



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales

Carrera de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Estudio de los mantenimientos, las fallas y los parámetros de operación de los motores Hyundai Himsen de la Central Eléctrica Santa Clara 110 kV de Fuel Oil.

Autor: José Alberto Toledano Reyes.

Tutor: MSc. Ing. Reinaldo Marcelino Martínez Martínez.



Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales

Carrera de Ingeniería Mecánica

DIPLOMA THESIS

Title: Study of the maintenance, faults and operating parameters of the Hyundai Himsen engines of the Santa Clara Power Plant 110 kV of Fuel Oil.

Author: José Alberto Toledano Reyes.

Tutor: MSc. Ing. Reinaldo Marcelino Martínez Martínez.

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

“ Un poco más de persistencia, un poco más de esfuerzo, y lo que parecía irremediablemente un fracaso pudo convertirse en un éxito glorioso ”

Elbert Hubbard

Dedicatoria

A mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado para poder vencer esta meta.

A mi hermano Yens por alentarme siempre a ser un profesional.

Agradecimientos

A mis padres, por darme la vida y estar siempre a mi lado en mi formación personal y profesional.

A mis tres hermanos por formar parte de mi vida y ocuparse de mí en todos los momentos.

A Ailenys, por brindarme momentos únicos de felicidad y animarme en las peores situaciones.

A mis amigos y casi hermanos, Delvis, Jean Carlos, Omar, Víctor, Lachi, por las largas noches de desvelo y por hacer de mi estancia en la universidad, momentos inolvidables.

A mi tutor Reinaldo Martínez Martínez por brindarme todos sus conocimientos para la realización de este trabajo.

Al director de la central eléctrica (Alejandro) por atenderme en todas mis visitas y brindarme la información necesaria para la realización del trabajo.

A mis suegros por atenderme como un hijo más y animarme a vencer cada obstáculo.

A toda mi familia y demás personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de mi trabajo de diploma.

Resumen

En el presente trabajo de diploma se realiza un estudio de los mantenimientos, principales fallas y desviaciones de parámetros en los motores de combustión interna Hyundai Himsen de la Central Eléctrica Santa Clara 110 kV de Fuel Oil. Se analiza, el desarrollo de la Generación Distribuida a base de motores de combustión interna y su aplicación en Cuba. Se realiza una descripción de la central eléctrica, así como de los motores Hyundai Himsen 9H 21/32 explotados en el emplazamiento, sus principales sistemas y partes. Se describen los principales mantenimientos aplicados a los motores de combustión interna. Se determinan las piezas o partes con mayor frecuencia de fallas por las que se producen averías en los motores, así como los modos de falla y la causa raíz de estas, para lo que se utilizó el gráfico de barra. Se selecciona un listado con todos los parámetros medidos en los motores, y los de mayor incidencia en la variación de los índices de consumo de combustible, de los cuales, se realiza una representación gráfica de la variación anual en un período de 2008 a enero de 2019, donde se demuestra el empeoramiento de estos parámetros y el envejecimiento de los motores en el tiempo. Posteriormente se calculan los parámetros de confiabilidad de las piezas con mayor incidencia de fallas comparándolas con los tiempos de mantenimiento planificado para cada una de ellas y se proponen medidas para disminuir las desviaciones de parámetros ocasionadas por estas fallas.

Abstract

In the present diploma work a study of the maintenance, main failures and deviations of parameters in the motors of internal combustion is made Hyundai Himsen of the Power station Santa Clara 110 kV of Fuel Oil. The development of the Distributed Generation based on internal combustion engines and its application in Cuba. A description is given of the power plant, as well as of the Hyundai Himsen 9H 21/32 engines operated on the site, its main systems and parts. The main maintenance applied to internal combustion engines are described. The parts or parts with greater frequency of failures are determined by which failures in the engines take place, as well as the ways of fault and the root cause of these, for which the bar graph was used. A list with all the parameters measured in the engines is selected, and those with the highest incidence in the variation of fuel consumption indices are selected, of which a graphical representation of the annual variation is made in a period of 2008 to January 2019, which demonstrates the worsening of these parameters and the aging of the engines over time. Subsequently, the reliability parameters of the pieces with the highest incidence of faults are calculated, comparing them with the planned maintenance times for each of them and measures are proposed to decrease the deviations of parameters caused by these faults.

Simbología

GD- Generación Distribuida

GE- Grupo electrógeno

MPP- Mantenimiento preventivo planificado

MCI- Motores de combustión interna

Vel.T/C- Velocidad del turbocompresor

P mot- Presión de aceite a la entrada del motor

PE filt- Presión de aceite a la entrada del filtro

DP filt- Diferencia de Presión

P tur- Presión de aceite en el turbo

PE Rad- Presión de agua a la entrada al radiador

PS Rad- Presión de agua a la salida del radiador

Niv- Nivel del tanque de expansión

P ag. BT- Presión del agua de baja temperatura

P ag. AT- Presión del agua de alta temperatura

TE Rad- Temperatura de entrada al radiador

TS Rad- Temperatura de salida del radiador

T enf. AC- Temperatura de agua del enfriador de aire

T enf Air- Temperatura del agua en el enfriador de aire de carga

TE cam- Temperatura del agua a la entrada de las camisas

TS cam- Temperatura del agua a la salida de las camisas

Amb- Temperatura Ambiente

T inc.- Temperatura dentro del contenedor

T Air C- Temperatura del aire de carga

PAC- Presión del aire de carga

P a. Arran- Presión del aire de arranque

P emer- Presión de Emergencia

P válv- Presión de la válvula

TE tur- Temperatura de entrada al turbo

TS tur- Temperatura de salida del turbo.

Listado de figuras y tablas

Figura 1. Comportamiento de los costos de mantenimientos en relación al tiempo

Figura 2. Influencia de la temperatura del aceite en el cárter sobre las pérdidas por fricción

Figura 3. Esquema del sistema de enfriamiento de un motor en línea

Figura 4. Variación de los parámetros del motor Diésel en función de la carga

Figura 6. Emplazamiento de generación distribuida de fuel oil SC110 kV.

Figura 7. Principales partes del motor HIMSEN Hyundai

Figura 8. Motor de combustión interna de fuel oil HIMSEN HYUNDAI 9H21/32

Figura 9. Diagrama de Pareto de número de fallas vs piezas o partes que fallan en SC 110 kV.

Figura 10. Número de fallas vs piezas o partes que fallan en SCI

Figura 11. Número de fallas vs piezas o partes que fallan en Sagua 110 kV

Figura 12. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura de los gases de escape a la salida de los cilindros de los motores.

Figura 13. Gráfico comparativo de la media mensual de temperatura de los gases de escape de los motores 2017-2018.

Figura 14. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura y presión del aire de carga.

Figura 15. Gráfico de variación de la media de temperatura del agua a la entrada y salida del enfriador del aire de carga

Figura 16. Gráfico de variación de la media de temperatura del agua de enfriamiento a la entrada y salida de los cilindros.

Figura 17. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura y presión del aceite lubricante.

Figura 18. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura y viscosidad del fuel oil.

Figura 19. Gráfico del comportamiento de la media anual de velocidades de los turbocompresores

Figura 20. Gráfico del comportamiento de la presión de encendido por inflamación del motor.

Tabla 2.1. Principales características de los motores Hyundai HIMSEN 9H21/32

Tabla 2.2. Parámetros y rango de medición del motor Hyundai HIMSEN 9H 21/32

Tabla 2.3. Parámetros con mayor incidencia en la variación del consumo de combustible

Tabla 3.1. Datos de las fallas en las culatas.

Tabla 3.2. Datos de las fallas en los inyectores

Tabla 3.3. Datos de las fallas en los múltiples de escape.

Tabla 3.4. Datos de las fallas en las camisas de los cilindros.

Tabla 3.5. Datos de las fallas en los turbocompresores

Tabla 3.6 Comparación de tiempos medios entre fallas calculados y tiempos de mantenimientos establecidos en la central eléctrica.

Tabla 3.7 Costo del mantenimiento semicapital a las 54 000 horas-motor, aplicado al motor 3 en octubre de 2018.

Tabla 3.8 Comportamiento de la producción de lodos en el cuarto trimestre 2013

Tabla 3.9 Comportamiento de la producción de lodos en el cuarto trimestre 2018

Tabla 3.10 Media de los valores de los parámetros de los análisis de combustión.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1.....	3
Generación Distribuida con motores de combustión interna de combustible fuel oil3	
1.1 Generación Distribuida	3
1.2 Generalidades de los mantenimientos.....	7
1.3 Sistema de control y seguimiento de fallas relacionadas con el funcionamiento del motor.....	15
1.4 Parámetros con mayor incidencia en los índices de consumo de combustible	19
1.5 Contaminación ambiental por los MCI de una central eléctrica	26
Capítulo 2.....	27
Aplicación de los mantenimientos, principales fallas en las piezas y variaciones de parámetros en los motores de combustión interna de la central eléctrica	27
2.1 Descripción de la Central Eléctrica Fuel Oil SC110 kV	27
2.2 Principales características de los motores de combustión interna que se utilizan en la central eléctrica.....	28
2.3 Partes principales del motor	28
2.4 Principales Sistemas del Motor.....	31
2.5 Descripción de los principales mantenimientos aplicados a los motores.....	34
2.6 Análisis de las principales fallas que producen averías en los motores	43
2.7 Parámetros que se miden en los motores de la central eléctrica.....	49
Capítulo 3.....	61
Análisis de fiabilidad de las partes o piezas con mayor frecuencia de fallos.....	61
3.1 Cálculo de parámetros de confiabilidad en los motores de la central eléctrica.	61
3.2 Análisis económico	69
3.3 Análisis de contaminación ambiental en la Central Eléctrica Santa Clara 110 kV de Fuel Oil	70
Conclusiones.....	73
Recomendaciones.....	75
Bibliografía	76

Introducción

La Generación Distribuida constituye uno de los pasos más significativos en el desarrollo de los sistemas eléctricos, debido que las plantas eléctricas no sufren grandes pérdidas en la transmisión, por lo que son más económicas. Además, la energía eléctrica que entregan, cuenta con mayores parámetros de calidad, fundamental para sistemas industriales modernos, donde interrupciones o variaciones de voltaje tendrían consecuencias negativas y pérdidas económicamente cuantiosas. Este tipo de generación es muy útil también ante la presencia de eventos climáticos extremos donde los conductores de alta tensión pueden quedar destruidos, por lo que se logra mantener la vitalidad energética de zonas determinadas en forma aislada hasta la reparación de las redes (Torres, 2011). En apoyo a la revolución energética en Cuba se comenzó a usar la Generación Distribuida (GD) de electricidad como método alternativo a la generación centralizada. El uso de este nuevo método tuvo como propósito apoyar al Sistema Electro-energético Nacional (SEN) en los horarios pico donde el consumo de energía eléctrica alcanza un valor máximo.

La crisis energética que enfrentó Cuba en el período 2003-2005 se agravó en el verano de 2004, dejando poco margen a la búsqueda para una solución inmediata. La introducción del modelo de GD resolvió la situación en un tiempo muy corto. La mayoría de las nuevas instalaciones de GD en el país, son generadores y motores que queman combustibles fósiles, así como pequeños generadores de emergencia (Generación-Distribuida-de-Electricidad-Cubana, 2010). Cuba bajo el programa de la Revolución Energética decide pasar de una Generación Concentrada en solo una decena de puntos en el país, a una Generación Distribuida a base de motores de combustión interna en una primera etapa, en más de doscientos puntos. Por las características de esta generación se prevé la disminución de las pérdidas eléctricas, así como la mejora sustancial de los costos, al tener mejores índices de eficiencia energética según las experiencias consultadas internacionalmente.

En los emplazamientos de la Empresa de Mantenimiento a Grupos Electr6genos de Fuel Oil (EMGEF) de la GD, existe una combinaci3n de m3todos de generaci3n mediante Grupos Electr6genos (GE) MTU Serie 4000 de Di3sel, Hyundai Himsen y Man de fuel oil, de los cuales el Hyundai Himsen es la base de estudio de este trabajo de diploma. Un an3lisis del comportamiento de los motores durante un largo per3odo de tiempo permite conocer las tendencias del consumo de combustible, las horas trabajadas y prever un desempe1o futuro de la planta de generaci3n.

Estudiar los par3metros del motor se presenta tambi3n como un tema importante para establecer criterios de trabajo en relaci3n con los par3metros del fabricante y comprobar el funcionamiento dentro de los rangos establecidos, de ah3 la necesidad de analizar los mantenimientos aplicados a estos motores, las piezas con mayor incidencia de fallas que provocan aver3as y desviaciones de los par3metros de operaci3n, que a su vez afectan los consumos espec3ficos de combustible.

Objetivo general:

- Analizar las desviaciones de par3metros que se producen a partir de las principales fallas en las piezas de los motores HYUNDAI Himsen de la Central El3ctrica Santa Clara 110 kV Fuel Oil.

Objetivos espec3ficos:

- Definir mediante una revisi3n bibliogr3fica, los aspectos a tener en cuenta en los an3lisis de fiabilidad y aplicaci3n de los mantenimientos a los motores de combusti3n interna utilizados en la generaci3n distribuida en Cuba.
- Identificar las piezas con mayor incidencia de fallas que producen aver3as en los motores de la central el3ctrica.
- Evaluar los par3metros de operaci3n en los motores de la central el3ctrica, que muestran mayor incidencia en los 3ndices de consumo espec3fico de combustible.
- Calcular los par3metros de confiabilidad de las piezas con afectaci3n por fallas, que provocan variaci3n en los par3metros de operaci3n de los motores.

Capítulo 1

Generación Distribuida con motores de combustión interna de combustible fuel oil

1.1 Generación Distribuida

La Generación Distribuida (GD) representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aunque pudiera señalarse como un nuevo concepto, su origen parte de la generación eléctrica.

Diversos autores han tratado de explicar el concepto en varias definiciones. La más completa es la siguiente:

Generación distribuida es la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética (Fernández, 2011).

Otra definición relacionada con GD la expresa como: cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución (Dirección-General-de-Industria-Energía-y-Minas-de-la-Comunidad-de-Madrid, 2007).

1.1.1 Beneficios de la generación distribuida

El auge de los sistemas de GD se debe a los beneficios inherentes a la aplicación de esta tecnología, tanto para el usuario como para la red eléctrica.

a) Beneficios para el usuario

Incremento en la confiabilidad, aumento en la calidad de la energía, reducción del número de interrupciones, uso eficiente de la energía, menor costo de la energía (en ambos casos, es decir, cuando se utilizan los vapores de desecho, o por el costo de la energía eléctrica en horas pico), uso de energías renovables, facilidad de adaptación a las condiciones del sitio y disminución de emisiones contaminantes.

b) Beneficios para el suministrador

Reducción de pérdidas en transmisión y distribución, abasto en zonas remotas, libera capacidad del sistema, proporciona mayor control de energía reactiva, mayor regulación de tensión, disminución de inversión, menor saturación y reducción del índice de fallas (Energía, 2014).

1.1.2 Generación Distribuida en Cuba

La GD en Cuba se caracteriza por los siguientes factores:

- 1- Posibilitar mejores condiciones de vida a la población.
- 2- Hacer más eficientes y competitivas las producciones, al mejorar sus indicadores de eficiencia energética.
- 3- Impactar favorablemente en el mejoramiento de las condiciones medioambientales del país.

La primera etapa de la GD consistió en la instalación de baterías de grupos electrógenos, de alta calidad y eficiencia suministrados por firmas prestigiosas.

En menos de dos años de intenso trabajo, se instalaron más de 1300 MW que son generados de forma distribuida por Grupos Electrógenos Diésel en 116 de los 169 municipios del país.

Posteriormente se da paso a la 2^{da} etapa del proceso con la instalación de grupos de mayores potencias con los MTU de Diésel, y de tecnología fuel oil, el HYUNDAI (Corea del Sur) y el MAN (Alemania), hasta cubrir una capacidad instalada actual de casi 900 MW (Fernández, 2011).

1.1.3 Generación distribuida con motores de combustión interna

Los alternadores se mueven por turbinas hidráulicas, de gas, de vapor, eólicas u otros motores, entre los que se encuentran motores de combustión interna de gasolina, de diésel o de gas.

Si el motor que mueve un alternador es de combustión interna, el grupo se llama grupo electrógeno (GE), que significa grupo que genera energía eléctrica. Es importante observar diferentes parámetros de trabajo de estos motores para que la electricidad que generen estos grupos pueda comercializarse (Quintela, 2013).

Dentro de estos parámetros, tenemos:

- Velocidad de un grupo

Cada grupo debe funcionar siempre a la misma velocidad para que la frecuencia f de la fuerza electromotriz que genera el alternador sea la nominal.

- Potencia máxima de un grupo

Toda la potencia que el alternador entrega a los receptores conectados a él, salvo las pérdidas, sale del motor. El alternador solo transforma potencia mecánica en potencia eléctrica, que entrega a la red conectada a él.

- Potencia máxima del alternador de un grupo

Un alternador solo puede entregar su carga en forma de potencia eléctrica, como máximo, la potencia P_n máxima que pueda entregarle el motor. Así, el alternador de un grupo de $P_n = 50$ MW no puede entregar a su carga eléctrica una potencia activa superior a 350 MW.

En Cuba los GE deben cumplimentar requerimientos técnicos para la tensión, la frecuencia y las potencias de entrega. Estos requerimientos, establecidos en la norma ISO 8528, están acordes con las clases de comportamiento de los GE, los cuales a su vez están en concordancia con las cargas que los alimentan, y que son:

- **Clase G1:** Aplica para los grupos donde están conectadas cargas que solo requieren los parámetros básicos de tensión y frecuencia.
- Ejemplo: Aplicaciones de propósito general (cargas eléctricas sencillas y de iluminación).
- **Clase G2:** Aplica para grupos donde las características de tensión sean muy similares a las del sistema eléctrico público comercial con el cual opera.

En estos casos, se permiten desviaciones temporales de tensión y frecuencia cuando ocurren cambios en la carga.

Ejemplo: Sistemas de iluminación, bombas, ventiladores y grúas.

- **Clase G3:** Aplica cuando los equipos conectados demandan de los grupos, determinadas características de estabilidad y niveles de frecuencia, tensión y forma de ondas.

Ejemplo: Cargas de telecomunicaciones o controladas por tiristores.

- **Clase G4:** Aplica cuando los requerimientos de estabilidad y niveles de frecuencia, tensión y forma de onda son excepcionalmente severos.

Ejemplo: Equipamiento que procesa información o sistemas de cómputos.

Para un óptimo funcionamiento del GE hay que conocer a qué clase pertenece (G1, G2, G3 o G4) y, según esta, hacer un análisis de sus límites de variación de tensión, sus requerimientos de frecuencia y de potencia activa y/o reactiva.

Como dato de interés, los GE instalados en Cuba, se consideran con clase de comportamiento dentro del grupo G3 (Quintela, 2013).

De acuerdo a la revista cubana de Ingeniería Eléctrica los GE pueden prestar servicios generando:

- **De forma continua:** durante 24 horas e ininterrumpidamente como generación base.
- **De forma intermitente:** para servicios donde es necesario equilibrar los consumos y cubrir picos de consumo.
- **Como servicio de emergencia**

Aun cuando la red de alimentación de energía eléctrica en un sistema cualquiera se mantenga en general sin problemas en el servicio, es recomendable la colocación de grupos electrógenos en todos los edificios donde existan posibilidades de riesgos personales (policlínicos, hospitales), lugares donde por su importancia económica o social sea necesario el servicio continuo de electricidad.

Los GE presentan los siguientes modos de operación:

- **Operación continua a carga constante:** Operación del grupo sin tiempo límite tomando en consideración los períodos de mantenimiento.

Ejemplo: Operando como carga base en ciclo combinado.

- **Operación continua a carga variable:** Operación del grupo sin tiempo límite tomando en consideración los períodos de mantenimiento. Ejemplo: Cuando el grupo opera en una localización donde no existe otra instalación o donde la alimentación de la instalación existente no es confiable.

- **Operación limitada a carga constante:** Se define como la operación del grupo limitada en tiempo a carga constante.

Ejemplo: Cuando el grupo opera en paralelo con alguna instalación o con el sistema durante los períodos de carga pico.

- **Operación limitada en tiempo a carga variable:** Se define como la operación del grupo limitada en tiempo a carga variable (Quintela, 2013).

1.2 Generalidades de los mantenimientos

El Mantenimiento es considerado cualquier actividad ya sea comprobaciones, mediciones, reemplazos, ajustes y reparaciones necesarios para mantener una unidad funcional de forma que esta pueda cumplir sus funciones.

1.2.1 Sistemas de mantenimientos

Dentro de la ingeniería se emplean distintos tipos de mantenimientos que se encargan de garantizar una fiabilidad en el funcionamiento de los equipos mecánicos. En la actualidad el sistema de mantenimiento que más se utiliza es el sistema de mantenimiento preventivo, aplicado en alguna de sus variantes. Las empresas más desarrolladas del mundo se han inclinado mayormente a la introducción de un sistema de mantenimiento predictivo, utilizando los avances de la electrónica aplicados en las técnicas de diagnóstico y monitoreo.

Los tipos de mantenimientos se dividen en mantenimientos correctivos, mantenimientos preventivos y mantenimientos predictivos. Se puede añadir otro sistema de mantenimiento denominado sistema alternativo de mantenimiento, surgido por la rápida y compleja evolución de los equipos. Otras bibliografías incluyen los sistemas de mantenimientos asistidos por ordenadores, mantenimiento productivo total y mantenimiento centrado en la confiabilidad (Artiles, 2011).

Los costos de mantenimientos y su comportamiento en relación al tiempo se muestran en la figura 1.

