



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS**  
**VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**TÍTULO: TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO Y FALLAS EN  
LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA FUEL OIL  
DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE  
ELECTRICIDAD.**

**AUTOR: PEDRO JULIO BATISTA MARTÍNEZ**

**TUTOR: MSc. REINALDO MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

**SANTA CLARA**

**2013**

**"AÑO 55 DE LA REVOLUCIÓN"**



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS**  
**VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**TÍTULO: TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO Y FALLAS EN  
LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA FUEL OIL  
DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE  
ELECTRICIDAD.**

**AUTOR: PEDRO JULIO BATISTA MARTÍNEZ**

**TUTOR: MSc. REINALDO MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

**SANTA CLARA**

**2013**

**"AÑO 55 DE LA REVOLUCIÓN"**

## **PENSAMIENTO:**

*"Tengamos fe que la razón es poderosa; y con esa fe, avancemos hasta el fin, haciendo la parte que nos toca, siguiendo siempre la verdad..."*

*Khalil Gibrán.*

## **DEDICATORIA:**

*A toda mi familia y amigos en especial a mi abuela, mi papá y mi novia que siempre estuvieron a mi lado.*

## **AGRADECIMIENTOS:**

*A mi tutor, Reinaldo Martínez, por brindarme sus conocimientos y toda la ayuda posible.*

*A mi abuela, que aunque no me dio la vida es mi madre y es la que me da fuerzas para seguir adelante.*

*A mi papá, que sin sus consejos, su ayuda incondicional y su cariño hoy no estaría donde estoy.*

*A mi mamá, Marcos y hermanos, que aun en la distancia siempre los llevo en mi corazón y espero poder volver a estar juntos.*

*A mi novia, que a pesar de los momentos difíciles siempre ha estado a mi lado dándome no solo amor sino confianza en mí mismo.*

*A toda mi familia en especial a Erick, Amauri y Jesuito, a mis hermanas, primos, tíos, abuelos, mis padrinos, mis suegros, etc., que los quiero mucho y gracias por ayudarme.*

*A mis compañeros y amigos, que gracias a nuestra unidad hemos podido superar cada obstáculo que nos ha puesto esta carrera, gracias Roger, Robeisi, Jorge Asiel, Roberto Carlos, Humberto, Enrique, Asnel, Mario, Ramcet, Brayan, Luis Enique González, Tony, etc.*

*Agradezco al personal de las empresas de EMGEF, en especial a Orosman, Moya y Alexander, que me brindaron su ayuda incondicional para la realización de esta tesis.*

**A todos Gracias**

## **RESUMEN:**

En este trabajo se realiza un estudio acerca de las técnicas de diagnóstico y fallas que se emplean en Grupos Electrónicos de la Generación Distribuida en Villa Clara. En su primer capítulo se realiza una investigación acerca de las Centrales Eléctricas de fuel oil instaladas en Cuba, se describe el motor Hyundai HIMSEI, y se actualiza el estado del arte entorno a los sistemas de mantenimientos, el proceso de combustión, el fenómeno de vibraciones, entre otras cosas. El capítulo dos está dedicado a las técnicas de diagnóstico que se emplean en los grupos electrónicos, enfatizando en las mediciones que realiza la EMGEF y la Generación Distribuida, se describen dos equipos de diagnóstico el TEMPEST 100 y VIVROTIP, con los datos obtenidos de mediciones realizadas con los mismos se efectúa un análisis estadístico obteniéndose valores permisibles, los cuales se comprueban y son aceptados. El capítulo tres aborda las fallas ocurridas en los motores de la Generación Distribuida en el período del año 2012 hasta el mes de abril del 2013, determinando que los equipos o partes que más fallas presentan son la culata, el múltiple de escape, el gobernador, la camisa, etc., se realiza un análisis de confiabilidad de estos equipos en las centrales Santa Clara 110 y Santa Clara Industrial, y por último se utiliza el sistema de control y seguimiento de fallas el estudio de un número de fallas asignadas.

## **ABSTRACT**

In this work he is carried out a study about the diagnosis techniques and flaws that are used in Groups of the Distributed Generation in Villa Clara. In their first chapter he is carried out an investigation about the Electric Power stations of fuel oil installed in Cuba, the motor Hyundai HIMSEI is described, and the state is upgraded from the art environment to the systems of maintenances, the combustion process, the phenomenon of vibrations, among other things. The chapter two are dedicated to the diagnosis techniques that are used in the groups, emphasizing in the mensurations that he carries out EMGEF and the Distributed Generation, two diagnosis teams TEMPEST 100 and VIVROTIP they are described, with the obtained data of mensurations carried out with the same ones a statistical analysis it is made obtaining you permissible values, which are proven and they are accepted. The chapter three approach the flaws happened in the motors of the Distributed Generation in the period of the year 2012 until the month of April of the 2013, determining that the teams or parts that more flaws present are the breech, the multiple of escape, the governor, the shirt, etc., he/she is carried out an analysis of dependability of these teams in the power stations Santa Clara 110 and Santa Industrial Clara, and lastly it is used the control system and pursuit of flaws the study of a number of assigned flaws.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Estado del Arte.....</b>	<b>4</b>
1.1 Descripción de la Central Eléctrica de Fuel Oil. ....	4
1.2 Descripción de los MCI de la Central Fuel Oil. ....	9
1.2.1 Partes principales del motor. ....	11
1.2.2 Ciclos de trabajo del motor HIMSEN Hyundai.....	13
1.2.3 Principales Sistemas de Motor. ....	14
1.3 Generalidades del Mantenimiento.....	17
1.3.1 Mantenimiento Predictivo o por Diagnóstico .....	18
1.3.1.1 Diagnóstico Técnico. ....	20
1.4 Análisis de la combustión.....	27
1.4.1 Contaminantes en motores Diesel. ....	29
1.5. Análisis de Vibraciones. ....	32
1.5.1 Vibraciones en motores de Combustión Interna.....	36
1.6 Sistema de control y seguimiento de fallas. ....	37
1.7 Conclusiones parciales. ....	39
<b>Capítulo 2. Técnicas de diagnóstico. ....</b>	<b>40</b>
2.1 Toma de Parámetros.....	40
2.1.1 Parámetros tomados por la Generación Distribuida:.....	40
2.1.2 Parámetros tomados por EMGEF: .....	43
2.2 Equipos de diagnóstico. ....	45
2.2.1 Analizador del rendimiento de la combustión TEMPEST 100 .....	45
2.2.1.1 Datos obtenidos con el TEMPEST 100. ....	48
2.2.1.2 Análisis de los datos obtenidos. ....	49
2.2.2 Analizador de vibraciones en maquinaria y colector de datos VIBROTIP. ....	56
2.2.2.1 Datos obtenidos con el Vibrotip.....	60
2.2.2.2 Análisis de los datos obtenidos. ....	61
2.3 Conclusiones Parciales. ....	62
<b>Capítulo 3. Fallas en lo motores de la generación distribuida.....</b>	<b>63</b>
3.1 Análisis del historial de fallas. ....	63
3.1.1 Análisis del historial de fallas por centrales eléctricas.....	65
3.2 Análisis de confiabilidad en los motores de la generación distribuida. ....	68

3.2.1 Centrales eléctricas estudiadas.....	70
3.2.2 Análisis de los resultados.....	77
3.3 Análisis de las principales fallas.....	78
3.3.1 Fallas en las camisas:.....	78
3.3.2 Fallas en el bloque de alta.....	80
3.3.3 Fallas en la tubería de alimentación.....	80
3.3.3 Fallas en la bomba de combustible.....	81
3.3.4 Fallas en el Turbocargador:.....	82
3.4 Conclusiones Parciales.....	84
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>85</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>89</b>

# INTRODUCCIÓN

Hoy en día la energía eléctrica se genera mayormente a partir de combustibles fósiles. Hasta hace pocos años en Cuba las centrales termoeléctricas llevaban todo el peso de esta generación, solo una pequeña parte le correspondía a la generación eólica e hidroeléctrica. A raíz de esta situación surgen problemas con la generación de electricidad, existían enormes pérdidas en el transporte de la energía desde las centrales termoeléctricas hasta el consumidor, debido a que entre ambos había cientos de kilómetros de distancia. Además las propias centrales comenzaron a deteriorarse obligando al país a realizarles fundamentalmente reparaciones capitales. Comenzó entonces con todos estos problemas un crecimiento de la demanda de energía eléctrica que el país por su situación económica no podía satisfacer. En principio se tomó como alternativa comenzar a cortar la energía principalmente en los horarios pico de consumo de electricidad. Apareció entonces en el campo de la generación de electricidad el concepto de generación distribuida. Esta consiste en la generación de eléctrica por medio de pequeñas fuentes. Se caracteriza por encontrarse instalada en puntos cercanos al consumidor. Se caracteriza generalmente por reducir los flujos de energía por la red disminuyendo así las pérdidas en esta. Los sistemas empleados como fuentes de energía distribuida son plantas de generación a pequeña escala, usadas para proporcionar una alternativa o ayuda a las tradicionales centrales eléctricas. Los sistemas generación distribuida de energía pueden tener instaladas tecnologías de cogeneración, pilas de combustibles, microturbinas, energía solar fotovoltaica, pequeños sistemas de energía eólica o motores de combustión interna. Con esta situación el estado cubano emprendió una investigación sobre la ubicación de emplazamientos diesel de generación distribuida en lugares cercanos al consumidor. Con la implantación de las centrales de generación distribuida se disminuyeron la mayoría de los problemas antes explicados en el país. Posteriormente se comenzó a instalar emplazamientos consumidores de fuel oil como combustible, reduciendo así su costo de explotación y mantenimiento. Estas Centrales de Fuel se fueron explotando intensamente por el país debido a su situación. A los motores HIMSEN Hyundai de estas centrales se les aplicaron a lo largo de su explotación un sistema de mantenimiento preventivo planificado

orientado por la propia Hyundai. Este sistema comenzó a presentar problemas y necesitaba al menos de una mejora. Surge así la necesidad de confeccionar un sistema de mejoras de este mantenimiento mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico. El diagnóstico técnico es la rama de la ciencia que estudia y establece los síntomas de un estado de fallo de un equipo, son métodos que ayudan llegar a conclusiones respecto al estado técnico de los sistemas que forman las máquinas sin tener que desarmarlos, y además poder pronosticar los recursos necesarios para restablecer su funcionalidad. Surge con el desarrollo de los equipos, ya que al hombre se le hizo un problema conocer el estado técnico de los equipos sin desarmarlos. En los años cercanos a 1975 con el desarrollo acelerado de la electrónica aparecen nuevas técnicas de diagnóstico fortaleciéndose cada vez más con el transcurso de los años. En otras palabras el diagnóstico consiste en saber medir de forma continua o discreta los parámetros que caracterizan el estado técnico de un equipo, permitiendo establecer su estado real y determinar su posible tiempo de explotación hasta el momento en que alcance su fase límite de avería. Dentro de los fundamentos del diagnóstico se puede afirmar que lo que falla no son los equipos o las máquinas, sino sus componentes, y que siempre se producen síntomas que anteceden las fallas. Algunos de los parámetros mecánicos de diagnóstico pueden ser las vibraciones, el caudal, la velocidad, aceleración, tensión, deformación, presión, entre otros. [1; 2; 24]

### **Idea Inicial:**

Necesidad del estudio detallado de las principales técnicas de diagnóstico que se le aplican a los motores de la generación distribuida con el objetivo de aplicarlas correctamente y obtener los mejores resultados, se añade a esto el análisis de sus principales fallas.

### **Planteamiento del Problema:**

En la Empresa de Mantenimientos a Grupos Electrógenos Fuel Oil no se tienen valores para comparar los resultados obtenidos en la medición de componentes de gases de escape y en las vibraciones en el turbo cargador, además no se ha realizado análisis en base a las fallas que presenta el motor con vista a mejorar el diagnóstico de las mismas.

**Objetivo general:**

Analizar las técnicas de diagnóstico con vistas a obtener los mejores resultados y estudiar las principales fallas en los motores de la Generación Distribuida Hyundai de fuel oil.

**Objetivos específicos:**

1. Describir la Central Eléctrica de motores Fuel Oil.
2. Analizar los diferentes sistemas de mantenimiento existentes haciendo énfasis en el diagnóstico técnico.
3. Describir los equipos de diagnóstico TEMPEST 100 y VIBROTIP
4. Realizar un análisis estadístico en base a las mediciones obtenidas con los equipos estudiados con vistas a obtener un intervalos de confianza.
5. Realizar un estudio de los equipos o partes que más fallas presentan en los motores de la Generación Distribuida.
6. Llevar a cabo un análisis de confiabilidad para los equipos o partes con más fallas para las centrales del municipio Santa Clara.
7. Utilizar el sistema de control y seguimiento de fallas en el estudio de un número de fallas asignadas.

**Justificación:**

La realización de este proyecto es factible para la Empresa de Mantenimiento a Grupos Electrónicos ya que con el análisis estadístico y de las fallas pueden modificar el mantenimiento preventivo planificado que emplea actualmente con vistas a la implementación del mantenimiento predictivo, mejorando la eficiencia en los motores, las pérdidas económicas y disminuyendo las fallas en los mismos.

**Hipótesis:**

Mediante la utilización de equipos de diagnóstico y el análisis del historial de fallas de los motores, se puede mejorar el sistema de mantenimiento preventivo planificado aplicado en los motores de la Generación Distribuida proporcionando que sea más eficaz y económico.

## Capítulo 1. Estado del Arte.

### 1.1 Descripción de la Central Eléctrica de Fuel Oil.

Una Central Eléctrica de Fuel Oil como muestra la figura 1.1 es un emplazamiento donde la gran mayoría de sus componentes están instalados en contenedores diseñados para tal propósito. [1]



*Fig. 1.1 Emplazamiento de generación distribuida fuel oil. [1]*

Los elementos principales que posee un emplazamiento de este tipo se dividen en dispositivos de una batería y componentes comunes. Estos últimos son únicos para toda la central eléctrica. Dentro de ellos está la sala de control y monitoreo remotos, la planta de tratamiento de agua (WTU) y el generador de arranque en negro (BSG). Un emplazamiento de generación distribuida tiene una o varias baterías. De su cantidad depende la capacidad de generación total de la central. 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. Su esquema de funcionamiento se indica en la figura 1.2.

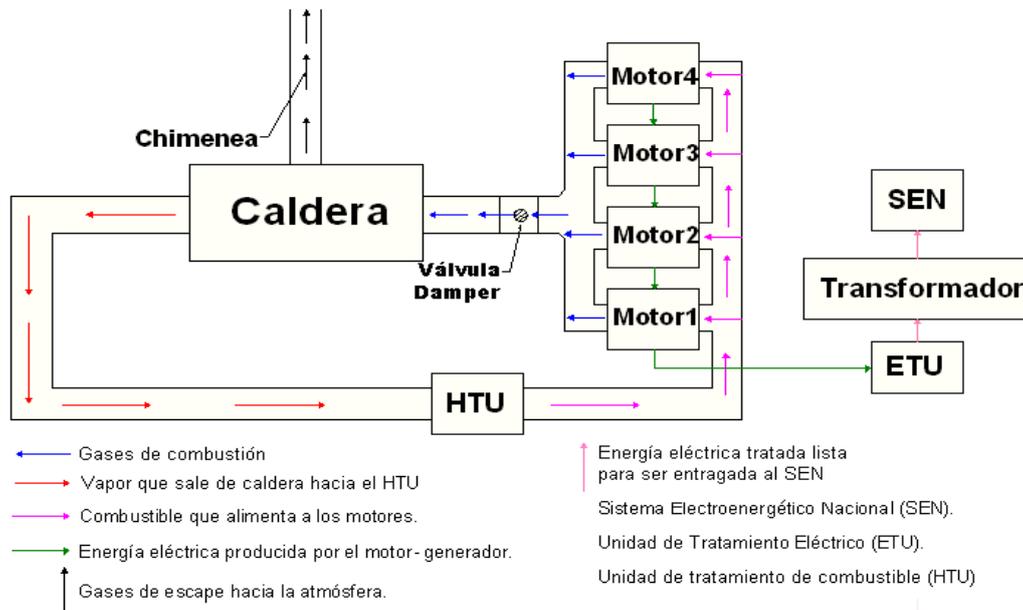


Fig. 1.2 Esquema de funcionamiento de una batería de una Central de Fuel.[2]

Una sala de control y monitoreo es el lugar donde se opera todo el emplazamiento. Posee en su interior una consola de mando con una computadora que a través de su pantalla brinda acceso a los parámetros, mediciones, alarmas, señalizaciones, disparos y al mismo tiempo permite operar cualquier equipo. Cada consola de control está diseñada para 16 grupos motor-generador, o sea, 4 baterías. Cada consola posee en su panel horizontal los botones de parada por emergencia de cada uno de los motores, las llaves para los modos de control y funcionamiento de frecuencia, voltaje y factor de potencia. En el panel vertical además del monitor de la computadora posee las lámparas de señalización de alarmas.

Necesariamente para el buen funcionamiento de los procesos industriales donde interviene el agua se necesita un tratamiento previo para evitar daños en los diferentes sistemas. El propósito de la planta de tratamiento de agua es garantizar las características físicas y químicas del agua que demanda el fabricante. El agua en la central de fuel se utiliza para tres objetivos fundamentales, uno es el enfriamiento del motor, aceite y aire de carga, otro es alimentar a la caldera para producir vapor y el último es garantizar el funcionamiento de las purificadoras de aceite y combustible. En la planta de tratamiento de agua existen al ingreso del agua filtros mecánicos de arena y carbón para eliminar sólidos, barro, arena,

bacterias, olores, colores y sabores que trae de su fuente externa, ya sean ríos, presas, o pozos. Más adelante el agua pasa a través de la unidad de ósmosis inversa donde se le extraen los iones de calcio y magnesio que acreditan el agua como dura. Ambos procesos eliminan por completo las impurezas físicas y químicas del agua dejándola ligeramente por debajo del valor neutro de pH, o sea, algo ácido. A raíz de esto al agua se le añade un compensador básico (hidróxido de sodio) para llevar el pH al valor neutral (pH=7). Este último proceso exige que la adición del compensador básico sea manual con la ayuda de un peachesímetro y un conductímetro. La planta posee dos bombas de suministro modelo P-801 AB-00 con una capacidad de trabajo de  $3 \text{ m}^3 / \text{h}$  a una presión de 2,5 bar. Dichas bombas una se encuentra una trabajando y otra de reserva. Las bombas que laboran en la extracción del agua en el proceso de ósmosis inversa lo hacen a igual flujo que las suministradoras, pero a mayor presión (13 bar).

En particular el generador de arranque en negro es un grupo electrógeno diesel de emergencia pequeño, con solo 45 kW de potencia destinado alimentar a los consumidores imprescindibles para el arranque de solo un grupo motor-generador en situaciones de pérdida total de energía eléctrica. El arranque del emplazamiento en estas condiciones se denomina “arranque en negro”. [1]

Este generador a pesar de estar diseñado para el arranque de un solo motor posee enlace electrónico con otros motores de diferentes plantas con el objetivo de arrancar otro, en causa de que el motor enlazado tenga problemas. Los componentes principales que este generador alimenta son los compresores de aire y bombas de trasiego de diesel y pre-lubricación de los motores. En general el conjunto de generador de arranque en negro está formado por un motor diesel de 50 kW de potencia, un generador eléctrico trifásico de 480 V y 60 Hz de voltaje y frecuencia respectivamente, un tanque de diesel, una batería y un panel de control. El grupo motor-generador está compuesto por un motor diesel HIMSEN 9H21/32, el generador eléctrico HYUNDAI 1,7 MW y los paneles de control. El motor diesel 9H21/32 está diseñado para consumir fuel oil como combustible, tiene una potencia mecánica de 1800 kW, 9 cilindros en línea y 900 rpm de velocidad nominal. El generador eléctrico HYUNDAI es trifásico sincrónico, con una potencia nominal de

1701 kW, un voltaje nominal de 4,16 kV, corriente nominal de 295,1 A y una frecuencia de 60 Hz. Los paneles de control se dividen en 3 secciones. La primera es el control de los dispositivos auxiliares (ventiladores de enfriamientos, bombas y válvulas), la segunda se encarga de la señalización y control del motor y el generador (control de velocidad y voltaje), y la tercera brinda las mediciones de los principales parámetros eléctricos (potencia, voltaje, temperatura y corriente). La planta de tratamiento de combustible y aceite está diseñada para garantizar los parámetros de presión y viscosidad del combustible para que sean quemados eficientemente en el motor diesel (6 bar y 12 cSt), eliminar el contenido de sólidos y agua en el combustible y el aceite mediante un proceso de centrifugado (depuración). Posibilitar el funcionamiento del motor diesel con combustible ligero o pesado según sea la demanda. Esta planta está conformada por 3 depuradoras (2 de combustible y una de aceite), bombas reforzadas, válvulas de 3 vías de suministro de combustible pesado y ligero, sistemas de control de viscosidad, un tanque de lodo, entre otros. La depuradora es un equipo altamente complejo, posee dos funciones fundamentales, una es extraer los sólidos presentes en el combustible o el aceite y la otra es extraer el agua de ambos si no está en estado de emulsión (mezclados casi homogéneamente por la agitación mecánica). Este equipo basa su principio en incrementar la fuerza separadora de dos líquidos insolubles incorporando fuerza centrífuga a estos. Las depuradoras de aceite trabajan continuamente realizándole el centrifugado de cada motor durante una hora uno por uno, o sea, en una planta de 4 motores la depuradora necesita 4 horas para limpiar el aceite de cada motor por separado. [1]

De las depuradoras de combustible solo una de ellas trabaja continuamente y la otra espera de reserva. La depuración del fuel oil se realiza a  $98^{\circ}C$  y el aceite a  $90^{\circ}C$ . La unidad de control eléctrico tiene la función de permitir la sincronización de cada uno de los cuatro generadores de la batería ente sí y con el sistema eléctrico nacional. Además asegurar la alimentación eléctrica a todos los consumidores propios de la planta. La unidad está compuesta por 13 paneles y su conexión comienza por la barra de 4,16 kV, la cual está conectada a los generadores eléctricos de cada motor, sus baterías, un cargador de baterías, un panel del interruptor de enlace con el sistema, 4 paneles de los interruptores de conexión con

los 4 generadores de la batería de generación, un transformador seco de uso de la central y 2 paneles del interruptor del lado de alta y baja del transformador de uso de la central. Los paneles de 1 al 6 son del tipo vacío y laboran a un voltaje de 4,16 kV. Por su parte el panel 8 es del tipo de aire y opera a un voltaje de 480 kV.

Cada batería tiene dos compresores de aire del tipo recíprocante (uno de alta y otro de baja presión), movidos por motores eléctricos de 7,3 kW de potencia en el caso del de alta presión y 5,3 kW en el de baja presión. Cada compresor garantiza el suministro de aire comprimido a los consumidores de su batería, aunque existe una válvula que permanece normalmente cerrada que brinda una conexión entre baterías diferentes. En particular la función de los compresores es garantizar el suministro de aire comprimido al motor de arranque del motor diesel, a las válvulas solenoides de parada del motor, a las válvulas de tres vías de entrada y salida de fuel oil, a la planta de tratamiento de agua, a la planta de tratamiento de aceite y a las válvulas de bypass de la caldera. [1]

La caldera de una central de fuel de generación distribuida es recuperativa, ya que utiliza la energía en forma de calor de los gases de escape antes de expulsarse a la atmósfera para producir vapor y calentar agua. Básicamente es un intercambiador de calor de tubos de agua, o sea, los gases de escape viajan a un colector común para más tarde ponerlos en contacto con la superficie exterior de los tubos por donde circula el agua tratada de abajo hacia arriba, el agua por su parte circula en el mismo sentido que los gases de escape de los motores. Los parámetros de presión y temperatura del vapor se regulan por una válvula llamada bypass que se ubica a la entrada de la caldera regulando el flujo de los gases de escape que pasan por la caldera. [1]

La caldera recuperativa en particular tiene una presión nominal de 7 bar (aunque está diseñada para una presión de 11 bar), una producción de vapor de 1000 kg/h, un flujo de gases de escape de 53200 kg/h, los gases entran a 295<sup>0</sup> C y salen a 250<sup>0</sup> C por la chimenea, la altura de la chimenea es de 21 m, un flujo de agua de alimentación de 7 m<sup>3</sup> / h , y posee circulación forzada. Su un domo es de 1100 y 2476 mm de diámetro y longitud respectivamente, un peso de 3,05 ton, una

capacidad de  $2 \text{ m}^3$ , una temperatura de operación de  $169,6 \text{ }^\circ\text{C}$  y una presión de trabajo de 7 bar. Volviendo a los gases de escape de los motores fuel se puede afirmar que estos a su paso arrastran determinadas impurezas que se van depositando en la superficie exterior de los tubos de agua, creando una capa que obstruye la transferencia de calor de los gases al agua. Por tanto esta caldera además de tomar vapor para calentar el fuel oil dedica un por ciento de ese vapor en un mecanismo de auto soplado por atomización de la superficie exterior de los tubos, eliminando así las impurezas depositadas. Este sistema funciona cada 40 segundos de forma giratoria, enviando así suficiente vapor para la limpieza adecuada de la superficie externa del tubo, mejorando también la transferencia de calor que es el principal propósito de este dispositivo. En general el vapor producido por la caldera recuperativa se emplea para el calentamiento del combustible y el aceite que garantizan el trasiego, en la combustión del fuel oil, en la purificación del aceite y el combustible, y en el sistema de auto limpieza de los tubos de la caldera.

Por último el transformador de enlace con el sistema eléctrico nacional es el que garantiza que la energía producida de la planta llegue al sistema eléctrico nacional que es su destino final, exceptuando cuando se está en presencia de un desastre natural y se esté generando en modo de isla. Dentro de sus características fundamentales están que su voltaje nominal es de 4,16 kV, su potencia es de 8,5 MVA, su enfriamiento es del tipo ONAN y su conexión es  $\Delta/Y$ . [1]

## **1.2 Descripción de los MCI de la Central Fuel Oil.**

Las centrales eléctricas de fuel oil están diseñadas para suministrar energía eléctrica al sistema eléctrico nacional, alimentándolo parcialmente o entregando toda la energía a la red. Realizan dicha función utilizando, entre otros componentes, los grupos motor-generador. Son del tipo HIMSEN HYUNDAI y modelo 9H21/32S de 27,32 ton de peso. El nombre HIMSEN significa “Motor de Velocidad Media de Alta Tecnología” y corresponde a la fábrica que diseñó este motor perteneciente a la compañía HYUNDAI. La designación del modelo 9H21/32S nos brinda sucesivamente mediante sus letras y números información como por ejemplo que posee 9 cilindros, pertenece a la compañía HYUNDAI, el diámetro de los cilindros es 21 cm, la carrera del pistón es 32 cm y que es un motor estacionario. Cuentan con

un diseño para contenedores, son capaces de trabajar a una temperatura que oscila entre  $-54^{\circ}C$  y  $45^{\circ}C$ . En nuestro país estos motores laboran a una temperatura promedio de  $32^{\circ}C$  y a una humedad promedio del 80 %. En cuanto a las características principales de este motor se puede afirmar que su potencia de salida es de 1800 kW y su velocidad nominal de 900 rpm.

