

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO.



TESIS

AUMENTO DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA EN PLANTAS DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA MEDIANTE LA
DETECCIÓN DE GRIETAS POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
(ULTRASONIDO) EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE.

INGENIERO MECÁNICO

MARIO ESTUARDO DEL VALLE ALBUREZ

Guatemala, junio del 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

TESIS

AUMENTO DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA EN PLANTAS DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA MEDIANTE LA
DETECCIÓN DE GRIETAS POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
(ULTRASONIDO) EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE.

POR

INGENIERO MECÁNICO
MARIO ESTUARDO DEL VALLE ALBUREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO.

Guatemala, junio del 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NOMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultan Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN DE DEFENSA DE TESIS

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Puertas Jerez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

AUMENTO DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA EN PLANTAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA MEDIANTE LA DETECCIÓN DE GRIETAS POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (ULTRASONIDO) EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 13 de diciembre de 2008.

Ingeniero Mecánico
Mario Estuardo Del Valle Alburez

ACTO QUE DEDICO A:

Claudia Mercedes, Mario Javier y María Mercedes

Mario Augusto, Ana Graciela y Ana Patricia

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	i
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	iv
GLOSARIO	v
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	ix
OBJETIVOS	x
1. ASPECTOS GENERALES, COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO E INDICADORES DE OPERACIÓN	
1.1 Generalidades	1
1.2 Vigencia de las Centrales Diesel	3
1.3 Indicadores de Disponibilidad y Confiabilidad	5
1.4 Costos de Operación y Mantenimiento	10
2. FALLA EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE	
2.1 Desgaste en válvulas de admisión y escape	14
2.1.1 Combustible	14
2.1.2 Aceite lubricante	16
2.1.3 Sistema de inyección	17
2.1.4 Turbocargador	19
2.2 Programa de Mantenimiento de válvulas de Admisión y Escape.	21
2.3 Falla en válvulas de Admisión y Escape y su incidencia en el Motor de Combustión Interna	34

2.4	Análisis e identificación de la falla	41
2.5	Incremento en costos de Operación y Mantenimiento por falla de válvulas de Admisión y Escape	63
3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE		
3.1	Mantenimiento Predictivo y Ensayos No Destructivos	67
3.2	Principios de Ultrasonido	75
3.3	Equipo empleado para Ensayos No Destructivos de Ultrasonido en válvulas de Admisión y Escape	88
3.4	Procedimiento de inspección de Ultrasonido en válvulas de Admisión y Escape	89
4. EVALUACION DE RESULTADOS DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE		
4.1	Pruebas de campo	95
4.2	Evaluación de resultados de operación de motores	99
4.3	Evaluación de resultados en costos de Operación y Mantenimiento	105
CONCLUSIONES		110
RECOMENDACIONES		113
BIBLIOGRAFÍA		114
ANEXOS		115

INDICE DE ILUSTRACIONES

GRAFICAS

1.	Rendimientos de distintos tipos de Plantas Térmicas de Generación Eléctrica	3
2.	Eficiencia de Motores de Combustión Interna comparado con distintos tipos de Plantas Térmicas de Generación Eléctrica	4
3.	Vista superior de corona de pistón quemada	15
4.	Vista inferior de culata con las válvulas de escape quemadas y perforada	16
5.	Vista superior de corona de pistón perforada	16
6.	Sistema de control de viscosidad de combustible	18
7.	Turbocargador	20
8.	Vista de turbina de turbocargador	21
9.	Vista posterior de culata	22
10.	Corte de culata	24
11.	Maquina de ráfaga de vidrio molido para limpieza de válvulas	24
12.	Indicación de blow-by en cono de válvula de escape	25
13.	Indicación de golpes en vástago de válvula de admisión	25
14.	Corrosión en superficie de cono de válvula de admisión	26
15.	Formación de empedrado en válvulas	26
16.	Agujeros de corrosión en válvula de escape	27
17.	Medidas de válvulas	28
18.	Material consumido en cara expuesta de válvula a camara de combustión	28
19.	Máquina de pulido de válvulas de alta precisión	29
20.	Repaso de superficie de sellado a válvula de escape	29
21.	Repaso de superficie de sellado a válvula de admisión	30
22.	Válvulas antes y después de pulido	30
23.	Aplicación de pasta en superficie pulida	31
24.	Herramienta de asentamiento de válvulas	31

25.	Inspección de superficie de contacto entre cono de válvula y asiento de válvula	32
26.	Asiento de válvula antes y después de pulido	33
27.	Máquina de pulido de asiento de válvulas	33
28.	Correcto maquinado de asiento de válvulas	34
29.	Vista de coronas de pistón dañadas	35
30.	Vista de camisas de pistón dañadas	37
31.	Cara inferior de culatas dañadas	38
32.	Alabes de turbina dañados	39
33.	Fallas de válvulas de admisión y escape	40
34.	Recolección de muestras de piezas dañadas	50
35.	Válvulas quebradas	51
36.	Simbolos de árbol de falla	52
37.	Arbol de falla	53
38.	Vista de corte motor	60
39.	Clasificación de ondas	81
40.	Dispositivo experimental para estudio de propagación de ondas de Ultrasonido	82
41.	Aplicación del método de ultrasonido	84
42.	Palpador de haz recto	86
43.	Palpador de incidencia angular	87
44.	Equipo Panametrics	88
45.	Equipo Sonatest	89
46.	Calibración y ajuste de equipo de ultrasonido	90
47.	Pantalla de osciloscopio con ondas secundarias	91
48.	Forma de inspección de válvulas	91
49.	Señal de discontinuidad a diferente profundidad	92
50.	Señal de discontinuidad con respecto a la orientación	93
51.	Señal de discontinuidad en fisuras de localización especial	93
52.	Inspección ultrasónica de válvulas	94