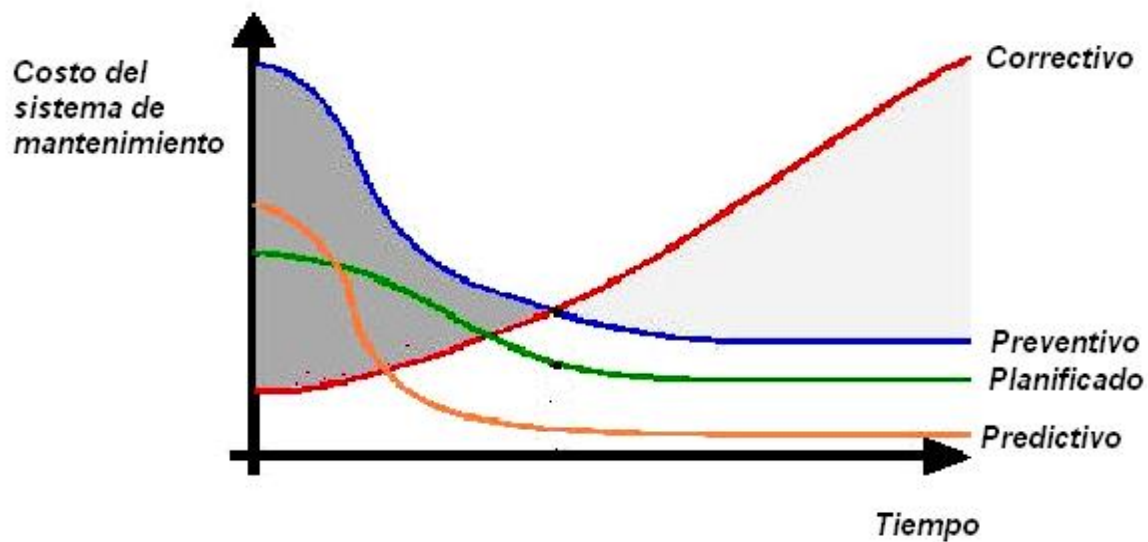


Figura 1. Comportamiento de los costos de mantenimientos en relación al tiempo (Artiles, 2011).

Como se puede apreciar la curva de color rojo correspondiente al mantenimiento correctivo tiene un costo de inversión inicial muy bajo. Esto se debe a que en este tipo de mantenimiento no se requiere de la compra de ningún instrumento de medición. Además, el ciclo continuo de trabajo del motor se aprovecha al máximo. A medida que el tiempo va aumentando la tendencia de la curva es a subir como consecuencia de las averías que van surgiendo. Por último, al terminar el tiempo el costo es muy alto debido a la gran cantidad de recursos que se necesitan para cometer las reparaciones generales de los equipos.

La curva del color azul representa el mantenimiento preventivo y la verde el planificado, unidas entonces serían el mantenimiento preventivo planificado. En este mantenimiento existe un costo inicial elevado ocasionado principalmente por la compra de piezas de repuesto y la preparación del personal.

Por último, la curva de color naranja muestra el comportamiento de mantenimiento predictivo o aleatorio. Este tiene un alto costo inicial debido a la adquisición de los caros equipos de diagnóstico. Además, se exige en este mantenimiento una mejor preparación de todo el personal, dígame operarios, técnicos e ingenieros. Más tarde la curva comienza a caer haciendo que el costo sea el mínimo hasta el final del ciclo (Artiles, 2011).

- Mantenimiento correctivo o mantenimiento contra averías

Este sistema de mantenimiento es el que marca el inicio de la historia de los mantenimientos. Se basa fundamentalmente en corregir las fallas en los equipos en el momento de la ocurrencia de esta. Es un sistema que no es planificado, el cual se lleva a cabo por el usuario o el operario de la máquina cuando detecta el fallo o la avería total del equipo. Para llevar a cabo este tipo de mantenimiento se necesita sacar por completo de funcionamiento la máquina que haya presentado la avería. Si el equipo averiado pertenece a una cadena de producción, el extenso tiempo de reparación de la falla provoca que el costo de mantenimiento que no era alto, se incremente hasta valores importantes encareciendo todo el proceso. Dicho sistema de mantenimiento demanda un gran número de personal de mantenimiento y piezas en el almacén debido a la no planificación de los mantenimientos. También incrementa el número y la frecuencia de accidentes de trabajo y pérdidas en las líneas de producción de las industrias (Artiles, 2011).

En general este mantenimiento correctivo presenta ventajas como:

- El aprovechamiento al máximo del ciclo continuo de trabajo del equipo.
- Las labores de reparación y recambio son ejecutadas fundamentalmente por los mismos trabajadores en algunas ocasiones.

Sin embargo, posee desventajas como:

- El alto costo por parada del equipo, debido a la propia ocurrencia del fallo, pudiendo este ser evitado mediante un seguimiento.
- Imposibilita la predicción del número de personas necesario para la ejecución de las reparaciones, siendo esta cantidad la mayoría de las veces insuficiente, ocasionando así la espera de los equipos para su reparación.
- La suma del costo de reparación y el costo de la pérdida de producción por la parada del equipo son muy elevados, pudiendo ser evitado con una atención oportuna.
- Posee una baja seguridad de operación y una alta posibilidad de ocurrencia de fallos impredecibles que pueden llegar averías o daños en cadena.
- Para contrarrestar los numerosos colapsos de las máquinas de producción se necesita un elevado stock de piezas, incluso costosas y de difícil adquisición, con la probabilidad de que algunas no lleguen ni a ser utilizadas.
- El fallo puede ocurrir a una hora inconveniente, o si el equipo es móvil, en un lugar inconveniente, donde posiblemente no estarán disponible ni el personal, ni las piezas necesarias para su reparación.

Existen plantas que no puedan ser detenidas de un momento a otro, ya sea porque proveen un servicio esencial o porque manejan productos tales como alimentos o materiales fundidos, los cuales se deteriorarán, solidificarán y producirán otros efectos dañinos si la planta se detiene repentinamente a causa de un fallo no predecible. Por último, este sistema de mantenimiento impide el diagnóstico exacto de las causas que provocan la falla, pues se ignora si falló por mala operación, por el abandono o por desconocimiento de su manejo (Artiles, 2011).

- **Mantenimiento preventivo planificado (MPP).**

Este sistema de mantenimiento es el más utilizado en la actualidad. Su característica principal es la de inspeccionar los equipos, detectar las fallas en su fase inicial y corregirlas en el momento oportuno. Particularmente se puede definir como una serie de revisiones en cuanto al funcionamiento y seguridad del equipo. Dichas inspecciones se basan en ajustes, reparaciones, análisis, limpiezas, lubricación, calibración, etc. Estas acciones deben ejecutarse en forma periódica en base a una planificación y no a una demanda del operario. Dicha planificación se realiza estadísticamente por el fabricante brindando un 98% de fiabilidad. Estos períodos de mantenimientos deben ser revisados continuamente, ya que estudios demuestran que dicho valor cambia a lo largo de la vida del objeto. Una de las causas de este cambio es el nivel de explotación de las piezas, debido que, si el equipo trabaja intermitentemente en condiciones favorables para su explotación, el período de mantenimiento que deberá llevar es largo y si el equipo labora continuamente en una ambiente abrasivo y corrosivo este período será mucho más corto. De ahí el surgimiento de los términos de sobre-mantenimiento (período largo de mantenimiento) y sub-mantenimiento (período corto) (Artiles, 2011).

Este sistema de mantenimiento tiene las ventajas de:

- Obtener experiencias en la determinación del tiempo de operación seguro de un objeto y llegar a saber los puntos débiles de las instalaciones mediante una buena distribución y organización del mantenimiento.
- Contar con una alta fiabilidad en los equipos, ya que operan en mejores condiciones de seguridad, y además se conoce su estado de funcionamiento.
- Se disminuye el tiempo de inactividad de los equipos.
- Se incrementa la vida útil de las instalaciones.
- Se evitan grandes reparaciones debido a grandes averías.
- Menores costos totales de reparación.
- Se aumenta la disponibilidad y seguridad de funcionamiento del equipo.
- Se incrementa la frecuencia de paradas por mantenimiento.

- Permite preparar las condiciones para la reparación con tiempo y con la correcta organización.
- Se dispone de una exacta coordinación de todos los elementos, herramientas y necesidad de personal.
- Se adquiere uniformidad en la carga de trabajo para el personal de mantenimiento.

Como desventajas principales están:

- La ocurrencia de fallos imprevistos entre los períodos de mantenimiento.
- Se sustituirán innecesariamente elementos mecánicos que se encuentren en perfecto estado e incluso que sean piezas caras y de difícil adquisición.
- Pueden ocurrir errores en el mantenimiento por los mecánicos.
- Existen riesgos de presentarse accidentes laborales que demoren el tiempo de la reparación.
- En una reparación general se deben examinar un gran número de elementos y se exige una alta cantidad de piezas de repuesto.
- Son necesarios modelos de optimización para mejorar la programación.
- Como mínimo se necesita de 3 años de operación y registro confiable para aplicar y determinar indicadores de fiabilidad (Artiles, 2011).

- **Mantenimiento predictivo.**

En la actualidad las principales industrias del primer mundo desarrollan como sistema de mantenimiento el predictivo. Se fundamenta en el análisis de parámetros de funcionamiento de un equipo, cuya evolución permite detectar un fallo antes de que suceda y ocasione consecuencias mucho más graves, dando tiempo a corregirla sin dañar el servicio. El mantenimiento se apoya en instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas para estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos.

Esto permite determinar en qué período de tiempo ese fallo va ocurrir y así poder planificar las intervenciones técnicas con tiempo suficiente. Así se garantiza que el fallo nunca tenga consecuencias graves sobre los elementos mecánicos. El mantenimiento predictivo no debe alterar el funcionamiento normal del equipo en explotación, por lo que las mediciones de parámetros se realizan en las máquinas sin llegar a su detención (Artiles, 2011).

El diagnóstico se puede realizar de forma periódica o continua, dependiendo de diversos factores como:

- El tipo de elemento o equipo mecánico.
- Los diferentes tipos de fallos a diagnosticar.
- La inversión que se quiera realizar.

En este tipo de mantenimiento aparece el control y seguimiento de la condición el cual se basa en el análisis de las mediciones obtenidas pendientes a detectar fallos incipientes, diagnosticar dichos fallos y a predecir cuánto tiempo podría funcionar continuamente el equipo sin llegar a que se cometa una avería. Los principales objetivos del mantenimiento por condición son indicar cuando aparece un problema en el equipo, identificar el grado de gravedad del problema, proteger la máquina de forma automática de la ocurrencia de cualquier avería, diagnosticar el fallo cuando es detectado, y estimar el tiempo de vida continua que le queda al equipo trabajando sin riesgo al surgimiento de una avería (Artiles, 2011).

Las principales ventajas de este mantenimiento mediante la condición son:

- Permite atender oportunamente los equipos de acuerdo a su estado de salud.
- Reduce gastos económicos en la aplicación del mantenimiento.
- Brinda un análisis estadístico de todo el sistema y su sistema de averías.
- Conoce el tiempo de vida sin riesgo de desarme de las máquinas.
- Permite confeccionar un archivo histórico de comportamiento mecánico y operacional de los equipos.
- Puede seguir la evolución de un defecto en el tiempo.

Sin embargo, posee desventajas como:

- Se necesita de una preparación de todo el personal referido a obreros, técnicos e ingenieros con el fin de realizar las actividades de forma correcta.
- Contar con una elevada inversión para la compra de los equipos de diagnósticos de última generación.

Este mantenimiento utiliza técnicas de monitoreo naturales apoyadas en instrumentos de medición. Las ventajas del monitoreo natural es que los resultados del diagnóstico se brindan de una manera inmediata sin tener que procesar los resultados.

Su desventaja con respecto al que utiliza instrumentos de medición es que dichos resultados no quedan archivados para un posterior análisis. Se puede lograr almacenar algo mediante el uso de cámaras fotográficas, de video, una impresión, molde de muestras, entre otros. Por otra parte, dentro del diagnóstico apoyado en instrumentos de medición se pueden encontrar el análisis del lubricante, la termografía, ultrasonido, radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, análisis del régimen de vibraciones, análisis de gases de escape y análisis del régimen de combustión (Artiles, 2011).

- Sistema alternativo de mantenimiento.

El sistema alternativo de mantenimiento (SAM) ha sido aplicado en diversas empresas en el mundo. Vincula los tres sistemas fundamentales de mantenimiento aprovechando y aplicando sus potencialidades en el momento oportuno. Esta combinación del mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo forman un sistema único que mejora las condiciones del mantenimiento en general.

Las principales ventajas de este sistema son:

- Disminuye el riesgo de accidentes o destrucciones de los equipos debido a intervenciones innecesarias de mantenimiento.

- Los períodos oportunos de mantenimiento hacen que este sea altamente económico.
- Con el ajuste a las características del equipo y su nivel de explotación, se logra incrementar su disponibilidad y su vida útil.
- Acorta el tiempo de parada por mantenimiento, elevando la producción total de los equipos.

En cuanto a las desventajas de este sistema se tiene que:

- Dispone de una alta inversión inicial para la compra de equipos de diagnóstico y piezas de repuesto.
- Para la aplicación de este sistema de mantenimiento es necesaria una clasificación de los equipos.
- Se necesita preparar el personal para la realización y el control del diagnóstico (Artiles, 2011).

1.3 Sistema de control y seguimiento de fallas relacionadas con el funcionamiento del motor.

El sistema de control y seguimiento de fallas tiene como objetivo sistematizar el proceso de análisis de causa raíz de la ocurrencia de las averías. Mediante ello se facilita la detección de las fallas más frecuentes y su incidencia en la explotación y disponibilidad del equipamiento. Teniendo en cuenta las características del proceso de detección de causa raíz, ha quedado conceptualizado como un proceso de diagnóstico aplicado a la ocurrencia de fallas y averías (Ariosa, 2012). Para este análisis es necesario definir conceptos como:

Falla: Evento que por su naturaleza limita el funcionamiento de una máquina o sistema como consecuencia de la desviación de sus parámetros de funcionamiento.

Avería: Se define como la ocurrencia de una falla que por su naturaleza implica la puesta fuera de servicio de una máquina, grupo de ellas o de un sistema determinado.

Tasa de fallas: Relación existente entre la ocurrencia de eventos que limitan el funcionamiento de máquinas o sistemas parcial o totalmente con respecto al tiempo. Generalmente la tasa de fallas se expresa en número de fallas por miles de horas de funcionamiento. De acuerdo a ello la tasa de fallas se calcula según:

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}} \quad (I)$$

Tiempo medio entre fallas (TMEF): Se denomina así al tiempo mínimo promedio de funcionamiento sin ocurrencia de fallas. Se calcula a partir del conocimiento de las tasas de fallas y se expresa en miles de horas.

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} \quad (II)$$

Confiabilidad: Es la probabilidad de que una pieza, conjunto de ellas, máquinas o sistemas, pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso predeterminadas.

$$P_{(t)} = \frac{N_o - N_t}{N_o} \quad (III)$$

Donde:

$P_{(t)}$.- Confiabilidad para una etapa establecida; (%)

N_o .- Número de elementos (Máquinas, piezas, equipos, etc.), al inicio del periodo

N_t .- Número de elementos que quedaron fuera de servicio durante el periodo analizado.

t .- Tiempo de operación en miles de horas.

El proceso de tratamiento de fallas y averías, así como la búsqueda de la causa raíz se sustenta fuertemente en la evaluación de evidencias, por ello es imprescindible la preservación de todo elemento, entiéndase fotos, registros, piezas o partes de estas, relacionado con el evento (Ariosa, 2012).

1.3.1 Búsqueda de la causa raíz

El proceso de búsqueda de causa raíz comienza por la detección y definición exacta de la falla. Por esta razón es necesario consignar adecuadamente la fecha de ocurrencia de esta (Ariosa, 2012).

El “Modelo registro de búsqueda de causa raíz” debe contener el resultado de cada una de las acciones, registrándose en cada caso, la fecha en que esta se realiza.

Los aspectos contenidos en el modelo de registro son los siguientes (Ariosa, 2012).

a) Datos generales.

Aquí se consigna la Central Eléctrica, la batería y número de motor. Se anota además la fecha de manifestación de la falla, así como las horas de funcionamiento del motor.

b) Datos iniciales.

Modo de falla. Descripción de la forma de manifestación de la falla (Desviaciones de parámetros funcionales, ruidos anormales, salideros, etc.)

Causas inmediatas. Definición de las limitaciones que impone la falla, elementos, conjuntos y/o sistemas afectados.

c) Fecha: Se anota la fecha en que se definen estos aspectos pues a partir de ello se considera el comienzo del proceso de diagnóstico y búsqueda de la causa raíz.

d) Causas básicas: Se relacionan todas las causas que pueden tener incidencia en la ocurrencia de la falla y que justifican la aparición de las causas inmediatas. Definido este aspecto se consigna la fecha en la cual se definen las causas básicas.

e) Evaluación de las causas básicas y definición de la causa raíz: En este apartado se anota la evaluación de la incidencia de las causas básicas en el modo de falla. Como resultado de este análisis se debe determinar la causa o causas raíces que ocasionaron la falla.

En aquellos casos en que el resultado de los análisis conduzca a definir como causa raíz el factor humano, los cálculos de confiabilidad se realizarán sobre la base de las causas básicas probadas; aunque ello debe quedar debidamente aclarado y en consecuencia, las medidas correctivas deben estar dirigidas, también, a este aspecto.

f) Medidas correctivas: Definición de las medidas correctivas adoptadas para solucionar parcial o totalmente la falla detectada. En aquellos casos en que se adopten medidas para erradicar parcialmente la falla detectada, deben definirse las causas que motivan esta decisión, así como el término de tiempo en que la falla será definitivamente erradicada.

g) Recursos utilizados: Comprende los materiales, piezas de repuesto utilizado para erradicar la falla.

h) Pruebas de funcionamiento: Se describen resumidamente los resultados de las pruebas posteriores a la solución de la avería. En aquellos casos en que esta tenga relación con el proceso de combustión, se anexan los resultados del comportamiento de los parámetros funcionales, así como un resumen de la hoja de datos aportada por las indicaciones realizadas con el indicador digital de presiones (Leutert).

1.4 Parámetros con mayor incidencia en los índices de consumo de combustible

Los parámetros del motor permiten determinar en cuanto a funcionamiento, como se encuentra en estado de rendimiento, predecir posibles averías y acometer acciones de reparación en caso de presentarse una alta desviación en uno o varios de ellos. Todos los parámetros medidos en el motor tienen relación con el mal funcionamiento de este, pero existen algunos que influyen mayormente en la desviación del índice de consumo de combustible de los cuales los más importantes se muestran a continuación.

1.4.1 Temperatura del fuel oil a la entrada del motor

El principal requerimiento hacia el combustible para Diésel es la facilidad de su inflamación al entrar en contacto con el aire caliente. Esta propiedad se evalúa por el retardo a la inflamación y depende en gran medida de las propiedades físico – químicas del combustible. Las propiedades físicas del combustible influyen considerablemente sobre la disgregación del chorro y las dimensiones de las gotas en la inyección. Las fuerzas de fricción interna reducen las perturbaciones en el flujo durante su movimiento en el pulverizador; en consecuencia, la disminución de la temperatura del combustible por debajo de los 110 °C, provoca el aumento de su viscosidad, empeorando la finura y uniformidad de pulverización, que es un proceso en el que debe descomponerse el chorro de combustible en finas gotas, cuyas dimensiones se encuentran entre los límites de 5—40 μm para asegurar una rápida combustión. Las gotas más grandes, que generalmente se forman al final de la inyección, pueden demorar el proceso de combustión y contribuir a la generación de carbonilla. Las gotas demasiado pequeñas (hasta 10 μm) se evaporan cerca de la boquilla del inyector, lo que dificulta la utilización del aire en los puntos más alejados de la cámara de combustión. Aumentar la temperatura del combustible por encima de 149 °C no tiene sentido, ya que cuando entra en contacto con la superficie caliente, en vez de escurrir por ella en forma de película comienza a ebullicir, además las partículas de combustible adquieren la forma esférica y se

separan de la pared. También puede tener lugar la descomposición térmica y la carbonización del combustible (Martínez, 2000).

En conclusión, la variación de la temperatura del combustible varía propiedades del combustible que afectan la eficiencia de la combustión y por otra parte se debe garantizar una viscosidad que garantice la lubricación del sistema de inyección y la bomba de combustible de alta presión.

1.4.2 Presión del aire de carga

Uno de los factores de los que depende el llenado de cilindro, es la resistencia hidráulica en el sistema de admisión, que hace disminuir la presión del aire de carga suministrada. La existencia de resistencias en el sistema de admisión conduce a que la cantidad de carga fresca que entra al cilindro del motor, disminuye debido al decrecimiento de la densidad de la carga.

En los motores Diésel de cuatro tiempos con sobrealimentación, la densidad de carga puede incrementarse considerablemente elevando la presión del aire o mezcla que ingresa al cilindro, en los cuales la presión de sobrealimentación no se limita por el surgimiento de la combustión detonante. Proporcionalmente a la densidad de carga, la presión efectiva crece y por consiguiente, la potencia por unidad de cilindrada del motor. Con el fin de garantizar la fiabilidad y una aceptable intensidad térmica en el motor Diésel sobrealimentado, se limita la presión máxima del ciclo y cuando funciona a régimen nominal, se eleva el coeficiente de exceso de aire (Jóvaj, 1987).

1.4.3 Temperatura del aire de carga

En el motor Diésel el combustible se introduce y evapora al final de la compresión, por eso calentar la carga de aire durante la admisión no es conveniente, ya que aumenta la variación de la temperatura (ΔT) y respectivamente disminuye el rendimiento volumétrico (η_v). En el motor Diésel siempre hay que tender a disminuir el calentamiento de la carga durante la admisión.

La disposición de los canales de admisión y escape en la culata en las zonas diametralmente opuestas, la refrigeración mayor posible de los canales de admisión de los colectores y su aislamiento térmico son los medios que permiten disminuir ΔT . Durante el arranque del motor Diésel, a bajas temperaturas del ambiente, en algunos casos el aire en la entrada del sistema de admisión especialmente se calienta. Con esto se eleva la temperatura de la carga al final del proceso de compresión, obteniendo la necesaria para la inflamación del combustible. Los motores diésel con sobrealimentación tienen valores de temperatura de la carga más altas, lo que se explica por el hecho de que las temperaturas del aire después del compresor son más altas y correspondientemente menor es la diferencia entre las temperaturas medias de las paredes del cilindro y de la carga fresca (Martínez, 2000).

1.4.4 Velocidad del turbocompresor

En el caso de sobrealimentación por turbocompresor, para la compresión del aire y su impulsión hacia los cilindros se utiliza parte de la energía que tienen los gases de escape. Esto permite parcialmente utilizar la caída de presiones entre su valor final en el proceso de expansión en el cilindro y la atmosférica, lo que es típico para el ciclo de expansión prolongada donde puede ser incrementada la potencia en más de un 50 % (Jóvaj, 1987).

El turbo sufre una constante aceleración a medida que el motor sube la carga, y como hay un límite en el giro de la turbina empujada por los gases de escape, un aumento por encima de este límite, provocaría que la presión que alcanza el aire en el colector de admisión sometido a la acción del compresor puede ser tal que sea más un inconveniente que una ventaja a la hora de sobrealimentar el motor. Por lo tanto, se hace necesario la regulación exterior, mediante el uso de una válvula de descarga que limite la presión en el colector de admisión, o interior mediante la utilización de turbinas que poseen aparatos de toberas de sección variable (Rodríguez, 2016).

En el caso particular de estos motores, no presentan ningún método de regulación del turbocompresor, por lo que conlleva al desmontaje de él para su limpieza, logrando así, que obtenga nuevamente sus parámetros de explotación.