Puede trabajar sin ningún tipo de problema con combustible diesel y también con uno pesado de hasta 700 cSt de viscosidad a  $50^{\circ}C$  de temperatura. Son altamente económicos y ecológicos debido a que tienen una alta relación de carrera contra diámetro del cilindro, una alta relación de compresión y una alta presión de inyección de combustible. Este motor posee una estructura simple y robusta en cuanto a número de componentes del motor y al acceso fácil y directo de los dispositivos para el mantenimiento. Su sistema de alimentación es completamente modularizado con accesibilidad directa. Se le inserta el concepto del mantenimiento “Cada Parte” y “Unidad del Cilindro” por lo que hace que sean prácticos y confiables. La posición de los cilindros es en línea con un diámetro y una carrera de 210 x 320 mm, el volumen de barrido por el cilindro es de  $11,1 \text{ dm}^3$  y la relación de compresión es de (17:1). La dirección de rotación del motor es a favor de las manecillas del reloj visto desde el lado del volante. Su sistema de distribución está compuesto por un árbol de levas, un engrane libre, dos bombas de agua de alta y baja temperatura acopladas al cigüeñal y por último una bomba de lubricación. La cantidad de cilindros es 9 con el orden de encendido 1 – 3 – 5 – 7 – 9 – 8 – 6 – 4 – 2. En particular el cilindro número 9 tiene 900 rpm de velocidad específica y 9,6 m/s de velocidad media del pistón, 200 kW de potencia y 24,1 bar de presión efectiva. La ventilación interior de este motor consta de 3 ventiladores de tiro forzado, cuya función es introducir un gran volumen de aire dentro del contenedor donde se encuentra el motor y el generador para absorber la temperatura desprendida por el funcionamiento del motor. Cada uno de estos ventiladores induce hacia el interior del contenedor una cantidad de aire de  $14400 \text{ m}^3 / \text{hora}$ , sumando entre los tres un caudal de  $43200 \text{ m}^3 / \text{hora}$  de aire. Como se había explicado este aire caliente por el funcionamiento del motor es obligado a salir a la atmósfera por 2 ventiladores de tiro inducido de una capacidad de  $10200 \text{ m}^3 / \text{hora}$  de flujo de aire cada uno, sumando entre ambos un caudal de  $20400 \text{ m}^3 / \text{hora}$  de aire. Este flujo de aire caliente se une

en un conducto a todo el ancho del contenedor con 660 mm de ancho encima de los paneles de control. Posteriormente este aire caliente es evacuado al exterior por una campana que expulsa el aire por encima de los ventiladores del intercambiador de calor de líquido refrigerante. La diferencia entre el volumen de aire que entra y el que sale es de  $22800 \text{ m}^3 / \text{hora}$ , que a su vez es el que consume el turbo compresor para el aire de admisión del motor. El diámetro de cada uno de los 5 ventiladores (2 de tiro inducido y 3 de tiro forzado) es de 550 mm. [1]

### 1.2.1 Partes principales del motor.

Como muestra la figura 1.3 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. [1; 3]

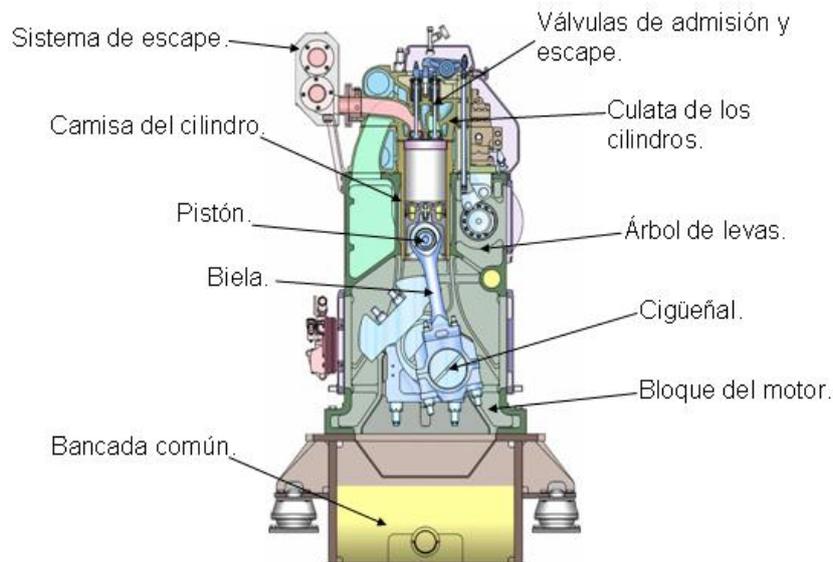


Fig. 1.3 Principales partes del motor HIMSEN Hyundai. [1]

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 móvil 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. El árbol se fabricó de un acero aleado forjado en troquel con flujo granular continuo. [1; 3]

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. [1; 3]

El anti vibrador 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. [1; 3]

### **1.2.2 Ciclos de trabajo del motor HIMSEN Hyundai.**

El primer tiempo de 4 que posee este motor, o sea, la admisión se describe mediante el aumento del volumen de la cámara de combustión al bajar el pistón tomando a través de la válvula de admisión un caudal de aire de  $12,428 \text{ kg/m}^3$  entregados por el turbocompresor mejorando así con este dispositivo el llenado de la cámara de combustión, dicho aire entra con una densidad de  $1,147 \text{ kg/m}^3$  a  $33^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Cuando el pistón llega a su punto muerto inferior, comienza a moverse hacia arriba comprimiendo el aire con una relación de 17:1. En este proceso de compresión al llegar el pistón al punto muerto superior tiene al aire comprimido a un 17/1 de su volumen original, aumentando su presión y temperatura hasta los  $400^{\circ}\text{C}$ . Al inyectarse el fuel oil cuando el pistón está en su punto muerto

superior debido a la alta temperatura de la compresión del aire, el combustible empieza reaccionar y a quemarse provocando así la explosión dentro del cilindro, que al estar ambas válvulas cerradas le da una fuerza de empuje al cilindro que lo lleva a su punto muerto inferior. El escape se produce cuando el pistón comienza a subir expulsando por la válvula de escape un caudal de  $13,680 \text{ kg/m}^3$  a una temperatura de  $427^{\circ}\text{C}$  hacia los múltiples de escape. Más tarde antes de llegar a la caldera recuperativa los gases de escape tienen una densidad de  $0,621 \text{ kg/m}^3$  y una temperatura de  $295^{\circ}\text{C}$ . De esta manera se resumen los cuatro ciclos de trabajo de este motor. [1]

### 1.2.3 Principales Sistemas de Motor.

Dentro de los principales sistemas del motor HIMSEN Hyundai modelo 9H21/32S está el sistema de lubricación, el sistema de admisión y el sistema de enfriamiento (ver figura 1.4).

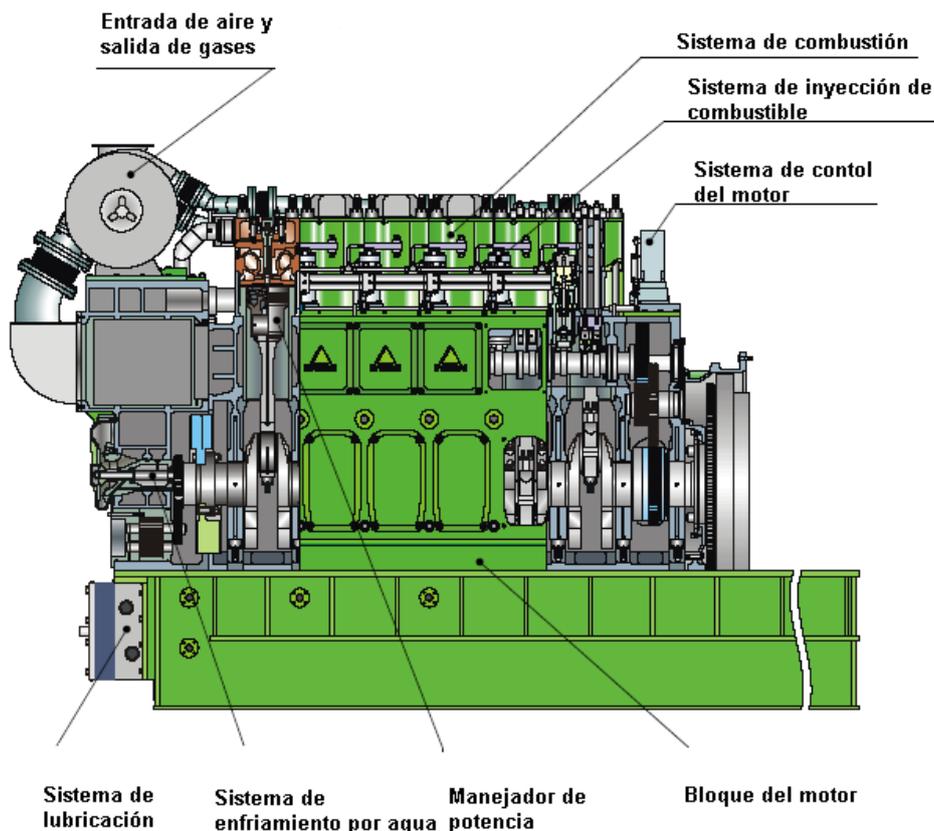


Fig.1.4 Motor de combustión interna de fuel oil HIMSEN HYUNDAI 9H21/32. [1]

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 prelubricación movida por un motor eléctrico del tipo tornillo. 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 69<sup>o</sup>C, 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 turbo cargador trabajen eficientemente, tienen que utilizar un aceite pesado y de mediana alcalinidad, con un consumo en su uso aproximadamente 1250 litros. [1]

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 turbo cargador 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 HIMSEN Hyundai 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. [1]

### 1.3 Generalidades del Mantenimiento.

El Mantenimiento es considerado como cualquier actividad como comprobaciones, mediciones, reemplazos, ajustes y reparaciones necesarios para mantener o reparar una unidad funcional de forma que esta pueda cumplir sus funciones. [4]

- **Tipos de Mantenimiento.**

Existen en la actualidad diferentes formas de clasificar las estrategias de mantenimiento, la más comúnmente usada es la que se refiere a las causas que originan el llevar a cabo las rutinas de mantenimiento de los equipos y maquinaria. Esta clasificación depende de los costos de mantenimientos y su comportamiento en relación al tiempo y se muestran en la figura 1.5. [5]

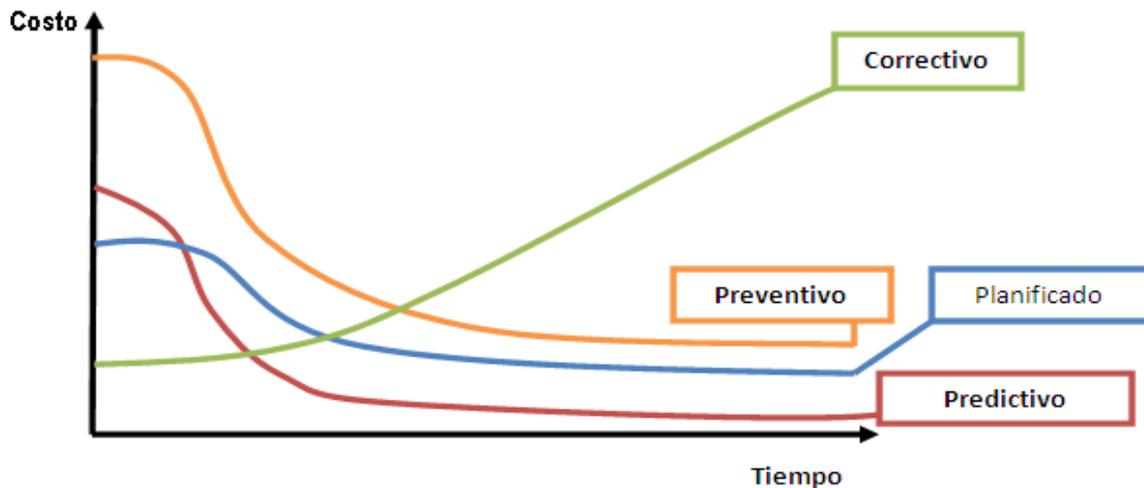


Fig. 1.5 Comportamiento de los costos de mantenimientos en relación al tiempo. [5]

Como se puede apreciar el 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 altísimo debido a la gran cantidad de recursos que se necesitan para cometer las reparaciones generales de los equipos. Además a esto se le suma la pérdida monetaria correspondiente al tiempo de producción interrumpido por dichas reparaciones. El mantenimiento preventivo y 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. Al transcurrir el tiempo la curva comienza a caer en cuanto a costo debido a que se garantiza el funcionamiento de los equipos. El costo al final del gráfico se mantiene casi constante originado principalmente por el cambio innecesario de piezas en algunas ocasiones. Por último 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, dígase operarios, técnicos e ingenieros. Más tarde la curva comienza a caer haciendo que el costo sea el mínimo hasta el final del ciclo. Sucede esto a raíz de que esta predicción hace que en los almacenes no existan piezas que no sean utilizadas, permite alargar el ciclo de mantenimiento a solo el momento en que se necesite y debido a los ahorros se puede recuperar la inversión hecha para la compra de los instrumentos en un corto tiempo. [5]

### **1.3.1 Mantenimiento Predictivo o por Diagnóstico**

Hace más de dos décadas el sistema de mantenimiento predictivo no era muy utilizado por las principales compañías de empresas debido a la existencia de problemas que invalidaban este uso. Dentro de esas dificultades se encontraba la falta de equipos de diagnóstico que indicaran el momento oportuno de las sustituciones de partes o piezas caras en las máquinas. No se estimaba el tiempo de vida que le quedaba a los elementos mecánicos. No se sabía si el usuario seguía correctamente las normas de explotación. Además se tenía que suspender de forma imprevista los servicios debido a la ocurrencia de averías. Posteriormente en el período de 1990 y 1994 surgieron en la ingeniería más de 124 instrumentos de diagnóstico que anularon la mayoría de las dificultades que se presentaban en años anteriores. En la actualidad las principales industrias del mundo desarrollado utilizan 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, o sea, las mediciones de parámetros se realizan en las máquinas sin llegar a su detención. Las mediciones hechas por el diagnóstico indican cuando es necesario intervenir con un mantenimiento.

*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. Sin embargo 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.[5]

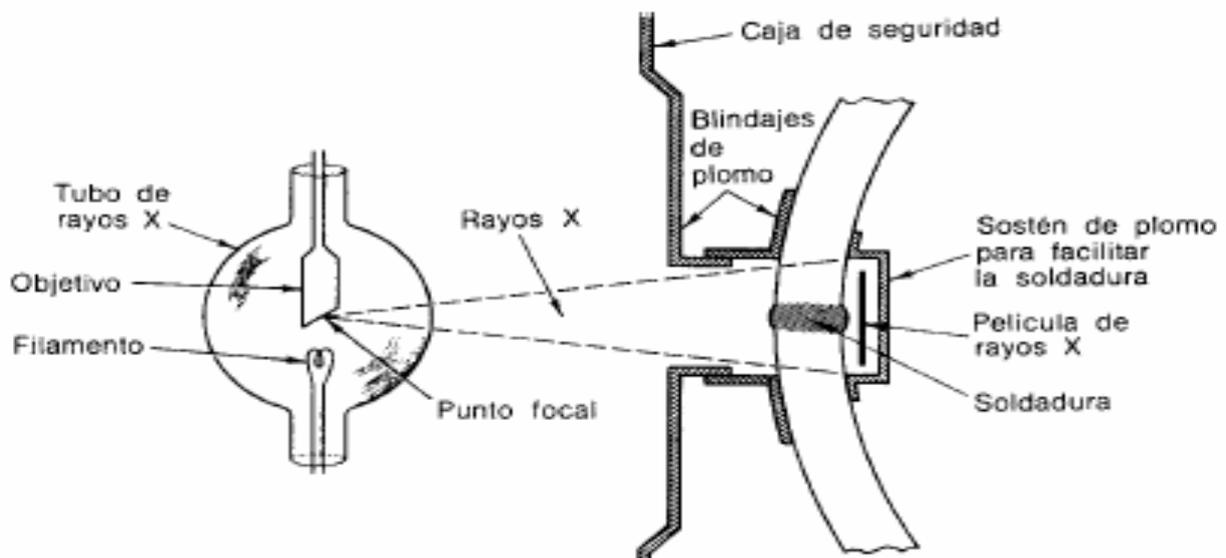
### 1.3.1.1 Diagnóstico Técnico.

El diagnóstico técnico es la rama de la ciencia que estudia y establece los síntomas de un estado de fallo de un equipo; son métodos, principios y equipamientos que ayudan llegar a conclusiones respecto al estado técnico de los sistemas que forman las máquinas sin tener que desarmarlos, y además poder pronosticar los recursos necesarios para restablecer su funcionalidad. En otras palabras, consiste en saber medir de forma continua o discreta los parámetros que caracterizan el estado técnico de un equipo, permitiendo establecer su estado real y determinar su posible tiempo de explotación hasta el momento en que alcance su fase límite de avería. Dentro de los fundamentos del diagnóstico se puede afirmar que lo que falla no son los equipos o las máquinas, sino sus componentes, y que siempre se producen síntomas que anteceden a la fallas. Algunos de los parámetros mecánicos de diagnóstico pueden ser las vibraciones, el caudal, la velocidad, aceleración, tensión, deformación, presión, entre otros. Los tipos de diagnósticos más empleados son la radiografía, análisis de vibraciones, análisis de lubricantes, termografía, análisis del rendimiento operacional, líquidos penetrantes, polvos magnetizados, etc. [6]

- **Tipos de técnicas de diagnósticos.**

a) *Radiografía:*

En particular mediante la radiografía se pueden medir grietas en las soldaduras de determinados componentes mecánicos. Como expone la figura 1.6 se le emiten rayos X dirigidos a la soldadura para analizar mediante un patrón o película de rayos X el estado de la misma. [7]



*Fig. 1.6 Representación esquemática del uso de los rayos X para examinar una placa soldada. [7]*

*b) Análisis de Vibraciones:*

Esta técnica es sin lugar a dudas la que más utilidad ha presentado a los analistas desde sus orígenes. La teoría y experiencia acumulada a través del tiempo han dado como resultado un importante grado de aciertos, mediante lo cual se ha prestigiado la técnica y masificado su uso. Adicionalmente a lo indicado, ha jugado un papel de importancia el bajo costo relativo de los equipos de medición con respecto a la reducción de los costos de mantenimiento.

Entre las principales ventajas de la aplicación del método se encuentra que, partiendo de las causas que provocan el surgimiento de vibraciones, las fallas pueden ser detectadas desde el comienzo de su desarrollo. Su principal desventaja está en la necesidad de repetir con exactitud las condiciones de medición para cada comprobación, referidas a la ubicación de los puntos de medición y condiciones del objeto de diagnóstico. Además, el equipamiento para realizar las pruebas por lo general es costoso y necesita de especialistas altamente calificados para realizar el procesamiento y análisis de los resultados que se obtienen.

La tecnología se apoya en equipos que analizan las vibraciones. El analizador de vibraciones Fluke 810 representado en la figura 1.7 es un ejemplo de ello, ya que diagnostica con precisión los problemas mecánicos más comunes, admitiendo una mejor comprensión de la vibración y de su impacto en la maquinaria, permitiendo al personal ser más consciente de los problemas que pueden aparecer en el futuro. Este analizador de vibraciones posee un sencillo proceso, o sea, cuando por primera vez se realicen las mediciones en el equipo, el analizador creará paso a paso informes de averías de las máquinas, sin necesidad de un historial de medición previo. Mediante la combinación de los diagnósticos, la gravedad de la falla y las recomendaciones de reparación, ayudarán a tomar decisiones con mayor conocimiento durante el mantenimiento y a concentrarse, en primer lugar, en los problemas críticos. [3; 8]



Fig. 1.7 Analizador de vibraciones Fluke 810. [8]

Entre las principales ventajas y características de este equipo están:

- La identificación y localización integrada de las averías mecánicas más comunes concentrando así los trabajos de mantenimiento en el origen del problema, reduciendo los tiempos de parada no planificados.
- La ubicación en una escala de cuatro niveles de acuerdo a la gravedad de las averías permitiendo así priorizar el trabajo de mantenimiento.
- Advierten a los técnicos sobre las medidas correctoras de la reparación del equipo.
- El tacómetro láser del equipo de diagnóstico proporciona con precisión en la velocidad de funcionamiento de las máquinas y favorece un diagnóstico seguro.

Puede diagnosticar este analizador, equipos como motores de combustión interna, ventiladores, turbinas, bombas centrífugas, bombas de pistón, bombas de paletas deslizantes, entre otros, que se muevan en un rango de velocidades entre 200 a 12000 rpm. Detecta averías estándares como el desequilibrio, holgura, alimentación incorrecta, averías en rodamientos, entre otros. Realiza en particular un diagnóstico de texto plano, brindando una gravedad de avería (leve, moderada, grave, crítica) y detalles sobre la reparación. [8]

c) Análisis de Aceite:

Este método se apoya en pruebas de laboratorio que permiten evaluar las características físico-químicas de los aceites lubricantes y determinar indirectamente el estado técnico de los componentes del motor. Al observar los resultados del análisis de aceite, es posible realizar el diagnóstico del estado técnico del motor, empleando la relación causa-efecto (diagrama de Ishikawa) existente entre las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de metales en el aceite lubricante, obtenidas en el análisis de laboratorio, con las condiciones del estado técnico de los componentes del motor.

El aceite lubricante de un motor de combustión interna transporta y contiene toda la información acerca de los contaminantes y las partículas de desgastes. Este análisis es una técnica simple que proporciona información respecto a la salud del lubricante, su contaminación, el desgaste de la maquinaria, entre otros. Específicamente el tipo de contaminación puede revelar problemas en los motores. Por ejemplo si viene contaminado con partículas metálicas se puede afirmar que las piezas del motor están sufriendo desgaste, además por el tipo de material (aluminio, cromado) se puede determinar que pieza en específico se está deteriorando (pistón, cigüeñal, etc.). Este aceite contaminado puede a su vez dañar el motor. Si posee partículas metálicas puede originar un desgaste en otras piezas por abrasión y fatiga. Si posee agua produce herrumbre y corrosión, el aceite lubricante con aire produce cavitación en las bombas y por último si el aceite está muy caliente ocurre un desgaste por pérdida de la película de lubricante. Al disminuir estas contaminaciones presentes mediante agua, aire o calor, no solo se reduce el desgaste en el motor, sino que también se alarga la vida del propio lubricante. Los aceites sufren un sistema de envejecimiento natural que afecta propiedades físicas como densidad, viscosidad y sus propiedades químicas mediante la oxidación, polimerización, ruptura y evaporación de este. Las pruebas de aceites lubricantes más efectivas en motores de combustión interna diesel o fuel oil son de acuerdo a la figura 1.8 la espectroscopia de metales (hierro, cobre, plomo, aluminio, cromo, estaño, calcio, sodio y silicio), la medida de contenido de hollín, la medida de la viscosidad cinemática, contenido de agua, etc. [9]

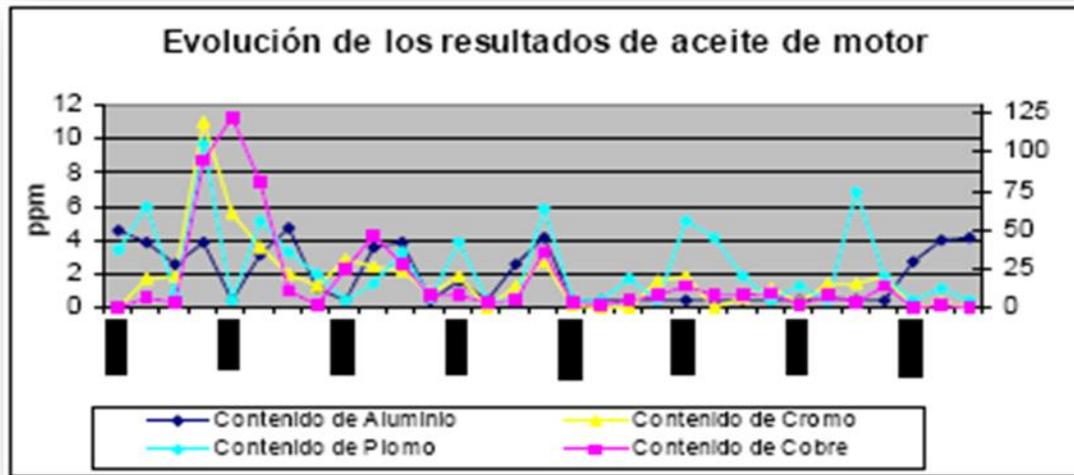


Fig. 1.8 a) Espectroscopia de metales de un aceite lubricante. [9]

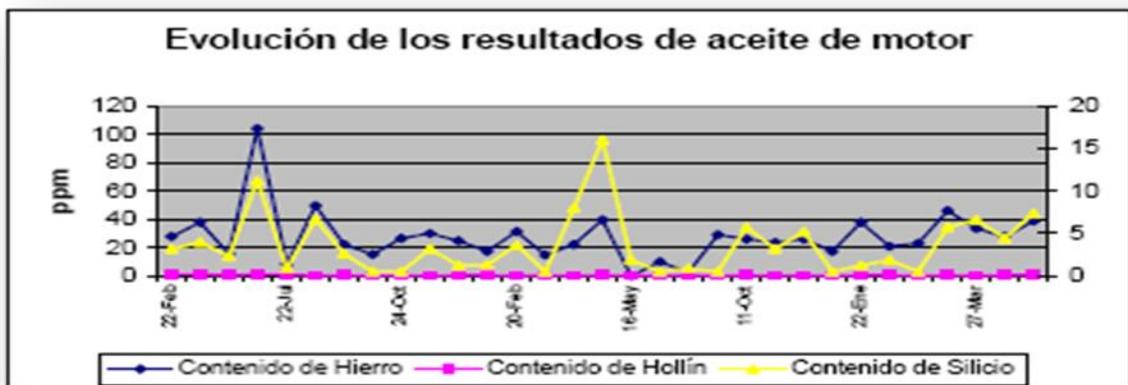


Fig.1.8 b) Contenido de hollín en un aceite lubricante. [9]

*Principales ventajas de este método:*

- Constituye una herramienta del mantenimiento predictivo, al establecer las tendencias de desgastes normales, progresivos o acelerados.
- Mejora la confiabilidad y disponibilidad técnica de los motores, al detectar fallas ocultas.
- Disminuye el costo del ciclo de mantenimiento.

*Desventajas:*

La técnica del análisis de aceite se debe respaldar en una serie de análisis, lo cual implica el uso de una instrumentación adecuada de laboratorio y terreno, así como de un control sobre los períodos de muestreo para realizar las pruebas.

d) Diagnóstico termográfico:

Este método aprovecha la capacidad de los cuerpos de irradiar la temperatura, realizando la comparación de está entre motores en buen estado con la proveniente de motores con funcionamiento incorrecto, lo cual permite llegar a conclusiones sobre su posible estado técnico.

*Entre las principales ventajas del método se encuentran:*

- Facilidad de aplicación.
- No invasivo.
- Mejora la confiabilidad y disponibilidad técnica de los motores, al detectar fallas ocultas.
- Los medios para realizar el diagnóstico técnico a partir de este método son relativamente económicos.

e) Análisis de líquidos penetrantes:

Se fundamenta en la adición de líquidos especiales que penetran en las grietas, poros o cualquier otro desperfecto que tenga la probeta o pieza que se esté analizando. En la figura 1.9 se señala específicamente el proceso, comenzando por la adición del líquido, un posterior lavado de la superficie de la pieza, una revelación mediante un revelador que actúa como esponja y atrae el líquido a la superficie, y por último una inspección con una luz negra que hace que el penetrante se vea fluorescente en la oscuridad. [4]

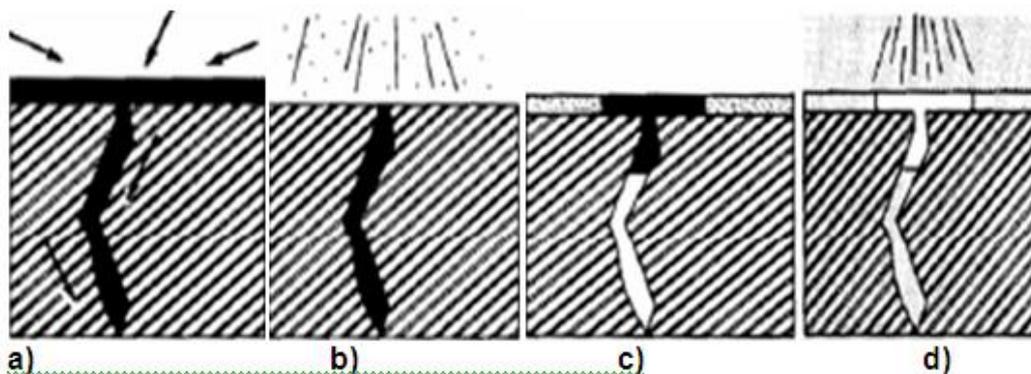


Fig. 1.9 Proceso de diagnóstico empleando líquidos penetrantes, a) Adición del líquido, b) Lavado de la superficie de la pieza, c) Revelación del líquido, d) Inspección con luz negra. [4]

f) Diagnóstico por magnetismo:

Es otra de las tecnologías aplicadas en Cuba y en el mundo. Consiste como expone la figura 1.10 en la adición a las piezas fundamentalmente en forma de eje o viga de polvo metálico. Siguiendo a esto se le aplica un campo magnético, al introducirse este en la pieza que se inspecciona las partículas de polvo metálico realizan figuras perfectamente visibles en la superficie de la pieza, indicando la existencia de una grieta mediante una formación de nuevos polos magnéticos. [4]

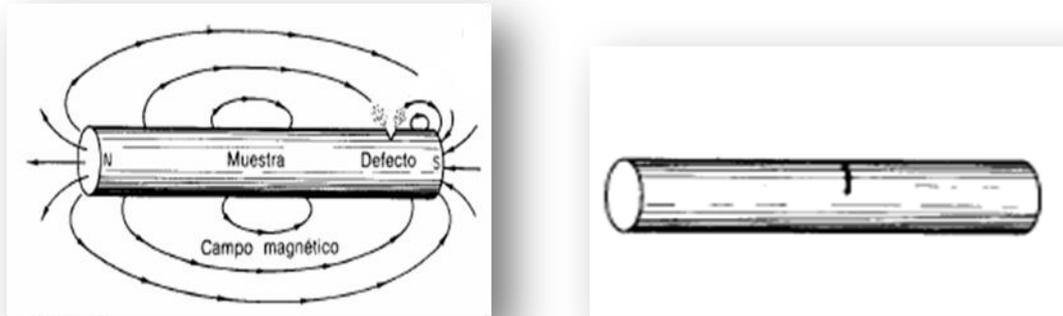


Fig. 1.10 Análisis de una pieza por el método de magnetismo. [4]

g) Análisis del Rendimiento Operacional:

Debe entenderse como aquella técnica que controla los más representativos parámetros de operación de la maquinaria, ya que éstos son un reflejo indirecto del rendimiento operacional de la misma. Es menester señalar, que la definición de los parámetros a ser controlados será una tarea prioritaria en este sentido y que su buena elección repercutirá notablemente en la eficiente implementación de esta técnica. En otro aspecto, es importante que el estudio de tendencias que se efectúe de los parámetros operacionales considere a la máquina en un régimen estable y sin variaciones a través del tiempo. Mediciones efectuadas a diferentes solicitudes que la previamente determinada, no deberán ser consideradas en el estudio de tendencias. La automatización en el monitoreo de la maquinaria y el uso de software de análisis serán de gran utilidad, sobre todo si se considera el alto número de datos necesarios de ser procesados. Por último, es necesario destacar que el uso de datos iniciales de operación, cuando la máquina está nueva o recién reacondicionada, prestará una importante utilidad, ya que servirá como referencia para determinar su degradación a través del tiempo. [6; 10]

#### 1.4 Análisis de la combustión.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor. La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente más usual. Si se supone que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir: [11]

#### **Combustible + Aire = Productos**

Una forma general de plantear una reacción química es la siguiente:



Donde las letras escritas en mayúsculas indican las sustancias químicas y las minúsculas indican la cantidad de moles de dichas sustancias. Se denominan genéricamente reactantes a las sustancias escritas antes del signo igual (A y B) y productos a las escritas detrás (C y D). Como se indicó anteriormente, la combustión es una reacción de oxidación exotérmica. Esto significa que durante la reacción se libera calor. La variación de entalpía que acompaña a la combustión completa de un mol de un compuesto se denomina calor de combustión. Este calor de combustión puede determinarse tanto en forma experimental como por medio de cálculos (teniendo en cuenta las entalpías de los reactivos y productos). La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. A los productos de una reacción de combustión se los denomina, en forma genérica, humos. Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire es 20,99% de O<sub>2</sub>, 78,03% de N<sub>2</sub>, 0,94% de Ar (argón), 0,03% de CO<sub>2</sub> y 0,01% de H<sub>2</sub>. Debido a que ni el N<sub>2</sub> ni el Ar reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar considerando que el aire está formado por 21% de O<sub>2</sub> y 79% de N<sub>2</sub>. Por lo

tanto, el N<sub>2</sub> pasará íntegramente a los humos. Se puede dar el caso en que el combustible esté formado por una mezcla de sustancias entre las cuales hay una o más que no reaccionan con el O<sub>2</sub>, por ejemplo SO<sub>2</sub>. En este caso, estas sustancias también pasarán en forma completa a los humos. Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el O<sub>2</sub> que no se utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire. Por último, es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el CO. Cuando el O<sub>2</sub> que se necesita para la reacción no es suficiente, se habla de reacciones con defecto de aire. En la tabla 1.4 se indican las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos. [11]

**Tabla 1.4** Sustancias que se pueden encontrar en los humos. [11]

Fórmula Química	Nombre	Procedencia principal	Otras procedencias
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	Combustión de sustancias que contienen C.	Componente no combustible del combustible.
H <sub>2</sub> O	Vapor de agua	Combustión de sustancias que contienen H <sub>2</sub> .	Combustible húmedo
N <sub>2</sub>	Nitrógeno	Aire.	Componente no combustible del aire.
O <sub>2</sub>	Oxígeno	Combustión realizada con aire en exceso.	Un gas combustible puede tener O <sub>2</sub> en su composición.
CO	Monóxido de carbono	Combustión realizada con aire en defecto.	Un gas combustible puede tener CO en su composición.
H <sub>2</sub>	Hidrógeno	Combustión realizada con aire en defecto.	
C	Carbono (hollín)	Combustión realizada con aire en defecto.	
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre	Presencia de S en el combustible.	Un gas combustible puede tener SO <sub>2</sub> en su composición.