TABLAS

I	Valores iniciales para cálculo de costo Operación y Mantenimiento	10
II	Resultados iniciales de costo de Operación y Mantenimiento	11
III	Matriz de Perfil de Riesgo	48
IV	Identificación de causas raíces de la falla	58
V	Definición de consecuencias de la falla	59
VI	Verificación de consecuencia en perfil de riesgo	61
VII	Verificación de cumplimiento de tareas	62
VIII	Valores de cálculo de costo Operación y Mantenimiento posterior a falla	64
IX	Resultados de costo de Operación y Mantenimiento posterior a falla	66
X	Resultados de pruebas de ultrasonido realizadas en válvulas de admisión y Escape en motores A, B y C	97
XI	Control de válvulas de admisión y escape en prueba de operación	98
XII	Índices de Disponibilidad y Confiabilidad antes y durante la prueba de válvulas inspeccionadas por ultrasonido	103
XIII	Valores para cálculo de costo Operación y Mantenimiento con Inspección Ultrasónica a válvulas de Admisión y Escape	106
XIV	Resultados de costo de Operación y Mantenimiento con inspección Ultrasónica a válvulas de Admisión y Escape	108
XV	Comparativo de costos de Operación y Mantenimiento	109
XVI	Comparativo de resultados de costos de Operación y Mantenimiento	109

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

Kg.	Kilogramo, (mil gramos)
m ³	Metro Cúbico
°C	Grado Celsius
cSt	centiStoke
Σ	Sumatoria
Mw.	Megavatios, (1 millón de vatios)
KJ	Kilo joules, (mil joules)
US\$	Dólares Americanos
Ton	Tonelada
g.	Gramos
hr.	Hora
Kwh.	Kilo vatio hora
cec	Consumo Específico de Combustible.
O&M	Operaciones y Mantenimiento
mm.	milímetros

GLOSARIO

Viscosidad	En un líquido, mide su tendencia a mantenerse unido y se manifiesta por su resistencia a fluir.
Crudo	Petróleo bruto sin refinar.
Gasóleo	También denominado diesel, compuesto fundamentalmente de parafinas y es utilizado como combustible en motores de combustión interna.
Vatios	Unidad de potencia expresada en unidades utilizadas en electricidad.
Poder Calorífico	Expresa la energía máxima que puede liberar un combustible.
Joule	Unidad del sistema internacional para esfuerzo y trabajo.
Cimac	Concilio Internacional de Motores de Combustión, entidad normadora y reguladora de fabricantes, usuarios, propietarios etc. de motores de combustión
Amortización	Término económico y contable, referido al proceso de distribución en el tiempo de un valor duradero.
ISO	Organización internacional no gubernamental, compuesta por representantes de los organismos de normalización nacionales, que produce normas internacionales industriales y comerciales.

Azufre	Elemento indeseable en el combustible que se quema en la cámara de combustión, formando gases que se transforman en líquidos corrosivos al reaccionar con el agua. Los compuestos de azufre pueden corroer las cámaras y los anillos de los pistones. El dióxido de azufre generado por la combustión puede causar corrosión en las salidas de escapes a bajas temperaturas.
Viscosidad Cinemática	Medida basada en el tiempo que requiere una cantidad determinada de combustible para fluir a través de un tubo capilar.
Densidad	Cantidad de masa contenida en un determinado volumen.
Punto de inflamación	Es la temperatura más baja a la cual el combustible desprende vapores inflamables en cantidad suficiente para inflamarse momentáneamente al contacto con una llama.
Cenizas	Representan los componentes incombustibles del combustible. Estos componentes pueden tener su origen en el combustible. Niveles altos de cenizas pueden causar taponamientos en los sistemas de inyección, depósitos en el cilindro y partes adyacentes, algunas cenizas son corrosivas y pueden adherirse a las válvulas de escape. Altos niveles de ceniza pueden también reducir la eficiencia y causar daños a los turbo cargadores.
Residuos de Carbón	El Carbón residual indica la tendencia a formar carbón de un combustible y es expresado como porcentaje en peso. El combustible con alto residuo de carbón puede causar depósitos de combustión, particularmente cuando las máquinas están marchando a baja carga.

Sedimentos	Contaminantes que normalmente proceden del almacenamiento y transporte del combustible. Todos los combustibles contienen sedimentos que consisten en residuos de hidrocarburos y materiales extraños. El análisis de sedimentos totales esta diseñado para determinar la cantidad de material no fluido en combustibles por un método de filtración.
Residuos catalíticos	Pequeñas partículas de la catálisis (aluminio y óxidos de silicio), usadas en procesos de refinación, algunas veces quedan como residuos en el combustible. Estas alcanzan en tamaño cerca de los 5 micrones hasta los 120 micrones y son de forma irregular, porosos, y extremadamente duros.
Asfáltenos	Familia de compuestos químicos orgánicos, resultan de la destilación fraccionada del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.
Viscosímetro	Equipo utilizado para medición de viscosidad del combustible.

RESUMEN

Las plantas de generación de energía eléctrica por motores de combustión interna tienen una gran importancia en el suministro de energía eléctrica para el país, actualmente esta generación alcanza un promedio anual de carga de un 40%.

Es por esa razón que la disponibilidad y confiabilidad de las centrales de generación por motores de combustión interna debe ser máxima cuando las condiciones del mercado energético nacional o centroamericano así lo requieran.

Actualmente los índices de disponibilidad de los motores de generación de energía eléctrica oscilan alrededor de un 92 a un 95 % anual, con el presente estudio se demuestra que se puede incrementar esta disponibilidad en un 1 a 2% anual, igual caso con el índice de confiabilidad se puede aumentar en un 1.5 % anual y alcanzar índices de confiabilidad del 100% anuales con respecto a fallas de válvulas de admisión y escape.

Los costos variables de producción se incrementan en un 3% por cada falla en las válvulas de Admisión y Escape; puede reducirse este impacto económico en los flujos de caja de las empresas realizando rutinas de Mantenimiento Predictivo y Ensayos No Destructivos por medio de Ultrasonido.

El presente estudio muestra el procedimiento de inspección ultrasónica realizada a válvulas de admisión y escape así como los resultados obtenidos en la operación de motores por un periodo de 12 meses.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio aborda uno de los principales problemas de la industria de generación de energía eléctrica en el país, la disponibilidad y confiabilidad de los motores de combustión interna para generación de electricidad cuando se enfrentan problemas de análisis complejo de a fallas en los elementos reutilizados de los motores que no presentan ningún tipo e indicación de defectos siguiendo los procedimientos normados por los fabricantes; la definición del problema es originado por fallas continuas en las válvulas usadas de admisión y escape, las cuales se ha encontrado con fisuras y luego fracturas durante la operación del motor, ocasionando un daño grave a otros mecanismos que interactúan con ellas en la cámara de combustión como pistones, camisas de pistón, culatas, guías de válvulas y turbocargadores.