1.4.4 Temperatura del aceite lubricante a la entrada del motor

La temperatura del aceite lubricante influye considerablemente en las pérdidas por fricción. Estas pérdidas de los motores dependen de la viscosidad del aceite que es bombeado a través de las holguras en los mecanismos. La viscosidad en condiciones de funcionamiento, queda definida por su característica de viscosidad – temperatura y por la temperatura en las superficies de las piezas del motor.

Cuando el motor se pone en marcha en condiciones de bajas temperaturas, la viscosidad del lubricante en las uniones es elevada, la magnitud de pérdidas por fricción alcanza su valor máximo y el bombeo del aceite a través de los cojinetes resulta dificultoso. Además, la viscosidad del aceite para las condiciones de tensión superficial, tiene importancia la resistencia de adsorción de la película lubricante, así como las cualidades antidesgaste de los lubricantes, para elevar las cuales se introducen aditivos especiales. En la **figura 2**, se muestra el gráfico de la influencia de la temperatura (t) del aceite en el cárter sobre las pérdidas por fricción (N_{fr}), en el cual se deduce que hay una gama de temperaturas donde las pérdidas por fricción son mínimas, comúnmente comprendidas entre 80 y 90 °C (Jóvaj, 1987).

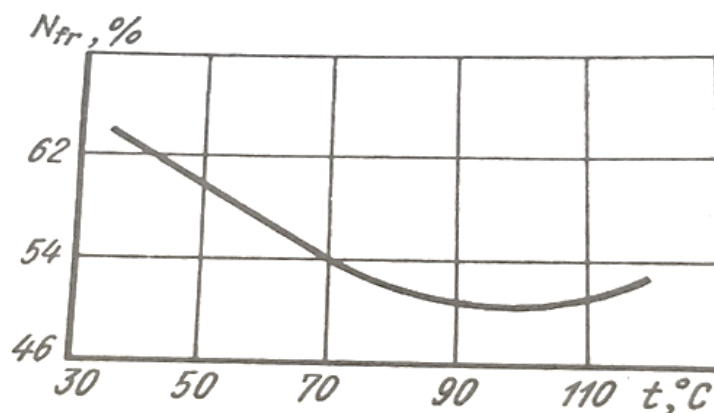


Figura 2. Influencia de la temperatura del aceite en el cárter sobre las pérdidas por fricción (Jóvaj, 1987).

1.4.5 Temperatura del agua del sistema de enfriamiento

En el sistema de refrigeración por agua (**figura 3**), la efectividad se eleva con el aumento de la circulación del líquido, su temperatura máxima y la cantidad de calor disipado en el radiador por unidad de área. El sistema se emplea exclusivamente del tipo cerrado con circulación forzada del líquido que consta de un termostato de acción automática que está conectado al circuito de circulación que regula la cantidad de líquido que ingresa al radiador. De esta manera se mantiene la temperatura del líquido a la salida del motor, al nivel de 90 – 95 °C para cualquier régimen de velocidad y carga. En este sistema, el valor de la diferencia de temperaturas que tiene el líquido a la entrada y salida del motor resulta elevada, especialmente cuando el motor funciona a pequeñas cargas y baja temperatura del aire circundante.

La efectividad de los sistemas ordinarios de refrigeración con circulación, empeora a causa de que el rendimiento de la bomba disminuye cuando la temperatura del líquido se acerca al punto de ebullición. A temperaturas elevadas hasta 120 °C del refrigerante, la temperatura de las piezas que conforman el grupo cilindro – pistón crece en 10...12 °C y puede aparecer también la cavitación en la bomba de agua y perturbar la circulación del líquido (Jóvaj, 1987).

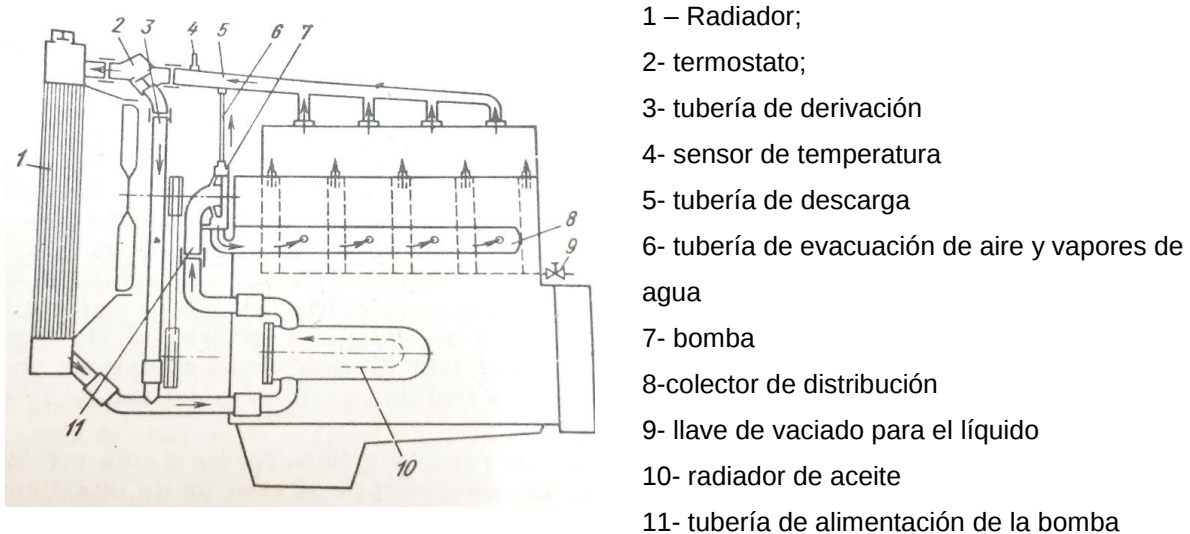
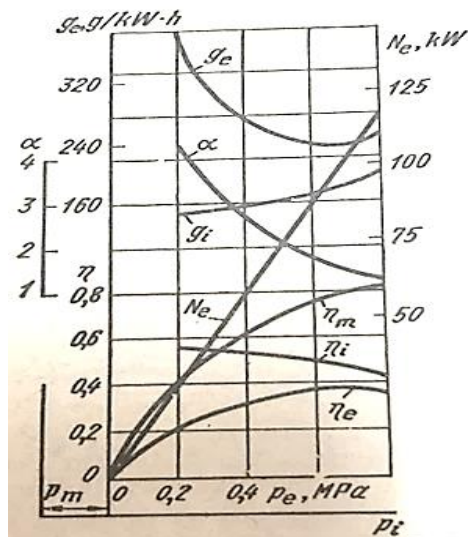


Figura 3. Esquema del sistema de enfriamiento de un motor en línea (Jóvaj, 1987).

1.4.6 Carga del motor

La característica de carga mostrada en la **figura 4**, queda determinada por tres parámetros que de una manera más completa definen los regímenes de funcionamiento: los consumos horario y específico de combustible a plena carga, la carga correspondiente al consumo específico efectivo mínimo de combustible $g_{e \text{ mín}}$ y el consumo horario de combustible cuando el motor funciona con la marcha en vacío.

Los altos nivel de empobrecimiento efectivo de la mezcla que se alcanza en el motor Diésel, dan la posibilidad de efectuar la regulación cualitativa. Como resultado de esto, en la zona de elevadas cargas cuando, siendo pequeños los valores de exceso de aire, se observa cierto empeoramiento del proceso de combustión, el rendimiento indicado se eleva más intensamente a medida que disminuye la carga. Para cierta carga (0.8 - 0.85 de la máxima) obtienen sus valores óptimos, pero al seguir incrementándola, el rendimiento efectivo disminuye. En el motor Diésel, las pérdidas en el intercambio de gases no varían en función de la carga, la diferencia entre las magnitudes de rendimiento efectivo y consumo específico del motor Diésel, crece a medida que disminuye la carga, lo que conduce a que el consumo de combustible operacional del motor Diésel con respecto al de carburador de la misma potencia nominal es en 15 – 30 % menor (Reyes, 1983).



- g_e - consumo específico
- g_i - consumo indicado
- α - coeficiente de exceso de aire
- η_m - rendimiento mecánico
- η_i - rendimiento indicado
- η_e - rendimiento efectivo
- N_e - potencia efectiva
- p_e - presión efectiva
- p_i - presión indicada

Figura 4. Variación de los parámetros del motor Diésel en función de la carga (Jóvaj, 1987).

1.4.7 Presión de encendido en el motor diésel (presión máxima con el motor encendido sin carga)

La presión de encendido en el motor Diésel, se mide con el indicador de presiones Leutert en la culata de cada cilindro, cuando el motor se encuentra en funcionamiento sin carga establecida.

Esta presión en cada uno de los cilindros del motor, está directamente relacionada con la presión de compresión, puesto que, a menor presión de compresión, equivale a disminuir la relación de compresión, por lo que menor será la eficiencia térmica, y por consiguiente el rendimiento térmico del ciclo.

Los parámetros finales del proceso de compresión dependen de los valores iniciales de presión y temperatura en la admisión y de las fugas de la mezcla a través de las partes no herméticas de los anillos del pistón. Si la temperatura de las superficies transmisoras de calor es baja, el calor se transmite desde la carga hacia el medio refrigerante de manera muy intensa. Al poner en marcha el motor frío, cuando la frecuencia de rotación del cigüeñal es baja y los anillos no se ajustan tan herméticamente al espejo del cilindro, además, el tiempo durante el cual se produce la compresión es relativamente elevado, aparecen notables fugas de la carga a través de los anillos, lo que conduce a la disminución de la temperatura y presión de compresión, y proporcionalmente también a la disminución de la presión de encendido (Jóvaj, 1987).

1.5 Contaminación ambiental por los MCI de una central eléctrica

La contaminación ambiental que puede emitir una central eléctrica de fuel-oil de la generación distribuida se deriva de los residuales que se generan en las emisiones de gases, los residuales líquidos y los residuales sólidos. Estos se controlan en los recorridos diarios mediante mediciones de emisión de gases, nivel de ruido, vibraciones y la contaminación de los afluentes. Este recorrido incluye la revisión de los drenajes, volumen del foso oleaginoso y tanque de lodos. También los desechos sólidos, la limpieza y organización de las áreas y por último inspeccionar los salideros de combustibles y lubricantes. El control de las emisiones de gases se lleva a cabo tres veces al año, determinando las características en cuanto a temperatura y concentración de los gases expulsados a la atmósfera. Dentro de ellos se mide el contenido de SO₂ debido a su toxicidad, efectos sobre la salud humana y el medio ambiente. Además, se incluyen el (CO₂) y el (CO) por su contribución al efecto invernadero (Trujillo, 2013).

El estudio realizado se concentra en la generación de electricidad mediante la utilización de combustible diésel y fuel oil. El diésel es un derivado del petróleo que está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas y un 25% de hidrocarburos aromáticos incluyendo naftalenos y alcatobencenos. Todos estos componentes son perjudiciales al medio ambiente e insolubles en agua por lo cual pueden contaminar grandes áreas en caso de ser vertidos en aguas marítimas o fluviales. (Trujillo, 2013). De lo expuesto anteriormente se observa la necesidad de atender rigurosamente las regulaciones medioambientales y todas las normas que en ese sentido ayuden a minimizar los efectos agresivos al entorno.

Capítulo 2

Aplicación de los mantenimientos, principales fallas en las piezas y variaciones de parámetros en los motores de combustión interna de la central eléctrica

2.1 Descripción de la Central Eléctrica Fuel Oil SC110 kV

La Central Eléctrica de Fuel Oil SC110 kV como muestra la figura 6 es un emplazamiento contenedorizado, debido que la gran mayoría de sus componentes están instalados en contenedores diseñados para tal propósito.



Figura 6. Emplazamiento de generación distribuida de fuel oil SC110 kV.

Los elementos principales que posee el emplazamiento se dividen en dispositivos de una batería y componentes comunes, los cuales son únicos para toda la central eléctrica. Dentro de ellos se encuentra la sala de control y monitoreo remoto, la planta de tratamiento de agua (WTU) y el generador de arranque en negro (BSG). El emplazamiento de generación distribuida tiene tres baterías, cada batería está compuesta por cuatro grupos motor-generador (MDU), una planta de tratamiento de combustible y aceite (HTU), una unidad de control eléctrico (ETU), dos compresores (uno de alta y otro de baja presión), una caldera recuperativa y un transformador de enlace con el sistema eléctrico nacional. De la cantidad de (MDU) en funcionamiento, va a depender la capacidad de generación total de la central.

La Central Eléctrica cuenta con varios depósitos de combustible diésel y fuel oil, un depósito de agua para alimentación de las calderas y depósitos de residuos sólidos. Existe un taller de reparación y mantenimiento para acudir rápidamente en caso de averías en algún elemento de la batería.

2.2 Principales características de los motores de combustión interna que se utilizan en la central eléctrica

En la tabla 2.1 se encuentran mostradas las principales características de los motores Hyundai HIMSEN 9H21/32, utilizados en la central eléctrica.

Tabla 2.1. Principales características de los motores Hyundai HIMSEN 9H21/32 (Cheonha-Dong, 2003).

Parámetro	Especificación
Tipo de Motor	Hyundai HIMSEN 9H21/32
Diámetro interior	210 mm
Carrera del pistón	320 mm
Velocidad media del pistón	9.6 m/s
Peso del motor	50 t
Longitudes del motor	2.4x3.4x12 m
Consumo de combustible	187-193 g/kW*h
Relación de compresión	17:1
Potencia	1700 kW

2.3 Partes principales del motor

Como muestra la figura 7 este motor está compuesto por la tapa de cilindro o culata, el bloque (block), cilindros, pistones, anillos, biela, árbol del cigüeñal, árbol de levas, elevadores, balancines, volante, rodamientos, anti vibrador, engranes auxiliares, válvulas de admisión y escape, una bancada común, entre otros.

El motor Hyundai posee una tapa por cilindro debido a su tamaño, dicha culata es la tapa que se encuentra situada en la parte superior del cilindro y su función principal es sellar el gas expandido. Cada tapa individual tiene 2 válvulas de admisión y 2 de escape fabricadas de acero aleado especial resistente al calor, asientos para dichas válvulas soldados con endurecimiento superficial reemplazable, mando de las válvulas mediante varillas, balancines y puentes, y una lubricación.

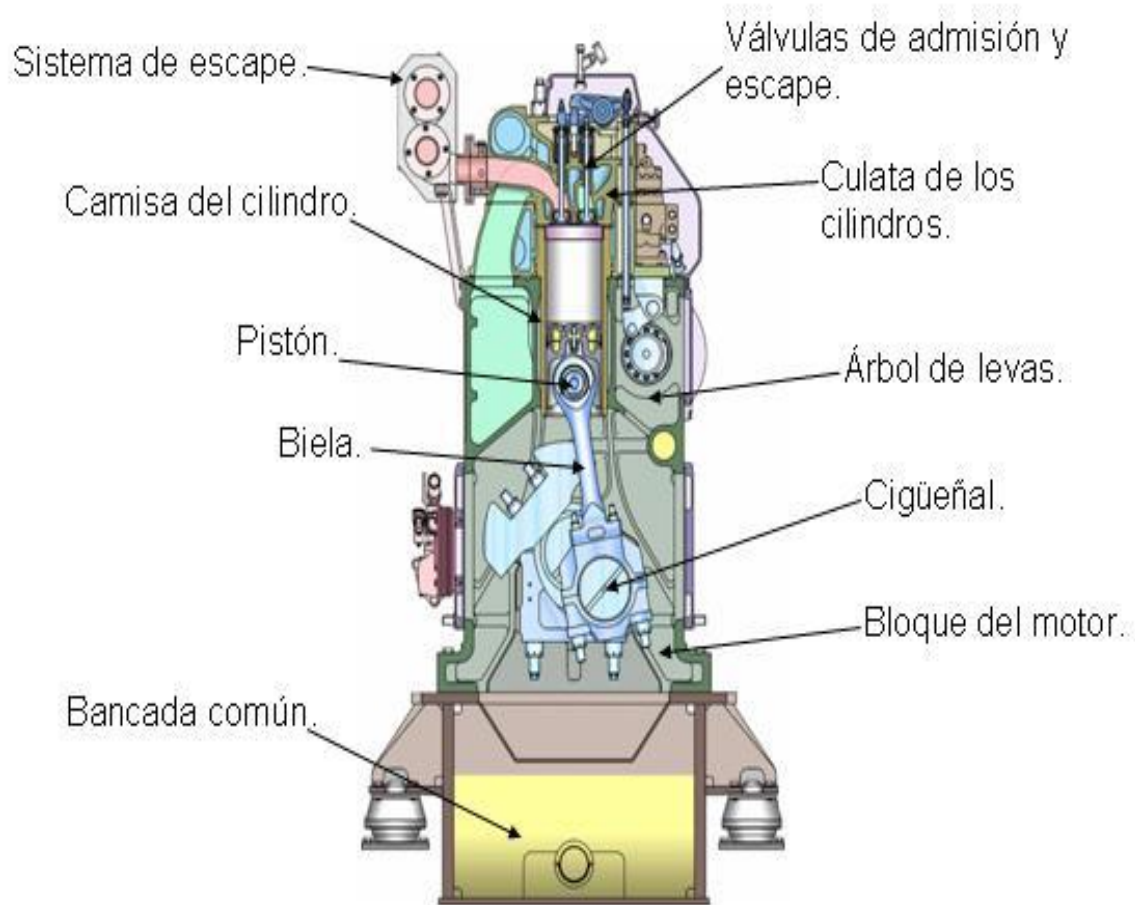


Figura 7. Principales partes del motor HIMSEN Hyundai (CNCI, 2007).

El block es la estructura principal del motor que sustenta todas las partes en funcionamiento para mantenerlas alineadas. Su material es hierro fundido gris, cuenta además con una gran cámara de aire, canales de aceite fundidos y amplias ventanas en la caja del cigüeñal para un fácil mantenimiento.

El bloque del motor Hyundai no tiene agua refrigerante en su interior por lo que no corre el peligro de la corrosión. Los cilindros son tubos huecos en los que los pistones se deslizan alternativamente de arriba hacia abajo para aprovechar la explosión de los gases quemados.

La camisa del cilindro es húmeda, tiene una altura de 583 mm y un diámetro de 290 mm, está hecha de una aleación especial de hierro fundido, con pasajes de aceite para su lubricación. Posee una distribución optimizada de temperaturas y esfuerzos para la operación con combustible pesado. Los pistones son el extremo movable de la cámara de combustión, poseen una altura de 254 mm y un diámetro de 210 mm, su función es transmitir la fuerza de la expansión de los gases. Su corona y falda están fabricadas de un acero aleado especial forjado. Los anillos o aros de los pistones ayudan a sellar los gases en combustión y aprovechar la mayor cantidad de energía que sea posible, además de controlar el consumo de aceite.

El juego de aros está formado por 2 anillos de compresión con recubrimiento cerámico del anillo superior y un anillo raspador de aceite.

La biela o barra de conexión es la unión entre el pasador del pistón y el cigüeñal, su función es transformar la fuerza lineal del pistón en movimiento torsional al cigüeñal, además de llevar el suministro de aceite al pistón para su enfriamiento. La barra de conexión debe absorber la fuerza del pistón sin permitir ningún nivel de flexión. Sus cojinetes de aluminio trimetálicos con gran área de rodamiento están fijados en el cigüeñal. La biela del motor HIMSEN Hyundai además de las características antes mencionadas tiene una alta capacidad de carga, cuenta con una optimización de masa de oscilación y está fabricada de un acero especial forjado en troquel.

La labor del árbol de cigüeñal es cambiar el movimiento lineal del pistón en movimiento giratorio y continuo. Se encuentra apoyado en el bloque por cojinetes de aluminio bimetálicos con una gran área de rodamiento, de acuerdo a su disposición y forma está determinado el orden de encendido del motor (CNCI, 2007).

El árbol de levas no es enterizo, o sea, es accionado directamente por el cigüeñal y su función es sincronizar la apertura de las válvulas de admisión y escape. Está fabricado de un acero aleado forjado en troquel y su diámetro es grande para lograr una alta presión de inyección. Por cada cilindro el árbol de levas posee 3 levas, válvulas de admisión y escape, y sistema de inyección de combustible.

El sistema de inyección de combustible de alta presión (hasta 2000 bar) está compuesto por una bomba de rodillos integrada y una tubería de inyección forjada en troquel en el bloque de acero. El volante almacena la energía y suaviza los pulsos de fuerza de los pistones. Mediante él se puede transmitir fuerza a otro equipo (generador). Los cojinetes de este motor en general están provistos de una parte de fácil sustitución reduciendo así la posibilidad de daño al cigüeñal o al árbol de levas que son componentes mucho más caros.

El antivibrador se usa para reducir la vibración torsional en el eje de cigüeñal. También se conoce al anti vibrador como balanceador armónico o amortiguador de vibración torsional. Los engranes de sincronización se utilizan para unir el conjunto entre el eje del cigüeñal, el árbol de levas, los árboles de balance, los sistemas de encendido y otros accesorios, de manera que todos los eventos ocurran en el motor al mismo tiempo. La bancada común del motor HIMSEN Hyundai está fabricada de acero soldado metalizado, es una estructura rígida, tiene un montaje flexible y una amplia capacidad de aceite (CNCI, 2007).

2.4 Principales Sistemas del Motor

Dentro de los principales sistemas del motor HIMSEN Hyundai modelo 9H21/32 está el sistema de lubricación, el sistema de admisión y el sistema de enfriamiento (ver figura 8). El sistema de aceite de lubricación de estos motores se divide en dos subsistemas, uno externo y otro interno. El sistema interno es el que suministra aceite para lubricación o enfriamiento a todas las partes móviles del interior del motor, mediante canales incorporados a los componentes del motor. Las partes de este sistema son un enfriador de aceite de lubricación del tipo plato, una bomba de aceite de lubricación del tipo engrane movida por el motor, una bomba de pre lubricación movida por un motor eléctrico del tipo tornillo.

