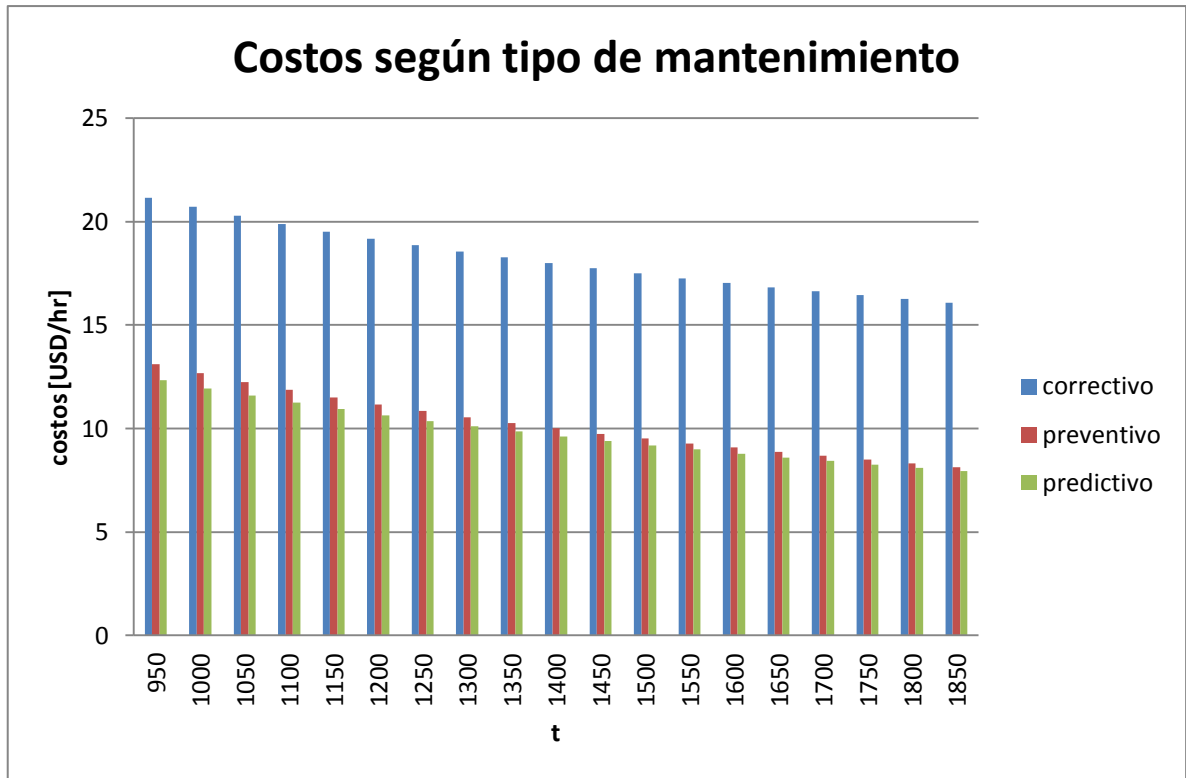


Figura 3.6: Comparación del costo entre las tácticas de mantenimiento en función del tiempo

No obstante a esto, se observa que siguiendo la lógica:

$$C_{correctivo} > C_{preventivo} \rightarrow 16,07 > 8,14$$

$$C_{predictivo} < (C_{correctivo} - C_{preventivo}) \rightarrow 7,97 < (16,07 - 8,14) \rightarrow 7,97 < 7,93$$

La estrategia de mantenimiento predictivo está al límite con la estrategia de mantenimiento preventivo.

Además se observa que técnicamente se puede aplicar las siguientes tácticas de mantenimiento predictivo:

| Sistema             | Señal débil                              | Registro de falla | técnica predictiva                                                                                                             |
|---------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LUBRICACIÓN         | Presión, Temperatura, Particulado        | Si                | Análisis de aceite, parámetros del ECM (temperatura y presión)                                                                 |
| SENSORES            | Resistencia eléctrica                    | No                | Medición de la resistencia eléctrica y trazado de tendencia (proyección de vida)                                               |
| CONTROL ELECTRONICO | Código de falla                          | Si                | Condiciona al código de falla                                                                                                  |
| REFRIGERANCION      | Presión, Temperatura, análisis de acidez | Si                | Análisis del refrigerante, parámetros del ECM (temperatura y presión) fotografía térmica a la bomba de refrigerante            |
| ESCAPE              | Temperatura                              | Si                | fotografía térmica a turbos compresores                                                                                        |
| COMBUSTIBLE         | Presión, Temperatura                     | Si                | Parámetros del ECM (temperatura y presión), fotografía térmica a la bomba de combustible                                       |
| ESTRUCTURAL         | desgaste (juego mecánico) / vibraciones  | No                | Medición del juego axial (tendencia y proyección de vida) medición de vibraciones global (sin FFT)                             |
| ELECTRICO           | Resistencia eléctrica, Voltaje, Amperaje | Si                | Medición de la resistencia eléctrica, medición del voltaje de salida del alternador, amperaje de arranque del motor de partida |

Tabla 3.3: Análisis de las señales débiles de los componentes y la técnica predictiva aplicable.