Al momento de suceder una falla de válvulas de admisión o escape, el motor dañado forzosamente tiene que salir de producción de energía eléctrica ocasionando pérdidas no sólo en el área de producción durante el tiempo que lleva la reparación, sino también en el incremento del costo variable de Operación y Mantenimiento, tal es el caso de repuestos que será necesario reemplazar, muchos de ellos con escasez en el mercado.

El estudio explica como evitar que las válvulas de escape y admisión continúen fallando y lleva a buscar un mecanismo o técnica de Ensayos No Destructivos que nos advierta por medio de inspecciones cuando las válvulas estén próximas a fallar y removerlas del motor.

El Ultrasonido es una herramienta de mantenimiento predictivo que los Ingenieros de Mantenimiento utilizamos y es sumamente útil en la solución este tipo de problemas, con ella podemos detectar anomalías en las válvulas de admisión y escape al ser inspeccionadas durante Mantenimientos Preventivos programados.

OBJETIVOS

GENERAL

Reducir el costo variable de producción de energía eléctrica de Operaciones y Mantenimiento; por fallas en válvulas de admisión y escape en plantas de generación de energía eléctrica por motores de combustión interna.

ESPECÍFICOS

1. Aumentar la Disponibilidad operativa en un 1.5% de los motores de combustión interna de la planta de generación de energía eléctrica.
2. Aumentar la Confiabilidad operativa en un 1.5% de los motores de combustión interna de la planta de generación de energía eléctrica.
3. Elaborar procedimiento de monitoreo de condición por ensayos no destructivos y de mantenimiento predictivo por ultrasonido en válvulas de admisión y escape de motores de combustión interna de la generadora de energía eléctrica.

1. ASPECTOS GENERALES, COSTOS DE MANTENIMIENTO E INDICADORES DE OPERACIÓN

1.1 GENERALIDADES

Durante los años 50 los motores de combustión interna basados en ciclo diesel fueron sustituyendo a las turbinas de vapor en propulsión naval. Principalmente se utilizaban motores de dos tiempos que, al trabajar con una velocidad mas baja, se podían acoplar directamente al propulsor.

La evolución posterior se concentró en la mejora de los motores de cuatro tiempos, más rápidos, con menor peso y volumen.

El combustible que se utilizaba era casi únicamente producto destilado, relativamente económico en aquellos años.

Esos mismos motores se utilizaban para la generación de energía eléctrica en plantas estacionarias.

El combustible en muy poco tiempo paso a ser el factor de mayor importancia en el establecimiento de los costos. Esto provocó la búsqueda de soluciones que ofrecieran un rendimiento más alto y la utilización de un combustible más económico.

Los fabricantes de motores centraron sus esfuerzos en adaptar y mejorar sus máquinas para la utilización de productos residuales de las refinerías como el combustible pesado, producto mucho más económico.

La utilización de motores diesel para la generación de energía eléctrica se generalizó en plantas estacionarias de tamaño mediano. Comenzaron también los problemas en estas plantas, atribuibles a la calidad de combustible.

Para los usuarios, se trataba de problemas de diseño de las máquinas, no diseñadas para utilizar el nuevo tipo de combustible que se popularizaba por su bajo precio.

Para los fabricantes se trataba de un problema de mantenimiento, especialmente en lo referido a la inclusión de los nuevos componentes, centrífugas, filtros, etc., requeridos para el tratamiento de este nuevo tipo de combustible de peor calidad y a los que el usuario no estaba acostumbrado.

Desde estas bases se evoluciona a la situación actual en donde los fabricantes ya se han adaptado a la utilización de fuel pesado como combustible principal, ofreciendo máquinas y equipos auxiliares de tratamiento para la combustión de productos con densidades de 990 Kg. /m³ a 15°C y viscosidades hasta 700 cSt a 50°C.

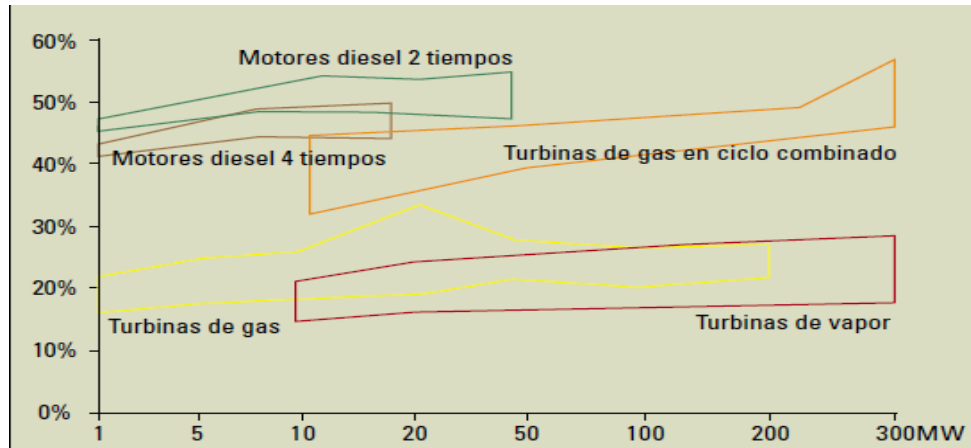
La oferta se diversifica y se especializa, y además de las soluciones para la generación en carga base con un combustible económico, se desarrollan soluciones particulares para la utilización de crudo y gas como combustible, manteniendo el alto rendimiento de las máquinas del ciclo diesel.

La utilización de destilado como combustible queda para las instalaciones de pequeña potencia, donde prima la facilidad de instalación y manejo frente a la economía de operación.

Se desarrollan también las máquinas duales, capaces de quemar tanto destilado como combustible pesado, para aquellas instalaciones de grupos de emergencia donde debe de primar la seguridad de funcionamiento y la conmutación inmediata entre distintos combustibles, añade un mayor margen de seguridad frente a posibles fallos en el suministro.

1.2 VIGENCIA DE LAS PLANTAS DIESEL

Los motores de combustión interna, frente a otro tipo de accionamiento primario, ofrecen la ventaja de su mejor rendimiento. En la figura 1 se comparan los rendimientos de distintas soluciones, motores diesel, turbinas de gas, turbinas de vapor y ciclos combinados.



fuelle: anales de mecánica y electricidad

Figura 1

Rendimientos de distintos tipos de plantas térmicas de generación eléctrica.