- **Eficiencia de la combustión:**

La eficiencia de la combustión es la medición de cuan efectivamente la energía contenida en un combustible es convertida en calor útil. La temperatura de la chimenea y la concentración de oxígeno (o  $\text{CO}_2$ ) en los gases de combustión son los indicadores primarios de la eficiencia de la combustión.

Dado una mezcla completa, una cantidad precisa o estequiometría de aire es necesario para hacer reaccionar completamente la cantidad dada de combustible. En la práctica, las condiciones de combustión no son nunca las ideales, siempre se debe suministrar una cantidad adicional o “exceso de aire”, para completar la quema total del combustible. [18]

La cantidad correcta de exceso de aire se determina del análisis de la concentración de oxígeno y dióxido de carbono existente en los gases de combustión. Una falta de exceso de aire resulta en combustible no quemado (combustible, hollín, humo y monóxido de carbono), mientras que un exceso resulta en pérdidas de calor por la chimenea debido al aumento de flujo de gases de combustión, por lo tanto en ambos casos, se disminuye la eficiencia total de la razón unidad de combustible/unidad de energía eléctrica. [Error! Reference source not found.]

#### **1.4.1 Contaminantes en motores Diesel.**

La combustión en los motores de combustión interna es turbulenta, premezclada (Otto) o de difusión (Diesel). La velocidad de llama no es fácil de predecir, en una llama premezclada, laminar, puede ser del orden de los 30-40 m/s, pero en una llama premezclada turbulenta puede ser 10 o hasta 50 veces más alta. En una llama turbulenta de difusión hay otros factores controlantes tales como evaporación, mezcla, transmisión de calor, etc. La temperatura de llama afecta a la composición de los productos de combustión, y la velocidad de quemado y posterior enfriamiento determinan la composición final de los gases de escape. También se deben considerar los no quemados producidos por apagado cerca de las paredes, la absorción de combustible por el aceite, el lavado por mala evaporación o penetración, etc. La riqueza de la mezcla también es determinante de los contaminantes producidos, tanto en el ciclo como se muestra en la siguiente figura: [11]

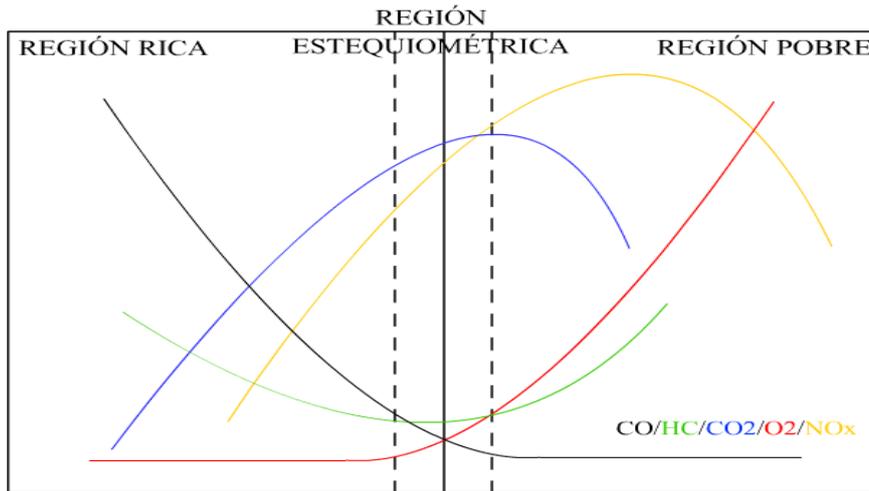


Fig.1.11 Contaminantes del Ciclo Diesel versus riqueza. [18]

Los orígenes de los contaminantes son:

- ✓ No quemados: apagado en las paredes y hendidias, apagado al soltar el acelerador (evaporación instantánea del mojado del múltiple al producirse vacío, que causa mezcla momentáneamente muy rica), apagado en la marcha en vacío (mezcla muy pobre). [11]
- ✓ CO: mezcla muy rica, mala puesta a punto del motor.
- ✓ NO<sub>x</sub>: Altas temperaturas de combustión, mezcla ligeramente pobre, mal diseño. [11]

- **Contenido de azufre.**

El azufre, que no se considera un lastre por constituir parte de la masa orgánica del combustible, es tal vez el elemento más indeseable. Aunque el azufre como sustancia química es un combustible, su calor específico de combustión es muy bajo, por lo que prácticamente no aporta energía en el horno, y sin embargo, crea grandes dificultades.

La presencia de azufre en el combustible hace que en los productos de la combustión estén presentes SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, debido a esto, al ocurrir la condensación de los vapores de agua en las zonas de baja temperatura, inmediatamente se forma ácido sulfúrico, el que se acumula en las superficies de intercambio de calor especialmente entre las incrustaciones; por lo que de inmediato comienza la

corrosión de las superficies metálicas, la que sólo termina con la destrucción de todos los tubos. [19; 22]

La formación de SO<sub>3</sub> es escasa y ocurre en presencia de oxígeno es una reacción que ocurre en forma espontánea muy lentamente debido a su alta energía de activación. Para acelerar la reacción se utilizan catalizadores como pentóxido de vanadio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) o platino que permiten la oxidación del gas a medida que se produce el contacto con el catalizador sólido. Antiguamente se utilizaba como catalizador una mezcla de óxidos de nitrógeno gaseosos. La oxidación mediada por catalizadores es utilizada en la fabricación industrial de ácido sulfúrico. [19; 22]



La oxidación del dióxido de azufre a trióxido de azufre puede producirse también por la reacción con ozono. La reacción ocurre en forma espontánea en las capas altas de la atmósfera. El trióxido de azufre al reaccionar con el agua presente en las nubes produce ácido sulfúrico, el cuál disminuye el pH del agua y precipita en forma de lluvia ácida.



Esta situación obliga a tomar diferentes medidas, todas las cuales constituyen gastos durante la operación o sacrificios durante el diseño, lo que implica gastos adicionales en aras de evitar males mayores.

Las medidas comúnmente adoptadas para combatir la corrosión en las superficies de baja temperatura son las siguientes:

- a) Aumentar la temperatura de los gases a la salida del generador de vapor para tratar de reducir al mínimo la condensación de vapores de agua. Esto se hace a expensas de provocar una disminución de la eficiencia del generador de vapor producto del aumento de la energía que se pierde con los gases de salida.
- b) Construir las superficies de transferencia de calor de baja temperatura de materiales especiales resistentes a la corrosión.

- c) Añadir al combustible reactivos químicos con los cuales reaccionen los ácidos, evitando que ataquen el metal. [19; 22]

Se puede afirmar que prácticamente casi todos los combustibles tienen azufre, en mayor o menor medida. El aceite combustible pesado (fuel oil) presenta contenidos de azufre muy variables y en base a ello se divide en tres categorías:

- $S^P \leq 0,5 \%$  Aceite combustible pesado de bajo contenido de azufre.  
 $S^P = 0,5 + 2,0 \%$  Aceite combustible pesado de medio contenido de azufre.  
 $S^P > 2 \%$  Aceite combustible pesado de alto contenido de azufre. [19; 22]

### 1.5 Análisis de Vibraciones.

La vibración puede definirse como el movimiento de una masa en torno a suposición de equilibrio. Este movimiento puede ser armónico, periódico, o estocástico. Los inevitables movimientos que se producen durante el funcionamiento de las máquinas crean fuerzas dinámicas y como resultado, vibraciones mecánicas. Las vibraciones mecánicas se consideran, para su estudio, como movimientos periódicos. Es decir, movimientos que se repiten así mismo en un intervalo de tiempo específico, conocido como periodo (T). La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen a dentro del objeto. Más adelante veremos que la proporción (frecuencia) y la magnitud de la vibración de un objeto dado, están completamente determinados por la fuerza de excitación, su dirección y frecuencia. Esa es la razón porque un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación actuando en una máquina. Esas fuerzas dependen del estado de la máquina, y el conocimiento de sus características e interacciones permite de diagnosticar un problema de la máquina. [13]

- **Tipos de Vibraciones:**

*Vibración armónica:*

La forma más elemental de una vibración periódica es la vibración armónica que se caracteriza por tener forma de una senoide. En la figura 1.12 se puede observar una señal armónica.

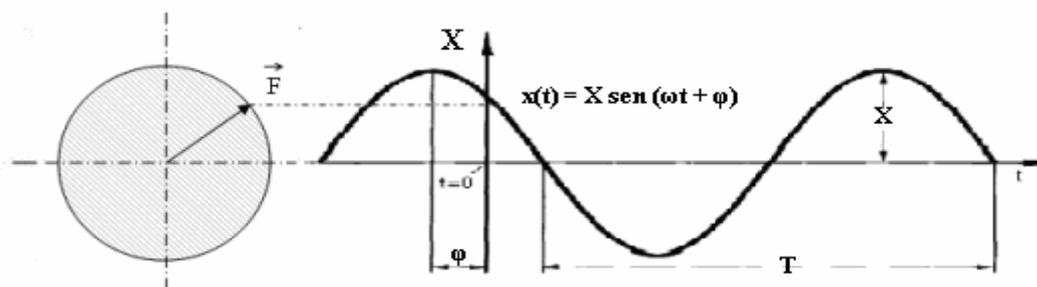


Fig. 1.12 Vibración armónica. [13]

Esta armónica puede ser la representación del movimiento que resulta al existir un desequilibrio dinámico, en un rotor. Este desequilibrio produce una fuerza centrífuga, representada gráficamente por el vector  $\vec{F}$ , que gira con velocidad angular constante ( $\omega$ ) y frecuencia de oscilación ( $f$ ). Esta fuerza centrífuga va a ocasionar una deformación del árbol, del cuerpo de la máquina, de su base, etc. Si se registra esta deformación en la dirección perpendicular al eje de rotación o posición vertical como se conoce, la deformación se hará máxima cuando la fuerza incida en esta dirección, en cambio en la dirección horizontal no se experimentará deformación alguna y así sucesivamente. Una vibración armónica  $x(t) = X \text{ sen } (\omega t + \varphi)$  puede ser descrita por su amplitud, su frecuencia y su ángulo de fase.

**Amplitud (X):** es el máximo valor instantáneo de la vibración y se relaciona en diagnóstico con la severidad de la carga vibratoria.

**Frecuencia (f):** es el número de veces que un evento se produce en un período de tiempo determinado. En el análisis de señales de vibraciones, el "período de tiempo definido" puede ser un segundo, o más a menudo, un minuto. La frecuencia se define a partir de la velocidad angular  $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$ ; es el recíproco del período T. En diagnóstico, las frecuencias contienen información sobre la causa de la vibración.

**Fase ( $\varphi$ ):** el ángulo de fase define la posición inicial de una componente vibratoria en  $t=0$ , medida en dirección opuesta a la rotación del eje y tomando una referencia en el eje. La medición del ángulo de fase es fundamental para disminuir el desbalance de rotores o diagnosticar determinados tipos de defectos. La superposición de vibraciones armónicas que ocurren al mismo tiempo a diferentes frecuencias de repetición forma la señal vibratoria. En la medida que las máquinas son más complejas en cuanto a partes rotatorias o reciprocantes mayor será la

complejidad de la mezcla de vibraciones resultante, esto se muestra en la siguiente figura. [13]

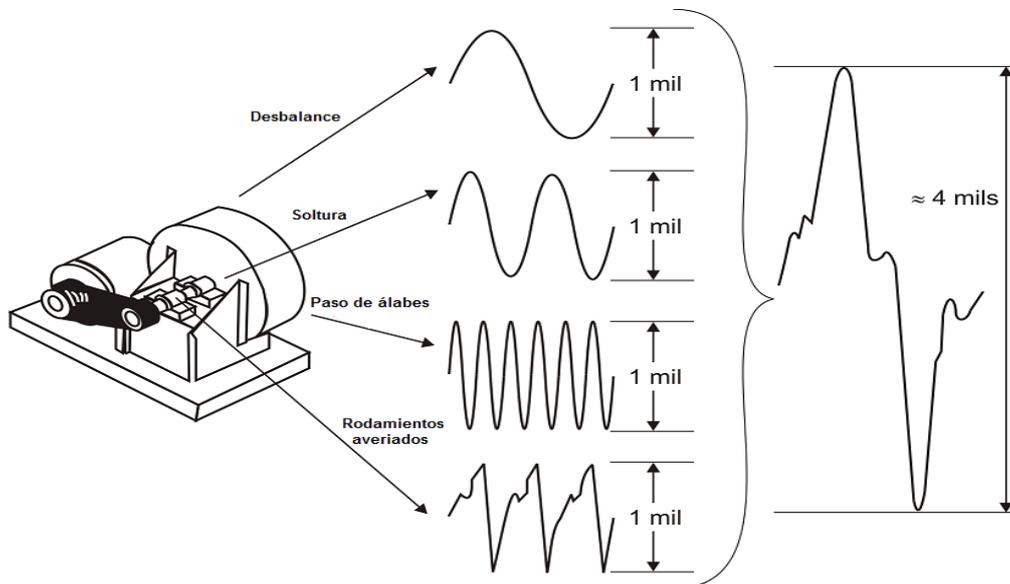


Fig. 1.13 La superposición de vibraciones armónicas forma la señal vibratoria. [13]

- **Vibración periódica:**

La vibración periódica es un movimiento que se repite en el tiempo. Un comportamiento dinámico representativo de un defecto puede ser periódico aunque no sea armónico. Ver figura 1.14.

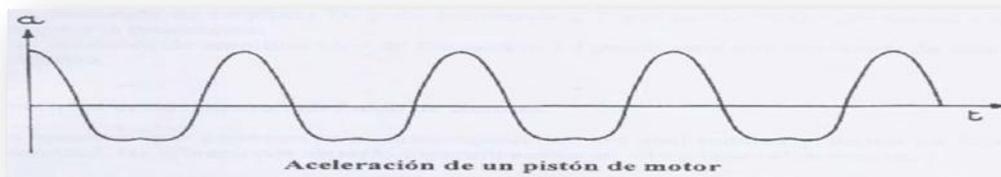


Fig. 1.14 Vibración periódica. [13]

- **Vibración aleatoria o estocástica:**

En las vibraciones aleatorias los ciclos son irregulares y nunca se repiten idénticos en cuanto a amplitud y periodo. Ver figura 1.15. [13]

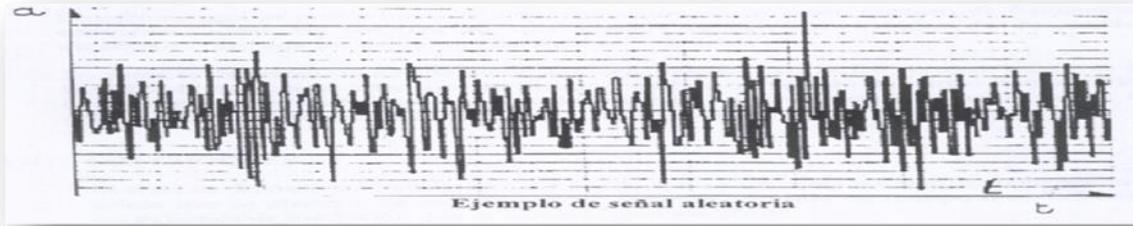


Fig. 1.15 Vibración aleatoria o estocástica. [13]

- **Frecuencia natural y resonancia:**

La frecuencia natural de un sistema es su frecuencia de vibración libre. La frecuencia a la cual un sistema sin amortiguamiento vibrará en consecuencia de su desplazamiento, en relación a su posición de reposo. Para un sistema con múltiples grados de libertad, las frecuencias naturales son frecuencias de sus modos naturales de vibración. Todas las máquinas y todas las estructuras presentan un determinado número de frecuencias naturales. Son propiedades del sistema dinámico que dependen de su distribución de masa y rigidez. [13]

Cuando la frecuencia natural del sistema (frecuencia natural del rotor, de la estructura, del fundamento, incluso de las correas) coincide o está muy próxima a la frecuencia de alguna fuerza perturbadora (desequilibrio, desalineamiento, defectos que se encuentren en rodamientos, en engranajes, desgaste de las correas) se produce la llamada resonancia, que se caracteriza por un incremento de la amplitud de las vibraciones, que puede provocar graves daños al sistema si no es debidamente controlado.

- **Medición de vibraciones:**

Es la técnica predictiva más difundida y empleada actualmente y esto tiene que ver con la cantidad de información que es posible interpretar de una señal vibratoria. Requiere, además de una instrumentación con potentes herramientas para el diagnóstico, de una adecuada preparación teórico práctica que permita interpretar los fenómenos dinámicos que ocurren en las máquinas. La medición y análisis de Vibraciones tiene como ventaja respecto a otras técnicas que la evaluación que se hace de la máquina no requiere detener o desarmar la máquina por lo que no

produce incidencias en la producción. El objetivo del análisis de vibraciones es interpretar la información que contiene la señal de vibraciones correctamente. En primer lugar, para determinar si los niveles registrados son admisibles para el tipo de máquina estudiada según las normas vigentes. En segundo lugar, para asociar componentes de esa vibración a los posibles defectos presentes en la máquina en diferentes etapas de su desarrollo. La tendencia actual de investigadores y fabricantes es a desarrollar herramientas e instrumentos que permitan detectar e identificar los defectos en etapas cada vez más incipientes de su desarrollo lo que representa para la industria, una disminución en los costos por reparaciones. [13]

- **Unidades de medición.**

Según la norma ISO 1000 las unidades empleadas para cuantificar los niveles de vibraciones son los siguientes: [28]

- ✓ Desplazamiento (m, mm,  $\mu\text{m}$ )
- ✓ Velocidad ( $\mu\text{m/s}$ , mm/s)
- ✓ Aceleración ( $\text{m/s}^2$ ,  $G's = 9,809 \text{ m/s}^2$ )

El desplazamiento es sencillamente la distancia desde una posición de referencia, o punto de equilibrio. Aparte de un desplazamiento variable, un objeto vibrando tendrá una velocidad variable y una aceleración variable. La velocidad se define como la proporción de cambio en el desplazamiento y expresa la rapidez con que el punto de medida se mueve respecto a su posición de equilibrio, la aceleración se define como la proporción de cambio en la velocidad y en el sistema inglés se mide en unidades G, o sea la aceleración promedio debida a la gravedad en la superficie de la tierra. [29]

### **1.5.1 Vibraciones en motores de Combustión Interna.**

Los componentes más afectados por las vibraciones generadas por el funcionamiento normal del motor son aquellos que forman el sistema biela-manivela, que está compuesto por los siguientes elementos: [0]

*Cigüeñal:* Este elemento sufre vibraciones debido a esfuerzos torsionales y de flexión.

*Bielas:* Las mismas forman parte del sistema biela-manivela, soportando esfuerzos de tracción y compresión durante el ciclo completo de funcionamiento.

*Pistón:* Otro componente del sistema que soporta esfuerzos de compresión y elevado gradiente de temperaturas, además de grandes aceleraciones alternativas y periódicas, debido a las variaciones periódicas de la presión del gas o mezcla al producirse la combustión. [0]

*Las vibraciones en un motor pueden tener dos tipos de causas:*

*Externas:* Cuando la acción de estímulos que proceden de fuentes generadoras de vibraciones, pueden ser permanentes o aisladas. Una fuente puede ser la pieza deteriorada, de alguna máquina acoplada al motor, que puede presentar desgaste o que pueda estar mal montada y transmita vibración a los apoyos del cigüeñal.

*Internas:* Cuando se producen por alguna falla en la máquina misma debido a diversas causas como por ejemplo un mal diseño, o un desgaste pronunciado en algún componente.

Cuando se diseña una máquina, se calcula sus componentes, con el suficiente nivel de confiabilidad para que pueda soportar las vibraciones normales que aparecen durante el funcionamiento de la misma. Por lo tanto se considerarán como vibraciones no deseadas aquellas que están fuera de las calculadas por diseño de la máquina y que pueden producir deformaciones permanentes o incluso llegar a la rotura del cigüeñal que se trata de la pieza que mayores esfuerzos torsionales soporta, como así también esfuerzos de flexión. Sin embargo es de anotar que no solamente el mecanismo principal del motor es el causante del comportamiento vibratorio del motor en conjunto. Mecanismos como el de distribución (árbol de levas, válvulas), fenómenos provenientes de irregularidades en el proceso de combustión (detonación) afectan el comportamiento vibratorio del motor. Lo anterior hace que la técnica de análisis de vibraciones como herramienta de diagnóstico tenga dificultades en su aplicación para este tipo de máquinas. [0]

### **1.6 Sistema de control y seguimiento de fallas.**

El sistema de control y seguimiento de fallas y averías 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, este ha quedado

conceptuado como un proceso de diagnóstico aplicado a la ocurrencia de fallas y averías. [27]

- **Requerimientos:**

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. Los aspectos a considerar son los siguientes:

**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. [27]

**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.** Aquí se relacionan todas las causas que pueden tener incidencia en la ocurrencia de la falla y que de hecho justifican la aparición de las causas inmediatas. Definido este aspecto se consigna la fecha en la cual se definen las causas básicas. [27]

**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. [27]

### **1.7 Conclusiones parciales.**

1. Una central eléctrica de fuel oil se divide en componentes de una batería (motor generador, planta de tratamiento de combustible y aceite, compresores, unidad de control eléctrico y caldera recuperativa) y componentes comunes (generador de arranque en negro, planta de tratamiento de agua y sala de control).
2. El motor de la central de fuel es un motor diesel 9H21/32S que está diseñado para consumir fuel oil como combustible, tiene una potencia mecánica de 1800 kW, 9 cilindros en línea y 900 rpm de velocidad nominal.
3. Existen técnicas de diagnóstico mediante radiografía, ultrasonido, termografía, análisis de vibraciones, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y análisis de lubricantes que pueden ser aplicadas eficientemente a un motor diesel.
4. La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno.
5. La medición de vibraciones es la técnica predictiva más difundida y empleada actualmente y esto tiene que ver con la cantidad de información que es posible interpretar de una señal vibratoria.
6. El sistema de control y seguimiento de fallas y averías 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.

## Capítulo 2. Técnicas de diagnóstico.

El diagnóstico que se le aplica a los motores está dividido en dos, uno es la toma de parámetros los cuales son tomados por la EMGEF y por la Generación Distribuida a través de registros de diagnóstico y el monitoreo SCADA estos parámetros se muestran a continuación, y el otro son los dispositivos de diagnóstico que aplica la EMGEF.

### 2.1 Toma de Parámetros.

Estos parámetros son tomados por las dos empresas que atienden a los grupos electrógenos la Generación Distribuida y la Empresa de Mantenimientos a Grupos Electrógenos Fuel Oil (EMGEF).