### 3.5 Componentes Críticos

Se selecciona los componentes críticos bajo cuatro criterios, siendo estos:

- Sistemas que más afecta al costo global de mantenimiento
- Sistemas que más afecta a la confiabilidad del equipo
- Sistemas que más afecta a la disponibilidad del equipo

- Matriz de decisión basado en la norma S.A.E. JA 1011-12

Los componentes que más afectan el costo global de mantenimiento son:

| Sistema             | TTF (hr) | TTR (hr) | costos       |            |            |
|---------------------|----------|----------|--------------|------------|------------|
|                     |          |          | Intervención | Falla      | Emergencia |
| LUBRICACIÓN         | 4792     | 108      | \$ 3.567     | \$ 129.600 | \$ 133.167 |
| SENSORES            | 4640     | 65       | \$ 10.371    | \$ 78.000  | \$ 88.371  |
| CONTROL ELECTRONICO | 3336     | 55       | \$ 1.712     | \$ 66.000  | \$ 67.712  |
| REFRIGERACIÓN       | 3457     | 48       | \$ 4.328     | \$ 57.600  | \$ 61.928  |
| ESCAPE              | 1638     | 16       | \$ 3.173     | \$ 19.200  | \$ 22.373  |
| COMBUSTIBLE         | 591      | 14       | \$ 3.105     | \$ 16.800  | \$ 19.905  |
| ESTRUCTURAL         | 5019     | 8        | \$ 269       | \$ 9.600   | \$ 9.869   |
| ELECTRICO           | 1077     | 4        | \$ 244       | \$ 4.800   | \$ 5.044   |

Tabla 3.4: Costos globales por sistema.

Los componentes que más afectan la confiabilidad del motor son:

| Sistema             | MTBF (hr) | MTTR (hr) | $\lambda$ |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| SENSORES            | 4910      | 13        | 0,000204  |
| LUBRICACIÓN         | 4910      | 22        | 0,000204  |
| CONTROL ELECTRONICO | 6138      | 14        | 0,000163  |
| ESCAPE              | 12275     | 8         | 0,000081  |
| REFRIGERACIÓN       | 12275     | 24        | 0,000081  |
| COMBUSTIBLE         | 12275     | 7         | 0,000081  |
| ESTRUCTURAL         | 12275     | 4         | 0,000081  |
| ELECTRICO           | 24551     | 4         | 0,000041  |

Tabla 3.5: Tasa de falla por sistema.

Se obtiene la siguiente grafica de confiabilidad por sistema:

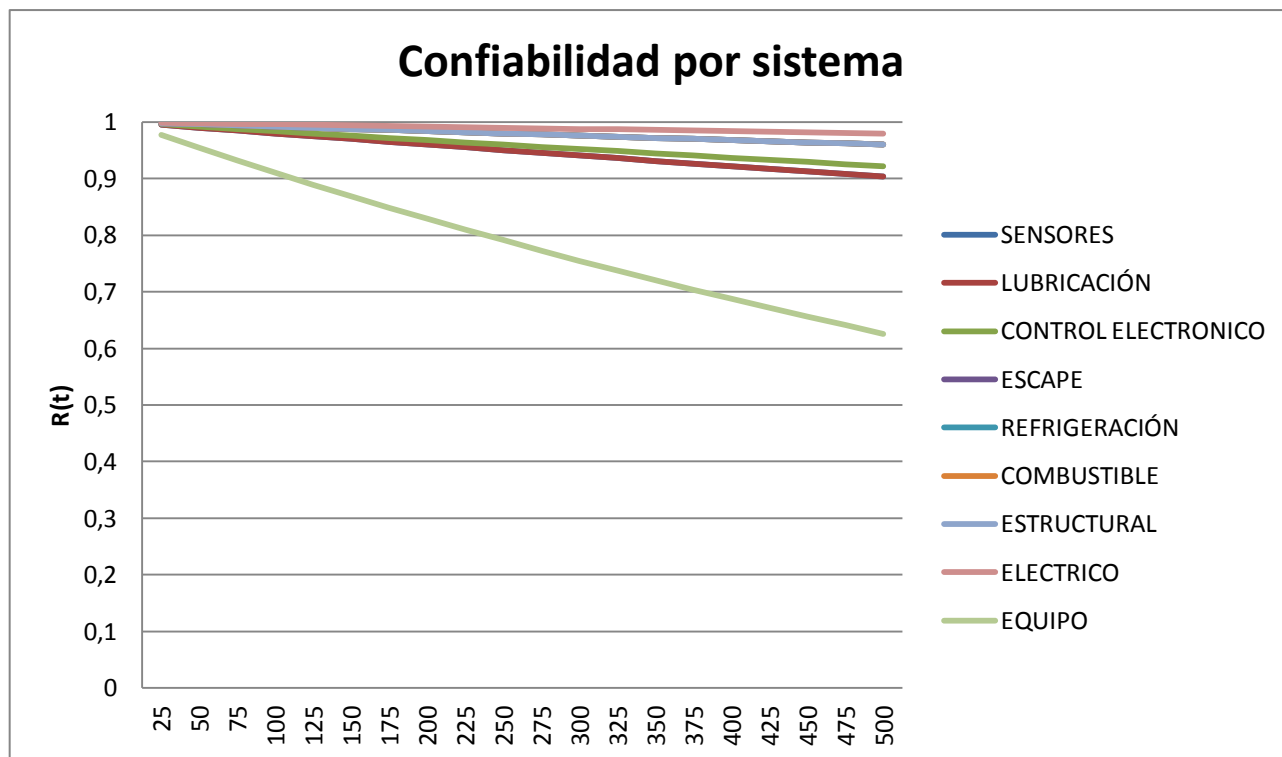


Figura 3.7: Curva de Confiabilidad por sistema del equipo

Los componentes que más afectan la disponibilidad del motor son:

| Sistema             | MTBF (hr) | MTTR (hr) | A(i)     |
|---------------------|-----------|-----------|----------|
| SENSORES            | 4910      | 13        | 0,997359 |
| LUBRICACIÓN         | 4910      | 22        | 0,995620 |
| CONTROL ELECTRONICO | 6138      | 14        | 0,997765 |
| ESCAPE              | 12275     | 8         | 0,999349 |
| REFRIGERACIÓN       | 12275     | 24        | 0,998049 |
| COMBUSTIBLE         | 12275     | 7         | 0,999430 |
| ESTRUCTURAL         | 12275     | 4         | 0,999674 |
| ELECTRICO           | 24551     | 4         | 0,999837 |
| EQUIPO              |           |           | 0,987149 |

Tabla 3.6: Disponibilidad por sistema.

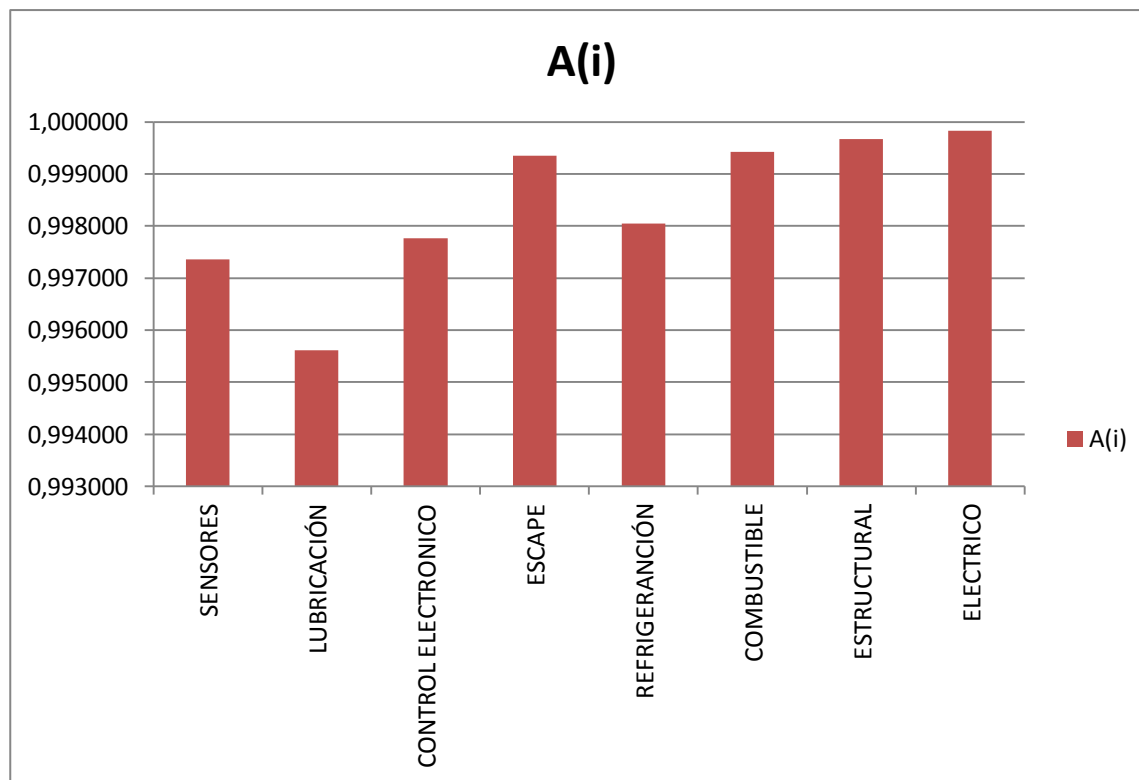


Figura 3.8: Disponibilidad por sistema del equipo

Se observa que en los tres primeros criterios, los sistemas que más afectan al motor y por lo tanto los primeros en ser analizados y mejorados son:

- Sistema de Lubricación
- Sistema de Sensores
- Sistema de Control Electrónico

En el criterio basado en la matriz de decisión de la norma SAE JA1011-12, arroja los siguientes componentes críticos:

| Componente Críticos del Equipo  |                                           |                     |
|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| Sistema                         | Componente                                | Calificación del MR |
| Combustible                     | bomba de alta                             | 105                 |
| Combustible                     | cañería de alta presión de combustible    | 104                 |
| Admisión                        | turbocompresor                            | 81                  |
| Combustible                     | cañería de retorno de combustible         | 78                  |
| Combustible                     | inyector                                  | 76                  |
| Eléctrico                       | arnés eléctrico                           | 75                  |
| Refrigeración                   | bomba principal de refrigerante           | 70                  |
| Admisión / Refrigeración        | intercooler                               | 68                  |
| Control Electrónico             | módulo de control electrónico (ECM)       | 68                  |
| Estructural                     | unidad de potencia (camisa)               | 64                  |
| Eléctrico                       | mando del alternador                      | 63                  |
| Combustible                     | bomba de transferencia                    | 60                  |
| Estructural                     | curata                                    | 60                  |
| Admisión                        | adaptador de intercooler                  | 54                  |
| Combustible / Sensores          | sensor de alta presión de combustible     | 54                  |
| Combustible / Sensores          | sensor de presión de combustible          | 54                  |
| Escape / Lubricación / Sensores | sensor de presión de turbo                | 54                  |
| Escape                          | goma descarga de turbo                    | 54                  |
| Estructural                     | válvulas de culata (admisión y escape)    | 52                  |
| Lubricación                     | Carter de aceite                          | 51                  |
| Escape                          | turbo                                     | 48                  |
| Estructural                     | cigüeñal                                  | 48                  |
| Lubricación                     | Filtro centrifugo                         | 38                  |
| Lubricación                     | bomba de aceite                           | 38                  |
| Combustible / Sensores          | sensor de temperatura de combustible      | 36                  |
| Estructural / Sensores          | sensor presión de carter                  | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de temperatura del intercooler     | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de presión de intercooler          | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de presión de refrigerante         | 36                  |
| Refrigeración / Sensores        | sensor de nivel de refrigerante           | 36                  |
| Lubricación / Sensores          | sensor de saturación de filtros de aceite | 36                  |
| Lubricación / Sensores          | sensor de presión de aceite               | 36                  |
| Lubricación / Sensores          | sensor de temperatura de aceite           | 36                  |
| Sensores                        | temperatura motor                         | 36                  |
| Combustible                     | galería del common rail                   | 35                  |
| Refrigeración                   | bomba secundaria de refrigerante          | 35                  |
| Estructural                     | biela                                     | 35                  |
| Estructural                     | block                                     | 33                  |
| Eléctrico                       | módulo de control electrónico (ECM)       | 32                  |
| Combustible                     | válvula moduladora                        | 31                  |
| Estructural                     | dámper                                    | 30                  |
| Lubricación                     | carcas de enfriador de aceite             | 29                  |
| Control Electrónico             | válvula moduladora                        | 27                  |

| Componente Críticos del Equipo |                                  |                     |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Sistema                        | Componente                       | Calificación del MR |
| Estructural                    | rodamiento cigüeñal              | 27                  |
| Refrigeración                  | caja de termostatos de alta      | 26                  |
| Refrigeración                  | caja de termostatos de baja      | 26                  |
| Refrigeración                  | Rockford                         | 24                  |
| Combustible                    | cabezal de combustible           | 23                  |
| Admisión                       | múltiple de admisión             | 23                  |
| Refrigeración                  | múltiple de refrigerante         | 22                  |
| Sensores                       | referencia de tiempo             | 21                  |
| Lubricación                    | Cabezal de Aceite                | 21                  |
| Refrigeración                  | válvula rockford                 | 21                  |
| Escape                         | tubo de descarga de turbo        | 20                  |
| Escape                         | tubo de escape                   | 20                  |
| Escape                         | y de escape                      | 20                  |
| Escape                         | múltiple de escape               | 20                  |
| Escape                         | silenciadores                    | 19                  |
| Admisión                       | ductos de admisión               | 19                  |
| Sensores                       | temperatura de aire r1           | 18                  |
| Sensores                       | presión barométrica              | 18                  |
| Sensores                       | referencia sincrónica            | 18                  |
| Admisión                       | sensor de temperatura de aire r1 | 18                  |
| Admisión                       | sensor de presión barométrica    | 18                  |
| Admisión / Sensores            | sensor de temperatura de aire    | 18                  |
| Lubricación                    | varilla de nivel                 | 18                  |
| Lubricación                    | tapa de reposición aceite        | 18                  |
| Control Electronico            | sensor de referencia de tiempo   | 18                  |
| Control Electronico            | sonor de referencia sincrónica   | 18                  |
| Estructural                    | tapa de inspección               | 18                  |
| Admisión                       | caja de filtros                  | 18                  |
| Admisión                       | filtro primario                  | 18                  |
| Admisión                       | filtro secundario                | 18                  |