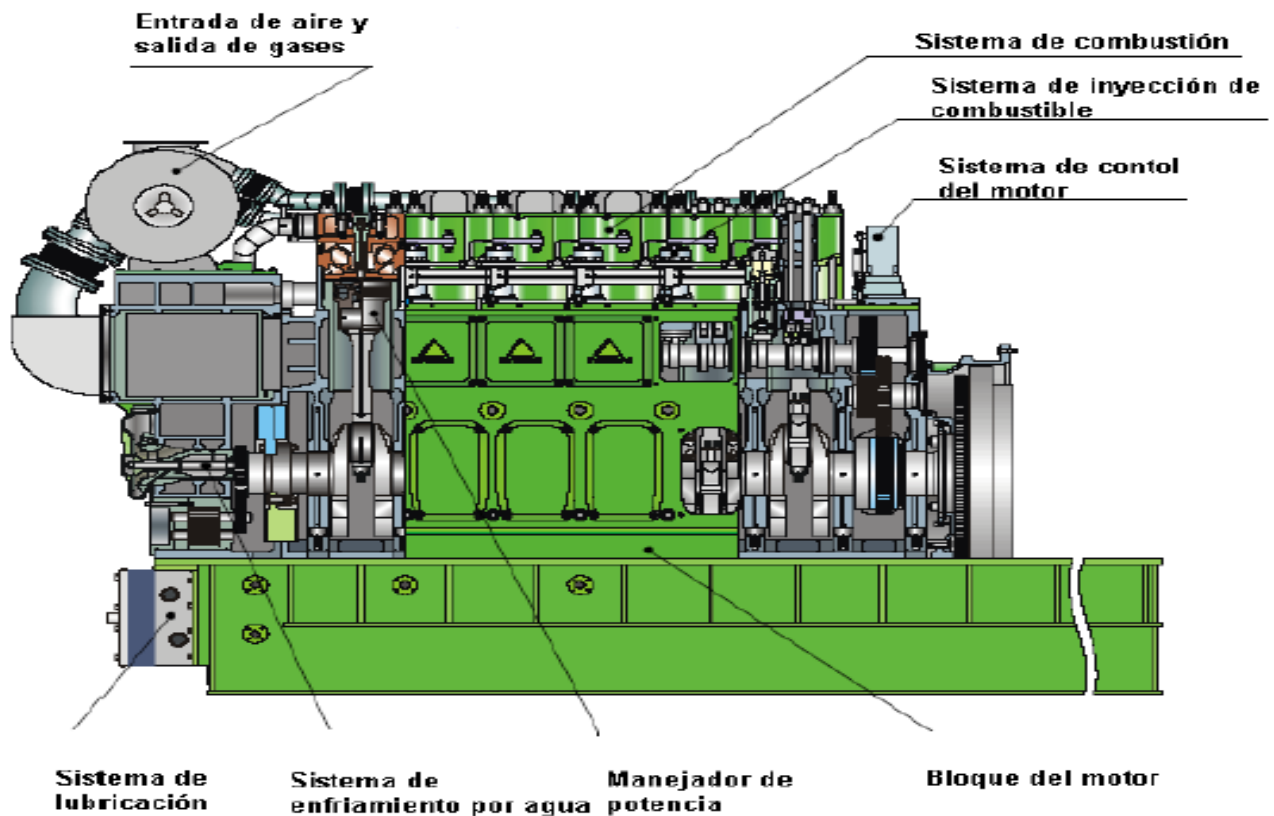


Figura 8. Motor de combustión interna de fuel oil HIMSEN HYUNDAI 9H21/32(CNCI, 2007).

Esta última es recomendable utilizarla cuando el motor es detenido y el combustible está circulando. Tiene además una válvula de termostato de aceite de lubricación del tipo de elemento de cera trabajando a un rango de temperatura de 60 a C 0 69, un filtro de aceite del tipo carrete de papel doble con un cartucho de seguridad de acero inoxidable, una válvula de regulación de presión que ajusta la presión del aceite de entrada después del filtro a 5 bar, un filtro centrífugo y un tanque de sumidero húmedo. El sistema externo de lubricación es necesario no solo para la limpieza, sino también para el calentamiento del combustible para el arranque rápido del motor. El sistema comprende cinco elementos, el primero es un separador de aceite lubricante dimensionado para operación continua y para varios motores, un filtro o malla de succión con una dimensión de malla entre 0.8 y 1 mm ubicado antes de la bomba de separación movida por un motor independiente.

El sistema cuenta también con un calentador para el separador que calienta el aceite desde 65 hasta 85 °C y por último con un sumidero para la ventilación del cárter del motor. De manera general para que estos sistemas de lubricación del motor e incluyendo la lubricación del turbocompresor trabajen eficientemente, tienen que utilizar un aceite pesado y de mediana alcalinidad, con un consumo en su uso aproximadamente 1250 litros (CNCI, 2007).

El sistema de admisión de estos motores es capaz de suministrar el aire limpio a la temperatura y cantidad correcta para la posterior combustión. El sistema en general está compuesto por filtros que limpian el aire de modo que quede libre de las partículas abrasivas que pueden afectar la vida del motor y un turbocompresor para empujar el aire dentro del cilindro. El uso de este dispositivo calienta el aire, lo cual requiere que sea enfriado posteriormente por enfriadores intermedios para lograr un llenado eficiente del cilindro. Por último, el sistema posee el múltiple de admisión que se encarga de introducir la misma cantidad de aire a todos los cilindros del motor para así garantizar una combustión uniforme de todos los cilindros.

El sistema de enfriamiento tiene como función principal la regulación de la temperatura de trabajo del motor. Esto asegura que el motor opere al rango más eficiente y que tenga una larga vida útil. Altas temperaturas en un motor pueden provocar diversos problemas, incluyendo el pre encendido, detonaciones, quemaduras de pistones y válvulas, ralladuras de camisas y graves daños en el sistema de lubricación. Bajas temperaturas conducen a dificultades tales como sedimentos, acumulación de agua en la caja de cigüeñal, pobre economía y desgaste en el motor. Dentro de las partes del sistema de enfriamiento están las camisas de agua, el termostato, la bomba de agua y conducción, el refrigerante, el radiador o intercambiador de calor, el ventilador, los conductos y los colectores de agua, mangueras y cubiertas. El motor Hyundai HIMSEN tiene dos circuitos de agua de enfriamiento, el sistema interno que incluye el motor, el enfriador del aire de carga y el enfriador de aceite lubricante, y el sistema de enfriamiento externo comprende el suministro de agua de enfriamiento al sistema interno.

El sistema de enfriamiento interno se divide en dos sistemas, uno de alta y otro de baja temperatura y muchos de los elementos de estos circuitos son modularizados y montados directamente en módulo de alimentación.

Ambos circuitos cuentan con una bomba movida por el motor, una válvula termostato de cera tipo divisoria y un enfriador de aire de carga. Se diferencian en que el circuito de baja temperatura posee un enfriador de aceite de lubricación y el de alta temperatura tiene camisas de agua en el motor y culata de los cilindros. Las conexiones externas están separadas para agua de baja temperatura y alta temperatura.

El sistema externo de lubricación consta de dos circuitos de enfriamiento, uno de alta y otro de baja temperatura. Las conexiones externas son proporcionadas para los circuitos de dos ramas. La central de enfriamiento para cada motor consiste en radiadores enfriados por ventiladores. El sistema de enfriamiento externo posee además una válvula de auto apagado que garantiza el precalentamiento del motor, lo cual prevé el flujo de agua de enfriamiento dentro del motor durante la acción del precalentamiento (CNCI, 2007).

2.5 Descripción de los principales mantenimientos aplicados a los motores

El mantenimiento de los motores de combustión interna de fuel oil de los grupos electrógenos es un sistema de mantenimiento preventivo planificado. Cada mantenimiento se realiza de acuerdo a las horas de trabajo del motor reflejadas en el contador de horas del panel de control del motor, los cuales son el cíclico a las 2 000 h, semicapital a las 6 000 h y el capital a las 12 000 h, este es un ciclo que se va aplicando según la acumulación de horas del motor, en el cual se llevan a cabo operaciones de revisión (diagnóstico). En cada período de mantenimiento, de acuerdo al volumen de trabajo se llenan los registros que corresponden a cada instrucción de mantenimiento. El informe de mantenimiento incluye los registros de las mediciones que se realizan a aquellos elementos que requieran ser sustituidos, e incluyen las dimensiones y holguras generadas por el montaje de nuevos elementos (EMGEF, 2017).

2.5.1 Cronograma de ejecución del mantenimiento cíclico a las 2 000 horas trabajadas

Reapriete de sujeciones principales

- Prueba de martillado en espárragos y tuercas de apriete hidráulico dentro del cárter del motor.

Inspección de unidad de cilindro y bielas

- Chequeo y ajuste de holgura de válvulas.
- Obtención de parámetros termo- técnicos y hermeticidad de las cámaras de combustión.

Inspección de árbol cigüeñal y engranajes

- Dientes del aro dentado del volante. (Visual)

Mecanismo de operación de válvulas

- Control de rotación de los giradores de válvula.
- Chequeo de las caras de contacto de la leva y el rodillo.

Inspección de sistema de inyección de combustible

- Bomba de inyección de combustible. (Mantenimiento y chequeo de holguras y desgastes límites)
- Deflectores. Inspección de dimensiones (sustitución cada 4000hrs)
- Válvula de inyección de combustible. (Inyector). Inspección, mantenimiento y ajuste de la presión de apertura.
- Revisión de la tubería de alta presión.

Sistema de agua de enfriamiento.

- Limpieza de la superficie externa del radiador con agua a presión a contra flujo y con vapor.

Sistema de aire comprimido

- Inspección de motor de arranque por aire.

Sistema de aire de la combustión y gases de escape

- Limpieza y reparación de la línea de limpieza con agua del turbocompresor y drenaje de la cámara de aire de sobrealimentación.
- Inspección y limpieza del aro de la tobera del TC.
- Revisión de fugas de la válvula de salida de escape (Dámper) del motor.
- Revisión del apriete de las sujeciones del múltiple de escape.

2.5.2 Cronograma de ejecución del mantenimiento semicapital a las 6 000 horas trabajadas

Chequeo de funcionamiento del sistema de control

- Inspección y ajuste de articulaciones de control del gobernador. Revisión rodamiento del piñón conductor y cambio de aceite del gobernador.
- Inspección de sensor rpm. Chequeo de dispositivos de seguridad. (Holgura normal 1,2 - 2,0 mm)

Inspección de cojinetes.

- Cojinetes de árbol de levas. (Chequeo de holguras).

Inspección y reapriete de calzos anti vibratorios

- Depósitos de aceite o daños en elemento de goma.
- Medición de altura HL entre bastidor y calzo metálico.
- Reapriete de tornillos del bloque del motor, el marco de la base y los calzos anti vibratorios.
- Tuercas entre los calzos anti vibratorios y el cimiento.

Inspección de unidad de cilindro y bielas

- Chequeo y ajuste de holgura de válvulas.
- Obtención de parámetros termo- técnicos y hermeticidad de las cámaras de combustión.

Inspección de árbol cigüeñal y engranajes

- Dientes del aro dentado del volante. (Visual).
- Chequeo de flexión del cigüeñal.

Mecanismo de operación de válvulas

- Control de rotación de los giradores de válvula.
- Chequeo de las caras de contacto de la leva y el rodillo.

Inspección de sistema de inyección de combustible

- Bomba de inyección de combustible. (Mantenimiento y chequeo de holguras y desgastes límites)
- Deflectores. Inspección de dimensiones (sustitución cada 4000hrs)
- Válvula de inyección de combustible. (Inyector). Inspección, mantenimiento y ajuste de la presión de apertura.
- Revisión de la tubería de alta presión.

Sistema de agua de enfriamiento.

- Limpieza de la superficie externa del radiador con agua a presión a contra flujo y con vapor.

Sistema de aire comprimido

- Inspección de motor de arranque por aire.

Sistema de aire de la combustión y gases de escape

- Limpieza y reparación de la línea de limpieza con agua del turbocompresor y drenaje de la cámara de aire de sobrealimentación.
- Inspección y limpieza del aro de la tobera del TC.
- Desmontaje y limpieza de turbocompresor. Medición de holgura radial y axial.
- Revisión de fugas de la válvula de salida de escape (Dámper) del motor.
- Revisión del apriete de las sujeciones del múltiple de escape

Sistema de enfriamiento

Ventiladores, radiadores y contendor del MDU

- Medición de aislamiento

Reapriete de sujeciones principales

- Tuercas de culatas.
- Tuercas del vástago de biela.
- Tuercas de la cabeza de biela.
- Prueba de martillado en espárragos y tuercas de apriete hidráulico dentro del cárter del motor.
- Tuercas de los soportes de los cojinetes principales.
- Tuercas de los contrapesos.
- Tuercas del árbol de levas.
- Tornillos del bloque del motor y el marco de la base (550 Nm).
- Tornillos del turbocompresor (455 Nm).

2.5.3 Cronograma de ejecución del mantenimiento capital a las 12 000 horas trabajadas

Chequeo de funcionamiento del sistema de control

- Inspección y ajuste de articulaciones de control del gobernador. Revisión rodamiento del piñón conductor y cambio de aceite del gobernador.

- Inspección de sensor rpm. Chequeo de dispositivos de seguridad. (Holgura normal 1,2 - 2,0 mm)

Inspección de cojinetes.

- Cojinetes del pie y cabeza de biela. Inspección y chequeo de holguras.
- Cojinetes de árbol de levas. (Chequeo de holguras).
- Cojinetes principales. (Evaluación de desgastes límites)
- Cojinetes de desplazamiento axial. (Chequeo de holgura)

Inspección y reapriete de calzos anti vibratorios

- Depósitos de aceite o daños en elemento de goma.
- Medición de altura HL entre bastidor y calzo metálico.
- Reapriete de tornillos del bloque del motor, el marco de la base y los calzos anti vibratorios.
- Tuercas entre los calzos anti vibratorios y el cimiento.

Inspección de unidad de cilindro y bielas

- Válvulas de admisión y escape, Asientos y Guías. Espacio de agua de enfriamiento en la culata.
- Chequeo y ajuste de holgura de válvulas.
- Inspección y mantenimiento Válvula Indicadora.
- Inspección y reacondicionamiento de camisas. (Bruído)
- Pistón, Bulón y aros. (Chequeo de holguras y desgastes límites)
- Medición de alojamiento para el bulón. Chequeo de Holguras entre el bulón y el cojinete de pie de biela.
- Obtención de parámetros termo- técnicos y hermeticidad de las cámaras de combustión.

Inspección de árbol cigüeñal y engranajes

- Dientes del aro dentado del volante. (Visual).
- Chequeo de flexión del cigüeñal.

Mecanismo de operación de válvulas

- Árbol de balancines y cojinete. (Chequeo de Holgura).
- Control de rotación de los giradores de válvula.
- Chequeo de las caras de contacto de la leva y el rodillo.

Inspección de sistema de inyección de combustible

- Bomba de inyección de combustible. (Mantenimiento y chequeo de holguras y desgastes límites)
- Deflectores. Inspección de dimensiones (sustitución cada 4000 hrs).
- Válvula de inyección de combustible. (Inyector). Inspección, mantenimiento y ajuste de la presión de apertura.
- Revisión de la tubería de alta presión.
- Sustitución de las bombas de inyección.
- Sustitución de los inyectores.
- Sustitución de la línea de combustible.

Sistema de aceite lubricante.

- Bomba de aceite lubricante – Reemplazar cojinetes.
- Enfriador de Aceite lubricante –Inspección y limpieza
- Inspección de válvula termostática. (Limpieza y chequeo de elementos)

Sistema de agua de enfriamiento.

- Bomba de agua de enfriamiento. Reemplazar aros de sellaje.
- Inspección de válvula termostática. (Limpieza y chequeo de elementos)
- Limpieza de la superficie externa del radiador con agua a presión a contra flujo y con vapor.

Sistema de aire comprimido

- Inspección de motor de arranque por aire.
- Válvula de arranque principal y emergencia (chequeo de funcionamiento).

Sistema de aire de la combustión y gases de escape

- Limpieza y reparación de la línea de limpieza con agua del turbocompresor y drenaje de la cámara de aire de sobrealimentación.
- Inspección y limpieza del aro de la tobera del T/C.
- Desmontaje y limpieza de turbocompresor. Medición de holgura radial y axial.
- Inspección de partes desgastables del turbocompresor (grupo base) y medición de holguras.
- Limpieza del enfriador de aire de carga con agentes químicos y de la cámara de aire. Reacondicionamiento (pintado) de la cámara de aire.
- Sustitución del enfriador del aire de carga.
- Revisión de fugas de la válvula de salida de escape (dámper) del motor.
- Reparación de la válvula dámper del motor.
- Revisión del apriete de las sujeciones del múltiple de escape
- Sustitución del turbocompresor.
- Sustitución del múltiple de escape.

Sistema de enfriamiento

Ventiladores, radiadores y contendor del MDU

- Toma de carga de los motores de los ventiladores
- Medición de aislamiento
- Chequeo de los rodamientos

Reapriete de sujeciones principales

- Tuercas de culatas.
- Tuercas del vástago de biela.
- Tuercas de la cabeza de biela.
- Prueba de martillado en espárragos y tuercas de apriete hidráulico dentro del cárter del motor.
- Tuercas de los soportes de los cojinetes principales.
- Tuercas de los contrapesos.

- Tuercas del árbol de levas.
- En los engranajes de la distribución.
- Tornillos de rueda dentada del cigüeñal (340 Nm).
- Tornillos (Allen) de la rueda ensamblada del cigüeñal (170 Nm).
- Tornillos de rueda dentada del árbol de levas (230 Nm).
- Tornillos del bloque del motor y el marco de la base (550 Nm).
- Tornillos del turbocompresor (455 Nm).

Generador

Chumacera

- Desarme, inspección y limpieza de la chumacera
- Sustituir el aceite de la chumacera.
- Inspección del muñón del eje y el metal antifricción
- Medición de holguras

Ventilación

- Limpieza de filtros del aire del generador (Sustituir si es necesario)

Otras tareas

- Inspección del block del motor, rectificar si es necesario
- Montaje de los aros de compensación de desgaste
- Revisión del estado del block de la línea de alimentación de combustible, sustituir en caso de que presenten signos de abrasión o corrosión.
- Reparar techo del contenedor (Encima del generador)
- Reparación de las válvulas de tres vías
- Reparación de los reguladores de aire de baja

2.6 Análisis de las principales fallas que producen averías en los motores

Las fallas en los motores del emplazamiento se han puesto de manifiesto en el transcurso de los años como consecuencia de la sobre explotación de los mismos, la mala operacionalidad por los obreros, la falta de piezas de repuesto en los mantenimientos y las condiciones tropicales debido que en verano la temperatura dentro del contenedor excede los 45 °C límites a los que deben operar estos motores por carta régimen, lo que evidencia la necesidad de determinar estas principales fallas en las piezas con mayor incidencia de fallas y analizar cómo se afectan los parámetros de los motores que a su vez provoca que aumenten los consumos específicos de combustible. La selección de los datos se realizó del reporte de averías existente en la empresa, que comprende el período de 2012 hasta el 2019.

- **Santa Clara 110 kV**

En la figura 9 se ilustra un gráfico de las piezas con mayor incidencia de fallas.

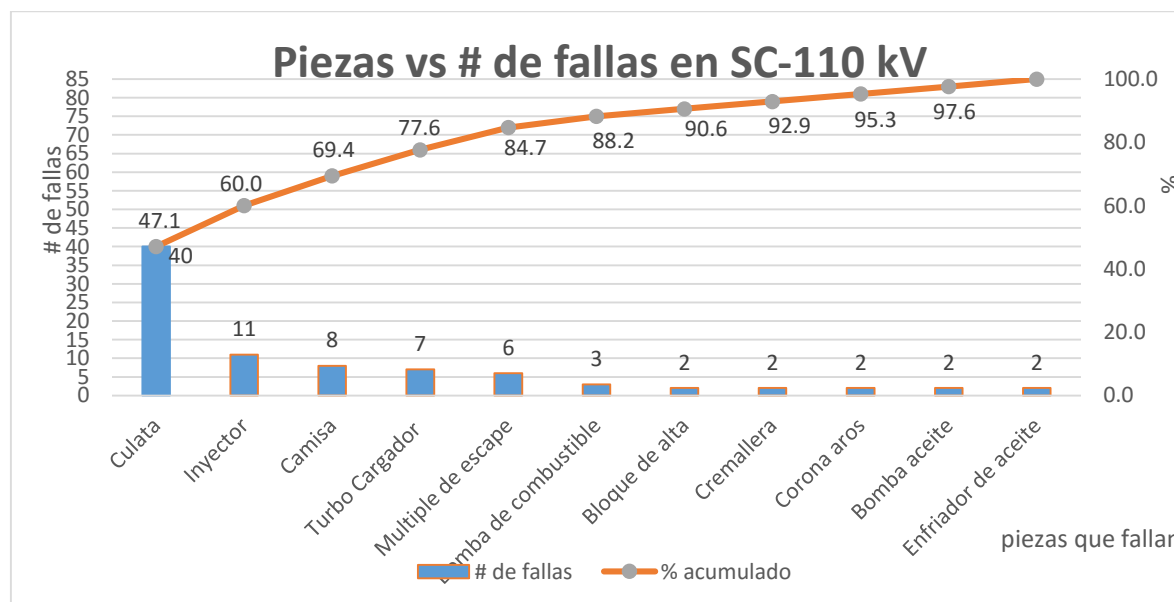


Figura 9. Diagrama de Pareto de número de fallas vs piezas o partes que fallan en SC 110 kV.

Las piezas con mayor incidencia de fallas en el período de 2012- enero de 2019 indicadas en el gráfico, con un 84.7 % de las fallas son, las culatas, inyectores, camisas, turbocompresor y múltiple de escape, las cuales han manifestado distintos modos de falla y causa raíz.

Fallas en las culatas

- Alta temperatura de los gases de escape en varios cilindros, temperatura de 395-400 al 85% de carga (Ruidos anormales en el escape).

Modo de falla. Escape de gases por el conducto de admisión. Alta temperatura del aire de carga.

Causa raíz. Mal estado de las superficies de asientos de las válvulas (ver anexo 1), válvulas de admisión partida y agrietadas (ver anexo 2 y 3)

- Baja hermeticidad en los cilindros e incremento del consumo de combustible

Modo de falla. Escape de gases por el grifo

Causa raíz. Falla en la junta metálica A 15.000-191.

- Existencia de agua en los cilindros

Modo de falla. Salidero de agua por el grifo

Causa raíz. Deterioro de la junta tórica A15000-192.

- Caída de potencia en los cilindros e ineficiencias de la combustión

Modo de falla. Salidero agua puerto de inspección

Causa raíz. Culata rajada por erosión de corrosión en frío del material (ver anexo 4).

Inyectores

- Alta temperatura de los gases de escape en todos los cilindros.

Modo de falla. Baja presión de inyección inferior a 450 bares.

Causa raíz. Toberas defectuosas por desgaste y falla de calibración.

Camisas

- Baja presión de compresión en los cilindros.

Modo de falla. Salidero de aceite entre camisa de agua y block (ver anexo 5)

Causa raíz. Camisa agrietada por deformaciones en las superficies de asentamiento entre la camisa y el block.

Turbocompresor

- Alto nivel de vibraciones en el turbocompresor

Modo de falla. Ruidos anormales en la turbina.