Una de las limitaciones de las plantas diesel es el tamaño unitario de las máquinas. Las unidades instaladas de mayor potencia son de 60 Mw. por medio de motores diesel de dos tiempos.

Acorde a grafica 1 sobre rendimientos, la tendencia natural en grandes instalaciones de generación es hacia la instalación de turbinas de gas en ciclo combinado, en donde se aprovecha el calor de los gases de escape para producir vapor, que se utiliza a su vez para generar energía eléctrica en una turbina, obteniendo un rendimiento muy elevado en la instalación. Como el tamaño unitario de estos equipos puede llegar a ser muy alto, esta es la solución mas difundida en aquellos países donde el establecimiento de una red de transporte amplia y segura permite la concentración de las unidades de generación de gran tamaño, en pocos lugares, obteniendo beneficios de economías de escala.

Esta no es la situación que se da en los países en vías de desarrollo como el nuestro ni en zonas aisladas, citamos el caso del departamento del Petén en donde el suministro eléctrico es en base a dos centrales con motores diesel que proporcionan electricidad al departamento por medio del “Sistema aislado de Petén”.

En estas circunstancias, la solución más eficaz suele ser la del establecimiento de plantas de generación de potencia mediana, próximas a los lugares donde se produce el mayor consumo. Si coincide esta situación con la falta de otros combustibles naturales en la zona, lo más sencillo suele ser de dotar a la zona de un parque de almacenamiento de productos petrolíferos, o utilizar los existentes, normalmente nacidos para proporcionar gasolinas y gasóleos para uso industrial y doméstico.

En situaciones como el departamento de Petén, se producen oscilaciones en la demanda que tiene que ser atendida por una única central durante las horas no pico y en el Sistema nacional interconectado algunas centrales diesel operan a carga parcial como Reserva Rodante Operativa en horas no pico. Aquí nuevamente nos encontramos con un comportamiento superior por parte de los motores diesel. Estos son capaces de mantener un mejor rendimiento trabajando a baja carga que lo que pueden ofrecer otras soluciones, según lo comparado en la figura 2.

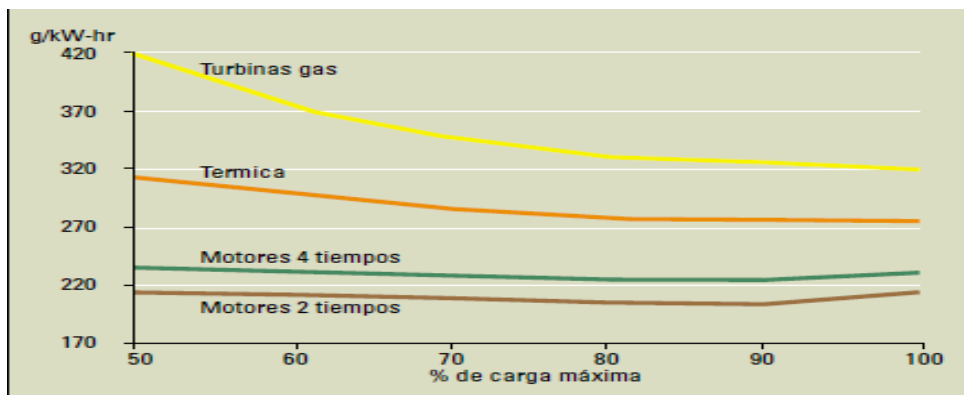


Figura 2 fuente: anales de mecánica y electricidad

Eficiencia de Motores de Combustión Interna comparado con distintos tipos de Plantas Térmicas de Generación Eléctrica

Puede observarse también en la figura 2 que el rendimiento de los motores diesel a 100% de carga también superior a las otras alternativas térmicas.

1.3 INDICADORES DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD

Las actividades de operación y mantenimiento en las plantas generadoras diesel se miden con parámetros que, enfocados a la toma de decisiones, son señales del monitoreo de su administración, de esa manera se verifica que las actividades vayan en el sentido correcto y permiten evaluar los resultados.

Estas señales son conocidas como indicadores de gestión. Un indicador de gestión es la expresión cuantitativa del comportamiento o desempeño de un proceso, en este caso la operación y mantenimiento de la maquinaria, cuya magnitud, al ser comparada con algún nivel de referencia, puede estar señalando alguna desviación sobre la cual se toman acciones correctivas o preventivas, según sea el caso.

Un indicador es una medida de la condición de un proceso o evento en un momento determinado. Los indicadores en conjunto pueden proporcionar un panorama de la situación operativa, de mantenimiento o cualquier proceso en general de la planta generadora.

Empleándolos en forma oportuna y actualizada, los indicadores permiten tener control adecuado sobre una situación dada, la principal razón de su importancia radica en que es posible predecir y actuar con base a las tendencias positivas o negativas observadas en su desempeño global.

Los indicadores son una forma clave de retroalimentar la operación y mantenimiento de la planta, y son más importantes todavía si su tiempo de respuesta es inmediato, o muy corto, ya que de esta manera las acciones correctivas son realizadas sin demora y de forma oportuna.

No es necesario tener bajo control continuo muchos indicadores, sino solo los más importantes, los claves. Los indicadores que engloben fácilmente el desempeño total de la planta generadora deben recibir la máxima prioridad.

Los indicadores de máxima prioridad para la operación y mantenimiento de la central diesel son la disponibilidad y confiabilidad de la maquinaria, por supuesto existen otra serie de indicadores de control en la operación global de la planta.

Los principales beneficios derivados de los indicadores de disponibilidad y confiabilidad en la operación de la planta se pueden enumerar:

A - Monitoreo de la operación y mantenimiento de la maquinaria de la planta: el mejoramiento continuo sólo es posible si se hace un seguimiento exhaustivo a cada eslabón de la cadena operativa del proceso de generación de energía eléctrica. Las mediciones son las herramientas básicas, no sólo para detectar las oportunidades de mejora, sino además para implementar las acciones.

B - Benchmarking: si una planta generadora pretende mejorar sus procesos, una buena alternativa es traspasar sus fronteras y conocer el entorno para aprender e implementar lo aprendido, una forma de lograrlo es a través del benchmarking para evaluar procesos y actividades y compararlos con los de otra central generadora diesel de similar equipo. Esta práctica es más fácil si se cuenta con la implementación de los indicadores como referencia.