Tabla 3.7: Clasificación de Criticidad por matriz

Se observa que los componentes más críticos según este criterio son:

- Bomba de combustible de alta
- Cañería de alta presión de combustible
- Turbo compresor

Esto se debe principalmente, a que este método da una mayor ponderación al factor seguridad, y estos tres componentes pueden generar un incendio que puede provocar una falla catastrófica y poner en peligro la vida del operador.

### 3.6 FMECA

Del cuadro de análisis de falla y criticidad, se obtienen los modos de fallas y las tareas preventivas que evitan la falla, dichas tareas se ocupa para modificar las pautas y por lo tanto las tareas preventivas como tal.

### 3.7 Frecuencias óptimas de inspección o intervención

Se utiliza dos métodos distintos, uno para disminuir el costo global de mantenimiento y otro para aumentar la disponibilidad:

Frecuencia óptima para minimizar el costo global:

|              |     |
|--------------|-----|
| horas<br>mes | 414 |
|--------------|-----|

| SISTEMAS            | MTBF | MTTR | T.<br>inspección | C.<br>predictivo | C.<br>reparación | C. falla | $\lambda(n)$ | $f(n)$ | i     | u     | n    | frecuencia<br>a inspección |
|---------------------|------|------|------------------|------------------|------------------|----------|--------------|--------|-------|-------|------|----------------------------|
| LUBRICACIÓN         | 958  | 21,6 | 4                | 200              | 3567             | 25920    | 0,0010       | 0,432  | 103,6 | 19,2  | 1,62 | 255                        |
| SENSORES            | 928  | 13   | 3                | 200              | 10371            | 15600    | 0,0011       | 0,446  | 138,1 | 31,9  | 1,78 | 232                        |
| CONTROL ELECTRONICO | 834  | 13,7 | 3                | 200              | 1712             | 16500    | 0,0012       | 0,497  | 138,1 | 30,13 | 1,58 | 263                        |
| ESTRUCTURAL         | 2510 | 4    | 2                | 200              | 4328             | 4800     | 0,0004       | 0,165  | 207,2 | 103,6 | 0,78 | 534                        |
| COMBUSTIBLE         | 296  | 7    | 4                | 200              | 3173             | 8400     | 0,0034       | 1,401  | 103,6 | 59,2  | 1,82 | 228                        |
| REFRIGERACIÓN       | 1729 | 24   | 4                | 200              | 3105             | 28800    | 0,0006       | 0,240  | 103,6 | 17,3  | 1,26 | 329                        |
| ESCAPE              | 819  | 8    | 2                | 200              | 269              | 9600     | 0,0012       | 0,506  | 207,2 | 51,8  | 1,43 | 290                        |
| ELECTRICO           | 1077 | 4    | 3                | 200              | 244              | 4800     | 0,0009       | 0,385  | 138,1 | 103,6 | 0,72 | 576                        |

Tabla 3.8: Frecuencia de inspección para minimizar el costo global

Frecuencia óptima para aumentar la disponibilidad del motor:

|              |         |
|--------------|---------|
| horas<br>mes | 414,348 |
|--------------|---------|

| SISTEMAS            | MTBF | MTTR  | T.<br>inspección | $\lambda(n)$ | $f(n)$  | $\mu(n)$ | $\theta(n)$ | n        | frecuencia de<br>inspección |
|---------------------|------|-------|------------------|--------------|---------|----------|-------------|----------|-----------------------------|
| LUBRICACIÓN         | 958  | 21,6  | 4                | 0,001043     | 0,43234 | 19,2     | 103,6       | 0,84786  | 489                         |
| SENSORES            | 928  | 13    | 3                | 0,001077     | 0,44647 | 31,9     | 138,1       | 0,65996  | 628                         |
| CONTROL ELECTRONICO | 834  | 13,75 | 3                | 0,001199     | 0,49680 | 30,1     | 138,1       | 0,82286  | 504                         |
| ESTRUCTURAL         | 2510 | 4     | 2                | 0,000398     | 0,16510 | 103,6    | 207,2       | -1,10806 | 374                         |
| COMBUSTIBLE         | 296  | 7     | 4                | 0,003381     | 1,40123 | 59,2     | 103,6       | 0,89697  | 462                         |
| REFRIGERACIÓN       | 1729 | 24    | 4                | 0,000578     | 0,23968 | 17,3     | 103,6       | 0,36333  | 1140                        |
| ESCAPE              | 819  | 8     | 2                | 0,001221     | 0,50600 | 51,8     | 207,2       | 0,70508  | 588                         |
| ELECTRICO           | 1077 | 4     | 3                | 0,000928     | 0,38485 | 103,6    | 138,1       | -0,66723 | 621                         |