Causa raíz. Desbalance en el rotor de la turbina y álabes fracturados por fatiga térmica (ver anexo 6)

- Elevación excesiva de la temperatura del aire de carga y suciedad en los paneles del enfriador.

Modo de falla. Incendio en el filtro de aire del turbocompresor (ver anexo 7)

Causa raíz. Salidero de aceite en la tubería de aceite de enfriamiento de las toberas de inyección, la cual incidió directamente el filtro del compresor y por las condiciones de temperatura y aire se inflamó.

- Altas temperaturas de los gases de escape en todos los cilindros

Modo de falla. Inestabilidad en las revoluciones del turbo.

Causa raíz. Pérdida de eficiencia y holgura de compresión.

Múltiples de escape

- Alto nivel de ruido y pérdidas de potencia

Modo de falla. Salidero de gases por el múltiple (ver anexo 8) y rotura de los compensadores de escape.

Causa raíz. Deterioro de elementos de fijación en el múltiple y falla de material por fatiga.

- **Santa Clara Industrial (SCI).**

Esta central eléctrica se encuentra ubicada en el municipio Santa Clara y posee tres baterías de cuatro motores Hyundai HIMSEN. La figura 10 muestra la cantidad de fallas por piezas en esta central.

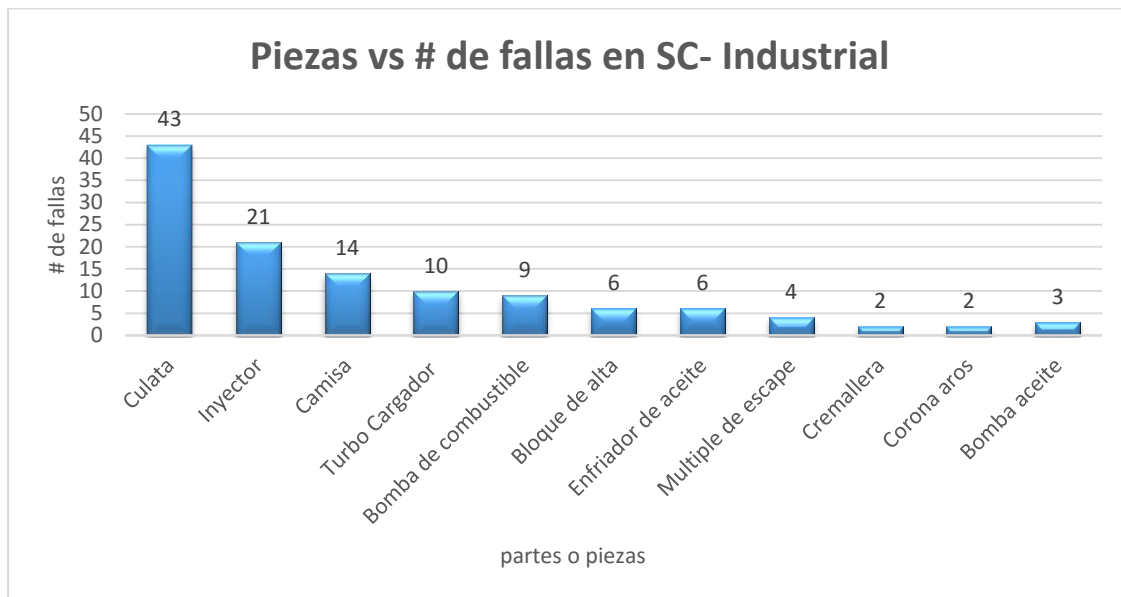


Figura 10. Número de fallas vs piezas o partes que fallan en SCI

En la misma se encontraron un total de 120 fallas en el período de 2012- ene 2019 de las cuales con mayor incidencia están las culatas con 43 fallas, los inyectores con 21 fallos, 14 fallas por camisas faldeadas, 10 turbocompresores con descompensación en los álabes y 9 fallas por bombas de combustible.

- **Sagua 110 kV.**

Esta central eléctrica se encuentra ubicada en el municipio Sagua la Grande y posee tres baterías de cuatro motores Hyundai HIMSEI al igual que SC 110 kV y SC Industrial, lo que permite hacer una comparación de la existencia de fallas y saber si está en un rango considerado. La figura 11 muestra la cantidad de fallas por piezas en esta central.

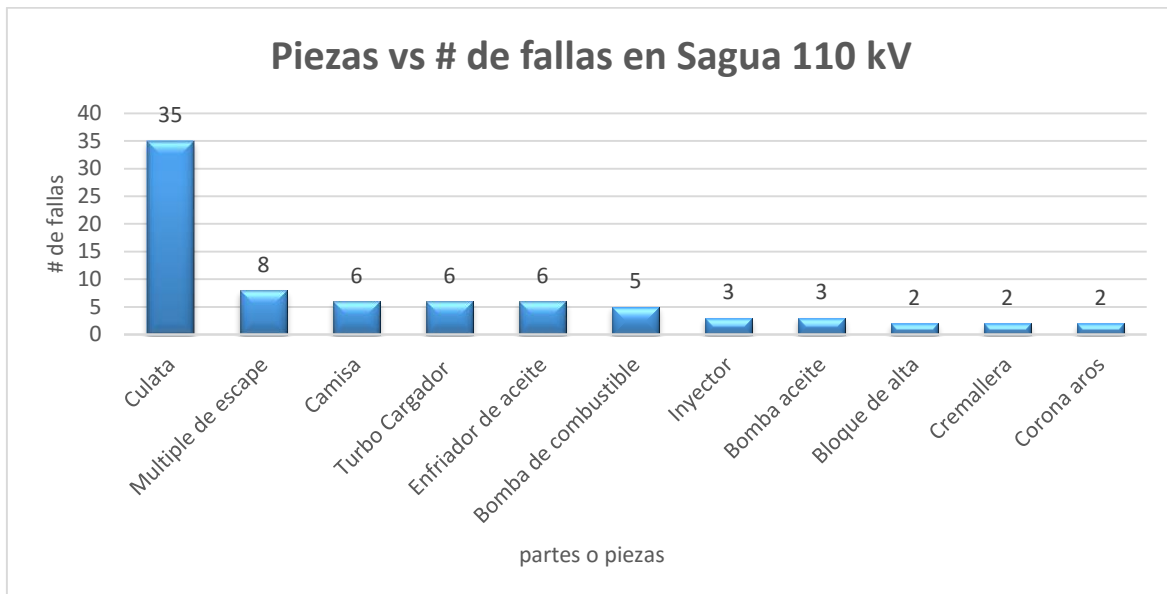


Figura 11. Número de fallas vs piezas o partes que fallan en Sagua 110 kV

En esta central las piezas con mayor incidencia son las culatas con 35 fallas y los múltiples de escape con 8 fallas, las demás piezas se mantienen en un rango de fallas considerable.

Con el análisis realizado a las tres centrales eléctricas se pudo determinar que estas se encuentran en un rango elevado de incidencia de fallas en las culatas, inyectores, enfriadores de aceite, múltiples de escape, camisas y turbocompresores, las cuales se están manifestando como consecuencia de falta de piezas de repuesto y la mala capacitación de los mecánicos para la aplicación de los mantenimientos, alto régimen de trabajo con sobre explotación, la falta de instrumentos de medición de algunos parámetros del motor y las altas temperaturas ambientales para las cuales no está establecido el régimen de operación de estos motores.

2.6.1 Diagnóstico mecánico aplicado en los motores

La forma más precisa de relacionar la incidencia de fallas con las desviaciones de parámetros es mediante la realización de un diagnóstico mecánico (EMGEF, 2017).

Estos diagnósticos son realizados a los motores cuando están previo a un mantenimiento y después de realizado este, lo que permite evaluar si los parámetros se encuentran en rango o no. Antes de iniciar el mantenimiento el motor se fija en un régimen de carga (85%), una velocidad de rotación de 900 rpm y se le comienzan a medir parámetros de temperatura y presión en los diferentes sistemas.

El proceso de diagnóstico continúa a la vez que el motor se desarma. Aquí se mide una posible deflexión del cigüeñal con respecto al eje de rotación del generador, se chequea la holgura de las válvulas de admisión y escape y se inspeccionan las toberas de inyección de combustible de acuerdo al desgaste y la holgura. El diagnóstico se centraliza en la toma de mediciones y la comparación contra la carta tecnológica del motor, lo que permite determinar la calidad de funcionamiento de este. En los diagnósticos pueden ser detectadas producto a las manifestaciones de las fallas expuestas anteriormente, desviaciones en los parámetros funcionales del motor, las cuales son:

- Alta temperatura del aire de carga mayor de 55 °C
- Pérdida total de potencia en uno o varios cilindros (deficiente distribución de las válvulas).
- Alta velocidad del turbo y presión del aire de carga, $n = 39000$ rpm y $P > 2.7$ bar.
- Alta temperatura del agua de enfriamiento de los cilindros, en el enfriador de aceite y el enfriador del aire de carga.
- Baja presión del agua de enfriamiento a la entrada del motor, por debajo de (3,5 a 4,5 bar).
- Descompensación de la potencia en los cilindros del motor.
- Presencia de poscombustión en todos los cilindros.
- Baja presión de encendido en todos los cilindros por lo bajo de 160 bar.
- Cremalleras excesivamente caladas. Valor medio 29,4 mm.
- Temperatura de los gases muy alta, mayor de 390 °C en todos los cilindros

Estas desviaciones de parámetros del motor, dan lugar a la producción de causas inmediatas como:

1. Alto consumo de combustible.
2. Combustión deficiente.
3. Baja cargabilidad.
4. Incrementos de cargas dinámicas en el cigüeñal

2.7 Parámetros que se miden en los motores de la central eléctrica

La manifestación de una falla en varios o todos los cilindros del motor, acusa el mal funcionamiento de sistemas o agregados que afectan, a su vez, el estado de los parámetros termo técnicos de la máquina en funcionamiento. En la central eléctrica se hace una lectura diaria a las 2:00 pm, a través del monitoreo y una lectura antes y después de los mantenimientos, por los especialistas de la EMGEF, de todos los parámetros del motor, según el sistema de mantenimiento preventivo planificado. La **tabla 2.2** muestra el modelo de parámetros que debe llenar el operario responsable del funcionamiento de los motores, dichas mediciones están asociadas al sistema de combustible, lubricación, agua de enfriamiento y parámetros termo técnicos, las cuales deben ser archivadas en el expediente de cada uno de estos motores. (Ver ejemplo en anexo 9).

Tabla 2.2. Parámetros y rango de medición del motor Hyundai HIMSEN 9H 21/32 (EMGEF, 2017).

CENTRAL ELÉCTRICA	Nº MOTOR	Rango de medición
TIPO DE MOTOR	BATERÍA	
Tiempo	hh:mm	
Temperatura ambiente	(°C)	<32
Temperatura dentro del contenedor	(°C)	30-45
Carga del motor	%	85%

Velocidad del motor	rpm	891-909
Velocidad del turbocompresor	rpm	<40300
Posición del indicador del gobernador	%	3.5-6
Índice de cremallera	(mm)	21-32
Temperatura del fuel oil (FO)a la entrada del motor (operación continua con FO)	(°C)	110-149
Presión del FO a la entrada del motor (operación continua con FO)	(bar)	7-10
Viscosidad del FO a la entrada del motor.	cSt	12- 14
Presión de aceite lubricante a la entrada del filtro	(bar)	5-6
Presión de aceite lubricante a la entrada del motor	(bar)	4-5
Caída de la presión de aceite lubricante en el filtro	(bar)	0.2-1
Presión de aceite lubricante a la entrada del turbocompresor (T/C).	(bar)	2-4
Temperatura del aceite lubricante a la entrada del motor	(oC)	60-73
Presión del agua de enfriamiento de alta temperatura (A.T) a la entrada del motor	(bar)	2.5- 4.5
Temperatura del agua de enfriamiento de A.T. a la entrada y salida del motor	(oC)	75-78 77-85
Presión del agua de enfriamiento de baja temperatura (B.T) a la entrada del enfriador de aire	(bar)	1.5-4.5
Temperatura del agua de enfriamiento de B.T. a la entrada y salida del enfriador de aire.	(oC)	30-40 40-50
Presión del agua enfriamiento a la entrada y salida de la unidad refrescadora(radiador)	(bar)	0.7-0.9 0.1-0.3
Temperatura del agua a la entrada y salida de la unidad refrescadora(radiador)	(oC)	75-85 35-50
Temperatura de aire de carga después del refrescador de aire	(oC)	35-55

Presión del aire de carga después del refrigerador de aire	(bar)	1-3.2
Temperatura de gases de escape a la entrada y salida del T/C.	(oC)	250-380
Temperatura de los gases de escape a la salida de los cilindros	(oC)	250-390
Presión del aire de arranque	(bar)	25-30
Temperatura del cojinete del generador	(oC)	55-75
Nivel de aceite en el cárter	%	50-75
Presión de encendido por inflamación del motor	(bar)	115-190
Temperatura de los gases de escape en la salida de los cilindros.	(oC)	250-390

Las lecturas de los parámetros, permiten determinar cómo se encuentra el rendimiento de los motores, predecir posibles averías y acometer acciones de reparación en caso de presentarse una alta desviación en uno o varios de ellos, con el fin de generar mayor cantidad de kW/h con el menor consumo de combustible posible, dado por el fabricante del motor. Todos los parámetros medidos en el motor tienen relación con el mal funcionamiento de este, pero existen algunos parámetros en los cuales una desviación, afecta directamente el índice de consumo específico de combustible de los motores, los cuales se encuentran expuestos a continuación en la **tabla 2.3**.

Tabla 2.3. Parámetros con mayor incidencia en la variación del consumo de combustible (EMGEF, 2017).

Carga del motor	%
Velocidad del turbocompresor (Vel. T/C)	<40300 (rpm)
Temperatura del fuel oil a la entrada del motor. (Temp. FO)	110-149 (°C)
Presión de aceite lubricante a la entrada del motor. (P Mot.)	4-5 (bar)
Temperatura del aceite lubricante a la entrada del motor (Temp. ac)	60-73 (°C)

Temperatura del agua de enfriamiento de alta presión a la entrada y salida del motor. (Te cam y Ts cam)	75-78 (°C) 77-85 (°C)
Temperatura del agua de enfriamiento de baja presión a la entrada y salida del enfriador de aire de carga. (Te enf. air y Ts enf. air)	30-40 (°C) 40-50 (°C)
Temperatura del aire de carga. (T air.c)	35-55 (°C)
Presión del aire de carga después del refrescador de aire. (P air.c)	1-3.2 (bar)
Presión de encendido por inflamación del motor.	115-190 (bar)
Temperatura de los gases de escape en la salida de los cilindros.	250-390 (°C)

Los parámetros anteriormente mencionados en la **tabla 2.3**, se encuentran explicados teóricamente en el epígrafe 1.4.

Las figuras mostradas a continuación, representan gráficamente el comportamiento de los principales parámetros afectados por la presencia de fallas, que a su vez, son los de mayor incidencia en el consumo de combustible de los motores. Para la realización gráfica, se hizo la selección de las lecturas de parámetros en los expedientes de 6 de los 12 motores de forma alterna, a un 85 % de carga, y se seleccionaron datos de 8 meses de cada año en el período de 2008 a enero de 2019. La información brindada gráficamente corresponde a la media anual de los parámetros tomados de los motores, los que se calcularon en el caso de la temperatura de gases de escape, hallando la media diaria de los 6 motores, debido que cada cilindro tiene un termómetro independiente con un total de 54 cilindros, posteriormente la media mensual, dependiente de la media diaria, y finalmente la media anual de los 6 motores. Teniendo en cuenta que la temperatura de los gases de escape a la salida de los cilindros es un parámetro multidependiente (EMGEF, 2010), una vez detectada la falla, es necesario realizar el análisis de cada algoritmo donde se manifieste la desviación de uno o varios parámetros relacionados con la temperatura de escape (ver anexo 10).

De igual forma, se pudo determinar la media anual de temperatura y presión del aire de carga, la temperatura del agua a la entrada y salida del enfriador del aire de carga, la temperatura del agua de enfriamiento a la entrada y salida de los cilindros, la temperatura y presión del aceite lubricante a la entrada del motor, la temperatura del fuel oil a la entrada del motor, la velocidad del turbocompresor y la presión de encendido del motor.

En la **figura 12** se ilustra el comportamiento de las temperaturas de los gases de escape a la salida de los cilindros.

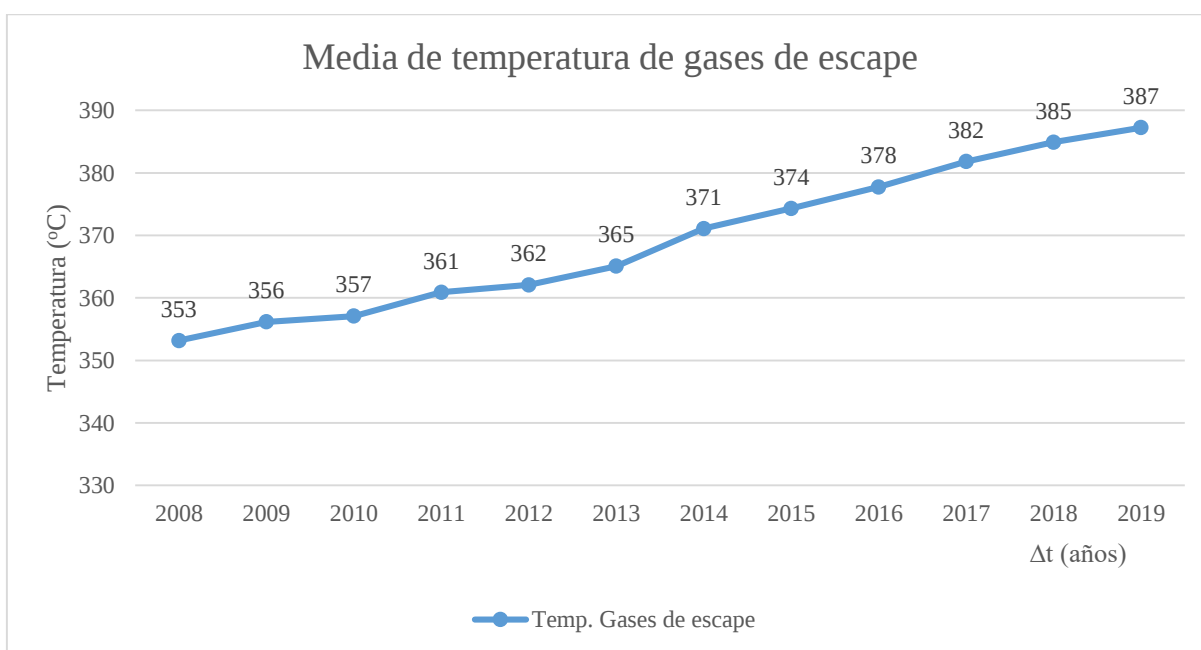


Figura 12. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura de los gases de escape a la salida de los cilindros de los motores.

En el gráfico de la figura 12 se observa el comportamiento de la media anual de temperatura de los gases de escape a la salida de los cilindros, manteniéndose desde el comienzo de la generación en 2008, con una tendencia ascendente hasta enero de 2019, puesto que este parámetro es multidependiente en el cual se refleja la desviación de otros parámetros del motor, pero independiente de la alta desviación del parámetro en algunos motores, la media anual se encuentra dentro del rango establecido para estas temperaturas.

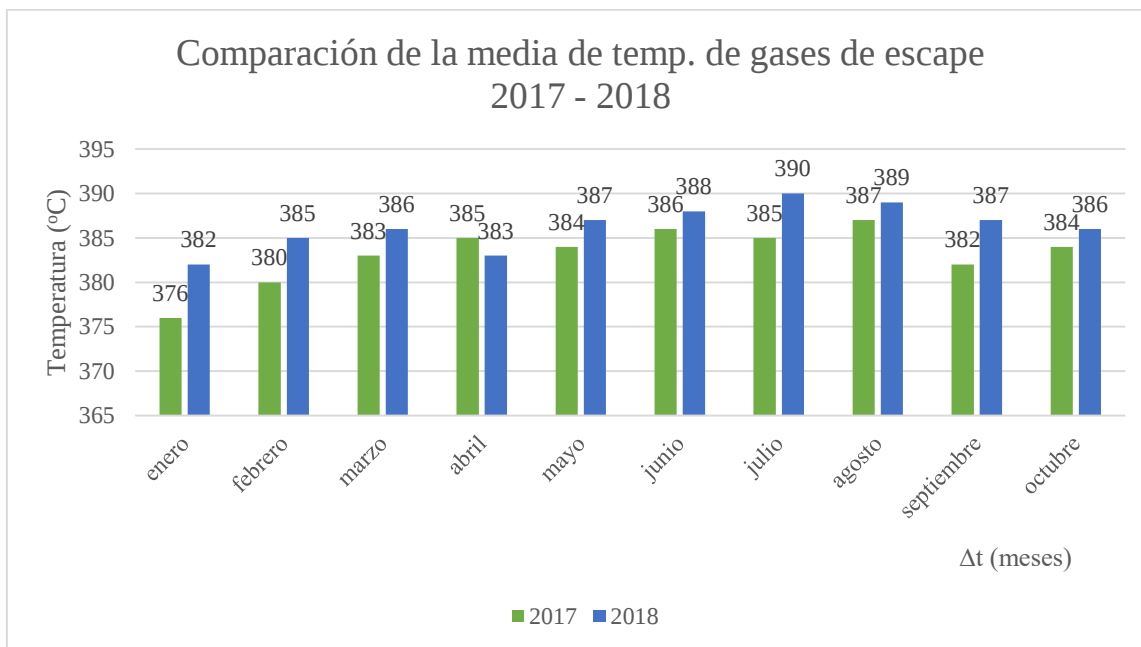


Figura 13. Gráfico comparativo de la media mensual de temperatura de los gases de escape de los motores 2017-2018.

En el gráfico de la **figura 13** se muestra comparativamente, las temperaturas de gases de escape en los años 2017 y 2018, en el cual se evidencia el aumento de las temperaturas en la mayoría de los meses del 2018 con respecto al 2017, debido que en el 2018 no se realizó ningún mantenimiento capital y algunos motores están trabajando limitados por deterioro de piezas por sobreexplotación, debido a la falta de piezas de repuesto.