C – Gerencia del cambio: un adecuado sistema de medición les permite a las personas conocer su aporte en las metas de la organización y cuáles son los resultados que soportan la afirmación de que lo están realizando bien. Las características que tienen los indicadores de disponibilidad y confiabilidad son simplicidad, adecuación (entendido como la facilidad de la medida para describir por completo el fenómeno o efecto; refleja la magnitud del hecho realizado y muestra la desviación real del nivel deseado), valido en el tiempo, útil y oportuno (capacidad para que los datos sean recolectados a tiempo e igualmente requiere que la información sea analizada oportunamente para poder actuar).

Los indicadores de disponibilidad y confiabilidad resultan ser una manifestación de los objetivos estratégicos de la organización a partir de su Misión; igualmente, resultan de la necesidad de asegurar la integración entre los resultados operacionales y estratégicos de la generadora y reflejan la estrategia corporativa a todos los empleados.

Los elementos de los indicadores de disponibilidad y confiabilidad son principalmente:

A – La definición: expresión que cuantifica el estado de la característica o hecho que quiere ser controlado.

B – El Objetivo: es lo que persigue el indicador seleccionado, indica el mejoramiento que se busca y el sentido de esa mejora, en el caso de disponibilidad y confiabilidad es la maximización. El objetivo en consecuencia, permite seleccionar y combinar acciones preventivas y correctivas en una sola dirección.

C - Los valores de referencia: el acto de medir es realizado a través de la comparación y esta no es posible si no se cuenta con un nivel de referencia para comparar el valor de un indicador.

D – La responsabilidad: clarifica el modo de actuar frente a la información que suministre el indicador y su posible desviación respecto a las referencias escogidas.

E – Los puntos de medición: define la forma como se obtienen y conforman los datos, los sitios y momento donde deben hacerse las mediciones, los medios con los cuales hacer las medidas, quiénes hacen las lecturas y cual es el procedimiento de obtención de las muestras. Ello permite establecer con claridad la manera de obtener precisión, oportunidad y confiabilidad en las medidas.

F – La periodicidad: define el periodo de la realización de la medida, cómo se presentan los datos, cuando realizan las lecturas puntuales y promedios.

G – El sistema de procesamiento y toma de decisiones, el sistema de información debe garantizar que los datos obtenidos de la recopilación de históricos o lecturas, sean presentados adecuadamente al momento de la toma de decisiones. Un reporte para tomar decisiones debe contener no solo el valor actual del indicador, sino también el nivel de referencia.

Para definir los indicadores de disponibilidad y confiabilidad de control en el proceso de operación y mantenimiento de la central diesel, es importante el monitoreo de forma continua, ya que el seguimiento tiene un costo alto cuando no esta soportado por un verdadero beneficio.

Podemos entonces definir la Disponibilidad como la cantidad de tiempo que esta disponible un equipo para formar parte de un proceso productivo o también como el tiempo total durante el cual el equipo esta operando satisfactoriamente, más el tiempo que estando en receso, puede trabajar sin contratiempos durante un período.

Su propósito es identificar y cuantificar los tiempos de interrupción del servicio de los activos.

La fórmula para realizar el cálculo de la disponibilidad mensual de un motor en la central de generación diesel esta dado por:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by})}{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by} + \sum \text{ horas mto correctivo no planificado} + \sum \text{ horas de mto correctivo planificado} + \sum \text{ horas de mto preventivo})} \times 100$$

Un valor de disponibilidad entre un 93 a 95% se considera muy bueno, acorde a los contratos entre operadores y propietarios de las centrales diesel. La Confiabilidad es el grado de confianza que nos da un equipo que no fallará en un período de tiempo determinado o también es la probabilidad de que un equipo pueda operar sin fallar durante un período estipulado. El estudio de la confiabilidad es el estudio de fallos de un componente, si se tiene un equipo sin fallo se dice que el equipo es cien por ciento confiable.

Su propósito es asegurar el servicio continuo de los activos.

La fórmula para realizar el cálculo de la confiabilidad mensual de un motor en la central de generación diesel esta dado por:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by})}{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by} + \sum \text{ horas mttto correctivo no planificado})} \times 100$$

La confiabilidad siempre es mayor o igual a la disponibilidad, el aumento de la confiabilidad (disminución de imprevistos) trae enormes beneficios económicos, en especial porque el proceso de generación de energía eléctrica posee alto costo por perdida de producción.

Los elementos que atentan contra la confiabilidad del sistema de producción de energía eléctrica son:

- A – incorrecta operación de motores y/o equipos auxiliares
- B – incorrecta estrategia de mantenimiento
- C – imprevistos
- D – problemas de diseño y fabricación

Para minimizar índices bajos de disponibilidad y confiabilidad es necesario tomar en cuenta los siguientes puntos:

A - Estrategias de capacitación de operadores y personal de mantenimiento.

B – Estrategias de mantenimiento predictivo (Análisis de síntomas emitidos por los equipos), mantenimiento proactivo (minimizar causa raíz de falla) y monitoreo de condiciones (análisis periódico de vibraciones, análisis de aceite y partículas de desgaste, termografía, ultrasonido, monitoreo de defectos eléctricos, análisis voso y las que se consideren pertinentes acorde al equipo en monitoreo).

C – Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM

D – Mantenimiento Productivo Total TPM.

1.4 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos variables de producción de energía eléctrica en una central diesel principalmente dependen del precio internacional del combustible, el restante es el costo de operación y mantenimiento de la planta, a grandes rasgos.

Ilustrando esta situación, se toma el ejemplo de una planta pequeña de 7 Mw. a depreciar a un plazo de 5 años.

Para evitar la comparación con situaciones particulares, tales como exenciones de impuestos en la importación de combustibles para instalaciones de generación de energía eléctrica, etc. se toman como base precios internacionales de referencia.

Actualmente el cálculo de costos se podría desglosar acorde a Tabla I (referencia bibliográfica 10) en donde se toman los valores iniciales para el cálculo (datos en base a precios de enero 2009). Estos cálculos están bastante simplificados y suponen la existencia de un terreno e infraestructura básica.

En la tabla II puede observarse los resultados de costos de operación y mantenimiento obtenidos de los datos de tabla I.