Tabla 3.9: Frecuencia de inspección para aumentar la disponibilidad

Se observa que las frecuencias óptimas fluctúan entre las 250 a 500 [hrs]

### 3.8 Reemplazo del componente

Se utiliza el modelo de los costos medios por períodos actualizados:

| años | C(t)       | f(t) | C(t) f(t)  | $\Sigma C(t) * f(t)$ | Q(t)         | FRC   | Cme(t)     |
|------|------------|------|------------|----------------------|--------------|-------|------------|
| 1    | \$ 86.297  | 0,87 | \$ 75.040  | \$ 75.040            | \$ 485.040   | 1,150 | \$ 557.797 |
| 2    | \$ 71.822  | 0,76 | \$ 54.308  | \$ 129.348           | \$ 539.348   | 0,615 | \$ 331.762 |
| 3    | \$ 64.971  | 0,66 | \$ 42.719  | \$ 172.067           | \$ 582.067   | 0,438 | \$ 254.932 |
| 4    | \$ 65.742  | 0,57 | \$ 37.588  | \$ 209.656           | \$ 619.656   | 0,350 | \$ 217.044 |
| 5    | \$ 315.581 | 0,50 | \$ 156.899 | \$ 366.555           | \$ 776.555   | 0,298 | \$ 231.658 |
| 6    | \$ 90.154  | 0,43 | \$ 38.976  | \$ 405.531           | \$ 815.531   | 0,264 | \$ 215.493 |
| 7    | \$ 113.795 | 0,38 | \$ 42.780  | \$ 448.310           | \$ 858.310   | 0,240 | \$ 206.304 |
| 8    | \$ 145.058 | 0,33 | \$ 47.420  | \$ 495.730           | \$ 905.730   | 0,223 | \$ 201.842 |
| 9    | \$ 183.945 | 0,28 | \$ 52.289  | \$ 548.019           | \$ 958.019   | 0,210 | \$ 200.776 |
| 10   | \$ 230.454 | 0,25 | \$ 56.965  | \$ 604.983           | \$ 1.014.983 | 0,199 | \$ 202.238 |

Tabla 3.10: Tiempo óptimo de reemplazo.

Obteniendo la siguiente gráfica:

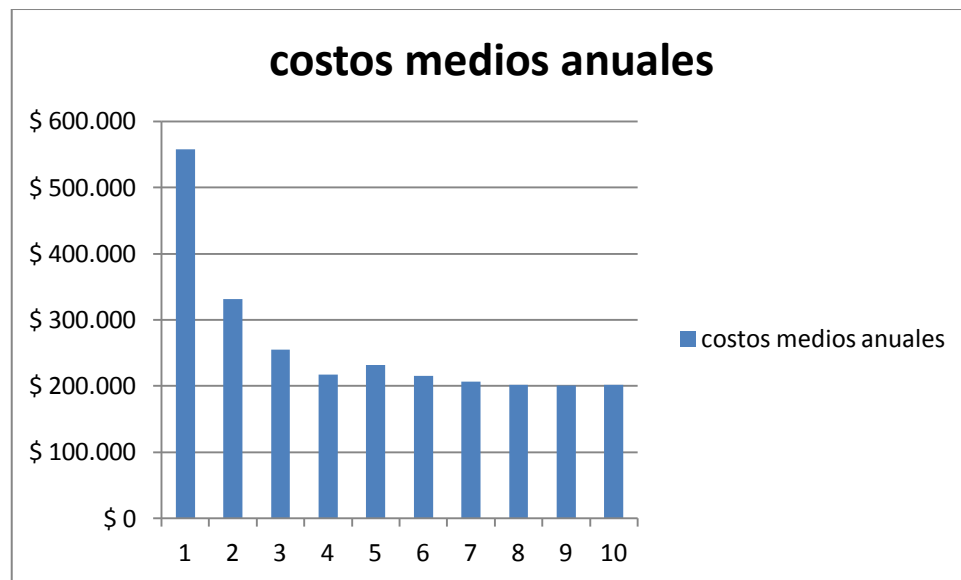


Figura 3.9: Costos medios anuales

Se observa que bajo este modelo, se considera un mantenimiento mayor al quinto año (24000 [hr]), el modelo converge con la política actuar de reemplazo de equipo:

- Se compra el motor nuevo, se realiza un mantenimiento mayor a las 24000, luego se instala para operar por un periodo más, después del segundo período de uso, se da de baja.