#### 2.1.1 Parámetros tomados por la Generación Distribuida:

En las centrales eléctricas de fuel de la generación distribuida se toman mediciones cada 2 horas de los parámetros más importantes del motor-generador según el sistema de mantenimiento preventivo planificado (MPP). Existe un libro denominado “Control de régimen de MDU Hyundai 1.7 MW” que tiene la función de poseer todos los valores de estas mediciones. En la tabla 2.1 se muestran los parámetros con su rango de medición de dicho libro. Dichas mediciones están asociadas al sistema de combustible, lubricación, agua tratada y parámetros termotécnicos del motor. También se incluyen mediciones del generador eléctrico como frecuencia, voltaje, etc. [1; 3]

**Tabla 2.1** Rango de los parámetros tomados por la Generación Distribución. [3]

Parámetros	Pot. Act (%)	Vel. Motor (rpm)	Vel. Turbo (rpm)	Ind. Gobernador	Combustible	
					Presión (bar)	Temperatura (°C)
Rango	50-100	891-909	<40300	3,5-6	7-10	110-149

Parámetros	Aceite de Lubricación					
	Nivel Carter	Temp. (°C)	P Mot. (bar)	PE Fill (bar)	DP Fill (bar)	P Turb. (bar)
Rango	50-75	60-73	4-5	5-6	0,2-1	2-4

**Tabla 2.1** Continuación.

Sistema de Agua							
Parámetros	PE rad (bar)	PS rad (bar)	Niv.	Pag BT (bar)	Pag AT (bar)	TE rad (°C)	TS rad (°C)
Rango	0,7-0,9	0,1-0,3	75-85	1,5-4,5	2,5-4,5	75-85	35-50

Sistema de Agua				
Parámetros	TEnfAiir (°C)	TEnf Ac (°C)	TE Cam (°C)	TS Cam (°C)
Rango	30-40	40-50	75-78	77-85

Temp. Sistema de Aire				Presión Sistema de Aire			
Parámetros	Ambiente (°C)	T Inc (°C)	T Air C (°C)	PAC (bar)	PAArran (bar)	P Emer (bar)	P Válv (bar)
Rango	<32	30-44	35-55	1-32	25-30	7-8	7-8

Temp. Sistema de Gases (°C)	
Cilindros	1-2-3-4-5-6-7-8-9
Rango	250-390

Generador			
Parámetros	Pres Ac Enf (bar)	T Dev (°C)	T Coj (°C)
Rango	3-5	60-100	55-75

**Clave:**

- **P mot-** Presión de aceite a la entrada del motor.
- **PE Fill-** Presión de aceite a la entrada del filtro.
- **DP Fill-** 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.
- **Pag BT-** Presión del agua de baja.
- **Pag AT-** Presión del agua de alta.
- **TE Rad-** Temperatura de entrada al radiador.
- **TS Rad-** Temperatura de salida del radiador.
- **TEnf AC-** Temperatura de agua del enfriador de aire.
- **TEnf 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.
- **PAArran**- Presión del aire de arranque.
- **PEmer**- Presión de Emergencia.
- **Pválv**- Presión de la válvula
- **TE tur**- Temperatura de entrada al turbo.
- **TS tur**- Temperatura de salida del turbo.
- **Pres Ac ENf**- Presión de aceite de enfriamiento de toberas.
- **T Dev**- Temperatura del devanado.
- **T Coj**- Temperatura del cojinete. [1; 3]

#### *Parámetros de SCADA:*

La sala de control y monitoreo es el lugar donde se opera toda la central de fuel. Posee en su interior una consola de mando con una computadora que a través de un software denominado SCADA brinda acceso a parámetros, mediciones, alarmas, señalizaciones, disparos y al mismo tiempo permite operar cualquier equipo. El software controla parámetros de toda la central. Específicamente en el motor Himsen Hyundai 9H21/32S monitorea la presión y temperatura del combustible, presión y temperatura del aceite, presión del aire de carga, temperatura del agua de enfriamiento a la salida de la camisa y la temperatura de los gases de escape de cada cilindro. El SCADA en tiempo real grafica y monitorea estos parámetros constantemente. También posee una memoria donde almacena los datos con el objetivo de que el personal del emplazamiento los pueda volver a contactar. Con solo ajustar la fecha y hora del momento que se quiere saber la medición el software brinda automáticamente los parámetros de la central en ese momento de generación. Dicha memoria posee una capacidad de 90 días de generación. Al llenarse el ingeniero automático de la central debe descargar las mediciones de la memoria en una computadora. Más tarde se descarga en un CD y se almacena esta información. Hecha esta acción el software queda listo para monitorear los próximos 90 días. [1; 3]

### 2.1.2 Parámetros tomados por EMGEF:

Estos parámetros son medidos después de encendido el motor, cada dos horas de trabajo y el modelo a llenar se muestra en la siguiente figura, los valores permisibles para estos parámetros se encuentran en el anexo 11. [3]

**Tabla 2.2** Modelo de parámetros tomados en el motor. [3]

COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS TERMOTÉCNICOS DEL MOTOR.				
CENTRAL ELÉCTRICA			Horas del motor	FECHA
TIPO DE MOTOR		BATERÍA		Nº MOTOR
Tiempo				hh:mm
Presión / temperatura ambiental				mbar/°C
Puntos de medición				% <b>85%</b>
Velocidad del motor				rpm
Velocidad del turbocompresor				rpm
Carga del motor				kW
Posición del indicador del gobernador				%
Temperatura del FO a la entrada del motor (operación continua con FO)				°C
Presión del FO a la entrada del motor (operación continua con FO)				bar
Viscosidad del FO a la entrada del motor.				cSt
Temperatura de entrada y salida del aceite de refresco de las toberas				°C
Presión de aceite lubricante a la entrada del filtro				bar
Presión de aceite lubricante a la entrada del motor				bar
Caída de la presión de aceite lubricante en el filtro				bar
Presión de aceite lubricante a la entrada del T/C				bar
Temperatura del aceite lubricante a la entrada del motor				°C
Presión del agua de enfriamiento de A.T. a la entrada del motor				bar
Temperatura del agua de enfriamiento de A.T. a la entrada y salida del motor				°C
Presión del agua de enfriamiento de B.T. a la entrada del enfriador de aire				bar
Temperatura del agua de enfriamiento de B.T. a la entrada y salida del motor (enf de aire)				°C

**Tabla 2.2** Continuación.

Presión del agua enfriamiento a la entrada y salida de la unidad refrescadora	bar	
Temperatura del agua a la entrada y salida de la unidad refrescadora	°C	
Temperatura de aire de carga después del refrescador de aire	°C	
Presión del aire de carga después del refrescador de aire	bar	
Temperatura de gases de escape a la entrada y salida del T.C.	°C	
Temperatura del cojinete del generador	°C	
Contra presión en el sistema de escape	bar	-

Un ejemplo de la importancia que tiene en la toma de parámetros en el diagnóstico de averías en los motores se muestra en el reporte de falla de la tabla 2.3, donde a partir de parámetros tomados se encontraron fallas en el motor.

**Tabla 2.3** Reporte de avería.

Central Eléctrica: Santa Clara 110	Batería: 2	Motor: 7
<b>Causas inmediatas:</b>		
1. Desbalance en los valores de la potencia del motor		
2. Motor limitado por alta temperatura en los cilindros		
3. Alto consumo de combustible		
4. Incrementos de cargas dinámicas en el cigüeñal		
<b>Fallas o desviaciones de parámetros funcionales:</b>		
- Temperatura del combustible (115 °C) por debajo del valor recomendado (130-140 °C).		
- Baja potencia indicada en el cilindro 9 (-9,7 %) respecto a la media (1,22-1,23 %)		
- No existe potencia en el cilindro 5		
- Desviaciones en los índices de cremallera de forma general.		
- Alta temperatura en los cilindros 1(385 °C), 3(390 °C), 4(385 °C) y 6(380 °C)		
- Temperatura del aire de carga alta (55 °C)		
- Mala pulverización de los inyectores en los cilindro 3, 8 y 9		
- Temperatura del agua de salida del radiador alta (48,2 °C)		
<b>Causa raíz:</b>		
- Combustible sin temperatura adecuada		
- Mal reglaje en las válvulas del cilindro 5 ocasionado la pérdida de potencia.		
- Posible falta de hermeticidad en los cilindro 1, 2, 3, 4 y 6		
- Falta de calibración en los inyectores		
- Radiador sucio		
<b>Medidas correctivas:</b>		
1. Operar los motores con el combustible de 130-140 °C		
2. Calibración de las válvulas y yugos en cilindro 5		
3. Calibración de inyectores 3, 8 y 9		
4. Regular todos los índices de cremallera en posición cero con el gobernador		
5. Revisar la hermeticidad de los cilindros 1, 2, 3, 4 y 6, y verificar si existe salida de aire por válvulas o cilindros		
6. Limpieza del radiador.		

## 2.2 Equipos de diagnóstico.

De los equipos de diagnóstico que se aplican en la Generación Distribuida para el desarrollo de este trabajo fueron asignados el analizador del rendimiento de la combustión TEMPEST 100 y el analizador de vibraciones en maquinaria y colector de datos VIBROTIP.

### 2.2.1 Analizador del rendimiento de la combustión TEMPEST 100.

El analizador del rendimiento de la combustión TEMPEST 100 (fig. 2.1) fue fabricado por la empresa Telegan. Es un equipo que a través del análisis de los gases productos de una combustión brinda una serie de variables que permiten saber el estado en que se encuentran los parámetros fundamentales de la combustión. El analizador posee un diseño sencillo para su operación, ya que posee solo tres mandos. Su carcasa permite una rápida limpieza del equipo y una gran protección a la humedad y el polvo. Labora solo en un rango de temperaturas de 0 ° a 40 ° C, y cuenta con una batería interna de 6V y 850 mAh recargable con un tiempo de recarga de 2 horas. [12]



Fig. 2.1 Analizador del rendimiento de la combustión TEMPEST 100. [12]

El analizador puede trabajar continuamente un tiempo de 5 horas. TEMPEST 100 cuenta con una impresora de rollo con un ancho de papel de 45 mm que imprime sus resultados de las mediciones hechas. Posee sensores que pueden medir el volumen de gases resultantes de una combustión. El instrumento puede medir y calcular el % de oxígeno (O<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en los gases de escape de una combustión, procedente de una amplia gama de combustibles como el gas natural, aceites ligeros o pesados, carbón y coque. También puede estimar y determinar en partes por millón (ppm) el monóxido de carbono (CO), el óxido nítrico

(NO) y los restantes óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) presentes en la última fase de la combustión. El TEMPEST 100 puede brindar el resultado de la relación entre el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), además puede determinar la eficiencia de la combustión y el coeficiente de exceso de aire. Dentro de las principales características físicas de este analizador están la disponibilidad de una pantalla con retroiluminación con un formato de 4 líneas y de 20 caracteres alfanuméricos, un reloj que marca el tiempo real, una trampa integral de agua y un filtro de partículas, estos últimos con la función de garantizar mediciones fiables y proteger la vida del equipo. Cuenta también con un menú avanzado mediante un software que analiza y procesa las mediciones realizadas. Este permite variar la unidad de medida de las mediciones del contenido de los gases, ya sea en ppm o mg/m<sup>3</sup>. La comunicación entre el analizador y la computadora se lleva a cabo mediante un comunicador del tipo RS232. [12]

- **Funcionamiento del TEMPEST 100.**

El analizador puede realizar las mediciones mediante sensores y sondas de medición. En la tabla 2.4 se muestran los principales sensores del equipo. Un accesorio importante es la sonda estándar de acero inoxidable, que se utiliza para medir la temperatura de gases. Dentro de sus características principales está que la longitud de inserción es de 300 mm y la longitud del tubo es de 2500 mm. La sonda solo puede medir temperaturas inferiores a los 800°C. En cuanto al funcionamiento del TEMPEST 100 se puede afirmar que tiene un manejo sencillo mediante un teclado de membrana ubicado en su parte superior. Usando señales indica el encendido y apagado del equipo, o sea, pulsando dos botones simultáneamente se conecta, encendiendo una luz roja y provocando un sonido particular antes de mostrar la pantalla retroiluminada. Este diseño de la pantalla del analizador brinda la ventaja de que se pueden llevar a cabo las mediciones en lugares donde exista poca iluminación. También puede aparecer una luz verde que muestra la existencia de la conexión del cargador de batería. [12]

**Tabla 2.4** Principales sensores de medición del TEMPEST 100. [12]

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
Sonda de temperatura	0-800°C	1°C	±1°C
Temperatura ambiente	0-40°C	1°C	±1°C
Eficiencia/pérdidas	0-99.9%	0,1%	
Dióxido de carbono	0-99.9%	0,1%	

Al encender puede que el analizador comience a dar mediciones de temperaturas erróneas debido a la no conexión de todos los accesorios de equipo. El menú del analizador posee varias opciones para la operación. Una de ellas es la impresión los resultados que permite llevar un muestreo y seguimiento de las mediciones de emisiones a intervalos de tiempos predeterminados mayores de 3 minutos. Una vez terminado ese tiempo el equipo imprime los resultados y así vuelve a repetir el ciclo en cada período. TEMPEST 100 puede regular el tiempo de impresión, detener, o incluso cancelar la propia orden de impresión de los resultados. Otras de las opciones del menú es la que se relaciona con la selección del combustible de trabajo. El instrumento lo realiza mediante las teclas (arriba y abajo) y dispone de una serie de combustibles como el propano, gas natural, petróleo pesado, carbón, butano, entre otros. En el anexo 1 se muestran los comandos más importantes del TEMPEST 100. [12]

- **Obtención e interpretación de los resultados del TEMPEST 100.**

El analizador del rendimiento de la combustión obtiene los resultados en formato de texto ASCII para la compatibilidad con los procesadores de texto y hojas de cálculo. Para salida definitiva del equipo de medición los datos de las emisiones se envían por el comunicador RS232 para acceder posteriormente a su impresión (fig. 2.2). Esta última se realiza en intervalos de tiempo que permiten obtener varias copias de las mediciones. Si el analizador es operado erróneamente activará una alarma que cesará solo cuando se actualicen las mediciones, la hora y el período de obtención de parámetros. El TEMPEST 100 también se puede conectar a una computadora

Windows 3.1 para el análisis de sus datos. Su conexión es sencilla, solo se deben realizar determinados ajustes en la PC.

```

***  TELEGAN  ***
*  TEMPEST 100  *
DATA      09-19-02
TIME      15:11:06
NATURAL GAS
AMBIENT  C      23
STACK    C      187
NETT     C      162
INTAKE   C      25
O2       %      16.3
RATIO
CO       ppm     35
CO2     %      3.5
XAIR    % (N)   95
EFF     % (N)   85.5
DRY     13
WET     11
uCO
Prs.   mBar    975
NO     ppm     15
NOx    ppm     18
NO2    ppm     52
SO2    ppm     21
H2S    ppm     0.02
uHC    ABSENT
REF    %O2     3.0
    
```

Fig. 2.2 Hoja impresa de resultado del análisis de gases. [12]

Por ejemplo el equipo exige parámetros de comunicación de 9600 de velocidad de transmisión, 8 bits de datos, 1 bits de parada y un conector COM1 o COM2. También es compatible con una computadora que tenga en si instalación el Windows 95. Para esta instalación el equipo requiere una configuración del puerto con 9600 bits por segundo, 8 bits de datos, sin paridad, 1 bits de parada y activar un control de flujo por hardware. [12]

### 2.2.1.1 Datos obtenidos con el TEMPEST 100.

Los siguientes datos fueron medidos varios motores de las centrales eléctricas a carga estable (85%) y se obtuvieron datos como:

Tabla 2.5 Parámetros medidos con el TEMPEST 100 [12]

<b>Horas de trabajo</b>	
<b>Temp. Ambiente</b>	°C
<b>Temp. Escape</b>	°C
<b>Temp. Neta</b>	$T_{esc} - T_{amb} (°C)$
<b>O<sub>2</sub></b>	% de oxígeno
<b>Ratio</b>	Relación entre $(CO/10000)/CO_2$
<b>CO</b>	Monóxido de carbono (ppm)
<b>CO<sub>2</sub></b>	% dióxido de carbono
<b>XAIR</b>	Exceso de aire = $\alpha - 1$

**Tabla 2.5 Continuación.**

<b>EFF</b>	Eficiencia de la combustión
<b>NO</b>	Óxido nítrico (ppm)
<b>NOx</b>	Óxidos nitrosos restantes (ppm)
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de nitrógeno (ppm)
<b>SO<sub>2</sub></b>	dióxido de azufre (ppm)

Nota:  $\alpha$ - coeficiente de exceso de aire.

A continuación se muestran los datos obtenidos en la central eléctrica Santa Clara 110 donde se aplicó en analizador de gases TEMPEST 100 (los datos obtenidos de las otras centrales se encuentran en el anexo 3).

**Tabla 2.6 Santa Clara 110**

# de motor	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12
<b>Horas de trabajo</b>	24039	24711	24712	23870	22079	25980	23550	26512	27981	28094
<b>Temp. Ambiente (°C)</b>	29	29	32	31	31	31	31	31	26	29
<b>Temp. Escape (°C)</b>	321	329	318	346	351	341	320	307	314	330
<b>Temp. Neta (°C)</b>	292	300	286	315	320	310	289	276	287	300
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	13,2	13,2	13,2	12,7	12,8	13	12,9	13,4	13,3	13,2
<b>Ratio</b>	0,002 0	0,001 3	0,001 1	0,001 8	0,001 8	0,001 8	0,001 7	0,001 4	0,001 2	0,001 3
<b>CO (ppm)</b>	84	73	63	114	112	106	101	81	77	81
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	4,2	5,8	5,8	6,2	6,1	6,0	6,0	5,7	5,7	5,8
<b>XAIR</b>	171,4	171,4	171,4	154,9	158,0	164,6	161,3	178,7	175,0	171,4
<b>EFF (%)</b>	62,8	72,2	73,5	72,6	71,8	72,0	74,2	73,7	73,0	72,2
<b>NO (ppm)</b>	979	943	980	932	999	836	980	978	992	1020
<b>NOx (ppm)</b>	992	946	1000	943	1010	836	980	1005	1017	1049
<b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>	13	3	20	11	11	0	0	27	25	29
<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	352	399	367	376	390	387	390	346	345	360

### 2.2.1.2 Análisis de los datos obtenidos.

La razón de este estudio surge es debido a que la EMGEF está obteniendo valores con el TEMPEST 100 pero no tiene un patrón para compararlos por lo que para el análisis de estos datos se vio en la necesidad de emplear herramientas de estadística empleando el software SPSS (ver figura 2.3).

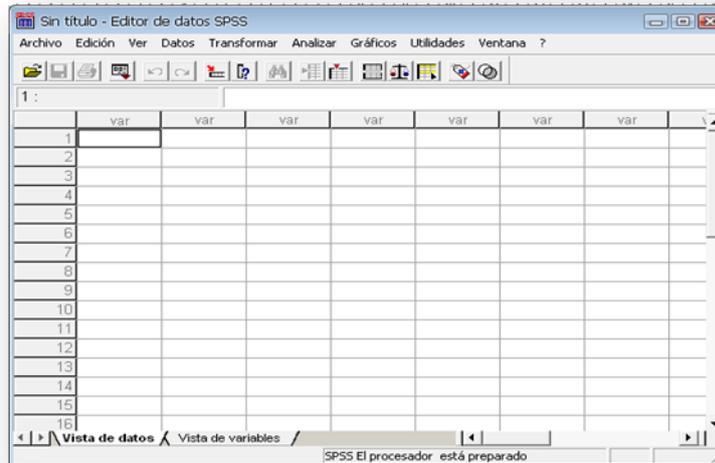


Fig. 2.3 Editor de datos SPSS.

Para realizar el análisis, es necesario realizar las diferentes definiciones:

*Diagrama de dispersión:* es un tipo de diagrama matemático que utiliza las coordenadas cartesianas para mostrar los valores de dos variables para un conjunto de datos. [25]

*Media ( $\bar{x}$ ):* Es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación. [23]

$$\bar{x} = \frac{\text{suma de los valores de la muestra}}{\text{tamaño de la muestra}}$$

*Varianza ( $S^2$ ):* Media de las desviaciones cuadráticas de una variable aleatoria, referidas al valor medio de esta. [23]

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \left( x_i - \bar{x} \right)^2 / (n - 1)$$

*Desviación Típica (S):* Es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable. [20]

$$S = \sqrt{S^2}$$

*Intervalo de confianza:* Es par de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido con una determinada probabilidad de acierto, estos valores vienen dado con un porciento de confiabilidad, que se encontrara entre los límites dados por:

$$\bar{X} \mp t * S$$

Donde el valor del coeficiente t es el nivel de significación utilizado para calcular el nivel de confianza. El nivel de confianza es igual a  $100*(1 - t) \%$ , es decir,  $t = 0,05$  indica un nivel de confianza de 95%, que para trabajos de ingeniería es la confiabilidad recomendada, y la utilizada en este trabajo. [26]

*Paso para el análisis:*

1. Los motores se analizaron a la misma carga (85%), similares horas de trabajo y con el mismo combustible.
2. Se seleccionaron los componentes a analizar ya que están vinculados con el estado técnico del motor. Esto son: temperatura de escape, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, XAIR, EFF, NO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>.
3. Agrupar los datos obtenidos en una tabla (ver anexo 4).
4. Introducir los valores en el SPSS (ver anexo 5).
5. Realizar el análisis estadístico para cada variable con 95 % de confiabilidad (ver figura 2.4).

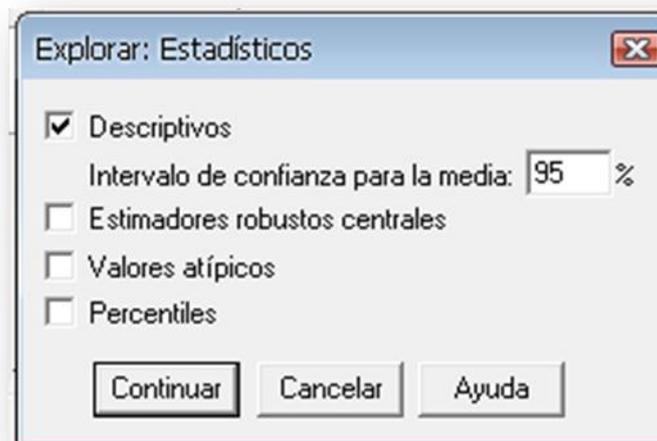


Fig. 2.4 Porciento de confiabilidad en el SPSS.

Después de realizado el análisis obtenemos los datos mostrados en la tabla 2.7.

**Tabla 2.7** Resultados obtenidos.

Componentes	Media	Varianza	Desv. Típica	Intervalos de confianza	
				Mín.	Máx.
<b>T. Escape (°C)</b>	329,0	483,6	22,0	320,1	337,8
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	13,3	0,3	0,6	13,1	13,5
<b>CO (ppm)</b>	96,0	2.355,1	48,5	76,4	115,6
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	5,8	0,2	0,4	5,6	5,9
<b>XAIR</b>	176,0	545,8	23,4	166,6	185,4
<b>EFF (%)</b>	71,5	13,1	3,6	70,1	73,0
<b>NO (ppm)</b>	877,2	35.861,9	189,4	800,7	953,7
<b>NOx (ppm)</b>	892,1	37.099,4	192,6	814,3	969,9
<b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>	14,8	101,8	10,1	10,8	18,9
<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	364,5	1.929,5	43,9	346,7	382,2

Para tomar estos valores como referencia es necesaria la comprobación de los mismos, para esto se realiza un análisis de cada uno de los componentes medidos y se compra con los resultados de la tesis “Valoración del impacto sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Clara de la generación de electricidad con grupos electrógenos a base de combustible fuel oil”.

- **Temperatura de escape:** Según el análisis estadístico realizado la media obtenida de las mediciones es de 329 °C, que está dentro del rango permisible establecido en la carta de régimen de tecnología del motor que es de 250 a 390 °C (ver anexo 11).
- **Di oxígeno O<sub>2</sub>, Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub> y Dióxido de azufre SO<sub>2</sub>:** Estos valores fueron comprobados a partir del cálculo de del los productos de la combustión empleando el software Combust, donde primero se tuvo que obtener la composición del combustible fuel oil que se puede observar en la parte superior izquierda de la figura 2.5, en la parte inferior izquierda se introduce el coeficiente de exceso de aire que en este caso es XAIR+1, y en la parte derecha de la figura se obtienen los resultados.

**Combustión estequiométrica o con exceso de aire, de un combustible sólido o líquido**

**Fracción Mássica de**

Carbono	0.859
Hidrógeno	0.0985
Azufre	0.01
Oxígeno	0
Nitrógeno	0.012
Agua	0.0152
Cenizas	0.0051

**Tipo de combustible:**

Combustible líquido

Carbón

Indique el coeficiente de exceso de aire, concebido como la relación entre la cantidad de aire real y la estequiométrica.

Introduzca un valor entre 1 y 10

**Ejecutar cálculos**



CO2	5,53 %
H2O	3,87 %
SO2	0,02 %
O2	13,12 %
N2	77,45 %

COMPOSICIÓN HUMOS SECOS

CO2	5,75 %
SO2	0,03 %
O2	13,65 %
N2	80,57 %

Fig. 2.5 Datos introducidos y obtenidos en el Combust.

Los resultados obtenidos son comparados en la tabla 2.8 con lo obtenidos en el software y se concluye que son coherentes.

**Tabla 2.8** Comparación de los resultados.

Componente	Resultados obtenidos	Resultados Software
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	13,3	13,65
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	5,8	5,75
<b>SO<sub>2</sub> (%)</b>	0,0364	0,03

- **Monóxido de Carbono CO:** Está comprobado que el contenido específico de monóxido de carbono en los gases de escape debe ser menor que 0,2 %, y la media obtenida de estas mediciones es de 96 ppm que al convertirlo es de 0,0096 % (ver anexo 21) la cual es mucho menor. [30]

- **Exceso de aire (XAIR):** Según el análisis estadístico la media de los valores medidos es de 1,76, cuyo valor se aproxima al valor dado en la figura 2.5, donde se toma la carga del motor a 85 %, y el valor obtenidos es 1,75. [30]

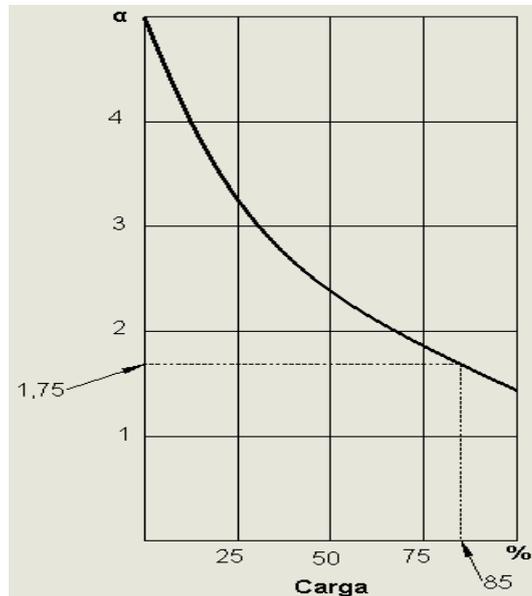


Fig. 2.5 Variación del exceso de aire en función de la carga para motor Diesel. [30]

- **Eficiencia de combustión EFF:** El valor medio obtenido de eficiencia de la combustión es de 71,5 %, lo cual está dentro del rango dado para motores diesel que es de 70-85 %. [30]
- **Óxidos de nitrógenos NO<sub>x</sub> y Dióxido de azufre SO<sub>2</sub>:** Estos son gases contaminantes y se pueden verificar con la norma cubana NC-TS 803 2010 para el control de emisiones, la cual da valores máximos permisibles para estos contaminantes lo cual se muestra tabla 2.8, para realizar esta comparación es necesario llevar los valores medidos de ppm a  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  la metodología para esto se encuentra en el anexo 21. [Error! Reference source not found.]

**Tabla 2.8** Concentraciones de gases contaminantes medidos en el escape VS límite máximo permisible según NC-TS 803: 2010. [Error! Reference source not found.]

Valores a comparar	Emisiones, mg/Nm <sup>3</sup> referidas a: 273,15 K y 101,325 kPa, de gases secos, O <sub>2</sub> ref 15%)	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Media de valores medidos	1042,1	No+No <sub>2</sub> =1214,2
NC-TS 803: 2010	<b>2000</b>	<b>1850</b>

Al comparar los valores de concentración de gases contaminantes medidos en el escape con los límites máximos permisibles según la norma cubana NC-TS 803 2010 mostrados en la tabla 2.8 se observa que en todos los caso se cumple que las concentraciones, se hayan por debajo del límite establecido, siendo el valor más cercano al límite el determinado NO<sub>x</sub>.

En la tabla 2.9 se comparan los parámetros medidos en la tesis “Valoración del impacto sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Clara de la generación de electricidad con grupos electrógenos a base de combustible fuel oil”, los cuales coinciden con las medias de los parámetros medidos en esta tesis, y confirman la validez y veracidad de los mismos.

**Tabla 2.9** Comparación entre de datos de mediciones tomadas. [2]

Parámetros	U/M	Med. 1	Med. 2
O <sub>2</sub>	%	13,25	13,3
NO	ppm	901	877,2
NO <sub>2</sub>	ppm	10	14,8
SO <sub>2</sub>	ppm	369	364,5
CO <sub>2</sub>	%	5,99	5,8

*nota: Med. 1: medición tomada de la tesis “Valoración del impacto sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Clara de la generación de electricidad con grupos electrógenos a base de combustible fuel oil”.*

*Med. 2: medición tomada de la presente tesis.*

La importancia del análisis estadístico es la verificación de valores que estén fuera del intervalo de confianza, investigar las causas que lo provocan y aplicar medidas correctivas. En la tabla 2.10 se muestra un ejemplo para los parámetros fuera del intervalo de confianza y la causa que provocan esto.

**Tabla 2.10** Análisis de algunos valores fuera del intervalo de confianza.

Comp.	Valor	Central/motor	Causa Raíz
Temp. Escape °C	383	Sagua 110/5	La prueba de hermeticidad arrojó problemas de asentamiento en válvulas y pase de gases al cárter. Al desmontarse las culatas pudo comprobarse el mal estado de los asientos y válvulas. Mezcla rica.
O <sub>2</sub> %	15,3		
COppm	32		
CO <sub>2</sub> %	4,2		
XAIR	273,2		
EFF%	56,8		
NOppm	37		
NOxppm	50		
NO <sub>2</sub> ppm	13		
SO <sub>2</sub> ppm	189		
Temp. Escape °C	354	Santa Clara Industrial/3	Falta de hermeticidad por el mal estado de los asientos y válvulas producto a la oxidación presente en cámara de admisión. Mezcla pobre.
O <sub>2</sub> %	12,7		
COppm	184		
CO <sub>2</sub> %	6,2		
XAIR	154,9		
EFF%	72,0		
NOppm	869		
NOxppm	870		
NO <sub>2</sub> ppm	1		
SO <sub>2</sub> ppm	418		

nota: los componentes soberados son los que están fuera del intervalo de confianza.