Tabla I

Valores iniciales para cálculo de costo Operación y Mantenimiento

* Precio de combustible fuel oil pesado, con poder calorífico de 42700 KJ/Kg. y acorde a la norma CIMAC

K35 de requerimientos para combustibles residuales para motores diesel.	300 US\$/ton
* Precio de aceite lubricante.	2200 US\$/ton
* Repuestos para período de 5 años.	800,000 US\$
* Costo de Operación y Mantenimiento para período de 5 años.	400,000 US\$
* Consumo específico de combustible (cec).	210 g/Kwh.
* Consumo de aceite lubricante.	2.30 Kg. /hr.
* Horas de funcionamiento de planta, anual.	7000
* Factor de carga.	100 %
* Producción Kwh al año.	49, 000,000

Tabla II

Resultados iniciales de costo de Operación y Mantenimiento

* Costos de Lubricante. = (consumo de lubricante * precio del lubricante * horas de operación anual) / Kwh producidos al año	0.00075 US\$/Kwh
* Costo de Repuestos = (Repuestos para periodo de 1 año) / Kwh producidos al año.	0.00326 US\$/Kwh
* Costo de Mantenimiento = (Costo O&M para periodo de 1 año) / Kwh producidos al año.	0.00163 US\$/Kwh

* Total costo de Mantenimiento. **0.00562 US\$/Kwh**

* Costo Combustible = ((Consumo específico de combustible, cec) * (Kwh. producidos al año)/1,000,000)) * (Precio de combustible) / Kwh producidos al año 0.0630 US\$/Kwh

* Costo total de Operaciones y Mantenimiento = (Costo total mantenimiento + Costo de combustible). **0.0686 US\$/Kwh**

Suponiendo un precio de US\$ 5, 200,000 para una planta de estas características y su depreciación en 5 años.

* Costo de inversión = (Precio de planta / No. de años a amortizar) / Kwh. producidos al año. 0.02122 US\$/Kwh

*** Costo total de Operaciones y Mantenimiento incluyendo amortización de la planta. 0.08985 US\$/Kwh**

Anteriormente se hizo la notación que estos cálculos presuponen la existencia del terreno e infraestructura básica. Otro caso es donde se tiene que considerar todos los gastos inherentes a los estudios previos, garantías de cobro, establecimiento de contratos de suministro de combustible, financiamiento, terrenos, peajes y otros costos de desarrollo, que pueden llegar a alcanzar un 30% de los costos considerados para la construcción de la planta. Esto tendría que ser objeto de un estudio más detallado.

Un punto importante es la relación entre costos de combustible / costos totales es del 70%, cuando en años anteriores no sobrepasaba el 40%.

Ahora nos encontramos en una evolución continua de máquinas cada vez más eficientes y más económicas, frente a unos recursos naturales cada vez más escasos.

El reto, para las máquinas de combustión interna está en trabajar con combustibles de inferior calidad, fracciones mas pesadas en la destilación del petróleo o crudos de poco valor, manteniendo niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera reducidos; éste será el reto de la siguiente década.

2. FALLA EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

2.1 DESGASTE EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

La operación y el mantenimiento de los motores de combustión interna en centrales de generación de energía eléctrica es un trabajo de sumo cuidado, manteniendo las reglas de seguridad tanto para el personal como para los equipos, las protecciones de seguridad instaladas nunca deben removerse ni cambiarse, si hubiera algún elemento dañado debe de reportarse inmediatamente para ser sustituido. Seguir las instrucciones y recomendaciones dadas por el fabricante en los manuales de operación y mantenimiento, es la base para asegurar una larga vida del equipo, correcto desempeño y economía de la central diesel.

Es de vital importancia que el departamento de operaciones de la Central Diesel realice un monitoreo y control estricto de las condiciones operativas del motor y que sean acordes a las instrucciones proporcionadas por el fabricante, ya que ésta es la principal influencia en el cumplimiento de la expectativa de vida de los componentes de la cámara de combustión de alta compresión: válvulas de admisión y escape, pistón y camisa de pistón.

A continuación se enumeran algunas instrucciones para el operador, que le ayuden a mantener la expectativa de vida de los componentes de la cámara de combustión y así asegurar costos de mantenimiento y operación bajos.

2.1.1 COMBUSTIBLE

La calidad del combustible pesado ha disminuido en los últimos años, muchos residuos del proceso de refinación, procesos de manufactura industrial y de la industria química son añadidos al combustible, esto resulta en que los

combustibles tienden a tener pobre calidad de ignición y una baja velocidad de combustión y la tendencia a formar dureza y componentes abrasivos, por estas razones las normas internacionales ISO y CIMAC aplican requerimientos generales para los combustibles, por el momento estas normas no proveen alguna información acerca de las propiedades de combustión de los combustibles. Los proveedores de combustibles se encuentran actualmente trabajando en definir propiedades y límites más precisos. De tal manera que se ha vuelto muy difícil para los operadores de centrales diesel evaluar las propiedades de combustión en los combustibles pesados y hacerlos compatibles con las características de operación de los motores diesel de gran tamaño.

Los combustibles con pobre calidad de ignición conducirán al incremento en el número de pistones y válvulas quemadas (figura 3), debido a la formación de depósitos de combustible que eventualmente se quemarán o arderán en la corona del pistón o en las válvulas de escape, en casos muy extremos esto puede resultar en válvulas y pistones perforados (figuras 4 y 5). Desafortunadamente es un indicativo en la baja considerable de la expectativa de vida de estos componentes y el tiempo programado entre mantenimientos mayores. En el peor de los casos el vanadio contenido en el combustible puede actuar como catalizador en la formación de ácidos fuertes provenientes de los mismos constituyentes del combustible como el azufre.



Figura 3

Vista superior de
corona de pistón
quemada



Figura 4

Vista inferior de culata con las válvulas de escape quemadas y perforada.