\* Lo que concuerda con la política de reemplazo vigente en la faena.

### 3.9 Gestión de repuestos

Al no tener la demanda de los componentes, se utiliza la tasa de falla como demanda para realizar la modelación matemática:

|     |     |
|-----|-----|
| mes | 414 |
|-----|-----|

| ítem              | nivel de servicio | MTBF | $\lambda$ (un/mes) | q (un) | f (1/mes) | pu (USD) | Cf (USD) | i     | Cad (USD) | T (mes) |
|-------------------|-------------------|------|--------------------|--------|-----------|----------|----------|-------|-----------|---------|
| Lubricación       | 0,9979            | 958  | 0,4322             | 2      | 0,21      | 3567     | 25920    | 0,015 | 250       | 4,65    |
| Sensores          | 0,9901            | 928  | 0,4461             | 1      | 0,37      | 10371    | 15600    | 0,015 | 250       | 2,70    |
| Control eléctrico | 0,9984            | 834  | 0,4964             | 3      | 0,16      | 1712     | 16500    | 0,015 | 250       | 6,27    |
| Estructural       | 0,9867            | 2510 | 0,1649             | 1      | 0,15      | 4328     | 4800     | 0,015 | 250       | 6,88    |
| Combustible       | 0,9944            | 296  | 1,3986             | 4      | 0,36      | 3173     | 8400     | 0,015 | 250       | 2,75    |
| Refrigeración     | 0,9984            | 1729 | 0,2394             | 2      | 0,15      | 3105     | 28800    | 0,015 | 250       | 6,70    |
| Escape            | 0,9996            | 819  | 0,5055             | 8      | 0,06      | 269      | 9600     | 0,015 | 250       | 15,66   |
| Electrico         | 0,9992            | 1077 | 0,3844             | 7      | 0,05      | 244      | 4800     | 0,015 | 250       | 18,86   |

Tabla 3.11: Gestión de repuestos.

### 3.10 Beneficios económicos de la mejora

Los beneficios económicos se dividen en dos:

- Beneficios económicos por el cambio de motor:

$$\text{Beneficio unitario} = LCC \text{ QSK60} - LCC \text{ MTU} \rightarrow \$4.194.105 - \$3.371.704 = \$822.401$$

Multiplicando ese beneficio unitario por la flota de camiones que tienen motores QSK-60 (16 camiones):

$$\text{Beneficio total por el cambio de motor} = 16 * \$822.401 = \$13.158.416 \text{ USD}$$

\* Nota: El cambio de modelo de motor, no representa un costo asociado, ya que el cambio de motor se realiza al momento del recambio del motor por tiempo de uso, y no se realiza cambio físico en la configuración del motor, ya que la transmisión es eléctrica, solo se cambia el programa de control de potencia.

- Beneficio por disminuir el costo unitario de mantenimiento hora:

Se considera en la ecuación del costo global, el aumento de las MPs desde 250 a 500 [hr]