### 2.2.2 Analizador de vibraciones en maquinaria y colector de datos VIBROTIP.

Dentro de las mediciones más importantes del diagnóstico están la medición de vibraciones, velocidad de rotación y temperatura de trabajo. El analizador de maquinaria y colector de datos VIBROTIP mostrado en la figura 2.4 es un equipo simple y portátil que permite la medición, visualización y almacenamiento de cinco mediciones de los equipos rotatorios de la industria en general. Puede medir vibraciones, nivel de cavitación, estado de rodamientos, velocidad de rotación y temperatura de trabajo. El equipo realiza, analiza y guarda las mediciones mediante sensores incorporados sin cables, ni conexiones delicadas que puedan complicar la obtención de los parámetros resultantes de la medición. Este analizador se denomina colector de datos debido a que puede transferir toda la información de las mediciones a una computadora, donde quedará almacenada para su posterior análisis de tendencias, representación gráfica y notificación de alarmas. Este analizador y colector de datos posee un canal analógico de medida, además trae

incorporado el transductor de vibración, velocidad de rotación y temperatura. Tiene una pantalla de visualización de mediciones, una batería de operación y solo dispone de tres teclas para una simple operación mediante las mediciones. [14]

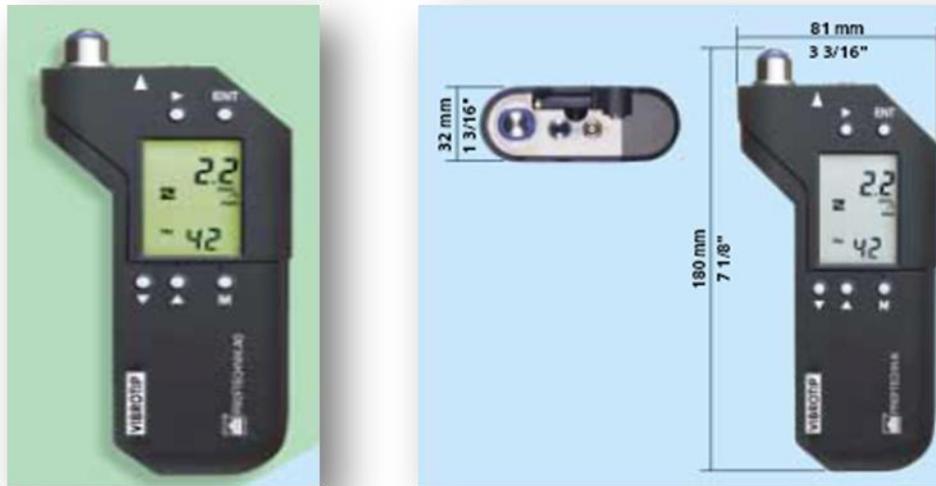


Fig. 2.6 Analizador de vibraciones en maquinaria y colector de datos VIBROTIP.

[14]

La carcasa del equipo es fabricada de un fuerte caucho diseñado para resistir a productos químicos, agua y para soportar fuertes impactos por causa de los trabajos del mantenimiento. Los demás accesorios son robustos y resisten muy fácil las salpicaduras, la suciedad y los golpes originados en los trabajos de mantenimiento. [14]

- **Funcionamiento del VIBROTIP.**

El Analizador y colector de datos VIBROTIP puede realizar las mediciones mediante los cinco accesorios y sensores ubicados en su parte superior. Dentro de ellos está la sonda de temperatura definida como una varilla flexible encargada de mantener un contacto exacto del equipo con la máquina diagnosticada sin importar en ángulo de medición, también puede medir la temperatura de determinados fluidos. Existe además el sensor rpm, que utilizando el contraste mide la velocidad de rotación en el rango de 60 a 30 000rpm desde distancias de hasta 1m. El VIBROTIP en su parte superior cuenta con dos conexiones, una es la de sondas de vibraciones externas y la otra es la de sonda de temperaturas externas.

Otro de los accesorios es el denominado VICODE que se encarga de codificar el puntero de medición mediante un sensor que es acoplado, brindado una señal

excelente de transmisión y repetitividad. Este sensor codifica el puntero con un número de punto y tipo de medición que permite que todas las mediciones de los puntos se tomen de forma automática. A su vez obtiene información de dichos puntos mediante un anillo de codificación fabricado de un material plástico, a través de la rotura de unas pestañas que conforman un código determinado. El sensor acoplado del VICODE cumple las funciones de descifrar el código captado por el anillo de plástico y recuperar las señales de la máquina sujeta a medición que necesita el instrumento. En general este dispositivo garantiza más de 8000 codificaciones utilizando un mismo transductor para descodificar y medir. Por tanto su fiabilidad es alta, ya que asegura que las mediciones se tomen en la misma dirección, localización y precisión. [14]

- **Obtención e interpretación de los resultados del VIBROTIP.**

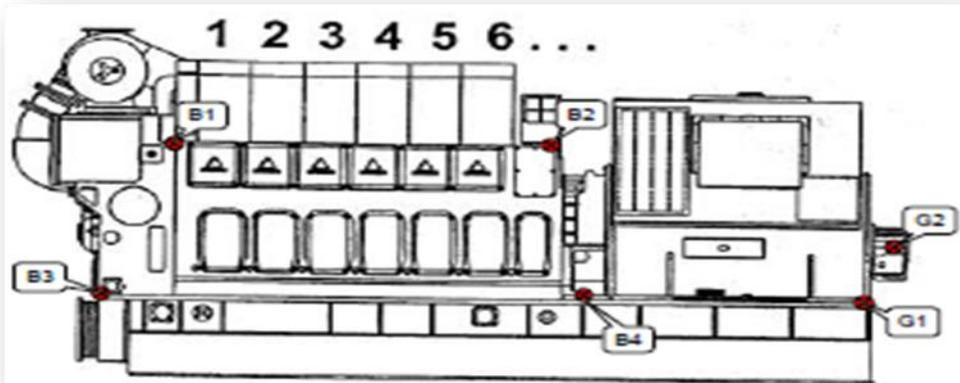
El VIBROTIP puede transmitir a una computadora las mediciones de intensidad de vibración, estados de rodamientos, temperatura, velocidad de rotación y cavitación en bombas, mediante un transmisor del tipo Interface RS-232C. Estando los datos en la PC se utiliza en su análisis el software OMNITREND (ver anexo 2).

Este programa puede supervisar un parque de máquinas e incluso señalar una alarma debida a la ocurrencia de cambios críticos en una máquina, la función anticipada extrapola la curva de tendencias, y predice cuando se excederá el límite establecido. Esto le permite responder rápidamente y tomar las medidas preventivas adecuadas. El software almacena las mediciones y las grafica, demostrando su tendencia para su posterior evaluación. Los gráficos pueden imprimirse para un mejor análisis o decisión a tomar en los ciclos de mantenimiento. [14]

- **Operaciones y requisitos para la realización de la medición:**

- 1- Revisión del apriete y estado general de los calzos antivibratorios.
- 2- La medición de los niveles de vibración del motor se realiza con la máquina funcionando con una carga estable no inferior al 85% del valor nominal de la misma.

- 3- Tener en cuenta que el funcionamiento errático del gobernador, el desajuste del mecanismo de regulación de las bombas de inyección (barra de cremalleras), así como el desbalance de las presiones máximas de combustión y la potencia entregada, inciden negativamente en el nivel de vibraciones del motor.
- 4- La evaluación del nivel de vibraciones se realizara en los siguientes casos:
  - ✓ Cada 6000 horas de rodaje con carga, según lo establece el Procedimiento FG-PM 0017."Procedimiento para la realización del proceso de diagnóstico mecánico".
  - ✓ Cuando se sustituyen calzos anti vibratorios.
  - ✓ Anterior y posterior la ejecución de los mantenimientos capitales.
  - ✓ Anterior al desacople y posterior al acoplamiento del alternador por acciones de mantenimiento o averías.
- 5- Los puntos de medición para cada tecnología se detallan a continuación:



[14]

Fig. 2.7 Puntos de medición para motores Hyundai HIMSEI. [14]

**Tabla 2.11** Puntos de medición para motores Hyundai HIMSEI. [14]

Puntos	Descripción	Ejes
<b>B1</b>	Extremo delantero. Reborde superior.	
<b>B2</b>	Extremo trasero. Reborde superior	
<b>B3</b>	Extremo delantero. Base de la estructura (Block)	X,Y,Z
<b>B4</b>	Extremo trasero. Base de la estructura del generador.	
<b>G1</b>	Extremo posterior del generador. Base de la estructura	
<b>G2</b>	Rodamiento del generador	

### 2.2.2.1 Datos obtenidos con el Vibrotip.

Estas mediciones fueron realizadas en varias centrales de la Generación Distribuida a carga estable (85%) aproximadamente a las mismas horas de trabajo, en la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos en la central Santa Clara 110, lo demás datos se pueden ver en el anexo 7.

**Tabla 2.12** Santa Clara 110

# de motor	Horas	Puntos de medición (mm/s)																			
		B1			B2			B3			B4			G1			G2			Turbo	
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Y	Z
1	24040	4,4	5	5,1	3,6	6,4	5,7	3,3	5,1	5,7	3,3	3,6	6,2	2,9	5,6	13,4	7,4	6,3	10,4	6,6	5,8
2	24711	4,4	6,5	4,4	3,3	6,4	5,4	3,3	5,7	5,5	3,3	3,8	6,2	3,6	8,1	15,3	7,2	8,7	13,2	7,7	5,3
3	24402	4,8	5,5	3,5	3,7	5,7	5,3	3,5	6,1	4,3	3,9	4	5,5	3,7	7,4	14,7	7,6	8,1	12,1	7	5,3
4	23353	4,7	8,1	4,4	3,9	6,7	5,8	3,4	5,8	5,5	3,9	4,2	6,8	3,9	8,8	15,5	7,7	9,8	12,8	6,4	6,2
6	24106	4,2	6	3,3	3,9	6,2	5,6	3,1	5,4	4	3,1	4,1	5,8	3,2	7,9	14,5	10,4	11,3	15,2	6,9	4,5
7	23278	5,2	6,3	4,7	5	7,1	6,1	4,5	5,5	5,8	4,7	3,9	7	4,6	7	15,3	9,6	7,8	12,3	8,5	5,8
8	24793	5,8	6,1	5,7	5,4	7	6	6,3	6,4	6,6	6,5	4,2	5,8	6,4	9,1	12,8	10,6	9,1	12,1	8	7
9	25015	5	5,3	4	4,3	7	5,3	3,5	5,2	4,6	3,9	3,4	6,2	3,6	7,2	14	8,9	8,3	10,8	8	4,9
10	25945	4,2	5,7	4,1	3,4	6,4	5,6	2,9	5,2	4,9	3,4	3,3	6	3,3	7,7	13,4	8,6	8,9	11,3	9,2	5,3
11	25466	6,4	5,5	4,9	5,8	6,9	5,3	6,2	5,8	5,3	6,2	4,1	5,8	6,2	8,2	13,8	8,3	7,9	12,7	8	5,5
12	26035	3,8	5,5	3,3	3,4	6,7	5,2	2,7	5,9	4	3,1	3,8	5,8	3	8,7	15,1	7,9	9,9	11,8	6,2	4,1

### 2.2.2.2 Análisis de los datos obtenidos.

Según el “Registro para el control del nivel de vibraciones de los motores HYUNDAI HIMSEN 9H 21/32 y 9H 25/33”, el valor permisible para los puntos B1, B2, B3, B4 es  $\leq 28$  mm, y para los puntos G1, y G2 es  $\leq 18$  mm, pero ellos no tienen un valor límite para las vibraciones en el turbo cargador, viéndose la necesidad de realizar un análisis estadístico para determinar el valor admisible para el cual el turbo cargador trabaja normalmente, para esto se utiliza el software SPSS (ver figura 2.3). [14]

*Paso para el análisis:*

1. Los motores se analizaron a la misma carga (85%) y similares horas de trabajo.
2. Agrupar los datos obtenidos en una tabla (ver anexo 8).
3. Introducir los valores en el SPSS introduciendo los puntos como si fueran uno (ver anexo 9).
4. Realizar el análisis estadístico para una confiabilidad del 95 % (ver figura 2.4).

A partir del gráfico de dispersión obtenido el SPSS (ver anexo 10), se logró determinar el intervalo de confianza, pero como en las vibraciones el valor máximo es el que importa, se toma como valor admisible, y se muestra en la tabla 2.13.

**Tabla 2.13** Datos obtenidos con el SPSS.

Puntos de turbo	media	desviación típica	valor admisible
Y-Z	6,6	1,4	$\leq 7,1$

Con esto se pueden determinar cuando el turbo está trabajando por encima del rango admisible se debe verificar las causas que provocan la vibración, por ejemplo el turbo cargador del motor 8 de la central Santa Clara Industrial (ver anexo 7), en el eje Y presenta problemas, ya tiene vibraciones de 8,3 mm/s que supera el valor admisible, pero las causa que provocan esto no son debido a daños en el mismo, sino que son debido al mal estado de la virola de una de las uniones de las tuberías asociada a la limpieza del turbo.

### **2.3 Conclusiones Parciales.**

1. El diagnóstico que se le aplica a los motores está dividido en dos, uno es la toma de parámetros los cuales son tomados por la EMGEF y por la Generación Distribuida a través de registros de diagnóstico y el monitoreo SCADA estos parámetros se muestran a continuación, y el otro son los dispositivos de diagnóstico que aplica la EMGEF.
2. Después de de realizar el análisis estadístico de todas las mediciones realizadas con el Tempest 100 se logro determinar un intervalo de confianza para cada componentes medidos por el dispositivo, estos valores fueron comprobados dando como resultado la fiabilidad de los mismos.
3. Gracias a un análisis estadístico se determino el valor máximo el cual el 7,1 mm/s, el cual determina la presencia o no de averías en el turbo cargador, este valor es probado gracias a un ejemplo de una falla real.

## Capítulo 3. Fallas en lo motores de la generación distribuida.

### 3.1 Análisis del historial de fallas.

Este trabajo es una recopilación de todas las fallas ocurridas en las centrales eléctricas de la generación distribuida en Villa Clara durante el año 2012 y hasta marzo del 2013, las cuales se han introducido en un documento Excel ([LEYENDA Causa Raíz de Averías](#)), separándolos por: [15]

- ✓ Central Eléctrica
- ✓ Número de Motor
- ✓ Equipo o parte
- ✓ Causa raíz
- ✓ Fecha de avería
- ✓ Horas de trabajo de motor
- ✓ Tiempo de reparación

De este análisis se pueden obtener datos como los que se muestran en la tabla 3.1, donde se muestran cuales son la piezas que más fallas presentan los motores

**Tabla 3.1** Piezas que más fallan en todas las centrales.

Equipo o Parte	# de fallas
Culata	21
Gobernador	20
Múltiple de escape	19
Camisa	15
Bloque de alta	9
Inyector	7
tubería de alimentación	7
Bomba de combustible	6
Turbo Cargador	5
Bomba agua	5
Motor de arranque	4
Ventilador del radiador	3
Tub. drenaje	2
Válvula Parada Emerg.	2
F Dúplex	2
tubería del drenaje de agua del aire de de carga	2
Bomba aceite	2
Filtro de aceite	2
otro	1

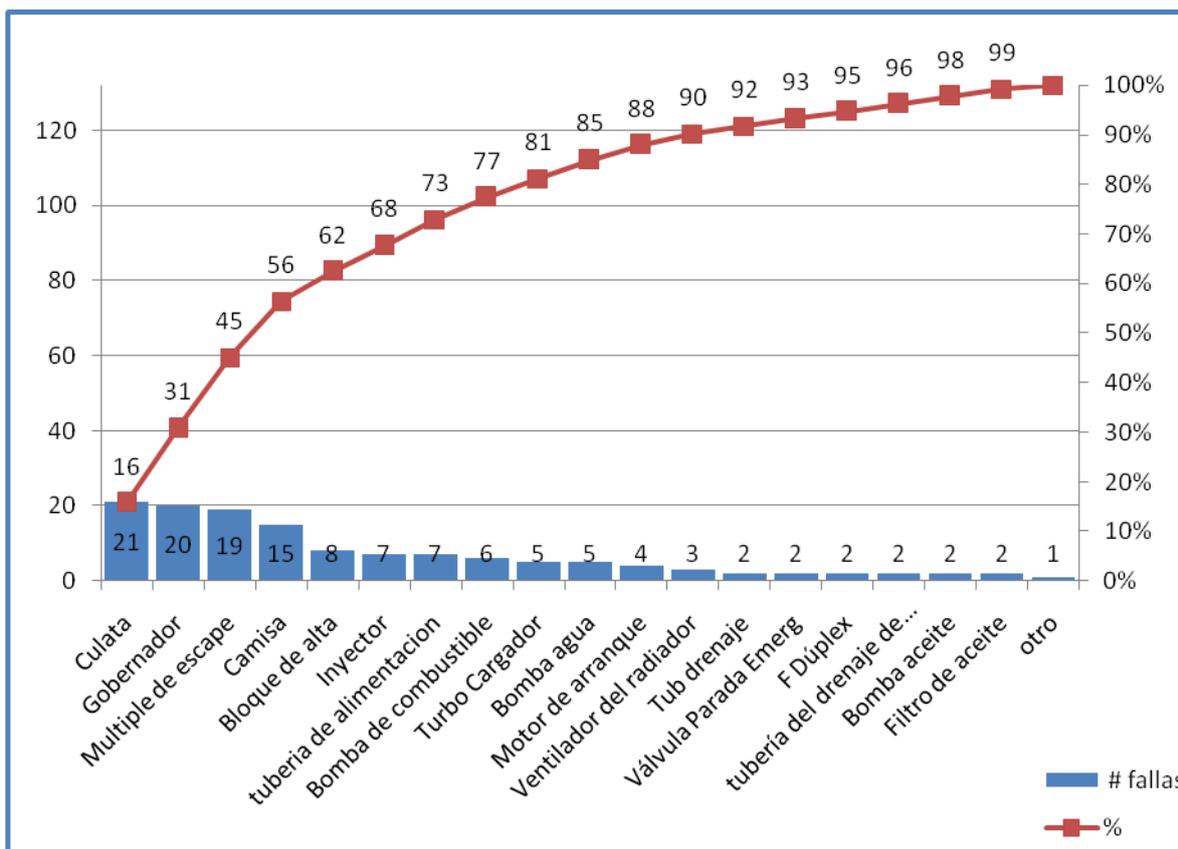


Fig. 3.1 Fallas por equipo o parte en todas las centrales.

Con este análisis se logra determinar que el 81 % de las piezas que más frecuencia de fallas presentan son:

- ✓ Culata
- ✓ Gobernador
- ✓ Múltiple de escape
- ✓ Camisa
- ✓ Bloque de alta
- ✓ Inyector
- ✓ tubería de alimentación
- ✓ Bomba de combustible
- ✓ Turbo Cargador

De estas la culata con 21 es la que más fallas presenta (fig. 3.2), ocurren debido al deterioro de la misma y produce generalmente alta temperatura en los gases de escape. [15]



Fig. 3.2 Culata dañada. [15]

### 3.1.1 Análisis del historial de fallas por centrales eléctricas.

Este análisis se realiza teniendo en cuenta las centrales que más fallas presentaron en el período evaluado, estas son:

- **Santa Clara 110.**

Esta central eléctrica se encuentra ubicada en el municipio Santa Clara y posee tres baterías de cuatro motores Hyundai HIMSEI, en la misma se encontraron un total de 28 fallas como se muestra en la tabla 3.3 a):

Tabla 3.3 a) Fallas por equipo o parte en SC 110

Pieza o Parte	# de fallas
Culata	6
Múltiple de escape	6
Gobernador	4
Bloque de alta	2
Tubería de alimentación	2
Camisas	2
otros	1

En la figura 3.3 a) con la ayuda del diagrama de Pareto se concluye que el 79 % de todas las fallas ocurren en los equipos:

- ✓ Culata
- ✓ Múltiple de escape
- ✓ Gobernador
- ✓ Bloque de alta

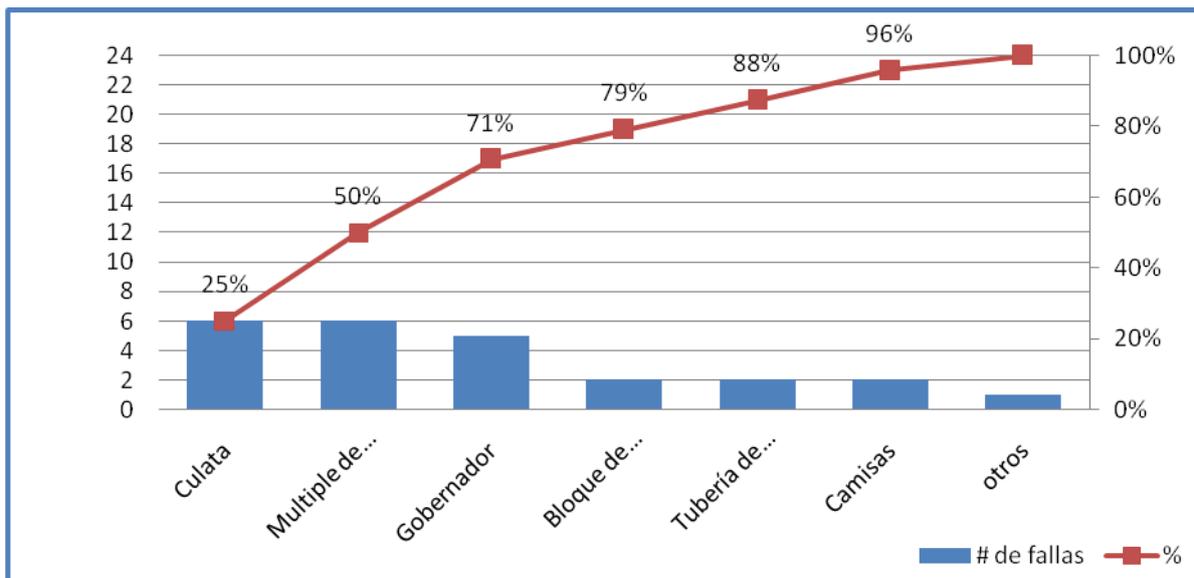


Fig. 3.3 a) Fallas por equipo o parte en SC 110.

- **Santa Clara Industrial.**

Esta central eléctrica se encuentra ubicada en el municipio Santa Clara y posee tres baterías de cuatro motores Hyundai HIMSEI, en la misma se encontraron un total de 69 fallas de las cuales la culata (7 fallas), y el bloque de alta e inyector (6 fallas) fueron las piezas más afectadas como lo indica la tabla 3.3 b).

Tabla 3.3 b) Fallas por equipo o parte en SCI

Equipo o Parte	# de fallas
<b>Culata</b>	7
<b>Bloque de alta</b>	6
<b>Inyector</b>	6
<b>Camisa</b>	5
<b>Bomba de combustible</b>	5
<b>Múltiple de escape</b>	4
<b>Gobernador</b>	4
<b>Turbo Cargador</b>	4
<b>Bomba agua</b>	4
<b>tubería de alimentación</b>	3
<b>Tub. drenaje</b>	2
<b>Válvula Parada Emerg.</b>	2
<b>Motor de arranque</b>	2
<b>otros</b>	1

En la figura 3.3 b) con la ayuda del diagrama de Pareto se concluye que el 82 % de todas las fallas ocurren en los equipos:

- ✓ Culata
- ✓ Bloque de alta
- ✓ Inyector
- ✓ Camisa
- ✓ Bomba de combustible
- ✓ Múltiple de escape
- ✓ Gobernador
- ✓ Turbo Cargador
- ✓ Bomba agua

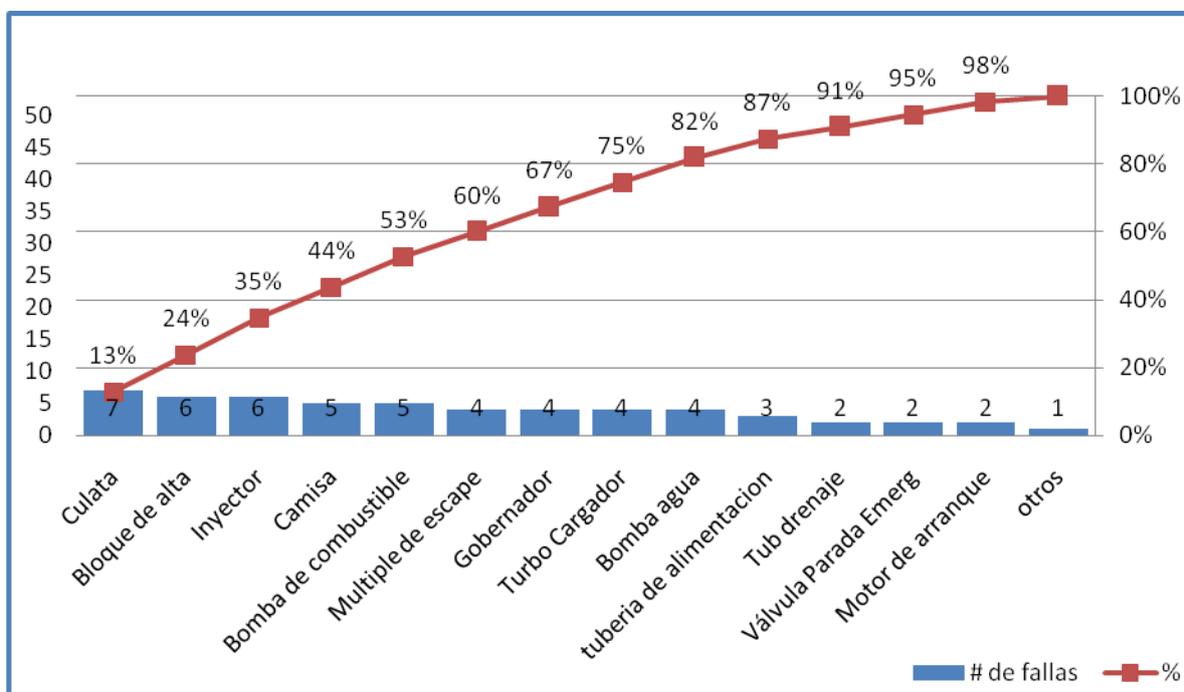


Fig. 3.3 b) Fallas por equipo o parte en SCI

- **Sagua 110.**

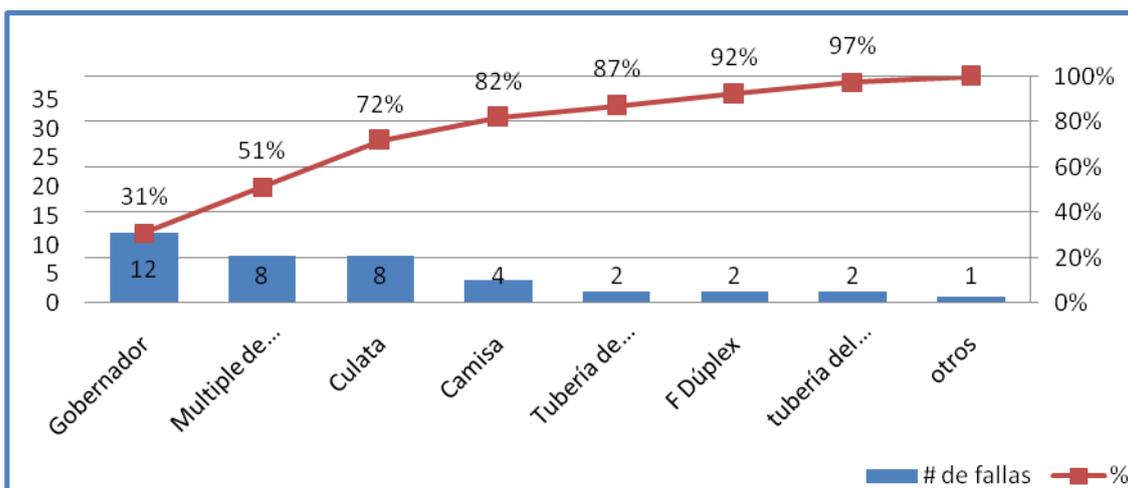
Esta central eléctrica se encuentra ubicada en el municipio Sagua la Grande y posee tres baterías de cuatro motores Hyundai HIMSEI, en la misma se encontraron un total de 47 fallas de las cuales el gobernador (7 fallas), el múltiple de escape y la culata (6 fallas) fueron las piezas más afectadas como lo indica la tabla 3.3 c).

**Tabla 3.3 c) Fallas por equipo o Parte en SG 110**

Equipo o Parte	# de fallas
Gobernador	12
Múltiple de escape	8
Culata	8
Camisa	4
Tubería de alimentación	2
F Dúplex	2
tubería del drenaje de agua del aire de de carga	2
otros	1

En la figura 3.3 c) con la ayuda del diagrama de Pareto se concluye que el 82 % de todas las fallas ocurren en los equipos:

- ✓ Gobernador
- ✓ Múltiple de escape
- ✓ Culata
- ✓ Camisa



*Fig. 3.3 c) Fallas por equipo o parte en SG 110*

Con este análisis se concluye que los equipos o partes que más fallas presentan por centrales, convirtiéndose en un método de diagnóstico, ya que permite tomar decisiones y modificar el mantenimiento preventivo que se aplica actualmente a estos motores en vista de disminuir el número de fallas.

### 3.2 Análisis de confiabilidad en los motores de la generación distribuida.

Este estudio se realiza con el objetivo de determinar si algunos de los equipos estudiados presentan tiempos medio entre fallas menores que el tiempo de mantenimiento preventivo planificado que se le aplica a estos motores (ver anexo

21), lo que indica que la pieza está fallando antes de que se le aplique el mantenimiento, y debe modificarse, para este análisis es necesario recopilar datos de cada equipo o parte, estos datos son:

- ✓ # de Motor
- ✓ Modo de falla
- ✓ Causa raíz
- ✓ Horas de funcionamiento de los elementos afectados
- ✓ # de elementos afectados

Y definir los siguientes aspectos:

*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:* Se define como tasa de fallas ( $\omega$ ) a la 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: [24; 21]

$$\omega = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{miles de horas}}$$

*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.

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega}$$

**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. Existen diversos criterios para el cálculo de la confiabilidad los cuales pueden estar basados en métodos elementales o en función del género de elementos analizados y sus funciones, adoptan carácter exponencial, logarítmico, etc. La presente instrucción establece como base de cálculo una de las modalidades más sencillas a utilizar. Esta última modalidad puede ser expresada mediante la ecuación: [24; 21]

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

Donde:

$P_{(t)}$ .- Confiabilidad para una etapa establecida; (%)se acepta una que un equipo es confiable de  $\geq 75\%$ .