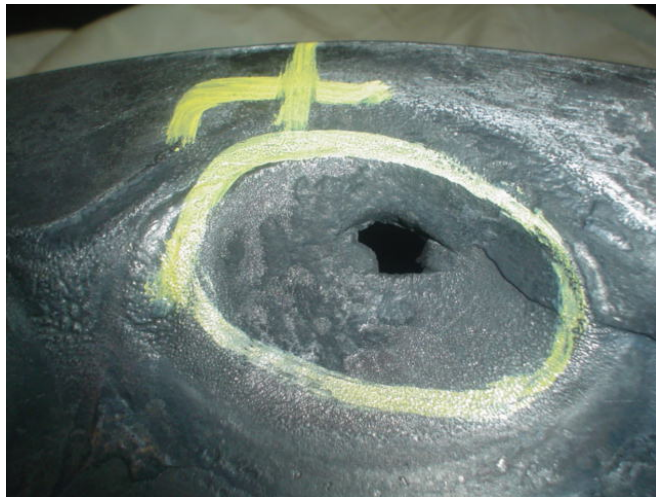


Figura 5

Vista superior de corona de pistón perforada

Se recomienda al operador realizar análisis de laboratorio del combustible en intervalos regulares o si se sospecha de un lote de baja calidad. El análisis debe contener resultados de viscosidad cinemática, densidad, punto de inflamación, cenizas, residuos de carbón Conradson, sedimentos, agua, azufre, vanadio, residuos catalíticos (sílice y aluminio), contenido de componentes aromáticos y asfáltenos.

2.1.2 ACEITE LUBRICANTE

El tratamiento del aceite lubricante tiene particular importancia en el aseguramiento de la correcta separación y filtración del aceite y para mantener un estricto control en los valores operativos del lubricante, ya que estos valores

también determinan en gran porcentaje el tiempo de vida para los componentes de la cámara de combustión; se recomienda realizar en periodos cortos de tiempo análisis del lubricante que contengan resultados de:

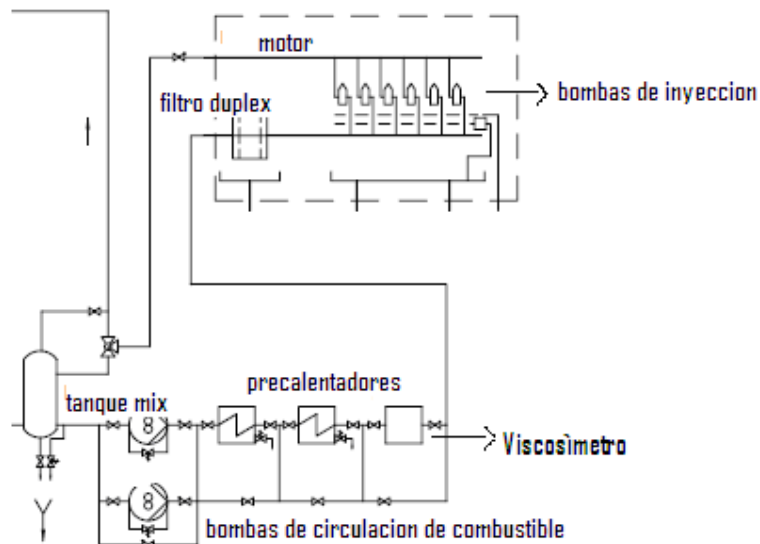
- Viscosidad, muy importante en la formación de la capa de lubricante de separación entre metal – metal de los elementos en rotación y reciprocantes, lo cual evita daños mayores en los componentes del motor.
- Numero de Base Total (TBN), se caracteriza por la capacidad de neutralización en el aceite, a través del aire de combustión y los formadores de ácidos fuertes en el combustible que se introducen en la cámara de combustión; estos dos elementos forman ácidos que deben de ser neutralizados para proteger a los elementos en la cámara de un ataque corrosivo.
- Contenido de agua, un pequeño porcentaje de agua en el aceite tiene efectos corrosivos, en casos extremos bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, burbujas de vapor en el aceite pueden causar la interrupción de la capa de lubricante entre metales, causando graves daños a los componentes de los motores, por ejemplo, en cojinetes de bancada central, cojinetes de biela etc.
- Porcentaje de elementos químicos individuales, especialmente importante el contenido de vanadio, dependiendo del método de medición el contenido de vanadio puede indicar el incremento de combustible en el aceite lubricante, un alto porcentaje de combustible en el aceite del motor puede particularmente afectar el enfriamiento del pistón el cual tiende a quemarse (figura 3).

2.1.3 SISTEMA DE INYECCIÓN

Particularmente se enfatiza la importancia del monitoreo de la correcta viscosidad de inyección del combustible, la conexión entre la viscosidad del combustible y su temperatura es utilizada para el control de la viscosidad de

inyección (figura 6), el viscosímetro esta constantemente capturando la corriente de viscosidad, en caso de discrepancias entre la viscosidad y el valor previamente fijado, el viscosímetro transmitirá una señal al precalentador de combustible el cuál regulará la temperatura del combustible, esto será realizado hasta que ya no haya discrepancia entre la corriente y el valor previamente fijado, una baja temperatura del combustible indicara alta viscosidad y viceversa.

Debido a este principio de control, es muy importante evitar distancias largas entre el viscosímetro y las bombas de inyección en el motor, para asegurar que el ajuste de la temperatura actual del combustible alcance al motor.



Fuente: MaK CM43 O&M instructions

Figura 6

Sistema de control de viscosidad de combustible

Problemas en caso del ajuste incorrecto de la viscosidad del combustible:

- Baja viscosidad: Atrancamiento de las bombas de inyección debido al decremento de lubricación en el émbolo. Formación de burbujas de vapor debido a la alta temperatura del combustible dando como resultado un exceso en el consumo.

- Alta viscosidad: Pobre atomización del combustible el cual creará formaciones severas de hollín debido a la pobre combustión, sobrecarga mecánica en todo el sistema de inyección (rodillos, seguidores de eje de levas, bombas de inyección e inyectores) y componentes de la cámara de combustión (pistones y válvulas de admisión y escape).