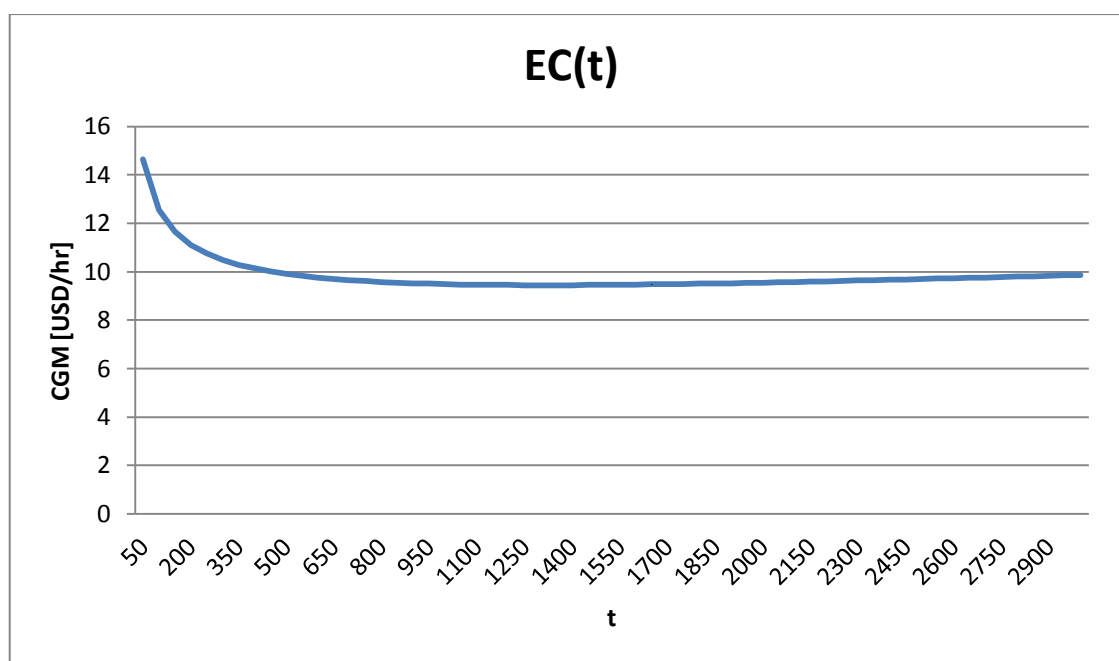


Figura 3.10: Modelamiento del costo de mantenimiento en función del tiempo de intervención

Se obtiene una reducción de \$0.84 [USD/hr]

Se evalúa por las 24.000 [hr] y por la flota entera de camiones (30):

$$\textit{Beneficio Total} = \$0.84 * 24.000 * 30 = \$604.800$$

El Beneficio total del trabajo: \$13.763.216 [USD]

## **CAPÍTULO 4: DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### 4.1 Discusiones

A continuación se realiza ciertas observaciones para discutir:

- La ingeniería de confiabilidad como toda área que utiliza estadística es de suma importancia contar con bases de datos verídicos, se comenta esto, porque la información de las órdenes de trabajos estudiadas estaban poco claras o con costos asignados variables incluso para los mismos modos de falla.
- Las inspecciones tienen como fin detectar una falla en desarrollo, no obstante se debe realizar la inspección correcta para cumplir con ese objetivo, no siendo así en todos los casos, provocando una distorsión en los modelos utilizados.
- Se debe evaluar primero, si los motores MTU siguen teniendo los mismos costos cuando se instalen en los camiones AC

#### 4.2 Conclusiones:

A continuación se presentan las Conclusiones:

- Gracias a los estudios de los últimos 20 años sobre la ingeniería de mantenimiento se está cambiando el paradigma del mantenimiento como un centro de costos (mal necesario) a un centro de inversión, donde la empresa invierte en gestión de mantenimiento con el retorno de aumentar la disponibilidad de los equipos y así aumentar la productividad y a su vez disminuir los costos unitarios del mantenimiento, es decir aumentar ingresos y disminuir costos, lo que representa la maximización de las utilidades.
- Los mantenimientos; RCM, TPM y OPM, se deben realizar en conjunto con el fin de mejorar y ser más competitivos,

- Para implementar un OPM se debe tener una base de datos verídica, con órdenes claras y tiempos de ejecución especificados.
- EL método RCM, donde se determinan los modos de fallas de los equipos críticos, es de suma importancia, que de estos modos se pueden obtener las actividades pre-fallas, que las prevengan.
- Las distribuciones estadísticas tiene la cualidad de predecir el futuro solo mirando hacia atrás.
- El TPM es posible aplicar solo si se tiene el personal capacitado tanto en esta metodología como en el funcionamiento del equipo.
- Si bien es factible realizar mejoras al motor QSK-60, no se recomienda, ya que en vista a su mayor consumo de combustible, igualmente seria la opción más cara.
- El cambio del modelo de motor, es técnicamente factible, ya que la estructura de los camiones (chasis) son exactamente iguales, y la transmisión es eléctrica, solo se debe cargar un programa distinto para controlar la potencia del motor.
- Los componentes del camión Komatsu 830E, ya sea DC o AC, tienen TBO (tiempo de cambio) completamente independientes, con garantías independientes, por lo cual, el cambio del modelo del motor no afecta las garantías del resto de los componentes.
- El uso del árbol de falla, es beneficioso para disminuir el tiempo de diagnóstico en sistemas complejos, lo cual ayuda en la disminución del MTTR.
- Se observa que el modo de falla que más afecta la confiabilidad y el costo global de mantenimiento es el sistema de lubricación, específicamente la bomba de lubricación.
- Si bien, el cambio de modelo de motor, es beneficioso económicamente, se debe evaluar el soporte logístico de la empresa representante, ya que depender de un solo proveedor es peligroso, tanto por posibles alzas en los precios de los repuestos, como también la falta de los mismos.

### 4.3 Recomendaciones

Las principales recomendaciones son:

- Realizar una prueba de motor; instalar un motor MTU en un camión modelo 830E AC, y realizar seguimiento sobre su comportamiento, si consume más o menos combustible
- Una vez verificado el comportamiento del motor, se recomienda realizar el cambio efectivo de motores.
- Se recomienda limpiar y sanear las O.T. tanto en la descripción técnica como en los costos cargados.