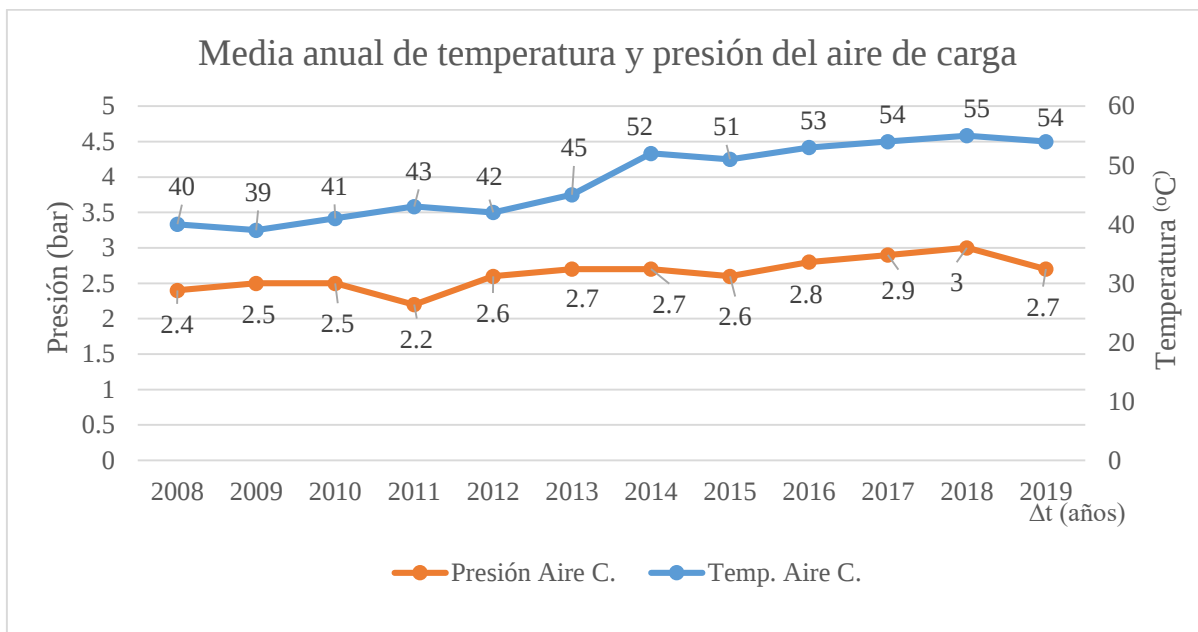


Figura 14. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura y presión del aire de carga.

En la **figura 14** se observa en la curva de temperatura como mantiene en el transcurso del tiempo un comportamiento ascendente, con un alto valor en los últimos tres años, y estando en el límite de rango (35-55 °C) en el 2018, lo cual se debe a la suciedad y deterioro que presentan los enfriadores de aire de carga, el cual conduce a un ineficiente intercambio de calor con el medio, provocando la disminución de la densidad del aire de carga; la curva de presión muestra en el año 2011, una caída de presión hasta 2.2 bar, producto a la suciedad en los filtros de aire de los compresores los cuales obstruyen el flujo de aire, el resto de los años existe una variabilidad con tendencia al aumento manteniéndose dentro del rango (1- 3.2 bar) pero con altas presiones para el 85 % de carga en los años 2017 y 2018, como consecuencia del trabajo ineficiente de los turbocompresores, debido a las incrustaciones en los álabes de la turbina, las cuales aumentan el área de contacto de los álabes con los gases, y obstruyen los conductos del distribuidor en el rodete de la turbina, aumentando la presión en el escape y por tanto ineficiencia en la combustión.

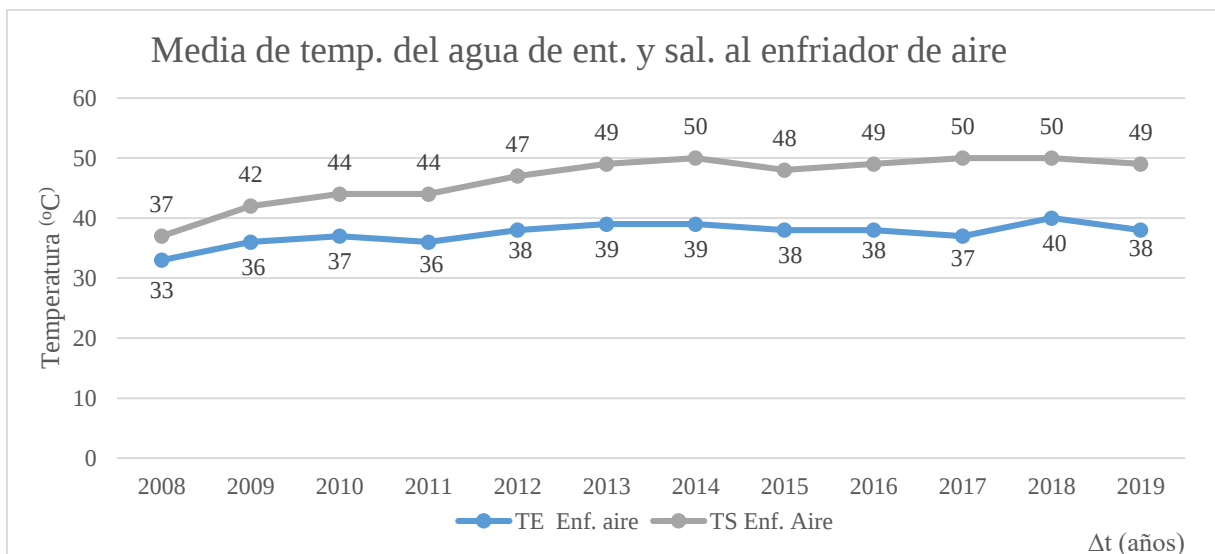


Figura 15. Gráfico de variación de la media de temperatura del agua a la entrada y salida del enfriador del aire de carga.

Las curvas en la **figura 15**, de la temperatura de agua de entrada y la de agua de salida de los enfriadores de aire tienen un comportamiento semejante y ascendente, se ilustra como en los años 2014 y 2018, están en el límite de rango, como consecuencia de deficiencias en los enfriadores de aire y la entrada de agua a estos proveniente de los radiadores a una mayor temperatura de la establecida para el 85 % de carga.

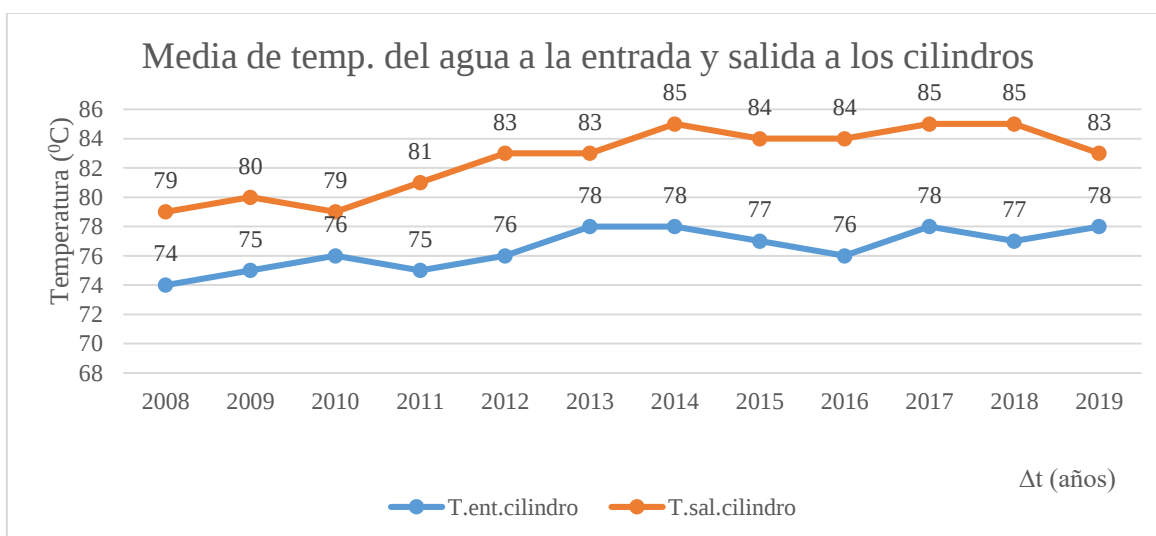


Figura 16. Gráfico de variación de la media de temperatura del agua de enfriamiento a la entrada y salida de los cilindros.

Las curvas en la **figura 16**, de la temperatura del agua de enfriamiento de los cilindros, tienen una ascendencia variable con picos de alta temperatura manteniéndose en los límites superiores del rango, en los años 2014, 2017 y 2018, que al igual que en las curvas de la **figura 15**, la mayor influencia en estas desviaciones, es la suciedad en los paneles de los radiadores, la cual no permite la transferencia de calor adecuada de la temperatura del agua con el medio; y la obstrucción por magnesita, de las tuberías de los paneles del radiadores y los conductos de enfriamiento de los motores, lo cual disminuye la circulación del agua y actúa como aislante, reduciendo el área de transferencia de calor y provocando un aumento significativo de la temperatura en el refrigerante, afectando la eficiencia de la bomba de agua y del motor en general.

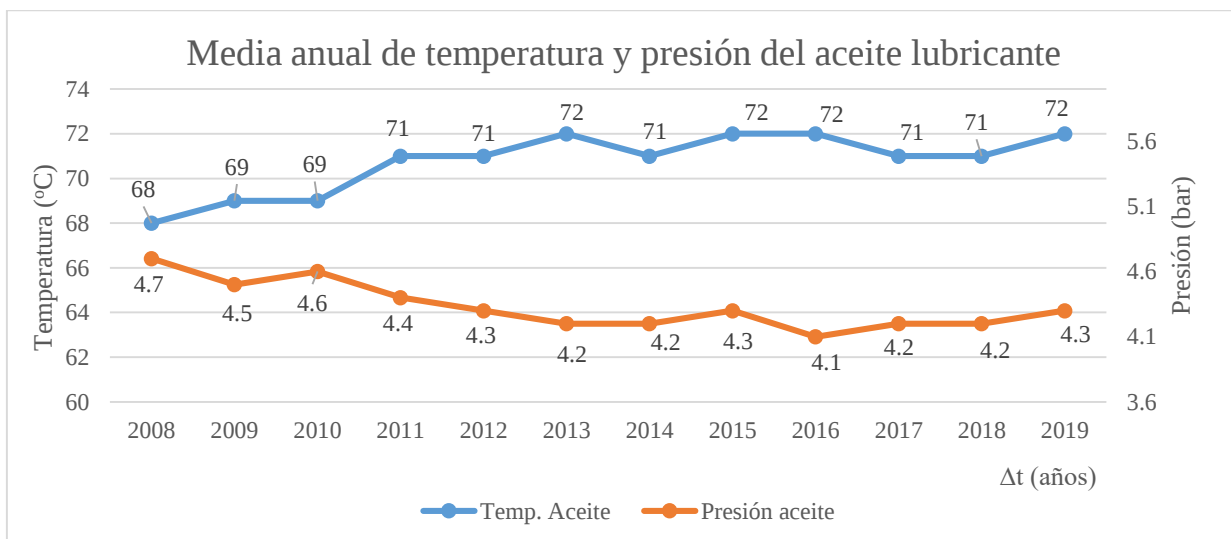


Figura 17. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura y presión del aceite lubricante.

La curva de temperatura en la **figura 17**, muestra una tendencia relativamente ascendente hasta el año 2013, acercándose al límite superior del rango (73 °C) para este parámetro, el resto de los años en adelante se ha mantenido variable entre los 71 y 72 °C, cerca del límite superior, como causa de las deficiencias en los enfriadores de aceite y otros elementos del sistema de enfriamiento lo cual ha provocado un deterioro prolongado de las piezas y limitaciones en el trabajo de los

motores. La curva de presión desde el año 2012, ha mantenido un comportamiento descendente hasta el año 2013, en los años posteriores la variación ha sido mínima oscilando entre los 4.1 - 4.3 bar, encontrándose dentro del rango, pero siendo presiones relativamente bajas para el 85 % de carga. Esta caída de presión se debe al desgaste de las piezas frotantes dentro del motor, de los sellos en los cuales se pueden producir pérdidas de aceite y el trabajo ineficiente de las bombas de aceite, el cual no se ha podido mejorar por falta de piezas en los mantenimientos.

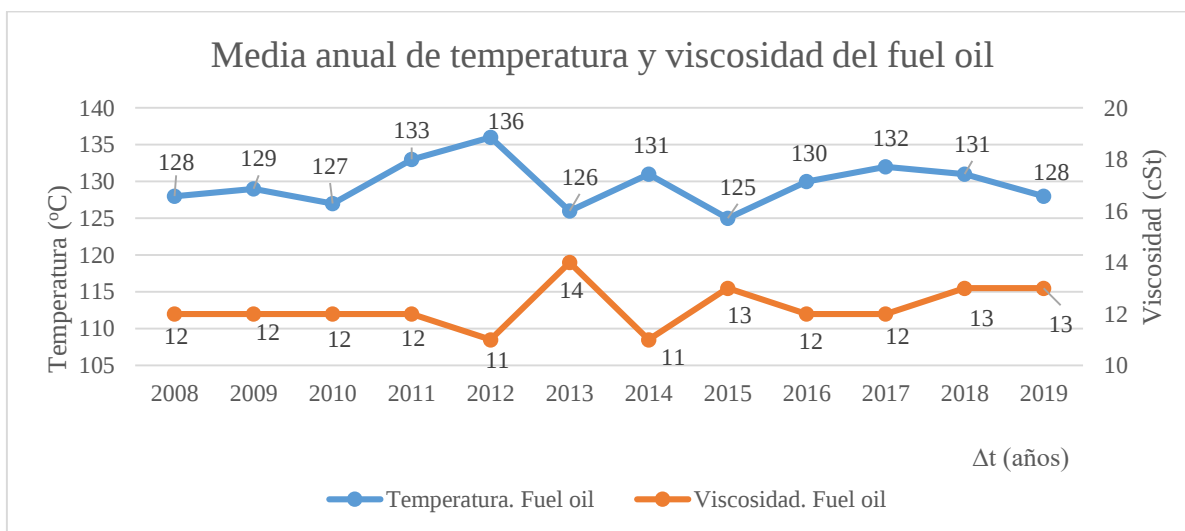


Figura 18. Gráfico del comportamiento de la media anual de temperatura y viscosidad del fuel oil.

La curva de temperatura del combustible de la **figura 18**, muestra un comportamiento muy variable, alcanzando picos de baja temperatura en los años 2013, 2015, pero manteniéndose dentro del rango establecido de precalentamiento de combustible. Estas caídas de temperaturas, se producen debido a las pérdidas de calor en las tuberías de vapor e ineficiencia de las calderas recuperativas, lo que impide que el combustible alcance la viscosidad adecuada para la inyección, deteriorando las agujas de inyección y el proceso de combustión, como consecuencia de la mala atomización del combustible y la caída de presión máxima en la cámara.

La curva de viscosidad una estabilidad considerable entre los 11 y 13 cSt, exceptuando el 2013 con 14 cSt y el año en curso alcanzando 15 cSt. Que se alcance la viscosidad requerida (12 cSt) para la inyección, depende de la temperatura de precalentamiento y de las propiedades químicas del fuel oil.

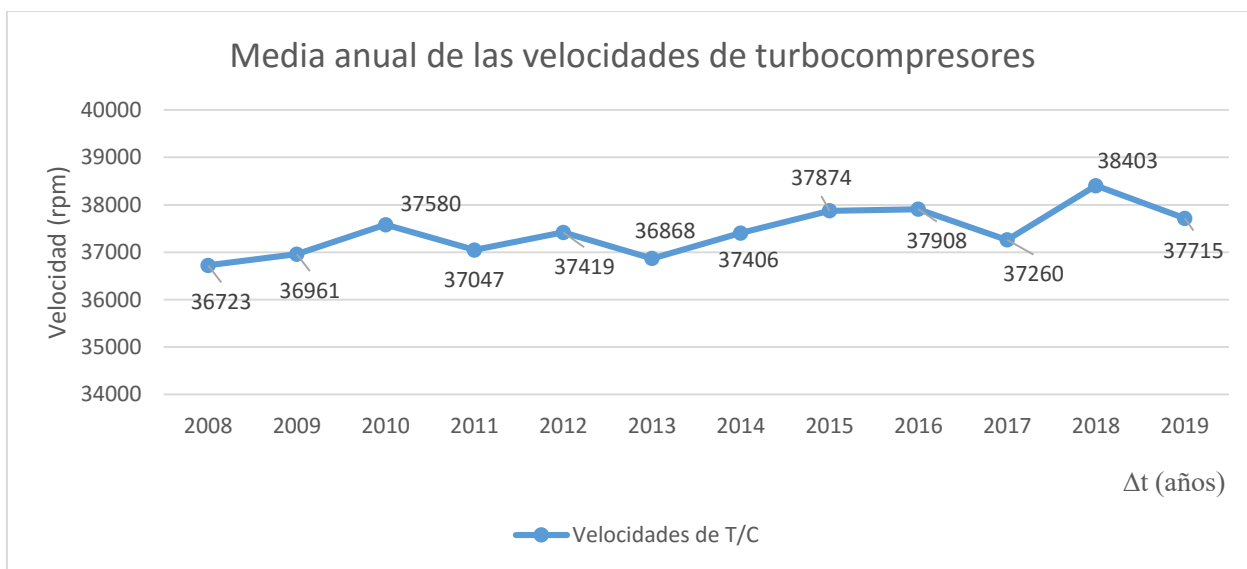


Figura 19. Gráfico del comportamiento de la media anual de velocidades de los turbocompresores.

Los turbocompresores han mantenido una variabilidad en el tiempo como muestra la **figura 19** con respecto a la velocidad, manteniéndose ligeramente sobre la velocidad establecida (37 000 rpm) para el 85 % de carga, exceptuando al año 2018 en el que se alcanzó un valor alto de velocidad de 38 403 rpm, como consecuencia del alto nivel de suciedad e incrustaciones en los álabes de la turbina lo cual aumenta el área de contacto con los gases; y la obstrucción por estas incrustaciones del distribuidor, el cual disminuye el flujo de gases, generándose un aumento de presión de los gases de escape, provocando ambos factores a su vez, un aumento de la velocidad en los rodets del turbocompresor.

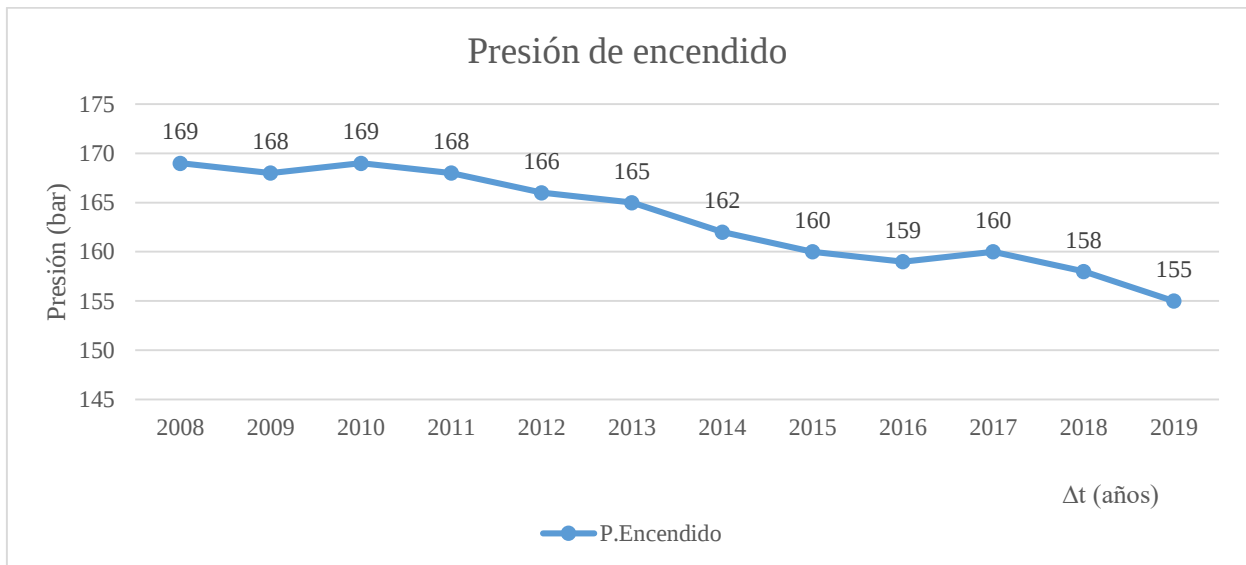


Figura 20. Gráfico del comportamiento de la presión de encendido por inflamación del motor.

En la **figura 20** se observa que las presiones de encendido han disminuido en el tiempo, alcanzando en el 2018 e inicios de 2019 bajas presiones para el 85 % de carga. El descenso de estas presiones se ha visto afectada principalmente por el desgaste, ovalaciones o deformaciones de las camisas, el desgaste de los aros de compresión; y el deterioro del sistema de inyección, lo cual produce una atomización ineficiente del combustible provocando un deterioro del proceso de combustión, la elevación de la temperatura de gases de escape y pérdida de eficiencia en el motor.

Capítulo 3

Análisis de fiabilidad de las partes o piezas con mayor frecuencia de fallos.

3.1 Cálculo de parámetros de confiabilidad en los motores de la central eléctrica.

Este cálculo se realiza con el objetivo de determinar si algunas de las partes o piezas analizadas en el epígrafe 2.6 presentan tiempos medio entre fallas menores que el tiempo de mantenimiento preventivo planificado que se le aplica a estos motores, lo cual indica si existe o no confiabilidad en las piezas antes de que se le aplique el mantenimiento. Para este análisis es necesario definir conceptos (epígrafe 1.3) y recopilar datos de cada equipo o parte, los cuales son:

- Modo de falla
- Causa raíz
- Número de elementos afectado
- Tiempo medio de funcionamiento de todos los elementos afectados (horas)

3.1.1- Fallas en las culatas

En la **tabla 3.1** se muestran los datos necesarios de las fallas en las culatas para el procedimiento de cálculo.

Tabla 3.1. Datos de las fallas en las culatas.

<i>Modo de falla</i>	<i>Causa raíz</i>	<i>Tiempo medio de funcionamiento de todos los elementos afectados (horas)</i>	<i># de elementos afectados</i>
Salidero de agua por el grifo.	Junta tórica A15000-192 dañada	5 428	28
Salidero agua puerto de inspección	Culata rajada por erosión de corrosión en frío del material.	6 816	5
Escape de gases por el conducto de admisión. Alta temperatura del aire de carga	Mal estado de las superficies de asiento de las válvulas	8 411	4
Escape de gases por el grifo.	Falla en la junta metálica A 15.000-191.	5 817	3

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{40}{5\,428*28 + 6\,816*5 + 8\,411*4 + 5\,817*3} = 0.000168$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = 1/0.000168 = \mathbf{5\,952\,h}$$

$$N_0 = 9 \text{ cil.} * 12 \text{ mot.} = 108$$

$$P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} = \frac{108-40}{108} = 63 \%$$

3.1.2- Fallas en los Inyectores.