$N_o$ .- 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 [24; 21]

### **3.2.1 Centrales eléctricas estudiadas.**

Para este trabajo se realiza un estudio de las fallas recopiladas en las centrales Santa Clara 110 y Santa Clara Industrial, debido a su cercanía y la facilidad para obtener datos de las mismas, de estas centrales se asignaron para el estudio los tres primeros equipos que más fallas presentan (ver figuras 3.3).

- **Santa Clara 110.**

Los datos recopilados se incluyeron en las tablas 3.4.

**Tabla 3.4 a)** Datos de la culata (ver figura 3.2).

Motor	Modo de falla (fecha)	Causa raíz	Horas de funcionamiento de los elementos afectados	# de elementos afectados
4	Salidero agua puerto de inspección (21-7-12)	Junta tórica A15000-192 dañado.	7967	1
5	Salidero de agua por puerto de inspección C6 (10-5-12)	Junta tórica dañadas	5550	1
5	Alta temperatura en varios cilindros (2-5-12)	Falta de hermeticidad	5440	3
7	Ruidos anormales en el escape (4-12-12)	Grietas en material de las válvulas de admisión	10114	9
9	Baja hermeticidad en cilindro 4 (20-12-12)	Válvulas y asientos de escape dañados	1093	1

$$N_0 = 9 * 12 = 108$$

$$\omega = \frac{\text{Núm.fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{1+3+9+1+1}{5,550+3*5,440+9*10,114+10,93+7,967} = 0,12$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,12} * 1000 = 8786 \approx 8800 \text{ horas}$$

$$P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} * 100 = \frac{108 - 15}{108} * 100 = 0,861 * 100 = 86\%$$

**Tabla 3.4 b)** Datos del múltiple de escape (ver anexo 14).

Motor	Modo de falla (fecha)	Causa raíz	Horas de funcionamiento de los elementos afectados	# de elementos afectados
2	Salidero de gases por el múltiple. (11-6-12)	Deterioro de elementos de fijación en el múltiple	8690	1
11	Salidero de gases por el múltiple. (14-6-12)	Deterioro de elementos de fijación en el múltiple y falla por fatiga de compensadores.	11350	1
11	Salidero de gases por el múltiple C9(3-7-12)	Rotura de elemento de fijación.	23637	1
3	Salidero de gases C8(16-7-12)	Rotura de elemento de fijación.	20966	1
8	Salidero de gases por el múltiple. (25-7-12)	Rotura de los compensador axiales por Falla del material por fatiga.	23303	1

$$N_0 = 12 \quad \omega = \frac{\text{Núm.fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{5}{8.690+11,350+23,637+20,966+23,303} = 0,102$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,102} * 1000 = 9804 \approx 9800 \text{ horas}$$

$$P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} * 100 = \frac{12-5}{12} * 100 = 58 \%$$

**Tabla 3.4 c)** Datos del gobernador (ver anexo 15).

Motor	Modo de falla (fecha)	Causa raíz	Horas de funcionamiento de los elementos afectados	# de elementos afectados
8	El gobernador no regula la carga. (8-6-12)	Desgaste en el cuadrado de la espiga y la pieza que forma parte del acoplamiento.	10495	1
12	Fallo en la parada por el botón del gobernador(13-8-12)	Rotura de un conductor en la válvula solenoide	24237	1
11	Inestabilidad en el funcionamiento del gobernador.	Tuerca y tornillo sin fin desacoplado.	26505	1

$$N_0 = 12$$

$$\omega = \frac{\text{Núm.fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{3}{10,495+24,237+26,505} = 0,049$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,049} * 1000 = 20408 \approx 20400 \text{ horas}$$

$$P_{(t)} = \frac{N_0 - N_t}{N_0} * 100 = \frac{12-3}{12} * 100 = 0,75 * 100 = 75 \%$$

Con este análisis se puede pronosticar que:

✓ La probabilidad de la no ocurrencia de fallas en la culata hasta 8800 horas de funcionamiento es de un 86%, lo cual determina que es confiable el funcionamiento de la misma durante ese tiempo.

✓ La probabilidad de la no ocurrencia de fallas en el múltiple de escape hasta 9800 horas de funcionamiento es de un 58%, lo cual indica que no es confiable su funcionamiento en ese periodo de tiempo.

✓ La probabilidad de la no ocurrencia de fallas en el gobernador hasta 20400 horas de funcionamiento es de un 75%, lo cual determina que es confiable el funcionamiento de la misma durante ese tiempo.

- **Santa Clara Industrial.**

**Tabla 3.5 a)** Datos de la Culata (ver figura 3.2)

Motor	Modo de falla (fecha)	Causa raíz	Horas de funcionamiento de los elementos afectados	# de elementos afectados
2	Salidero de agua por puerto de inspección C2 y 5.(14-6-12)	Junta tórica dañadas.	5506	2
3	Alta temperatura de los gases de escape en varios cilindros. (18-7-12)	Falta de hermeticidad en 2 culatas	7329	2
10	Ruidos anormales en cilindro 6. (16-08-12)	Tuerca del balancín de admisión floja	18809	1
3	Salidero de agua por puerto de inspección C8. (5-9-12)	Junta tórica A15000-192 dañado.	8062	1
9	Alta temperatura de los gases de escape en varios cilindros (17-9-12)	Falta de hermeticidad por el mal estado de los asientos y válvulas producto a la oxidación presente en cámara de admisión.	8766	9
10	Alta temperatura de los gases de escape en varios cilindros (01-01-12)	Falta de hermeticidad por el mal estado de las válvulas de escape.	8767	2

$$N_0 = 108$$

$$\omega = \frac{\text{Núm.fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{17}{2*5,506+2*7,329+18,809+8,062+9*8,766+2*8,767} = 0,114$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,114} * 1000 = 8772 \approx 8800 \text{ horas}$$

$$P_{(t)} = \frac{N_0 - N_t}{N_0} * 100 = \frac{108 - 17}{108} * 100 = 0,84 * 100 = 84 \%$$

Tabla 3.5 b) Datos del Bloque de Alta (ver anexo 16).

Motor	Modo de falla (fecha)	Causa raíz	Horas de funcionamiento de los elementos afectados	# de elementos afectados
1	Salidero de combustible por la tubería de alimentación. (04-06-12)	Deterioro de junta tórica.	17517	1
10	Salidero en sistema del combustible bloque alta presión del cilindro 1 y 8 (6-7-12)	Mal montaje de la junta tórica	459	1
8	Salidero de combustible (05-08-12)	Deterioro de la junta tórica A52-300-116	739	1
2	Salidero de combustible (06-08-12)	Rajadura del bloque de alta	18506	1
10	Salidero de aceite por la bomba de agua (28-08-12)	Deterioro de la junta tórica	6981	1

$$N_0 = 108$$

$$\omega = \frac{\text{Núm.fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{5}{17,517+0,459+0,739+18,506+6,981} = 0,113$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{0,113} * 1000 = 8850 \text{ horas}$$

$$P_{(t)} = \frac{N_0 - N_t}{N_0} * 100 = \frac{108 - 5}{108} * 100 = 0,9537 * 100 = 95 \%$$

**Tabla 3.5 c)** Datos del Inyector (ver anexo 17).

Motor	Modo de falla (fecha)	Causa raíz	Horas de funcionamiento de los elementos afectados	# de elementos afectados
2	Alta temperatura de los gases de escape en varios cilindros (6-7-12)	Toberas de inyección defectuosas	1516	4
3	Alta temperatura de los gases de escape en varios cilindros (10-7-12)	Toberas de inyección defectuosas	1400	4
10	Alta temperatura en los cilindros. (02-08-12)	Todas las Toberas de inyección defectuosa	566	9
11	Alta temperatura en los cilindros. (02-08-12)	Todas las Toberas de inyección defectuosa	276	9
2	baja temperatura de los gases de escape del cilindro 3 (10-9-12)	Tobera del inyector defectuosa	1175	1

$$N_0 = 108$$

$$\omega = \frac{\text{Núm.fallas}}{\text{miles de horas}} = \frac{27}{4*1,516+4*1,4+9*0,566+9*0,276+1,175} = 1,322$$

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{1,322} * 1000 = 756 \approx 760 \text{ horas}$$

$$P(t) = \frac{N_0 - N_t}{N_0} * 100 = \frac{108 - 27}{108} * 100 = 0,75 * 100 = 75 \%$$

Con este análisis se puede pronosticar que:

- ✓ La probabilidad de la no ocurrencia de fallas en la culata hasta 8800 horas de funcionamiento es de un 84%, lo cual determina que es confiable el funcionamiento de la misma durante ese tiempo.
- ✓ La probabilidad de la no ocurrencia de fallas en el bloque de alta hasta 8850 horas de funcionamiento es de un 95%, lo cual determina que es confiable el funcionamiento de la misma durante ese tiempo.
- ✓ La probabilidad de la no ocurrencia de fallas en el inyector hasta 760 horas de funcionamiento es de un 75%, lo cual determina que es confiable el funcionamiento de la misma durante ese tiempo.

### 3.2.2 Análisis de los resultados.

Este estudio se basa en la comparación del tiempo medio entre fallas obtenidas para las piezas estudiadas de cada central y compararlos con los tiempos de mantenimientos que establece el mantenimiento preventivo planificado que se aplica a los motores de la Generación Distribuida (ver anexo 21), con vista a proponer mejoras en vista de un mantenimiento más eficiente y disminuir las pérdidas en los mismos. Para esto se toman las piezas con tiempos medios entre fallas que tengan una confiabilidad del 75 % o más, y se introducen en la siguiente tabla donde se compara con los tiempos de mantenimiento que se le aplican actualmente.

**Tabla 3.6** Comparación entre el MPP y el TMEF.

Central Eléctrica	Equipo o Parte	TMEF (horas)	MPP (horas)	Comparación
SC110	Culata	8800	1200	Estas piezas presentan tiempos

<b>SC 110</b>	Gobernador	20400	6000	medios entre fallas mayores a los tiempos de mantenimiento preventivos planificados que se le aplican, lo cual indica una correcta planificación del mismo.
<b>SCI</b>	Culata	8800	1200	
<b>SCI</b>	Bloque de alta	8850	2000	

**Tabla 3.6** Continuación.

Central Eléctrica	Equipo o Parte	TMEF (horas)	MPP (horas)	Comparación
<b>SCI</b>	Inyector	760	2000	Esta pieza presenta tiempo medio entre fallas mucho menor al tiempo de mantenimiento preventivo, lo cual indica que deba variarse es tiempo de mantenimiento a 700 horas para evitar la falla, y se recomienda un análisis de las causa que la provocan para determinar si ocurre por la mala planificación del mantenimiento o por otros factores.

### 3.3 Análisis de las principales fallas.

Con el estudio realizado en el epígrafe 3.1, al determinar 80% los equipos o partes que más fallas presentan en las centrales (figura 3.1), de los cuales se analizara la falla más frecuente que presenta, se asignaron para el estudio de las fallas que presentan los siguientes equipos:

- ✓ Camisas
- ✓ Bloque de alta
- ✓ Tubería de alimentación
- ✓ Bomba de combustible
- ✓ Turbo cargador

#### 3.3.1 Fallas en las camisas:

En las camisas la única falla que se produjo fue la presencia de grietas en ellas. El siguiente análisis se realizó se forma inicial para verificarlo se recomienda realizar un estudio más detallado.

Esta falla a ocurrido en 10 motores de cuatro centrales diferentes, lo que primero se observa es un salidero de aceite en la camisa de agua y en el block, al desmontar se observa una deformación el block y en la camisa se observa que solo está apoyada en el lado de la bomba y del escape, después de un primer estudio se llega a la conclusión que la causa de la falla es debido al material del block que al deformarse la camisa se apoya en estos dos lados, y por fatiga debido al movimiento del pistón se produce una grieta la cual va de afuera hacia adentro (ver anexo 12). En cuanto a la posición de la camisa esta no tiene apoyo en la parte inferior al contrario de la forma en que está ubicada la camisa de MAN que si lo tiene, todo esto se puede observar en las siguientes figuras: [15]

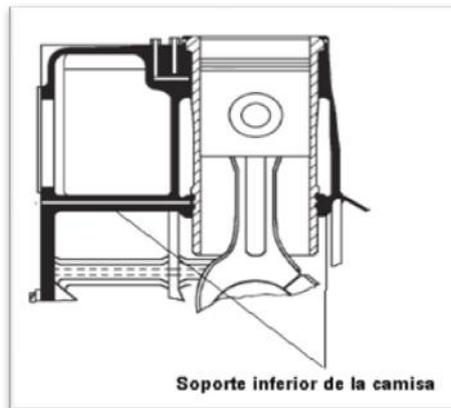


Fig. 3.4 Vista de la camisa del motor MAN. [16]

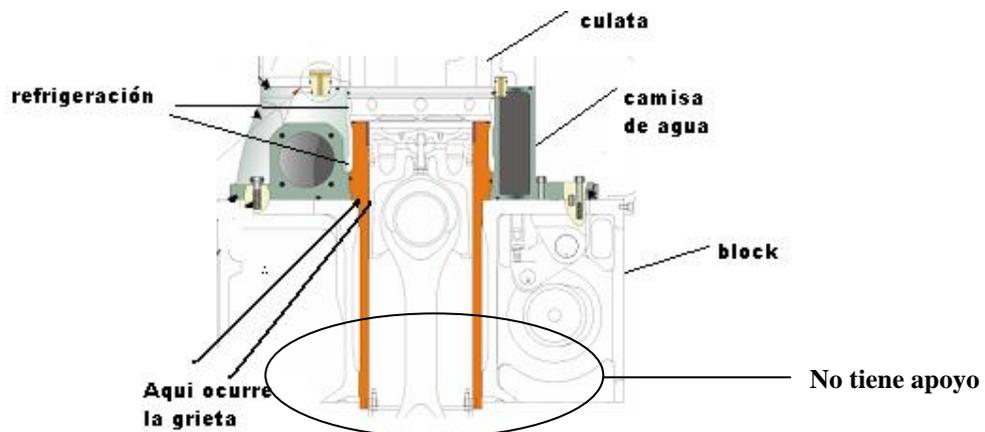


Fig. 3.5 Vista del motor HYUNDAI [1]

Los datos recopilados en las centrales sobre de las fallas en las camisas se introdujeron en la tabla “[camisas rajadas](#)”, la cual permite llegar a conclusiones como que la central que más ha presentado esta falla es Calabazar, el primer indicio de la falla es el derrame de aceite entre la camisa de agua y el block, las fallas ocurren en lado de la bomba y del escape, las grietas han presentado una longitud que va de 100 hasta 300 mm, y todas han ocurrido a partir de las 20000 horas de trabajo. [15]

### 3.3.2 Fallas en el bloque de alta.

El bloque de alta (ver anexo 16) ha fallado en las centrales Santa Clara 110 (2), Santa Clara Industrial (6), y Sagua 110 (1), las fallas que ha presentado son las siguientes:

- ✓ Fallas en la junta Tórica (7).
- ✓ Mala manipulación (tubo de inyección deformado) (1).
- ✓ Bloque de alta rajado producto a defectos internos del material (2).

Dentro de estas la falla que más se repite es la falla en la junta tórica, la cual se analiza en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Fallas en la junta Tórica (ver anexo 18)

<b># de repeticiones</b>	7
<b>Modo de falla</b>	Salidero de combustible
<b>Causas inmediatas</b>	Perdida de combustible.
<b>Causa básicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Juntas en mal estado.</li> <li>• Deterioro en superficies de asiento de las uniones.</li> <li>• Deterioro de los conductos o tubería.</li> </ul>
<b>Evaluación de las causas básicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se detecta deterioro de la junta torica (A52-300-116), ubicado en la cabeza de la bomba.</li> <li>• No se detecta deterioro en superficie de asiento.</li> <li>• No se detecta deterioro en conductos o tubería.</li> </ul>
<b>Causa raíz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deterioro de la junta (A52-300-116), ubicado en la cabeza de la bomba.</li> </ul>
<b>Medidas Correctivas</b>	Cambio de la junta torica.

<b>Tiempo estimado para la solución de la avería (días)</b>	1
---	---

### 3.3.3 Fallas en la tubería de alimentación.

La tubería de alimentación (ver anexo 19) ha fallado en las centrales Santa Clara 110 (2), Santa Clara industrial (3), y en Sagua 110 (2), en ellas la falla que ocurrió fue el mal estado de elementos sellantes o juntas tóricas (ver anexo 18), la cual se analiza en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Mal estado de los elementos sellantes.

<b># de repeticiones</b>	3
<b>Modo de falla</b>	Salideros de combustible en la tubería de alimentación.
<b>Causas inmediatas</b>	Perdida de combustible.
<b>Causa básicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mala manipulación en el montaje de elementos.</li> <li>✓ Deterioro de los elementos sellantes en las uniones por el tiempo en uso.</li> <li>✓ Mala calidad de la goma</li> <li>✓ Problemas de diseño (medida) del elemento sellante.</li> <li>✓ Frecuentes paradas y arranques del motor.</li> </ul>
<b>Evaluación de las causas básicas</b>	Durante la revisión se apreció el mal estado de elementos sellantes.
<b>Causa raíz</b>	Mala manipulación durante el montaje ocasionaron daños a las juntas
<b>Medidas Correctivas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revisión del estado de los elementos sellantes.</li> <li>✓ Sustitución de las juntas tóricas de la tubería de alimentación</li> </ul>
<b>Tiempo estimado para la solución de la avería (días)</b>	1

### 3.3.3 Fallas en la bomba de combustible.

La bomba de combustible (ver anexo 20) ha presentado fallas en las centrales eléctricas Santa Clara Industrial (5), y Sagua 110 (1), en ellas las fallas que ha presentado la bomba de combustible son las siguientes:

- ✓ Deterioro de la Junta tórica de las bombas (3)
- ✓ Deterioro de superficie de deslizamiento del ensamble cilíndrico (1)

- ✓ Cremalleras se encuentran atascadas debido a suciedades (1)
- ✓ Suciedades en las superficies de contacto entre la arandela metálica y el cuerpo de la bomba (1).

Dentro de estas la falla que más se repite es el deterioro de la junta tórica de las bombas, la cual se analiza en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8** Deterioro de la junta tórica de las bombas.

<b># de repeticiones</b>	3
<b>Modo de falla</b>	Salidero de combustible por electroválvula de parada de emergencia.
<b>Causas inmediatas</b>	Perdida de combustible.
<b>Causa básicas</b>	Problemas de sellaje en la bomba de inyección por lo que el combustible inunda el sistema de parada de emergencia (sistema que acciona la retirada de las cremallera de las bombas)
<b>Evaluación de las causas básicas</b>	En la revisión efectuada pudo apresiarse combustible de retorno en la entrada de aire para el sistema de parada de emergencia de las bombas
<b>Causa raíz</b>	Deterioro de la junta tórica de las bombas
<b>Medidas Correctivas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revisión y reacondicionamiento de las bombas</li> <li>✓ Verificación de salideros.</li> </ul>
<b>Tiempo estimado para la solución de la avería (días)</b>	1

### 3.3.4 Fallas en el Turbo cargador:

Estas fallas han ocurrido en las centrales eléctricas Santa Clara Industrial (4) y Cayo Santa María (1), en ellas las fallas que ha presentado el turbo cargador son las siguientes:

- ✓ Turbo sucio (1).
- ✓ Vibraciones (1).
- ✓ Falla del material por corrosión (1).
- ✓ Deterioro de unión roscada en tubería de aire para toberas de la limpieza del turbo (1).

- ✓ Desgaste total y fin de vida útil de los casquillos de cojinetes de ambas posiciones (1).

De todas estas la corrosión es un problema que presentan todos los turbo cargadores y se manifiesta a través de grietas en la superficie del mismo, estas grietas son normadas y el estudio correspondiente se muestra a continuación.

- **Corrosión en el Turbo cargador.**

Estas fallas son grietas que ocurren en el caracol del turbo cargador (ver anexo 13), estas ocurren debido a la fatiga que sufre el turbo cargador por su movimiento continuo, las cuales se han caracterizado y se ha determinado la longitud máxima de la grieta para la cual el turbo cargador debe ser cambiado, para esto se ha dividido el turbo cargador por secciones como se muestra en la figura 3.6:

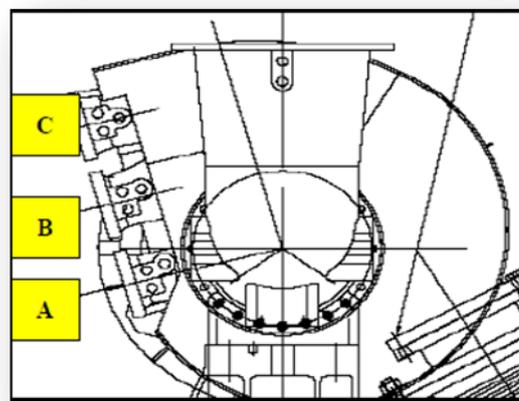
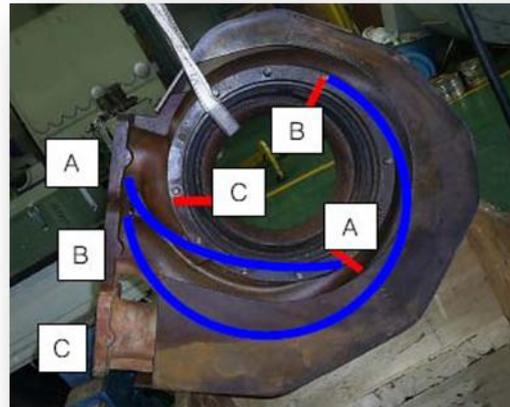


Fig. 3.6 Secciones del Turbo cargador. [17]

En la siguiente tabla se muestran las secciones y las dimensiones máximas permisibles de las grietas (ver anexo 13). [17]

**Tabla 3.9** Dimensiones permisibles de las grietas. [17]

Sección	Long. Permissible de la grieta (mm)
A	70
TH 31	45
B	140
C	140

### 3.4 Conclusiones Parciales.

1. En todas las centrales el 81 % de las piezas que más frecuencia de fallas presentan son culata, gobernador, múltiple de escape, camisa, bloque de alta, Inyector, tubería de alimentación, bomba de combustible, y turbo Cargador.

2. En la central Santa Clara 110 la culata y el gobernador, y en la central Santa Clara Industrial la culata y el bloque de alta, se determina que estas piezas presentan tiempos medios entre fallas mayores a los tiempos de mantenimiento preventivos planificados que se le aplican, lo cual indica una correcta planificación del mismo.
3. El inyector de la central Santa Clara Industrial presenta tiempo medio entre fallas mucho menor al tiempo de mantenimiento preventivo, lo cual indica que el tiempo de mantenimiento está planificado después que ocurre la falla.
4. Después de un primer estudio se llega a la conclusión que la causa de la falla es debido al block que al deformarse la camisa se apoya en estos dos lados, y por fatiga debido al movimiento del pistón se produce una grieta.
5. El bloque de alta ha fallado en las centrales Santa Clara 110, Santa Clara Industrial, y Sagua 110, y la junta Tórica es la falla que más se repite.
6. La tubería de alimentación ha fallado en las centrales Santa Clara 110, Santa Clara industrial, y en Sagua 110, en ellas la falla que ocurrió fue el mal estado de elementos sellantes o juntas tóricas.
7. La bomba de combustible ha presentado fallas en las centrales eléctricas Santa Clara Industrial, y Sagua 110, en ellas las fallas que ha presentado la bomba de combustible son el deterioro de la Junta tórica de las bombas es la que más ha ocurrido.
8. El turbo cargador a presentado fallas en las centrales eléctricas Santa Clara Industrial y Cayo Santa María, de todas estas la corrosión es un problema que presentan todos los turbo cargadores y se manifiesta a través de grietas en la superficie del mismo, éstas grietas son normadas y determinadas sus longitudes permisibles.

## CONCLUSIONES GENERALES

1. Una central eléctrica de fuel oil se divide en componentes de una batería (motor generador, planta de tratamiento de combustible y aceite, compresores, unidad de control eléctrico y caldera recuperativa) y componentes comunes (generador de arranque en negro, planta de tratamiento de agua y sala de control).
2. El motor de la central de fuel es un motor diesel 9H21/32S que está diseñado para consumir fuel oil como combustible, tiene una potencia mecánica de 1800 kW, 9 cilindros en línea y 900 rpm de velocidad nominal.
3. Después de de realizar el análisis estadístico de todas las mediciones realizadas con el Tempest 100 se logro determinar un intervalo de confianza para cada componentes medidos por el dispositivo, estos valores fueron comprobados dando como resultado la fiabilidad de los mismos.
4. Gracias a un análisis estadístico se determino el valor máximo el cual el 7,1 mm/s, el cual determina la presencia o no de averías en el turbo cargador, este valor es probado gracias a un ejemplo de una falla real.
5. En todas las centrales el 81 % de las piezas que más frecuencia de fallas presentan son culata, gobernador, múltiple de escape, camisa, bloque de alta, Inyector, tubería de alimentación, bomba de combustible, y turbo Cargador.
6. El inyector de la central Santa Clara Industrial presenta tiempo medio entre fallas mucho menor al tiempo de mantenimiento preventivo, lo cual indica que el tiempo de mantenimiento está planificado después que ocurre la falla.

7. Después de un primer estudio se llega a la conclusión que la causa de la falla es debido al block que al deformarse la camisa se apoya en estos dos lados, y por fatiga debido al movimiento del pistón se produce una grieta.
  
8. El turbo cargador a presentado fallas en las centrales eléctricas Santa Clara Industrial y Cayo Santa María, de todas estas la corrosión es un problema que presentan todos los turbo cargadores y se manifiesta a través de grietas en la superficie del mismo, éstas grietas son normadas y determinadas sus longitudes permisibles.

## **RECOMENDACIONES:**

1. Se recomienda la prueba del intervalo de confianza obtenido para los componentes de los gases analizados y el valor máximo obtenido de las vibraciones en el turbo, durante un año de funcionamiento del motor y en base a las fallas del mismo, lo cual ratifica los resultados en la práctica.
2. Realizar el análisis de determinación de del tiempo medio entre fallas ara todas las piezas y comparar los resultados con el tiempo entre mantenimiento.
3. Verificar el porqué de la ocurrencia de las fallas en las toberas del inyector, y cambiar el tiempo de mantenimiento para esta pieza a 700 horas.
4. Realizar un análisis más profundo en vista a determinar las causas de la formación de grietas en las camisas.