En la tabla 3.2 se muestran los datos de las fallas en los inyectores.

Tabla 3.2. Datos de las fallas en los inyectores.

Modo de falla	Causa raíz	<i>Tiempo medio de funcionamiento de todos los elementos afectados (horas)</i>	# de elementos afectados
Baja presión de inyección inferior a 450 bares.	Toberas defectuosas (desgaste)	5 442	7
	Falla de calibración	1 780	4

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{11}{5\,442*7 + 1\,780*4} = 0.00024$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0.00024} = \mathbf{4\,167\,h}$$

$$N_0 = 9 \text{ cil.} * 12 \text{ mot.} = 108 \text{ cilindros}$$

$$P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} = \frac{108-11}{108} = 89.8 \%$$

3.1.3- Fallas en los múltiples de escape

En la tabla 3.3 se encuentran los datos de las fallas en los múltiples de escape para la realización del cálculo.

Tabla 3.3. Datos de las fallas en los múltiples de escape.

Modo de falla	Causa raíz	<i>Tiempo medio de funcionamiento de todos los elementos afectados (horas)</i>	# de elementos afectados
Salidero de gases por el múltiple.	Deterioro de elementos de fijación en el múltiple	9485	4
Compensador averiado.	Falla del material por fatiga	9186	2

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{6}{9485 \cdot 4 + 9186} = 0.000106$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0.000106} = \mathbf{9434 \text{ h}} \quad N_0 = 12 \text{ múltiples de escape}$$

$$P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} = \frac{12 - 6}{12} = 50 \%$$

3.1.4- Fallas en las camisas de los cilindros

En la **tabla 3.4** se muestran los datos obtenidos de las fallas en las camisas de los cilindros en la identificación de las piezas con mayor incidencia de fallas.

Tabla 3.4. Datos de las fallas en las camisas de los cilindros.

Modo de falla	Causa raíz	<i>Tiempo medio de funcionamiento de todos los elementos afectados (horas)</i>	# de elementos afectados
Salidero de aceite entre la camisa de agua y block	Camisa agrietada por deformaciones en las superficies de asentamiento entre la camisa y el block	3 804	8

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{8}{3\,804 \cdot 8} = 0.000262$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0.000262} = 3\,816 \text{ h} \quad P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} = \frac{108 - 8}{108} = 92.6 \%$$

$$N_0 = 9 \text{ cil.} \cdot 12 \text{ mot.} = 108 \text{ cilindros}$$

3.1.5- Fallas en los turbocompresores

En la tabla 3.5 se muestran los datos necesarios de las fallas en los turbocompresores para el cálculo de los parámetros de confiabilidad.

Tabla 3.5. Datos de las fallas en los turbocompresores.

Modo de falla	Causa raíz	<i>Tiempo medio de funcionamiento de todos los elementos afectados (horas)</i>	# de elementos afectados
Ruidos anormales en el turbo	Desbalance en el rotor de la turbina y álabe fracturado por fatiga térmica	6 780	4
Inestabilidad en las revoluciones del turbo.	Pérdida de eficiencia y holgura de compresión	6 531	2
Incendio del filtro de aire de entrada al turbo	Salidero de aceite en la tubería de aceite de enfriamiento de las toberas de inyección	5 712	1

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{7}{5\,230*3 + 8\,329 + 6\,531*2 + 5\,712} = 0.000163$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0.000163} = 6\,134 \text{ h} \quad \text{P (t)} = \frac{N_0 - N_t}{N_0} = \frac{12-7}{12} = 42 \%$$

$N_0 = 12$ turbocompresores

3.1.1 Análisis de los resultados

Con los cálculos realizados anteriormente se puede afirmar que existe un 37 % de probabilidad de ocurrencia de fallas en las culatas hasta 5 952 horas de funcionamiento, como la falta de resistencia de las uniones roscadas de sujeción de las culatas y el grifo, el desgaste del asiento de las válvulas de admisión y escape, lo cual determina que no es sumamente confiable para garantizar una buena operacionalidad de las culatas, teniendo que presentar un mínimo de 80 % de confiabilidad para garantizarla; la probabilidad de ocurrencia de fallas en los turbocompresores, como las incrustaciones en los álabes de la turbina, el desbalance del rotor de la turbina y la fractura de álabes por fatiga térmica, es de un 58 % hasta 6 134 horas de operación, presentando una mala confiabilidad para ese tiempo; en los múltiple de escape hasta 9 434 horas de funcionamiento, existe un 50 % de probabilidad de ocurrencia de fallas como, la fatiga del material de los fuelles o compensadores, tornillos y tuercas de sujeción del múltiple con la culata, presentando una baja confiabilidad para su funcionamiento; los inyectores son confiables en un 89.8 % hasta 4 167 h de operacionalidad; y las camisas de los cilindros tienen una confiabilidad de un 92.6 % en un régimen de trabajo hasta 3 816 horas.

El análisis se realiza en base a una comparación de los tiempos medios entre fallas, obtenidos en el cálculo de confiabilidad de las piezas con mayor incidencia de fallas determinadas en el epígrafe 2.6 que a su vez tienen gran influencia en las desviaciones de los parámetros del motor, con los tiempos de mantenimiento que establece el sistema de mantenimiento preventivo planificado que se aplica a los

motores de la central eléctrica (ver anexo 11), con el objetivo de comprobar si existe una buena planificación del mantenimiento y proponer mejoras para disminuir las desviaciones de parámetros de los motores en vista al mejoramiento de los índices de consumo de combustible. Los datos comparativos se muestran en la **tabla 3.6** que aparece a continuación.

Tabla 3.6 Comparación de tiempos medios entre fallas calculados y tiempos de mantenimientos establecidos en la central eléctrica.

Parte o pieza	Confiabilidad (%)	TMEF (horas)	MPP (horas)
Culatas	63	5 952	6 000
Inyectores	89.8	4 167	2 000
Múltiples de escape	50	9 434	2 000
Camisas de los cilindros	92.6	3 816	12 000
Turbocompresores	42	6 134	6 000

Como se observa en la **tabla 3.6**, las partes o piezas como los inyectores, múltiples de escape y turbocompresores presentan tiempos medios entre fallas mayores a los tiempos de mantenimiento establecidos, con índices de confiabilidad bajos en el caso de los múltiples de escape de 50 % y turbocompresores con 42 %, lo cual indica que estas piezas no deben fallar antes de que se les aplique mantenimiento, pero existe una alta probabilidad de que fallen. En el caso de los inyectores, la probabilidad de fallo es mínima de un 10 %, con una confiabilidad del 90 %.

Las camisas de los cilindros y las culatas presentan índices de confiabilidad de 92.6 % y 63 % respectivamente, y los tiempos medios entre fallas son menores que los tiempos de mantenimientos para estas piezas, lo cual indica que, las camisas

tienen una alta confiabilidad hasta 3 816 horas de funcionamiento, pero debe ser variado el tiempo de mantenimiento planificado, al cíclico de 4 000 horas para la inspección y reacondicionamiento de estas; y en el caso de las culatas, se puede variar al cíclico de 4 000 h, debido que el tiempo medio entre fallas calculado, se encuentra solo a 48 h de diferencia con el MPP semicapital de 6 000 h, pero con una baja confiabilidad para mantenerlo en ese mantenimiento.

3.1.2 Propuesta para disminuir las desviaciones de parámetros de operación, que a su vez contribuyen al mejoramiento de los índices de consumo de combustible

Los principales problemas a los que se enfrenta la central eléctrica hoy en día, con respecto al funcionamiento de los motores, son los siguientes:

- Falta de instrumentos de diagnóstico y piezas de repuesto en la aplicación de los mantenimientos para conservar los parámetros de los motores cerca de los valores iniciales de explotación.
- La existencia de suciedad exterior en el sistema de refrigeración de los motores, específicamente de los radiadores, puesto que se encuentran colocados de forma horizontal sobre los contenedores, expuestos al ambiente, produciéndose una penetración y estancamiento de los residuos atmosféricos circundantes en los paneles de los radiadores, obstruyendo el flujo de aire a través de ellos y disminuyendo la transferencia de calor con el medio.
- La avería de algunos ventiladores y extractores dentro de los contenedores, los cuales tienen la función de mantener la circulación de aire para extraer el calor generado por los múltiples de escape y el motor. Como consecuencia, aumenta la temperatura dentro de los contenedores, aumentando la temperatura en la admisión de los turbocompresores, por lo que es necesario mantener abiertas las puertas de los contenedores y con esto, aumenta la suciedad dentro de ellos y el nivel de ruido en el área de explotación.

- La falta de instrumentos de medición en algunos puntos de los motores, que impiden conocer el estado de funcionamiento de estos, lo cual puede provocar averías de imprevistos que causen mayores daños económicos en la central eléctrica. Ejemplo, medida del consumo de combustible en cada motor.
- Salideros de combustible y aceite por deterioro de uniones y tuberías, lo cual produce directamente un aumento de los consumos y gastos económicos.
- Mala capacitación de los operarios y mecánicos que realizan los mantenimientos, puesto que muchos realizan las actividades y desconocen las consecuencias al respecto.

Medidas propuestas para disminuir las desviaciones de parámetros:

- Realizar la limpieza con vapor a los radiadores, para garantizar una mayor efectividad en esta y poder extraer así la mayor cantidad de suciedad posible, la cual no se aplica por la complejidad para el desmontaje de los radiadores, debido que sería más factible que la limpieza con agentes químicos, los cuales no se pueden aplicar más de 2 veces al año puesto que son muy agresivos y van desgastando al aluminio de las placas de los paneles.
- Reparar los ventiladores y extractores dentro de los contenedores para lograr una circulación adecuada del aire debido a las altas temperaturas que se alcanzan dentro de los mismos.
- Aislar térmicamente los múltiples de escape, el escape a la salida del turbocompresor, con el fin de disminuir las temperaturas dentro de los contenedores, puesto que se ha deteriorado el aislamiento térmico en el transcurso del tiempo y se producen pérdidas de calor.
- Colocar los filtros de la admisión de los turbocompresores, fuera de los contenedores para lograr una temperatura menos elevada del aire de carga, y así obtener mayor densidad de la carga en la admisión del motor.

- Completar la instrumentación necesaria para la lectura de los parámetros como la temperatura de entrada y salida de aceite de enfriamiento de las toberas, la temperatura de los gases de escape a la entrada del turbocompresor, la presión en el cárter y la viscosidad del fuel oil a la entrada del motor, debido que esta solo se mide en la unidad de centrifugado del fuel oil.
- Eliminar los salideros en las tuberías y uniones del motor; y en los equipos auxiliares principalmente en las purificadoras.
- Capacitar al personal que realiza los mantenimientos con el fin de lograr por la parte obrera una fiabilidad 95 %.

3.2 Análisis económico

Los gastos económicos de los mantenimientos de la central, se calculan mediante la suma del salario del personal, el importe de las piezas a sustituir, insumos y otros gastos indirectos que incluyen, lo cual queda determinado por la ecuación siguiente:

Total de Gastos= Salario del personal + Importe de piezas a sustituir + Otros Gastos.

Tabla 3.7 Costo del mantenimiento semicapital a las 54 000 horas-motor, aplicado al motor 3 en octubre de 2018.

	Salario del personal(cup)	Importe de piezas a sustituir(cup)	Otros Gastos(cup)	Total de Gastos(cup)
Motor 3	1537.7	4365.5	78.4	5981.6

En la **tabla 3.7** se muestra básicamente como se obtiene el costo de la aplicación del mantenimiento semicapital de un motor, el cual asciende cerca de los 240 cuc por unidad para este tipo de mantenimiento, costo que se incrementa en la aplicación de un mantenimiento capital, sobre todo cuando este se les aplica a todos

los motores, el cual puede llegar a un costo significativo para la economía de la empresa. La aplicación correcta de los mantenimientos puede provocar a la empresa grandes gastos, que se remitan al óptimo funcionamiento de los motores manteniendo un buen índice de consumo de combustible, gastos que se recuperarían con la venta de energía eléctrica a la red eléctrica nacional.

Otros gastos que se agregan a los de mantenimiento son los ocasionados por las averías imprevistas que surgen entre los períodos de mantenimiento. Dichas pérdidas se denominan gastos de averías y se originan en insumos, piezas de repuesto y horas de trabajo extras que se le paga al personal. Por tanto, para realizar un análisis económico cuantitativo más ampliado se necesita de un grupo de valores que respondan a un período de aplicación del sistema de mejoras del MPP mediante el diagnóstico en la central eléctrica.

Existe un renglón negativo, definido por la inversión en la compra de equipos de diagnóstico y la preparación técnica del personal que los aplica. Sin embargo, teóricamente se afirma que existe un ahorro que responde a factores como:

- Reducción al mínimo de aparición de averías imprevistas.
- Menor cantidad de piezas destinadas a las sustituciones.
- Aumento de la disponibilidad de los motores mediante la reducción del tiempo de mantenimiento.
- Reducción de costos debido a destrucciones o accidentes de los equipos debido a intervenciones innecesarias de mantenimiento.

3.3 Análisis de contaminación ambiental en la Central Eléctrica Santa Clara 110 kV de Fuel Oil

Cuando se habla de contaminación en la central eléctrica, los principales temas tratados son, la producción de lodos y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, para los cuales se realiza un análisis de la combustión. En las **tablas 3.8 y 3.9**, se muestran las producciones de lodos del cuarto trimestre del 2013 y 2018, las cuales son comparadas con el fin de determinar si se ha producido o no, un aumento de estos índices.

Tabla 3.8 Comportamiento de la producción de lodos en el cuarto trimestre 2013.

Control de la producción de lodos — cuarto trimestre 2013				
Variables	U/M	Octubre	Noviembre	Diciembre
Producción de Lodos	L	18898	21866	22124
Consumo de fuel oil	Ton	1521,9	1846	1920,9
Lodos/Combustible	L/Ton	12,4	11,8	11,5

Tabla 3.9 Comportamiento de la producción de lodos en el cuarto trimestre 2018.

Control de la producción de lodos — cuarto trimestre 2018				
Variables	U/M	Octubre	Noviembre	Diciembre
Producción de Lodos	L	27 910	23 138	13 674
Consumo de fuel oil	Ton	1594.9	1299.9	707.7
Lodos/Combustible	L/Ton	17.5	17.8	19.3

El índice de producción de lodos durante los meses analizados en el 2013, mantiene una tendencia a la disminución analizando la cantidad de litros de lodo por tonelada de combustible, generando así en el mes de octubre 12.4 L/ton, en noviembre 11.8 L/ton y en diciembre 11.5 L/ton. En el 2018, el índice de producción de lodos tiene un comportamiento ascendente llegando en el mes de diciembre a los 19.3 litros por tonelada de combustible, valores muy por encima de las producciones de lodo del 2013, lo que evidencia el deterioro y mal funcionamiento de las depuradoras de combustible en la unidad de centrifugado, así como el aumento del consumo de combustible en el tiempo que también afecta el índice de producción de lodos.

Los análisis de la combustión se realizaron con el analizador de gases TESTO 340, del cual se encuentran los rangos de medición en el anexo 12. Para dichas mediciones mostradas en el anexo 13 para el año 2013 y en el anexo 14 para el año 2018, se mantuvieron en carga fija los motores durante el período de pruebas en el cuarto trimestre de estos años. En la **tabla 3.10** se muestra la media de los valores de los parámetros de los análisis de combustión para cada año.

Tabla 3.10 Media de los valores de los parámetros de los análisis de combustión.

Parámetros	U/M	2013	2018
Oxígeno O ₂	%	12.52	13.04
Monóxido CO	ppm	103	428
Dióxido de carbono CO ₂	%	6.01	6.4
Óxido de nitrógeno NO	ppm	706	848

En la **tabla 3.10** se observa como aumentan considerablemente las partes por millón de monóxido de carbono y se nota un ligero aumento del % de dióxido de carbono en el 2018 con respecto al 2013, lo que evidencia el deterioro en el proceso de combustión que se ha generado en el transcurso de los años.

Conclusiones

- Las piezas con mayor incidencia de fallas en el período de 2012 a enero de 2019, son las culatas, los inyectores, las camisas de los cilindros, los múltiples de escape y los turbocompresores, generando el 84.7 % del total de fallas.
- El aumento de la velocidad de los turbocompresores sobre las 37 000 rpm para un 85 % de carga, se produce por el alto nivel de incrustaciones en los álabes de las turbinas que generan mayor superficie de contacto con los gases, aumentando la presión del aire de carga después del compresor a valores superior a los 3 bar.
- La temperatura del fuel oil tuvo descensos inferiores a los 110 °C con aumento de la viscosidad sobre los 14 cSt, causando un empobrecimiento de la lubricación en el sistema de inyección, y una mala atomización del combustible, proporcionando ineficiencias en la combustión.
- Se produjo un aumento de la temperatura del aceite lubricante alcanzando valores de 72 °C en los años 2013, 2015, 2016 y 2019, por la suciedad exterior de los enfriadores de aceite y la alta temperatura del agua proveniente de los radiadores, lo que produce un descenso de la viscosidad, generando pérdidas mecánicas que disminuyen el rendimiento mecánico de los motores.
- En la temperatura del agua del sistema de enfriamiento se generó un aumento alcanzando valores máximos admisibles de 40 °C a la entrada de los enfriadores de aire de carga en el año 2018 y 78 °C a la entrada de los motores en el 2013, 2014, 2017 y 2019, a consecuencia de la suciedad exterior existente en los radiadores que impiden la transferencia de calor al medio.

- La presión máxima alcanzada en los cilindros, ha disminuido llegando a valores 155 bar, debido a la baja presión de compresión, como resultado de las fugas por el desgaste de las partes frotantes; y el envejecimiento del sistema de inyección, lo cual provoca un deterioro del proceso de combustión y pérdidas de eficiencia de los motores.
- La temperatura de los gases de escape en la salida de los cilindros, ha aumentado hasta valores medios de 387 °C en el 2019 y en algunos motores hasta 410 °C por ineficiencias en la combustión, debido a las desviaciones de los demás parámetros analizados, puesto que es un parámetro multidependencia.
- Los tiempos medios entre fallas calculados para las camisas y las culatas, no llegan a los tiempos de mantenimiento planificado, por lo que se hace necesario reducir los tiempos de planificación del mantenimiento de estas piezas a 4 000 horas para que no fallen.

Recomendaciones

- Realizar un estudio profundizando en cuáles son las partes, en las que más afectaciones se producen, dentro de las piezas con mayor incidencia de fallas.
- Determinar la influencia en el funcionamiento de todos los elementos del motor, mediante el análisis de los diferentes sistemas.
- Hacer un estudio de los elementos comunes en la central eléctrica, que influyen en el funcionamiento de los motores.

Bibliografía

- ALBUERNE, Y. L. 2010. La generación distribuida y sus beneficios en Cuba.
- Ariosa, H. R. (2012). Instrucción de trabajo para el diagnóstico de fallas, averías y evaluación de los parámetros de confiabilidad de los motores con tecnología Hyundai.
- Artiles, A.H. 2011. Sistemas de Mantenimiento.
- CHEONHA-DONG & DONG-GU 2003. "Energoimport Operation & Maintenance Manual for 1700 kW Packaged Power Stations".
- CNCI. 2007 Composición de un Emplazamiento Hyundai PPS.
- COMISIÓN-NACIONAL-PARA-EL-USO-EFICIENTE-DE-LA-ENERGÍA. 2014. *Qué es la Generación Distribuida*.
- EMGEF, 2010. Instrucción metodológica para el diagnóstico y corrección de las causas de las altas temperaturas de escape en los motores Hyundai Himsen 9H 21/32.
- EMGEF, 2017. Modelo de informe conclusivo de diagnóstico mecánico y aplicación del mantenimiento.
- ENERGÍA, 2014. Generación distribuida y energía de calidad.
- FERNÁNDEZ, C. 2011. Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba.
- FERNÁNDEZ, M. F. & PEREZ, R. 2010. Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba. *Revista cubana de Ingeniería*.
- Jóvaj, M. S. 1987. Motores de automóvil. Moscú: Editorial MIR.
- Martínez, R. M. 2000. Motores de Combustión Interna.
- QUINTELA, F.2013. Grupos de generación de energía eléctrica, grupos electrógenos.
- Reyes, J. L. 1983. Teoría de los Motores de Combustión Interna. Editorial Pueblo y Educación.

- Rodríguez, D. 2016. “Motores sobrealimentados”. Disponible en: <http://www.motoressobrealimentados.com/elturbocompresor.htm> [Accesado el día 17 de junio de 2019]
- TORRES, Y. L. 2011. Estudio del Lodo producido en la Generación Distribuida y su posible utilización como combustible en diferentes instalaciones industriales. UCLV.
- Trujillo, C. L. (2013). Plan de manejo para los desechos existentes en la Empresa Eléctrica de Villa Clara.

Anexos

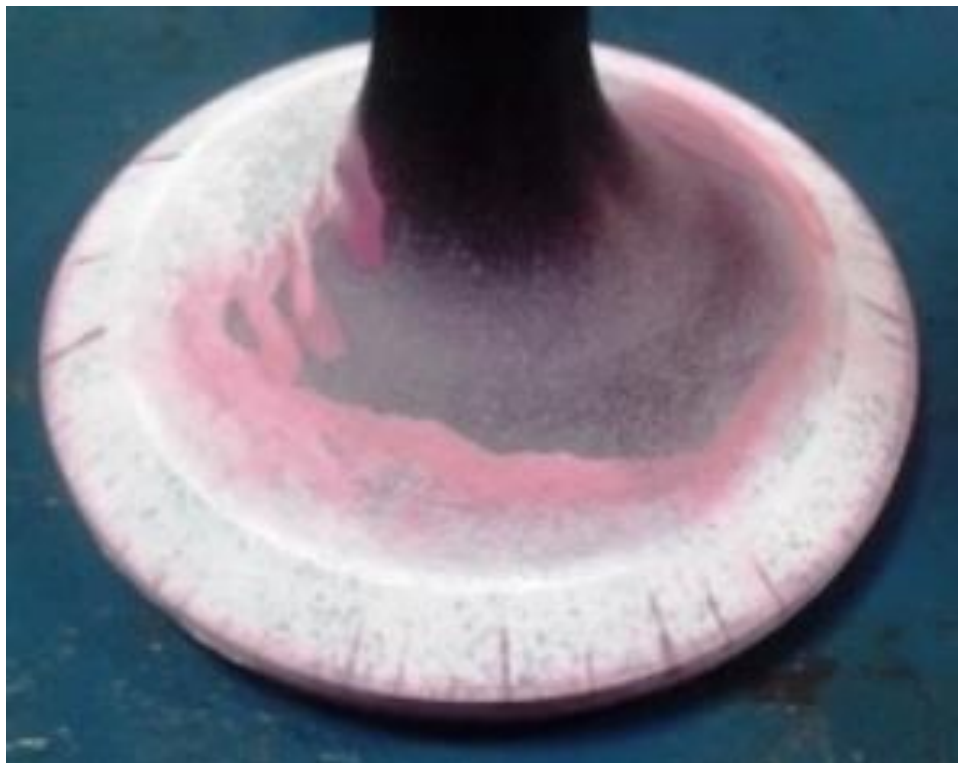
Anexo 1. Mal estado de los asientos de las válvulas de admisión.