## **BIBLIOGRAFÍA:**

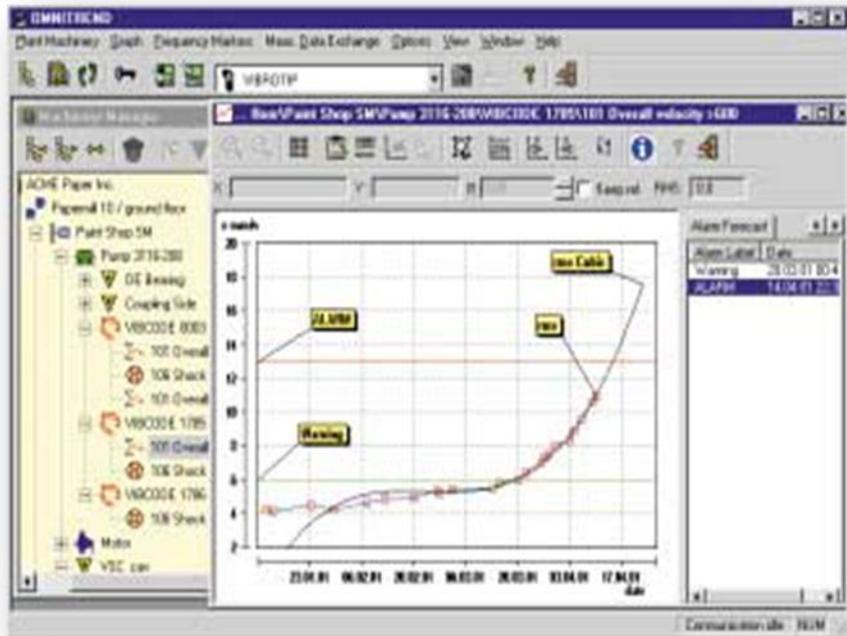
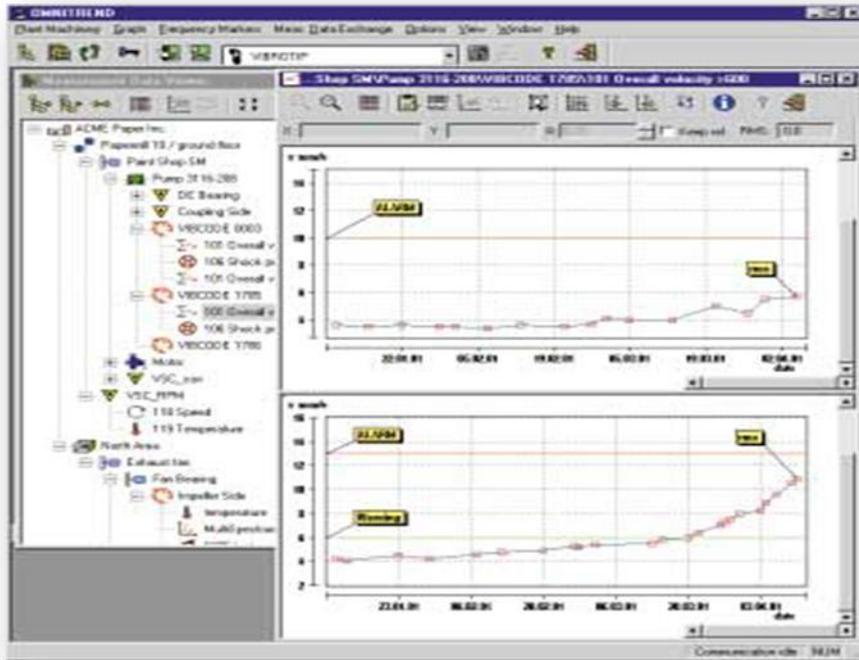
1. CNCI. 2007 Composición de un Emplazamiento Hyundai PPS
2. Reyes, Y.O. 2011. "Valoración del impacto sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Clara de la generación de electricidad con grupos electrógenos a base de combustible fuel oil." Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
3. Herrera, S.D. 2010. Manual de gestión (MAGEST) de la generación distribuida de electricidad en Cuba.
4. 2011. "Mantenimiento Predictivo." Vol 2013.  
URL:<http://www.dliengineering.com/vibman-panish/mantenimientopredictivo.htm>.
5. Artiles, A.H. 2011. Sistemas de Mantenimiento.
6. Olave, D.O. 2010. Implementación de un sistema de mantenimiento por diagnóstico a bordo de unidades navales y marítimas. Chile.
7. Matienzo, J. 2006. La tecnología del diagnóstico técnico.
8. Corporation, F. 2010. Analizador de vibraciones Fluke 810.
9. Valderrama, R. 2012. "Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis estadístico del aceite lubricante."
10. Fernández, S. 2008. "Caracterización del sistema actual de diagnóstico a los motores de combustión interna diesel en empresas cubanas y propuesta de modificación."
11. Brizuela, D.I. 2003. Combustión.
12. Tempest, M. 2011. "Manual del analizador de gases de combustión TEMPEST".
13. López, M.I.L.G. 2008. "Curso para la implementación de sistemas de diagnóstico por vibraciones."
14. Vibrotip, M. 2011. "Manual del analizador de vibraciones VIBROTIP."
15. Rivero, M.A.M. 2012. "Modelo registro de búsqueda de causa raíz." EMGEF.
16. 2008. "MAN B&W Diesel." In Manual de procedimientos.
17. HYUNDAI. 2009. "Criterio para rajaduras del caracol del T/C."
18. METROGAS. 2012. "Mejora en la eficiencia de combustión en calderas."  
URL: [www.metrogas.cl](http://www.metrogas.cl)

- 19.2013. "Anhídrico sulfuroso." Vol 2013.  
URL: <http://www.atsdr.cdc.gov>
- 20.2013. "Simulación de la desviación típica de una variable discreta con R (lenguaje de programación)." Vol 2013.  
URL: <http://www.cajael.com/mestadisticos/T1EDescriptiva/node7.php>
21. Alan Kardec, J.N. 2002. Mantenimiento. Función estratégica. .
22. España, I.N.d.S.e.H.e.e.T.d. 2013. "Ficha internacional de seguridad química del dióxido de azufre." Vol 2013.  
URL: <http://www.insht.es>
23. Española, R.A. 2001. Diccionario de la lengua española
24. Gutiérrez., A.M. 2007. Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios.
25. M., J. 2005. "Seeing Through Statistics." Vol 2013.  
Maderna, I.R.I. 2009. "VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA." Vol 2013.
26. Sotomayor Velasco, G.W., Piotr Marian. 2001. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias.
27. EMGEF. 2012. "Instrucción de trabajo para el diagnóstico de fallas, averías y la evaluación e los parámetros de confiabilidad de los motores con tecnologías Hyundai y MAN." MINISTERIO DE LA INDUSTRIA BÁSICA, UNIÓN ELÉCTRICA.
28. Marín, E.P. 2001. Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias. Habana, Cuba.
29. White, G. 2010. Introducción al análisis de vibraciones. U.S.A.
30. Jóvaj, M. S. y otros. 1987. Motores de automóvil. Edited by E. MIR. Moscú.
31. (NC), O.N.d.N. 2010. "Calidad del aire, emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor." Edited by E. Técnica. Habana. Cuba.

**Anexo 1.** Principales comandos del menú del analizador del rendimiento de la combustión TEMPEST 100.

No.	Símbolo	Opción	Descripción
1		Menú	Describe las diferentes opciones que tiene el equipo.
2		Retorno	Permite retroceder las órdenes que se le indican al analizador.
3		Imprimir	Impresiones de datos de las emisiones actuales, tiempo y fecha de la medición.
4		Suministro de papel.	Permite la inclusión en el equipo de un nuevo rollo de papel de impresión.
5		Conexión de datos.	Envía los datos de las emisiones a través del comunicador RS232 para su posterior análisis.
6		Escala de medición.	Brinda la escala en cuanto a unidad de medida de las mediciones hechas por los sensores de gases.
7		Temperatura	Muestra todas las mediciones hechas de temperatura en unidades de ° C y ° F.
8		Emisiones	Indica las mediciones en cuanto a concentración de los gases de escape de la combustión.
9		Eficiencia	Brinda la eficacia, el exceso de aire, la proporción calculada de CO <sub>2</sub> y las concentraciones de CO y O <sub>2</sub> .
10		Estado del equipo	Muestra la fecha, el tiempo y la vida de la batería.

Anexo 2. Software OMNITREND analizador de mediciones del VIBROTIP.



## Anexos

### Anexo 3. Datos tomados con el TEMPEST 100.

#### Santa Clara Industrial

# de motor	2	3	5	7	8	9	11
<b>Horas de trabajo</b>	24109	22911	22079	23841	22911	22827	23506
<b>Temp. Ambiente (°C)</b>	34	33	31	30	33	29	31
<b>Temp. Escape (°C)</b>	309	354	351	352	354	339	319
<b>Temp. Neta (°C)</b>	275	321	320	322	321	310	288
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	13,5	12,7	12,8	12,6	12,7	13,2	13,4
<b>Ratio</b>	0,0009	0,0030	0,0018	0,0028	0,0030	0,0027	0,0017
<b>CO (ppm)</b>	52	184	112	176	184	155	94
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	5,6	6,2	6,1	6,3	6,2	5,8	5,7
<b>XAIR</b>	182,4	154,9	158,0	151,8	154,9	171,4	178,7
<b>EFF (%)</b>	73,5	72,0	71,8	72,3	72,0	71,2	72,6
<b>NO (ppm)</b>	843	869	999	898	869	769	725
<b>NOx (ppm)</b>	857	870	1010	909	870	772	731
<b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>	14	1	11	11	1	3	6
<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	364	418	390	401	418	390	365

#### Calabazar

# de motor	1	2	3	6	7	8
<b>Horas de trabajo</b>	24058	24109	24032	23725	22376.5	10078
<b>Temp. Ambiente (°C)</b>	27	34	33	33	27	29
<b>Temp. Escape (°C)</b>	304	309	292	316	313	305
<b>Temp. Neta (°C)</b>	277	275	259	283	286	276
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	13,7	13,5	13,9	13,3	13,5	13,6
<b>Ratio</b>	0,0006	0,0009	0,0009	0,0014	0,0007	0,0009
<b>CO (ppm)</b>	35	52	50	80	41	52
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	5,4	5,6	5,3	5,7	5,6	5,5
<b>XAIR</b>	190,3	182,4	198,6	175,0	182,4	186,3
<b>EFF (%)</b>	72,5	73,5	73,6	73,4	72,4	73,0
<b>NO (ppm)</b>	963	843	799	861	1054	769
<b>NOx (ppm)</b>	989	857	815	868	1094	771
<b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>	26	14	16	7	40	2
<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	362	364	349	379	358	372

**Anexo 3.** Datos tomados con el TEMPEST 100.

Sagua 110

# de motor	1	4	5	7	12
<b>Horas de trabajo</b>	23735	23733	22079	24000	20461
<b>Temp. Ambiente (°C)</b>	29	33	31	31	30
<b>Temp. Escape (°C)</b>	311	360	351	320	316
<b>Temp. Neta (°C)</b>	282	327	320	289	286
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	13,7	12,8	12,8	12,9	13,4
<b>Ratio</b>	0,0011	0,0032	0,0018	0,0017	0,0013
<b>CO (ppm)</b>	58	196	112	101	75
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	5,4	6,1	6,1	6,0	5,7
<b>XAIR</b>	190,3	158,0	158,0	161,3	178,7
<b>EFF (%)</b>	72,0	71,2	71,8	74,2	72,8
<b>NO (ppm)</b>	921	926	999	980	886
<b>NOx (ppm)</b>	948	948	1010	980	902
<b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>	27	22	11	0	16
<b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>	305	400	390	390	355

**Anexo 4.** Principales datos obtenidos con el TEMPEST 100.

<b>Central Eléctrica</b>	<b>Calabazar</b>					<b>Sagua 110</b>			
<b>Motor</b>	1	2	3	6	7	1	4	5	12
<b>Horas</b>	24058	24109	24032	23725	22377	23735	23733	23200	20461
<b>Temp. Escape</b>	304	309	292	316	313	311	360	383	316
<b>O<sub>2</sub>%</b>	13,7	13,5	13,9	13,3	13,5	13,7	12,8	15,3	13,4
<b>COppm</b>	35	52	50	80	41	58	196	32	75
<b>CO<sub>2</sub>%</b>	5,4	5,6	5,3	5,7	5,6	5,4	6,1	4,2	5,7
<b>XAIR</b>	190,3	182,4	198,6	175,0	182,4	190,3	158,0	273,2	178,7
<b>EFF%</b>	72,5	73,5	73,6	73,4	72,4	72,0	71,2	56,8	72,8
<b>NOppm</b>	963	843	799	861	1054	921	926	37	886
<b>NOxppm</b>	989	857	815	868	1094	948	948	50	902
<b>NO<sub>2</sub>ppm</b>	26	14	16	7	40	27	22	13	16
<b>SO<sub>2</sub>ppm</b>	362	364	349	379	358	305	400	189	355

<b>Central Eléctrica</b>	<b>Santa Clara Industrial</b>						
<b>Motor</b>	2	3	5	7	8	9	11
<b>Horas</b>	24109	22911	22079	23841	22911	22827	23506
<b>Temp. Escape</b>	309	354	351	352	354	339	319
<b>O<sub>2</sub>%</b>	13,5	12,7	12,8	12,6	12,7	13,2	13,4
<b>COppm</b>	52	184	112	176	184	155	94
<b>CO<sub>2</sub>%</b>	5,6	6,2	6,1	6,3	6,2	5,8	5,7
<b>XAIR</b>	182,4	154,9	158,0	151,8	154,9	171,4	178,7
<b>EFF%</b>	73,5	72,0	71,8	72,3	72,0	71,2	72,6
<b>NOppm</b>	843	869	999	898	869	769	725
<b>NOxppm</b>	857	870	1010	909	870	772	731
<b>NO<sub>2</sub>ppm</b>	14	1	11	11	1	3	6
<b>SO<sub>2</sub>ppm</b>	364	418	390	401	418	390	365

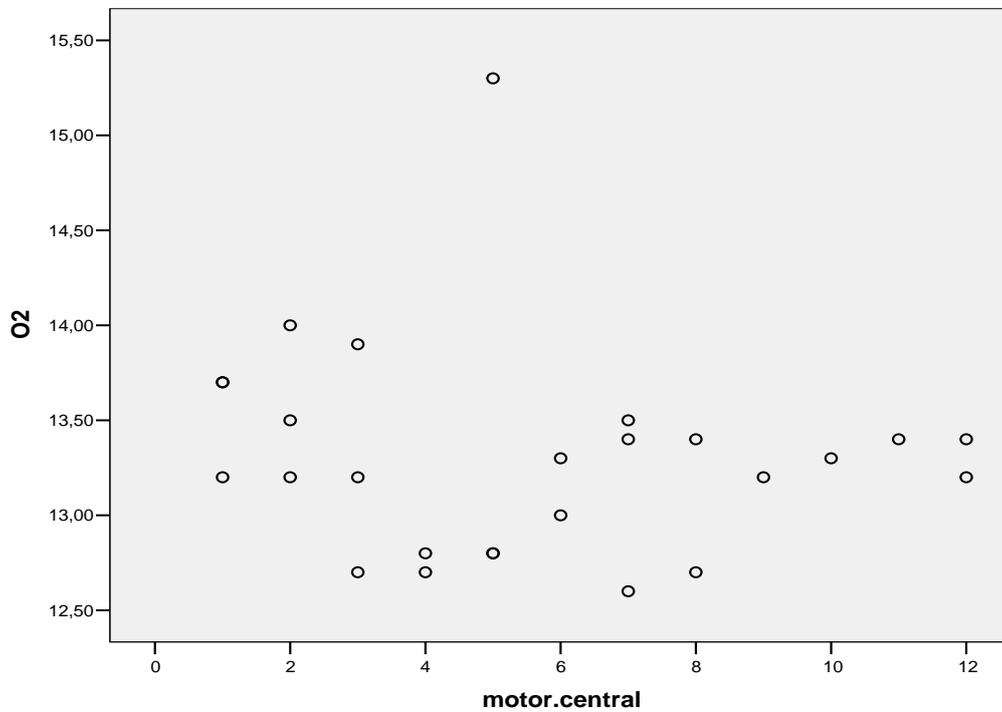
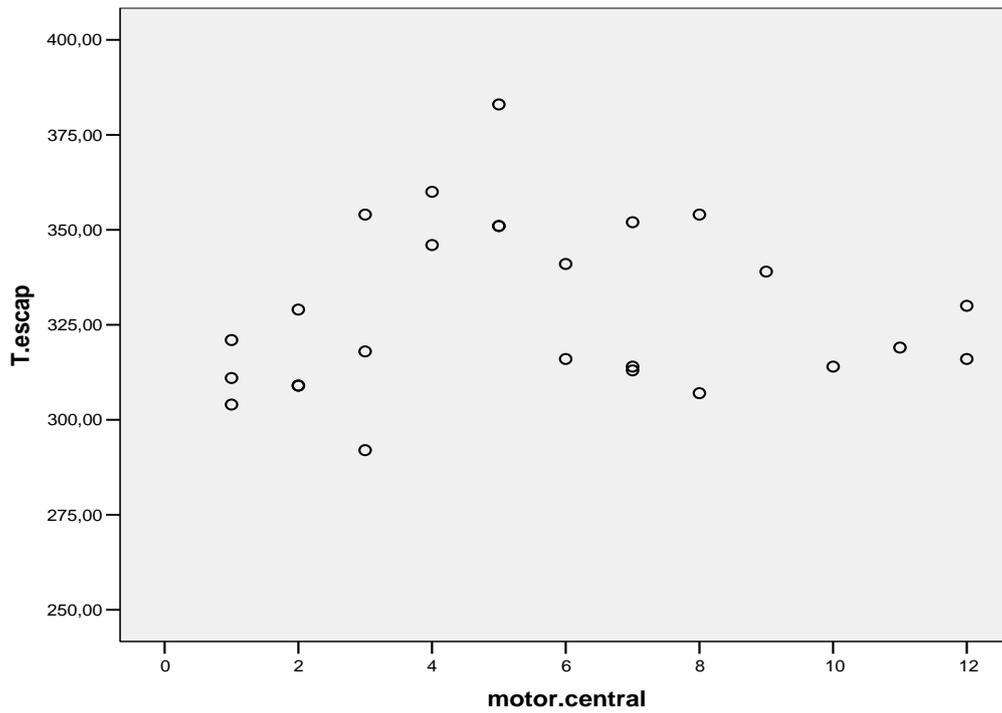
Anexo 4. Principales datos obtenidos con el TEMPEST 100.

Central Eléctrica	Santa Clara 110									
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12
Motor										
Horas	2403 9	2471 1	2471 2	2387 0	2207 9	2598 0	2396 4	2651 2	2798 1	2809 4
Temp. Escape	321	329	318	346	351	341	314	307	314	330
O <sub>2</sub> %	13,2	13,2	13,2	12,7	12,8	13	13,4	13,4	13,3	13,2
COppm	84	73	63	114	112	106	128	81	77	81
CO <sub>2</sub> %	5,8	5,8	5,8	6,2	6,1	6,0	5,7	5,7	5,7	5,8
XAIR	171,4	171,4	171,4	154,9	158,0	164,6	178,7	178,7	175,0	171,4
EFF%	62,8	72,2	73,5	72,6	71,8	72,0	72,8	73,7	73,0	72,2
NOppm	979	943	980	932	999	836	887	978	992	1020
NOxppm	992	946	1000	943	1010	836	906	1005	1017	1049
NO <sub>2</sub> ppm	13	3	20	11	11	0	19	27	25	29
SO <sub>2</sub> ppm	352	399	367	376	390	387	347	346	345	360

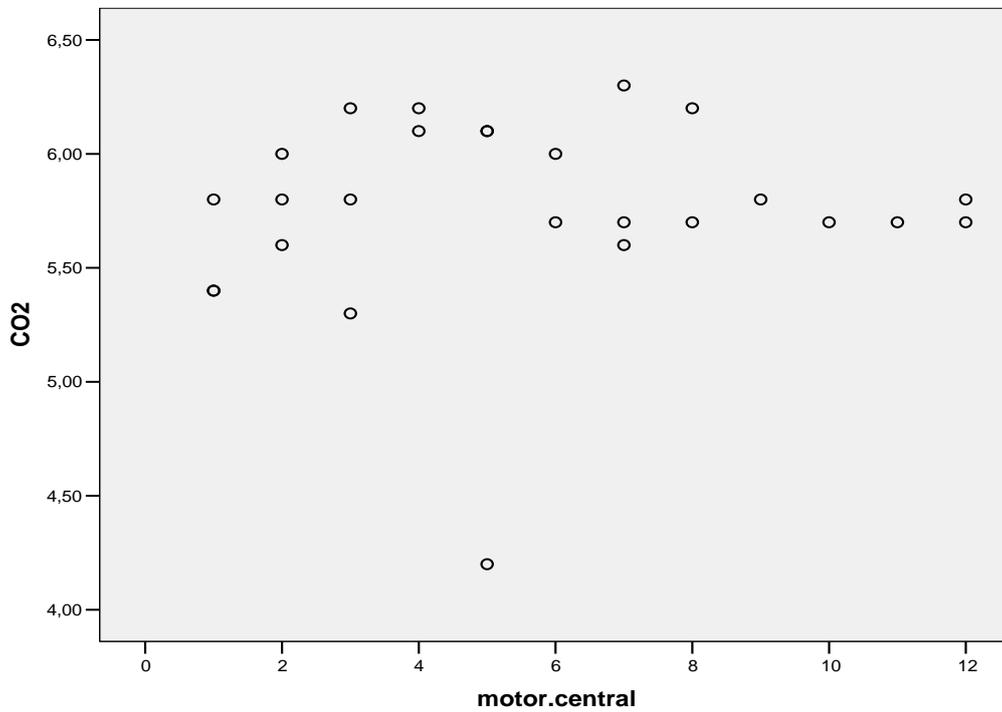
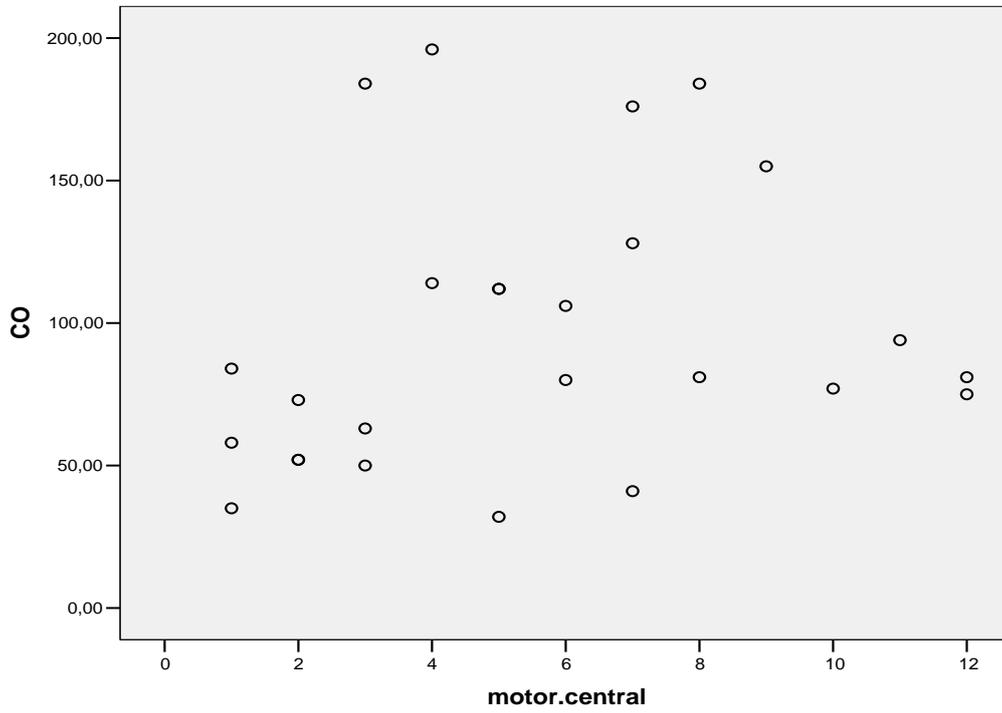
Anexo 5. Datos introducidos en el SPSS.

	motor.central	T.escap	O2	CO	CO2	XAIR	EFF	NO	NOx	NO2	SO2
1	2	309,00	14,00	52,00	6,00	182,00	73,00	843,00	857,00	14,00	364,00
2	3	354,00	12,70	184,00	6,20	154,90	72,00	869,00	870,00	1,00	418,00
3	5	351,00	12,80	112,00	6,10	158,00	71,80	999,00	1010,00	11,00	390,00
4	7	352,00	12,60	176,00	6,30	151,80	72,30	896,00	909,00	11,00	401,00
5	8	354,00	12,70	184,00	6,20	154,90	72,00	869,00	870,00	1,00	418,00
6	9	339,00	13,20	155,00	5,80	171,40	71,20	769,00	772,00	3,00	390,00
7	11	319,00	13,40	94,00	5,70	178,70	72,60	725,00	731,00	6,00	365,00
8	1	321,00	13,20	84,00	4,20	171,40	62,80	979,00	992,00	13,00	352,00
9	2	329,00	13,20	73,00	5,80	171,40	72,20	943,00	946,00	3,00	399,00
10	3	318,00	13,20	63,00	5,80	171,40	73,50	980,00	1000,00	20,00	367,00
11	4	346,00	12,70	114,00	6,20	154,90	72,60	932,00	943,00	11,00	376,00
12	5	351,00	12,80	112,00	6,10	158,00	71,80	999,00	1010,00	11,00	390,00
13	6	341,00	13,00	106,00	6,00	164,60	72,00	836,00	836,00	,00	387,00
14	7	314,00	13,40	128,00	5,70	178,70	72,80	887,00	906,00	19,00	347,00
15	8	307,00	13,40	81,00	5,70	178,70	73,70	978,00	1005,00	27,00	346,00
16	10	314,00	13,30	77,00	5,70	175,00	73,00	992,00	1017,00	25,00	345,00
17	12	330,00	13,20	81,00	5,80	171,40	72,20	1020,00	1049,00	29,00	360,00
18	1	304,00	13,70	35,00	5,40	190,30	72,50	963,00	989,00	26,00	362,00
19	2	309,00	13,50	52,00	5,60	182,40	73,50	843,00	857,00	14,00	364,00
20	3	292,00	13,90	50,00	5,30	198,60	73,60	799,00	815,00	16,00	349,00
21	6	316,00	13,30	80,00	5,70	175,00	73,40	861,00	868,00	7,00	379,00
22	7	313,00	13,50	41,00	5,60	182,40	72,40	1054,00	1094,00	40,00	358,00
23	1	311,00	13,70	58,00	5,40	190,30	72,00	921,00	948,00	27,00	305,00
24	4	360,00	12,80	196,00	6,10	158,00	71,20	926,00	948,00	22,00	400,00
25	5	383,00	15,30	32,00	4,20	273,20	56,80	37,00	50,00	13,00	189,00
26	12	316,00	13,40	75,00	5,70	178,70	72,80	886,00	902,00	16,00	355,00

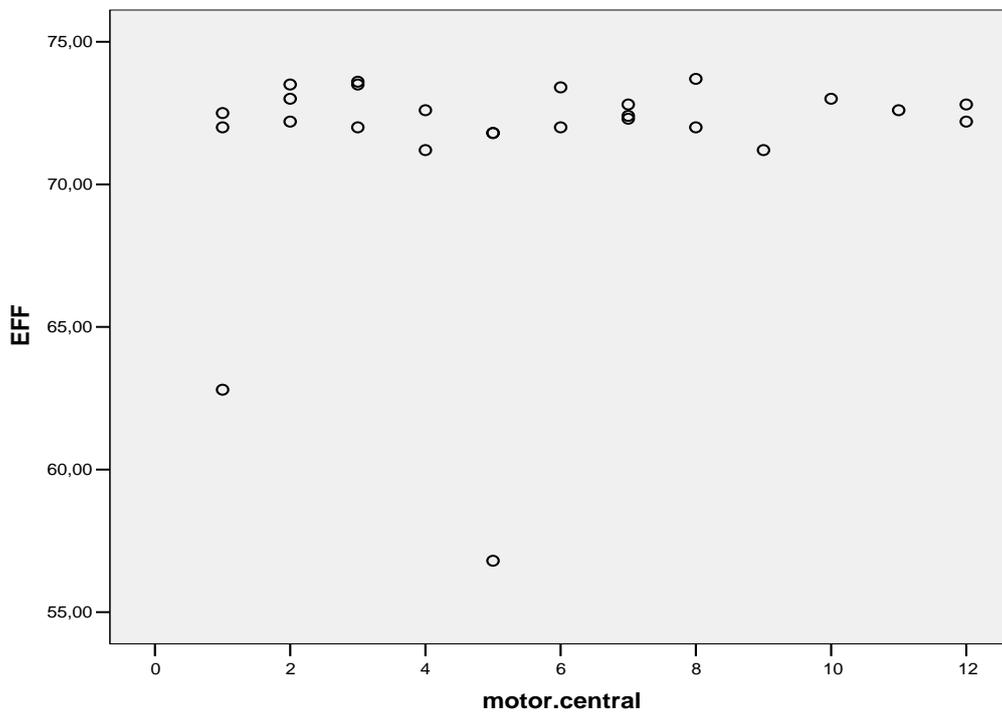
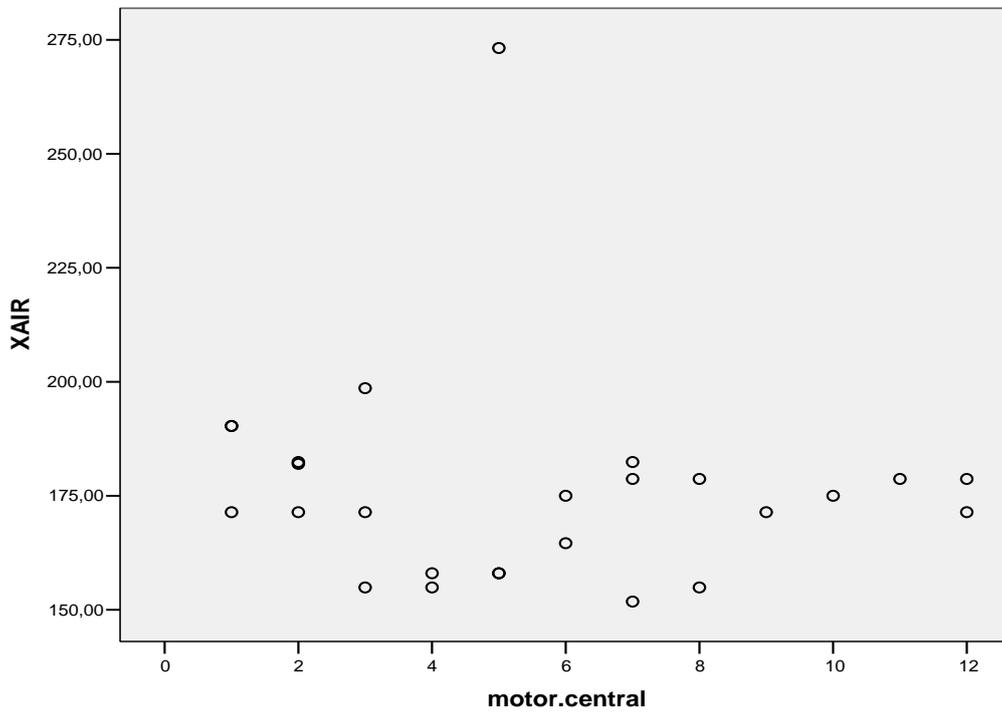
Anexo 6. Gráficos de dispersión obtenidos con el SPSS.



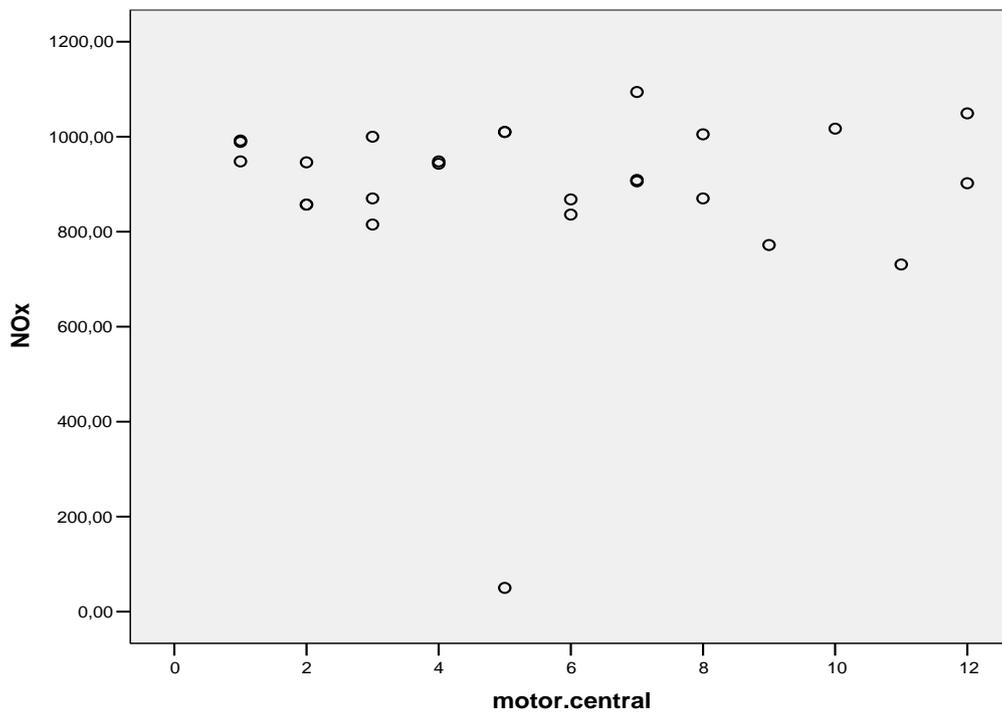
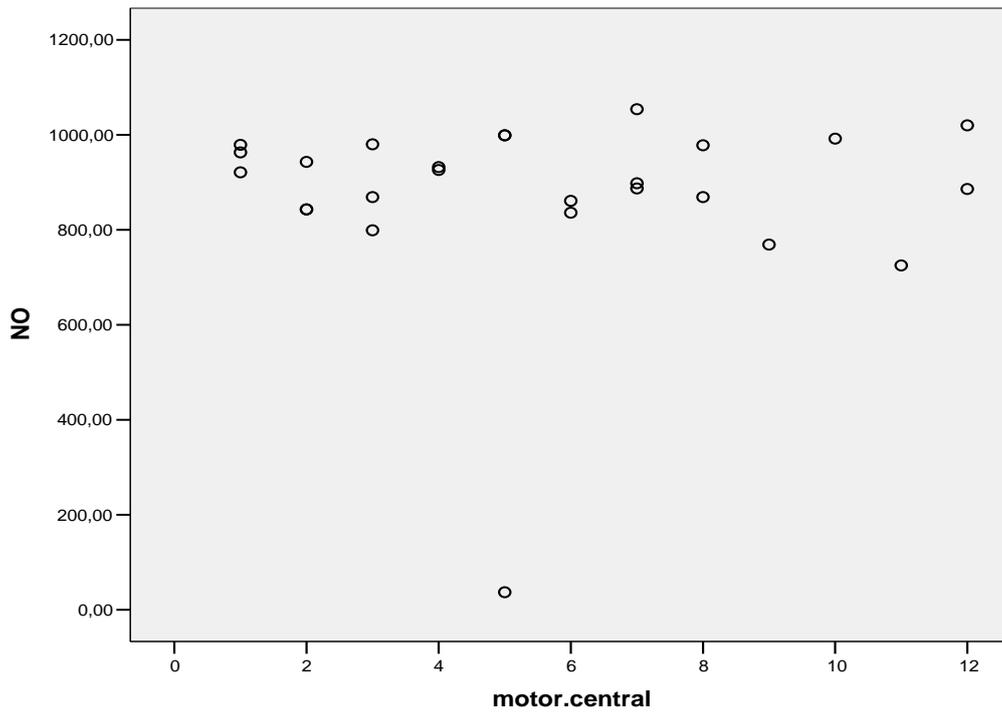
Anexo 6. Gráficos de dispersión obtenidos con el SPSS.



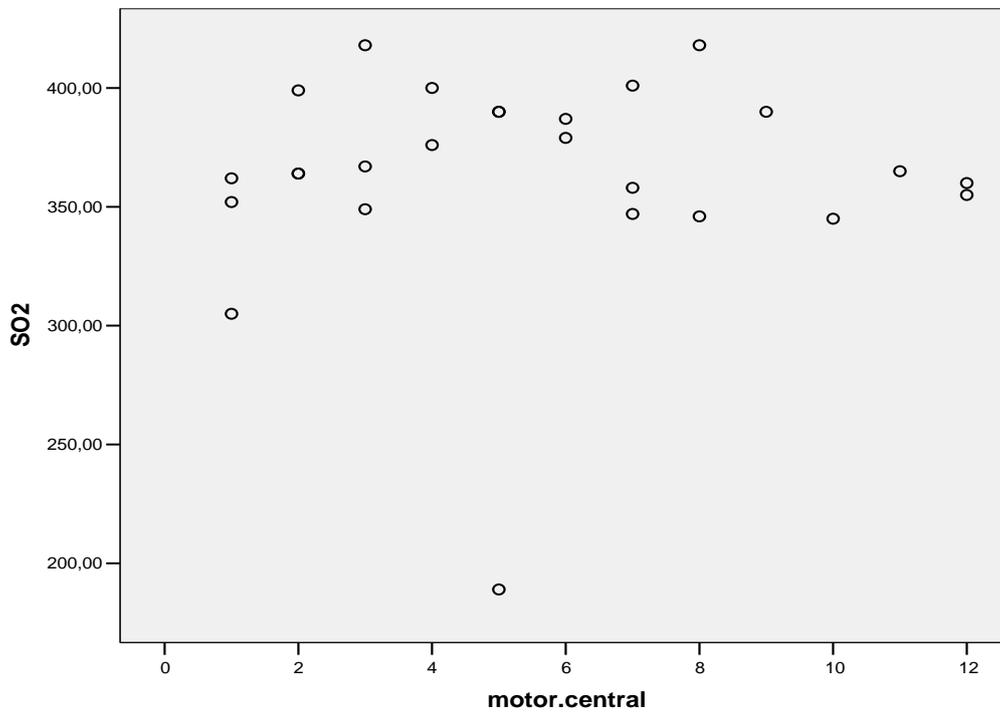
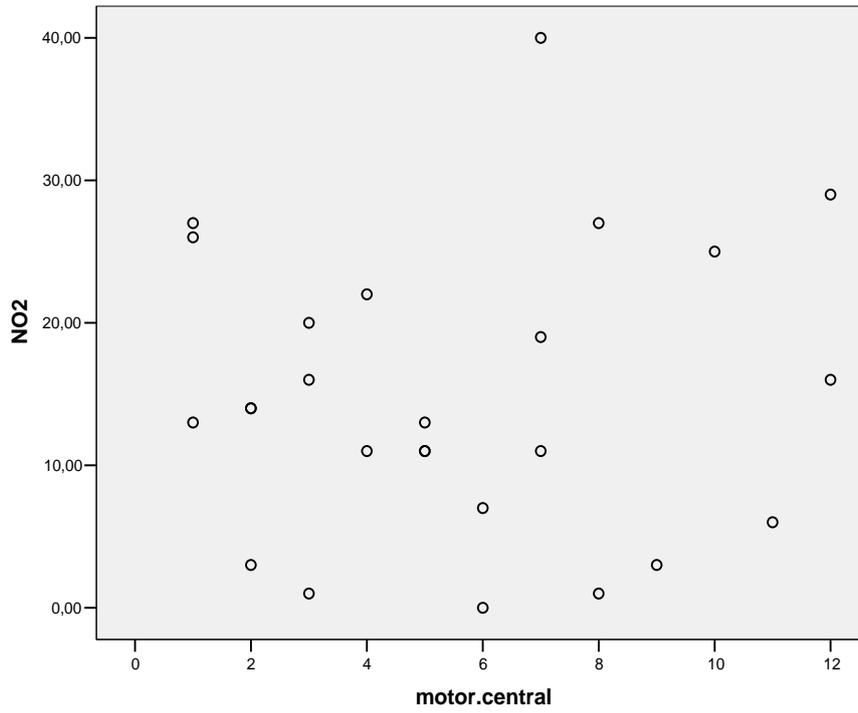
Anexo 6. Gráficos de dispersión obtenidos con el SPSS.



Anexo 6. Gráficos de dispersión obtenidos con el SPSS.



Anexo 6. Gráficos de dispersión obtenidos con el SPSS.



## Anexos

### Anexo 7. Datos obtenidos con el Vibrotip.

#### Santa Clara Industrial

# de motor	Horas	Puntos de medición (mm/s)																			
		B1			B2			B3			B4			G1			G2			Turbo	
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Y	Z
6	23306	6,2	6,2	6,2	4,3	6,6	5,7	4,6	5,2	6,7	6	3,9	6,2	6,4	8,4	15,9	12,5	8,7	14	7,9	5,3
7	22717	4,1	6,1	4,1	3,4	6	5,5	2,9	5,4	4,6	33	4	6	3,1	7	13,4	10,6	7,9	10,6	7,4	4,8
8	22410	5,8	6,1	4,8	5,3	6,8	5,7	6,7	5,1	6	6,6	3,5	6,6	6,4	7,6	15,5	9,1	7,5	13,2	8,3	4,9
11	23066	4,8	5,1	4,8	3,4	6,6	5,8	3,6	5,5	5,7	3,6	3,8	6,3	3,8	8,2	13,6	8,5	8,2	11,3	8,7	5,7

#### Calabazar

# de motor	Horas	Puntos de medición (mm/s)																			
		B1			B2			B3			B4			G1			G2			Turbo	
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Y	Z
1	24058	6,7	5,1	6,8	6	6,1	5,7	7,6	5,3	7,9	7,8	3,1	6,4	7,6	7,4	15,5	11	8	14,4	8,8	7,3

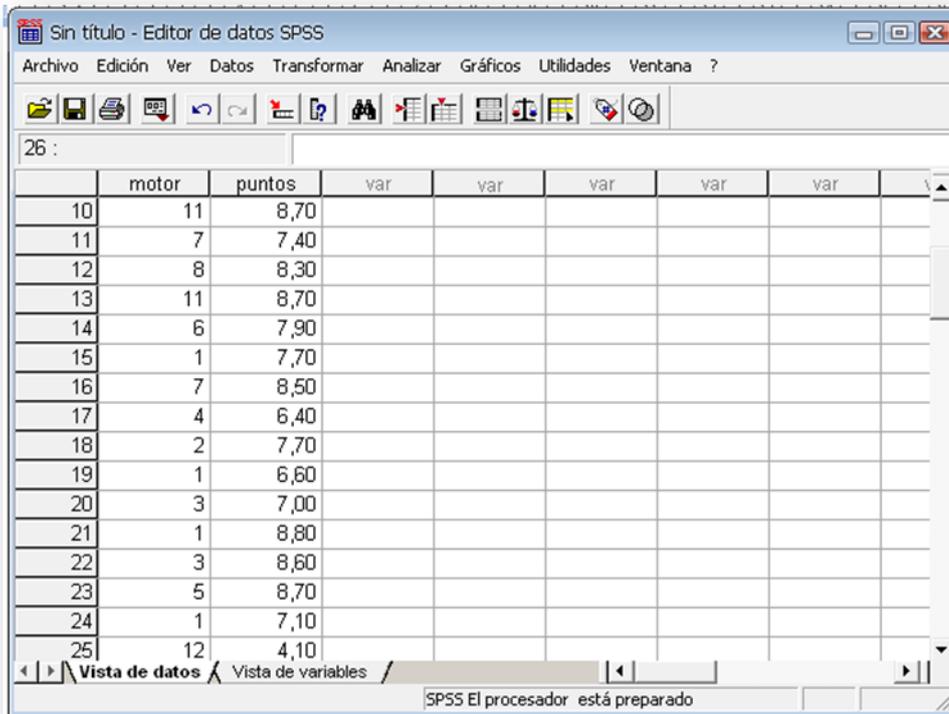
#### Sagua 110

# de motor	Horas	Puntos de medición (mm/s)																			
		B1			B2			B3			B4			G1			G2			Turbo	
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Y	Z
1	24069	5,4	5,8	5,8	4,1	7,3	6,1	4,5	5,4	6	4,6	3,9	6,7	4,5	8	16,4	9,8	9,1	13,2	7,1	6
3	23092	5,7	5,2	6,7	4,6	6,4	5,6	5,7	4,8	6,9	5,3	3,7	5,6	5,1	7,3	14	9,2	9,5	13,2	8,6	7,8
5	23205	4,7	4,4	3	4,1	5,5	4,6	3,4	4,4	3,7	3,9	3,2	5,3	3,5	5,7	13,4	7,4	7,7	10,8	8,7	4,8

**Anexo 8.** Datos obtenidos con el Vibrotip en el Turbo cargador.

<b>CE</b>	<b>Motor</b>	<b>Horas</b>	<b>Puntos de medición</b>	
			<b>Y</b>	<b>Z</b>
SC110	12	26035	6,2	4,1
SC110	6	24106	6,9	4,5
SC110	8	24793	8	7
SC110	2	23617	7,8	5,5
SC110	1	23017	6,8	5,5
SC110	3	23322	6,4	5,2
SC110	9	25015	8	4,9
SC110	10	25945	9,2	5,3
SC110	11	25465,8	8	5,5
IND	11	22723	8,7	5,2
IND	7	22717	7,4	4,8
IND	8	22410	8,3	4,9
IND	11	23066	8,7	5,7
IND	6	23306	7,9	5,3
Sagua	1	23735	7,7	6
SC110	7	23278	8,5	5,8
SC110	4	23353	6,4	6,2
SC110	2	24711	7,7	5,3
SC110	1	24040	6,6	5,8
SC110	3	24402	7	5,3
Calabazar	1	24058	8,8	7,3
Sagua	3	23092	8,6	7,8
Sagua	5	23205	8,7	4,8
Sagua	1	24069	7,1	6

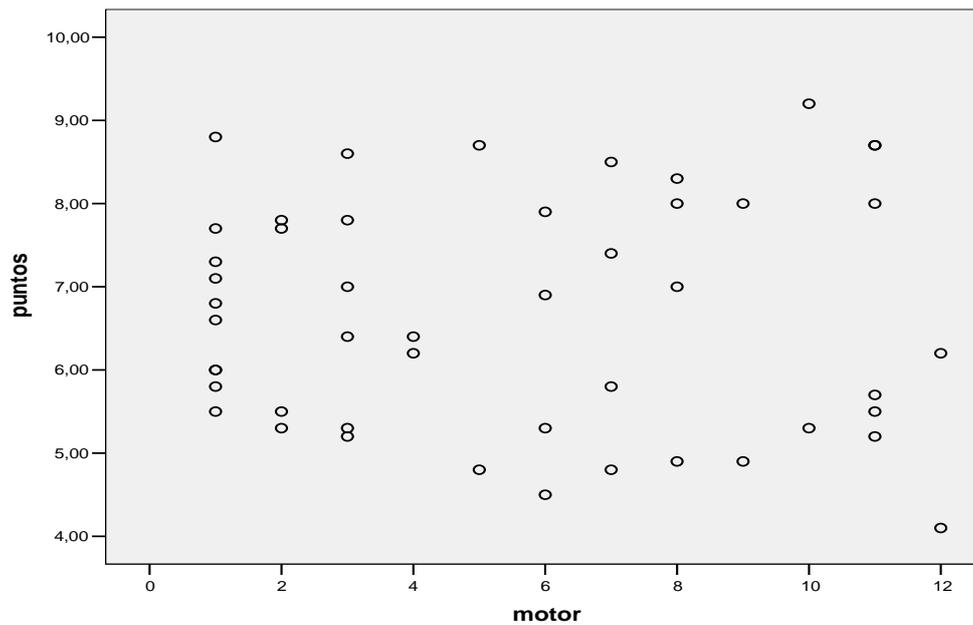
Anexo 9. Datos introducidos en el SPSS.



The screenshot shows the SPSS data editor window with the following data:

	motor	puntos	var	var	var	var	var
10	11	8,70					
11	7	7,40					
12	8	8,30					
13	11	8,70					
14	6	7,90					
15	1	7,70					
16	7	8,50					
17	4	6,40					
18	2	7,70					
19	1	6,60					
20	3	7,00					
21	1	8,80					
22	3	8,60					
23	5	8,70					
24	1	7,10					
25	12	4,10					

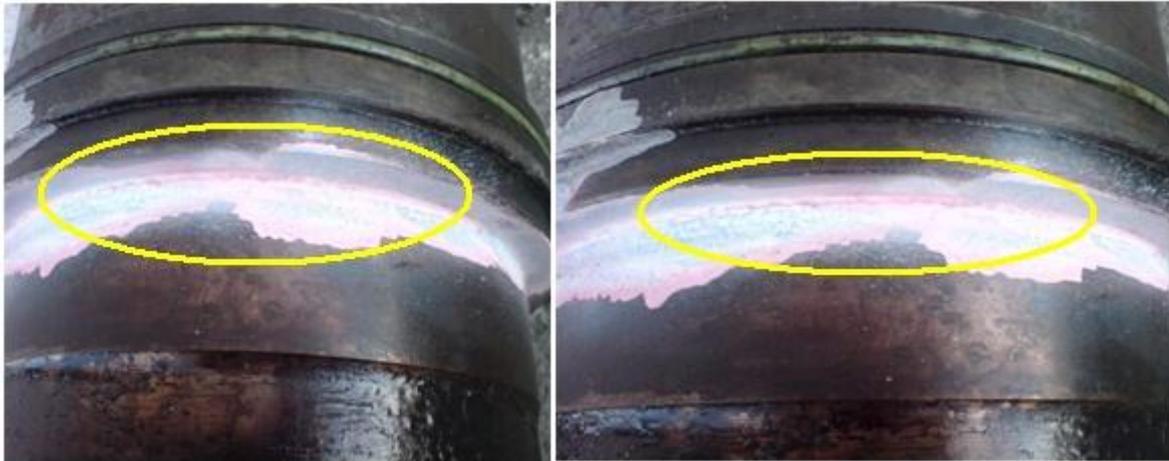
Anexo 10. Gráficos de dispersión obtenidos con el SPSS.



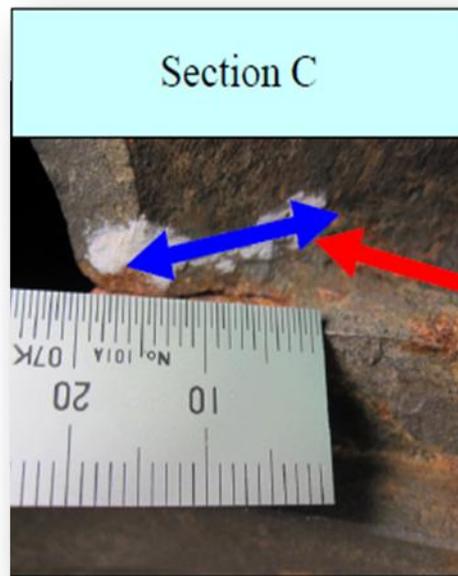
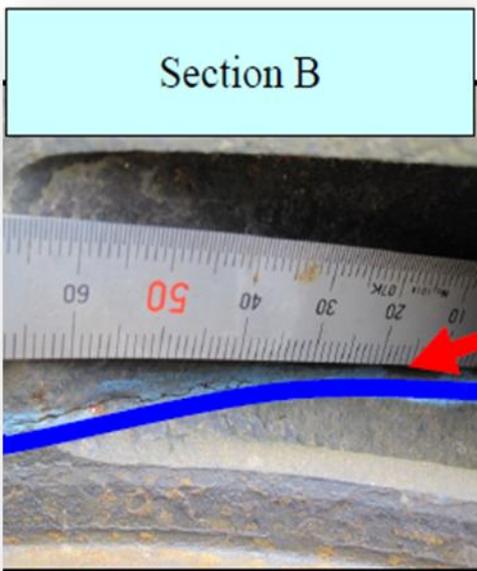
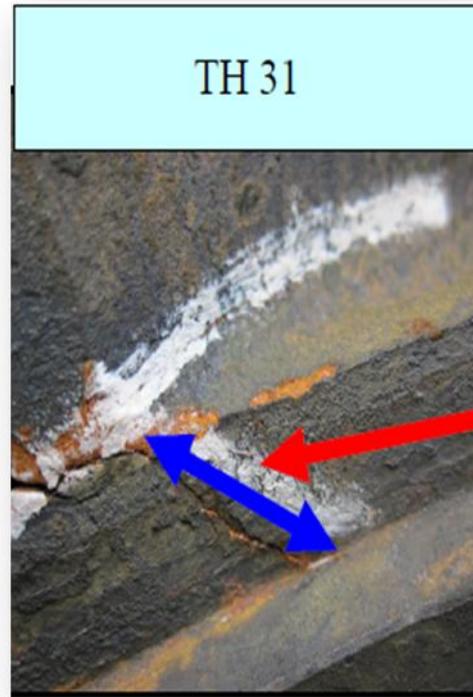
**Anexo 11.** Régimen permisible de los principales parámetros del motor de acuerdo a su carta de régimen de tecnología.

Parámetros	U/M	Régimen Normal
Presión de aire de arranque	bar	25....30
Presión del aceite de lubricación	bar	4....5
Presión de Fuel Oil a la entrada del motor	bar	7....10
Presión del Diesel a la entrada del motor	bar	7....8
Desviación de presión de encendido respecto a la media	bar	±5
Presión de encendido en los cilindros	bar	115...190
Presión de aire de carga	bar	1 ... 3.2
Temperatura de Fuel Oil a la entrada del motor	°C	110....170
Temperatura de Diesel a la entrada del motor	°C	30....45
Temperatura del aire de carga	°C	35...55
Temperatura de los gases a la salida de los cilindros	°C	250...390
Temperatura del aceite lubricante a la entrada del motor	°C	60....70
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida del motor	°C	75...87
Velocidad del motor	rpm	891...909
Nivel de aceite en el cárter	%	50....75
Índice de Cremallera	mm	16....28

**Anexo 12.** Grietas en las camisas.



Anexo 13. Grietas en el turbo cargador.



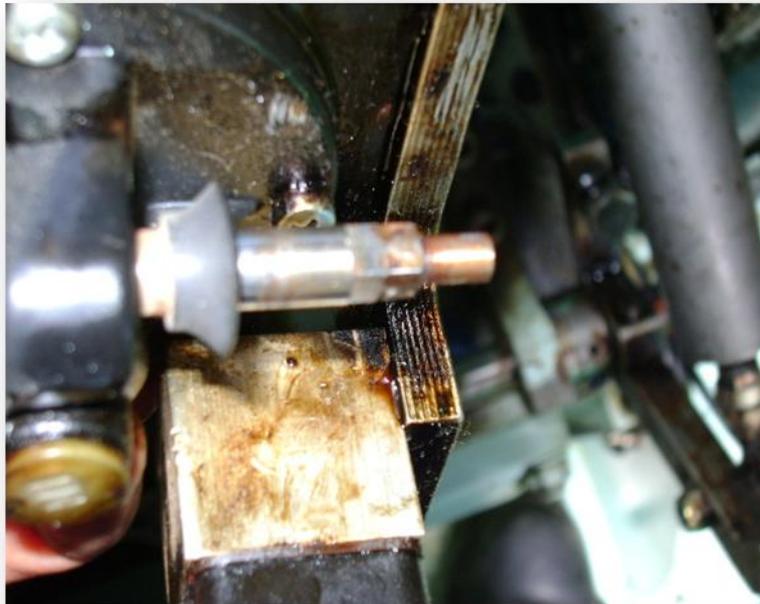
**Anexo 13.** Grietas en el turbo cargador.



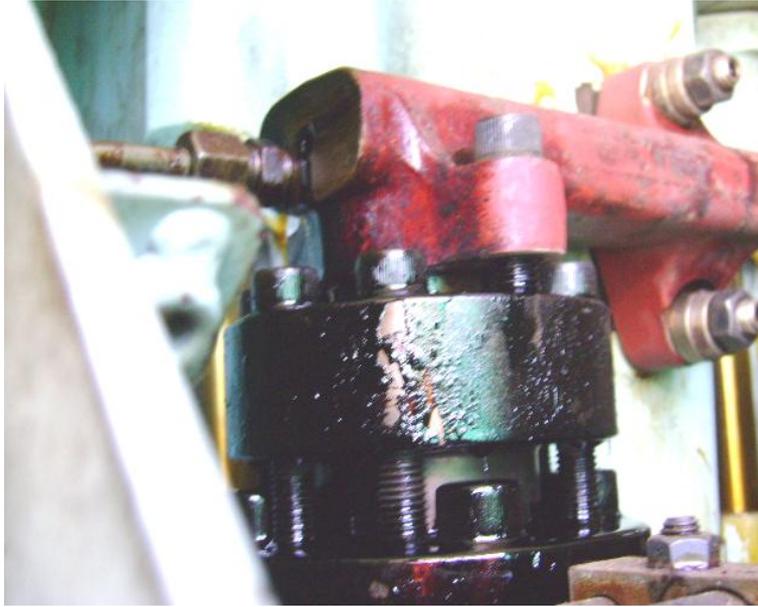
**Anexo 14.** Fallas en el múltiple de escape.



**Anexo 15.** Fallas en el gobernador.



**Anexo 16.** Fallas en el bloque de alta.



**Anexo 17.** Fallas en el inyector.



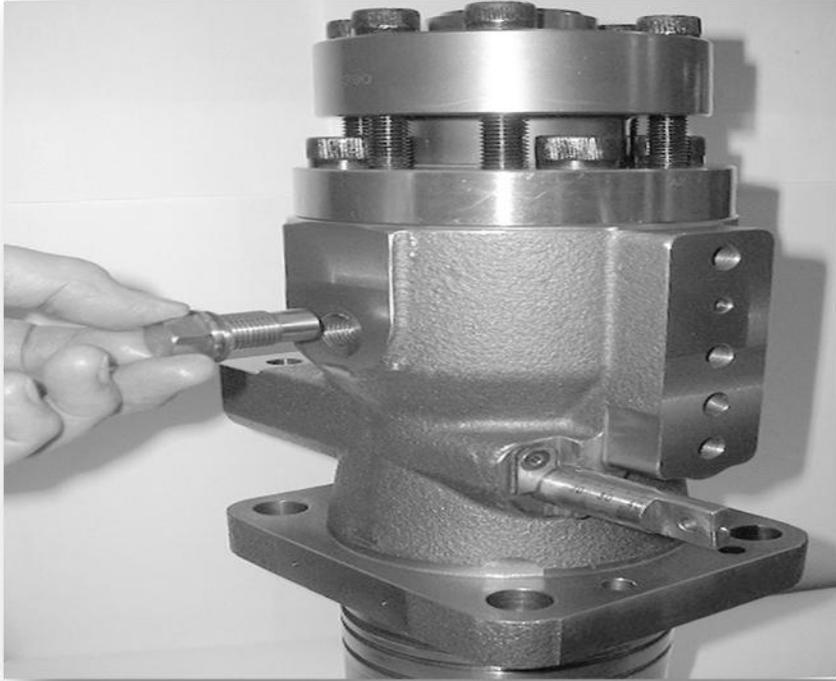
**Anexo 18.** Juntas Tóricas.



**Anexo 19.** Fallas en la tubería de alimentación.



**Anexo 20.** Fallas en la bomba de alimentación.



**Anexo 21.** Operaciones a realizar *durante la ejecución de los mantenimientos preventivos planificados.*

INSTRUCCION RELACIONADA	DESCRIPCION	INTERVALOS DE REVISION												COMENTARIOS.			
		200	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	22000		24000		
	■: Revisiones planificadas. ◇: Confirmar después de revisión o nuevo.																
<b>Reapriete de Sujeciones Principales.</b>																	
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.	◇			■			■				■				■	
	Tornillos del bloque del motor y el marco de la base.	◇			■			■				■				■	
	Tornillos del turbocompresor.	◇			■			■				■				■	
-	Prueba de martillado de todos los espárragos y tuercas de apriete hidráulico que se encuentran dentro del cárter del motor.	◇	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
<b>Inspección de cojinetes.</b>																	
FG-IM 0004	Cojinetes principales. (Evaluación de desgastes límites.)														■	■	Tres en 18 000 horas (Cojinetes #1; 8 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
<b>Inspección y reapriete de calzos antivibratorios.</b>																	
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 cimientó.	◇			■			■				■				■	
<b>Inspección de unidad de cilindro y las bielas.</b>																	
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	<b>Inspección y mantenimiento</b> 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									■						■	