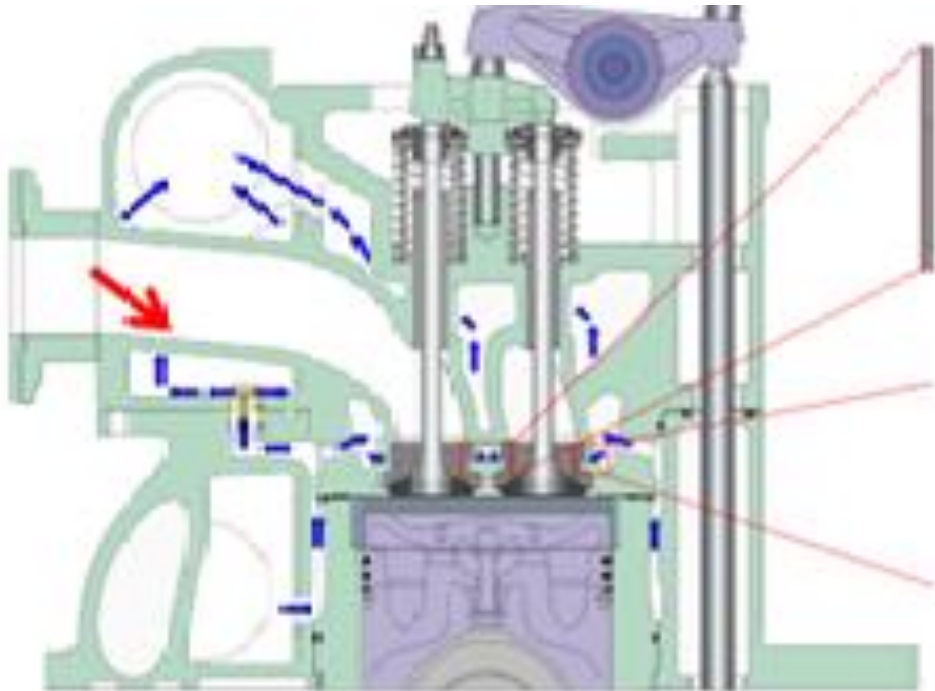
Anexo 2. Falla por válvulas partidas.



Anexo 3. Falla por válvulas agrietadas



Anexo 4. Falla por corrosión en frío del material



Anexo 5. Agrietamiento y deformación de las camisas.



Anexo 6. Álabes dañados y holgura de compresión.



Anexo 7. Rotura de la tubería de aceite



Anexo 8. Falla por fatiga de compensadores.



Anexo 9. Modelo de parámetros tomados en el motor.

Anexo
REGISTRO DE LAS MEDICIONES DE LOS PARÁMETROS TERMOTÉCNICOS DEL MOTOR ANTES DE LA
INTERVENCIÓN DE MANTENIMIENTO AL 85% DE LA CARGA NOMINAL (F-35-07-040 Rev. 003)

COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS TERMOTÉCNICOS DEL MOTOR

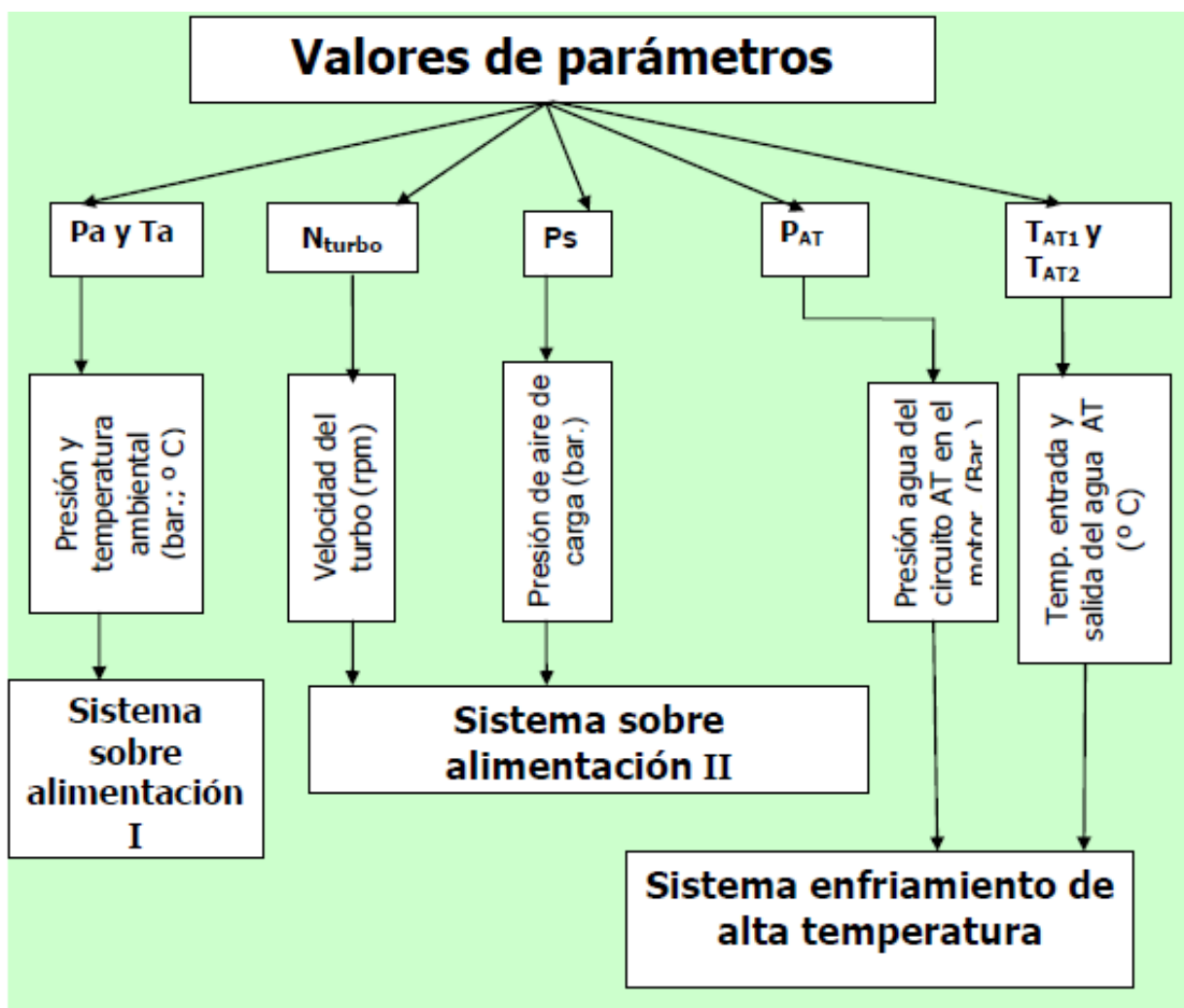
CENTRAL ELÉCTRICA	S/C 110 kV	Horas del motor	FECHA	10-9-16
TIPO DE MOTOR	HYUNDAI	BATERIA	Nº MOTOR	12
Velocidad del motor			rpm	139930
Velocidad del turbocompresor			rpm	901
Carga del Generador			kW	1490
Posición del indicador del gobernador			%	6
Temperatura del FO a la entrada del motor (operación continua con FO)			°C	130
Presión del FO a la entrada del motor (operación continua con FO)			bar	4
Viscosidad del FO a la entrada del motor			cSt	12
Temperatura de entrada y salida del aceite de refresco de las toberas			°C	-
Presión de aceite lubricante a la entrada del filtro			bar	4.4
Presión de aceite lubricante a la entrada del motor			bar	4.6
Caída de la presión de aceite lubricante en el filtro			bar	
Presión de aceite lubricante a la entrada del T/C			bar	3.0
Temperatura del aceite lubricante a la entrada del motor			°C	
Presión del agua de enfriamiento de A.T. a la entrada del motor			bar	2.9
Temperatura del agua de enfriamiento de A.T. a la entrada y salida del motor			°C	76 80
Presión del agua de enfriamiento de B.T. a la entrada del enfriador de aire			bar	7.1
Temperatura del agua de enfriamiento de B.T. a la entrada y salida del enfriador de aire			°C	40 48
Presión del agua de enfriamiento a la entrada y salida de la unidad refrescadora			bar	
Temperatura del agua a la entrada y salida de la unidad refrescadora			°C	40 48
Temperatura de aire de carga después del refrescador de aire			°C	46
Presión del aire de carga después del refrescador de aire			bar	2.1
Temperatura de gases de escape a la entrada y salida del T.C.			°C	-
Temperatura del cojinete del generador			°C	53
Presión en el cárter			mm H ₂ O	-

Anexo 9. Modelo de parámetros tomados en el motor.

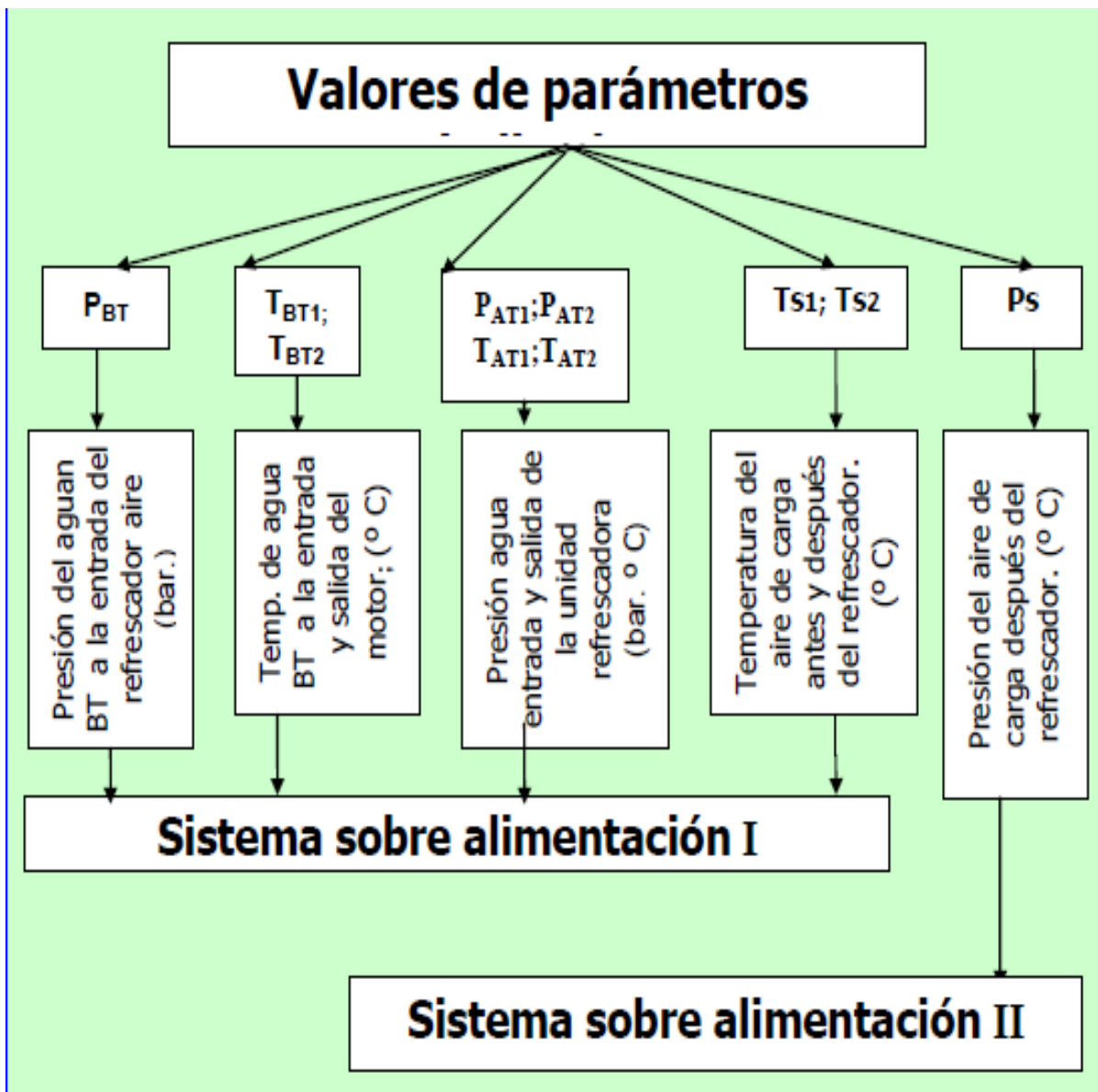
Puntos de medición			%	85%		
Temp. gases escape	Índice cremallera	Presión encendido	Nº Cilind.	P	EE	EB
Unidad del Cilindro			1	410	27	166
			2	420	28	166
			3	390	28	164
			4	380	27	158
			5	370	29	170
			6	350	30	164
			7	380	29	164
			8	370	23	160
			9	370	27	170
			Media	382.2	27.5	164.6

MEDICIÓN DE PARAMETROS DEL ESTADO DE LA CAMARA DE COMBUSTION.									
Nº Cilindro	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Presión de compresión P _c (bar)	42	42	42	44	44	42	44	42	42

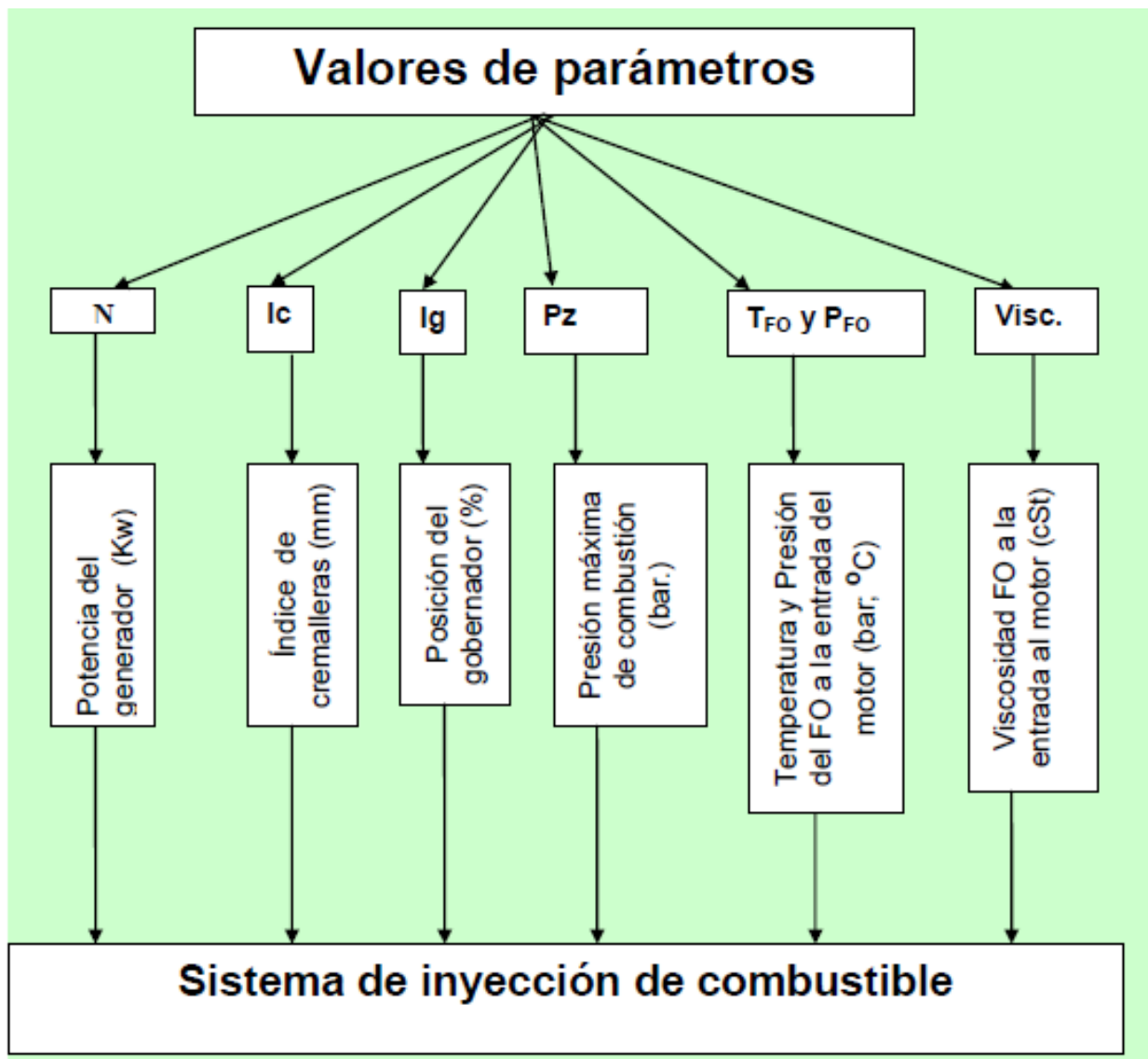
Anexo 10. Simbología y ubicación de parámetros.



Anexo 10. Simbología y ubicación de parámetros.



Anexo 10. Simbología y ubicación de parámetros.



Anexo 11. Operaciones a realizar durante la ejecución de los mantenimientos preventivos planificados

INSTRUCCION RELACIONADA	DESCRIPCION	INTERVALOS DE REVISION												COMENTARIOS.	
	■: Revisiones planificadas.	200	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	22000		24000
	◇: Confirmar después de revisión o nuevo.														
Reapriete de Sujeciones Principales.															
FG-IM 0002	Tuercas de las culatas.	◇			■			■			■			■	Comprobar siempre después de mttos, reparaciones o nuevo
	Tuercas de los Contrapesos.	◇			■			■			■			■	
	Tuercas de los soportes de los cojinetes principales.	◇			■			■			■			■	
	Tuercas de las bielas.	◇			■			■			■			■	
FG-IM 0001	Tuercas del árbol de levas.	◇			■			■			■			■	
	Tuercas de los engranajes de la distribución.	◇			■			■			■			■	
	Tomillos del bloque del motor y el marco de la base.	◇			■			■			■			■	
	Tomillos del turbocompresor.	◇			■			■			■			■	
-	Prueba de martillado de todos los espárragos y tuercas de apriete hidráulico que se encuentran dentro del cárter del motor.	◇	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Inspección de cojinetes.															
FG-IM 0004	Cojinetes principales. (Evaluación de desgastes límites.)										■			■	Tres en 18 000 horas (Cojinetes #1; 6 y 11) Todos en 24000 horas
	Cojinetes de desplazamiento axial. (Chequeo de Holgura axial.)										■			■	
FG-IM 0012 FG-IM 0013	Cojinetes del pie y cabeza de biela. Inspección y chequeo de holguras.							■						■	
FG-IM 0011	Cojinetes de árbol de levas. (Chequeo de Holguras)				■			■			■			■	En 6000 y 18000 horas, inspección visual
Inspección y reapriete de calzos antivibratorios.															
FG-IM 0003	Depósitos de aceite o daños en elemento de goma.	◇			■			■			■			■	
	Medición de altura HL entre bastidor y calzo metálico.	◇			■			■			■			■	
	Reapriete de tornillos entre el marco de la base y los calzos antivibratorios.	◇			■			■			■			■	
	Tuercas entre los calzos antivibratorios y el cimiento.	◇			■			■			■			■	
Inspección de unidad de cilindro y las bielas.															
FG-IM 0008	Válvulas de admisión y escape, Asientos y Guías. Espacio de agua de enfriamiento en la culata.							■						■	
FG-IM 0009	Chequeo y ajuste de holgura de válvulas.	◇	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
FG-IM 0104	Inspección y mantenimiento a Válvula Indicadora.							■						■	
FG-IM 0006 FG-IM 0108	Inspección y reacondicionamiento de camisas. (Bruído)							■						■	
FG-IM 0012	Pistón, Bulón y aros.(Chequeo de holguras y desgastes límites)							■						■	
FG-IM 0012	Medición de alojamiento para el bulón. Chequeo de Holguras entre el bulón y el cojinete de pie de biela							■						■	

[illegible][illegible]

[illegible]

Anexo 12. Principales sensores de medición del TEMPEST 340.

Sensor	Rango de medición.	Resolución.	Exactitud.
Oxígeno	0-25 %	0.1 %	± 0.2 %
Monóxido de carbono	0-10000 ppm	1 ppm	± 5%
Alto monóxido de carbono	0- 10%	0.01%	±0.01%
Óxido nítrico	0-1000 ppm	1 ppm	±5 ppm

Anexo 13. Análisis de la combustión en el año 2013.

Parámetros	U/M	Motor-1	Motor-2	Motor-3	Motor-4	Motor-5	Motor-6
Oxígeno O ₂	%	12,73	12,2	12,7	Avería por Turbo	Mantenimiento 26000 horas	12,68
Monóxido CO	ppm	79	153	109			88
Dióxido de carbono CO ₂	%	6,26	6,65	6,28			6,29
Óxido de nitrógeno NO	ppm	836	821	858			824

Parámetros	U/M	Motor-7	Motor-8	Motor-9	Motor-10	Motor-11	Motor-12
Oxígeno O ₂	%	12,9	Mantenimiento 30000 horas	Mantenimiento 30000 horas	12.34	12,31	12,36
Monóxido CO	ppm	51			94	129	120
Dióxido de carbono CO ₂	%	6,13			6,5	6,57	6,53
Óxido de nitrógeno NO	ppm	837			888	805	914

Anexo 14. Análisis de la combustión en el año 2018.

Parámetros	U/M	Motor1	Motor2	Motor3	Motor4	Motor5	Motor6
Oxígeno O ₂	%	12.73	12.93	12.56	12.62	13.38	12.97
Monóxido CO	ppm	441	437	408	421	416	445
Dióxido de carbono CO ₂	%	6.25	6.1	6.37	6.33	5.76	6.07
Óxido de nitrógeno NO	ppm	724	785	786	658	803	786

Anexo 14. Análisis de la combustión en el año 2018.

Parámetros	U/M	Motor7	Motor8	Motor9	Motor10	Motor11	Motor12
Oxígeno O ₂	%	12.86	13.66	13.2	12.54	13.86	13.2
Monóxido CO	ppm	429	411	423	439	431	434
Dióxido de carbono CO ₂	%	6.15	5.55	5.89	6.39	5.4	5.9
Óxido de nitrógeno NO	ppm	714	643	681	676	483	734