2.1.4 TURBOCARGADOR

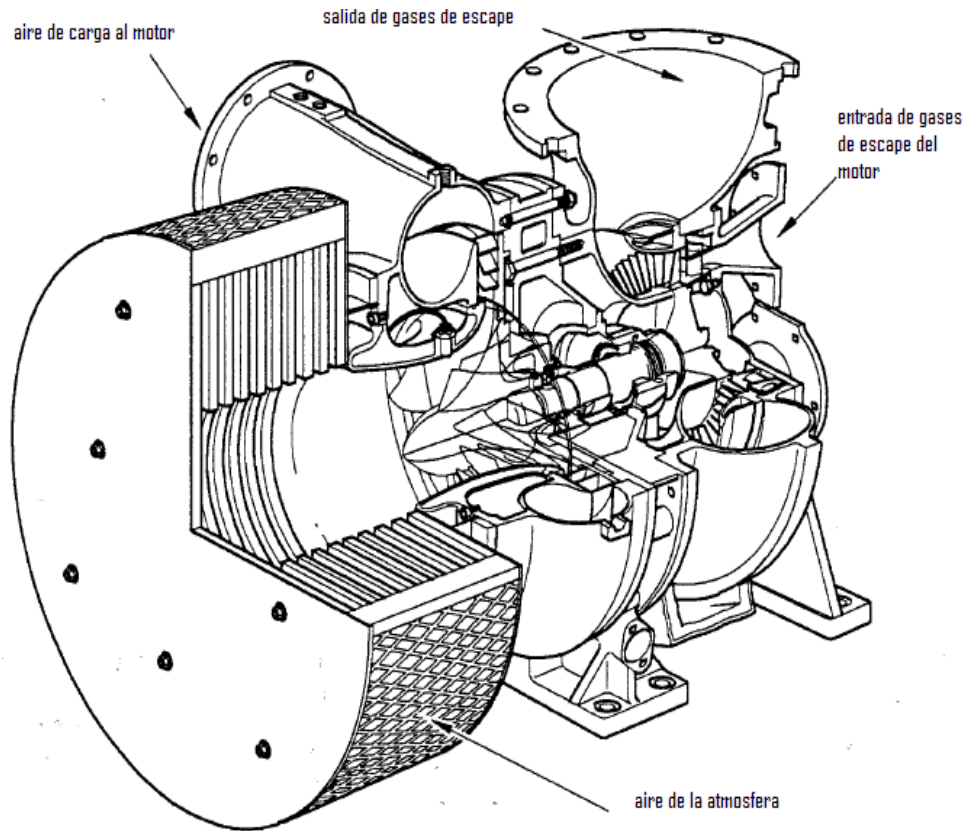
La función del turbocargador es utilizar la energía de los gases de escape del motor de combustión interna (los cuales de otra manera se desperdiciarían) para conducir una rueda de turbina y por ende una rueda de compresor. El compresor incrementa la presión y densidad del aire en la cámara de combustión por lo tanto incrementa la potencia disponible del motor en comparación con un motor de aspiración natural.

El turbocargador ha demostrado ser el más exitoso método de reducción de costos, peso y requerimiento de espacios en las Centrales Diesel y es reconocido como un método confiable de desempeño, eficiencia y consumo de combustible. El turbo cargador consiste en una turbina de flujo axial de una etapa y un compresor centrífugo de aire conectados por eje rotativo soportado por cojinetes.

El gas de escape descargado de los cilindros del motor entran en la carcasa de entrada de la turbina y se aceleran a través del anillo de toberas hacia los alabes de la turbina donde el gas de escape hace rotar al eje, los gases entonces pasan de la carcasa de salida de la turbina hacia la tubería de escape.

El aire requerido por el motor es conducido a través del filtro de aire hacia la carcasa de entrada del compresor en donde es comprimido por un impulsor y un difusor, posteriormente el aire comprimido va hacia la carcasa de salida del compresor, el aire posteriormente es enfriado y forzado hacia la cámara de combustión del motor.

El eje rota en cojinetes localizados entre el impulsor y la turbina, estos cojinetes radiales pueden ser lubricados por un sistema de lubricación propio del turbocargador o por el aceite del motor a través de galerías internas.



Fuente: Napier turbocharger

Figura 7
Turbocargador

Algunos tipos de turbocargadores son enfriados en las carcasas de entrada y salida de gases de escape por medio de camisas de agua.



Figura 8

Vista de turbina de turbocargador

El turbocargador es uno de los más sensibles componentes del motor, La eficiencia del turbocargador depende de su grado de contaminación, la cual se determina si los cilindros individuales son alimentados con suficiente aire de carga. Las consecuencias en el motor debido a un pobre desempeño del turbocargador pueden ser:

- Caída en la potencia producida por el motor
- Incremento del consumo de combustible
- Altas temperaturas en los componentes de las cámaras de combustión, las cuales reducen significativamente en tiempo de vida de estos componentes como pistones y válvulas de admisión y escape.

2.2 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DE VALVULAS DE ADMISION Y ESCAPE

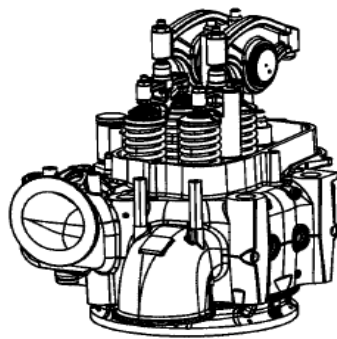
El mantenimiento de motores diesel de plantas estacionarias tiene que ser realizado por personal profesional, con toda la experiencia y conocimientos necesarios para realizar los servicios y mantenimientos apropiados de este tipo de maquinaria, los costos de mantenimientos mal realizados son muy altos en este tipo de negocio sin tomar en cuenta el tiempo de indisponibilidad o el costo por falta de producción de energía eléctrica.

Las válvulas de admisión y escape se encuentran instaladas en la culata, juntamente con los rotadores de válvulas de admisión y escape, puentes de válvulas, inyector de combustible, válvula de seguridad, válvula indicadora y válvula de arranque (la entrada del aire de arranque en los motores en configuración en V, únicamente se instalan en la bancada B).

La culata y los asientos de las válvulas de escape son enfriados por el sistema de alta temperatura del motor (AT), el agua de enfriamiento proviene del block del motor, por medio de agujeros en la parte superior de la camisa de pistón y conectados hacia laberintos en la carcasa de la culata, el agua del sistema de alta temperatura de enfriamiento es descargada por medio de canales en la parte superior de la fundición de la culata hacia el manifold de descarga de agua del motor por medio de una conexión flexible.

El balancín es montado en la parte superior de la culata y se sujeta con pernos ya sea por modo manual o hidráulico, las conexiones del sistema de lubricación pueden ser por medio de pequeñas tuberías o conexión directa entre culata y la parte inferior del balancín, el aceite lubrica y enfría los puentes de válvulas, válvulas y balancín.

La parte superior de la culata es cubierta por una tapadera con un pequeño orificio para inspección de válvulas rotadoras cuando el motor se encuentra funcionando.



Fuente: MaK CM43 O&M instructions

Figura 9

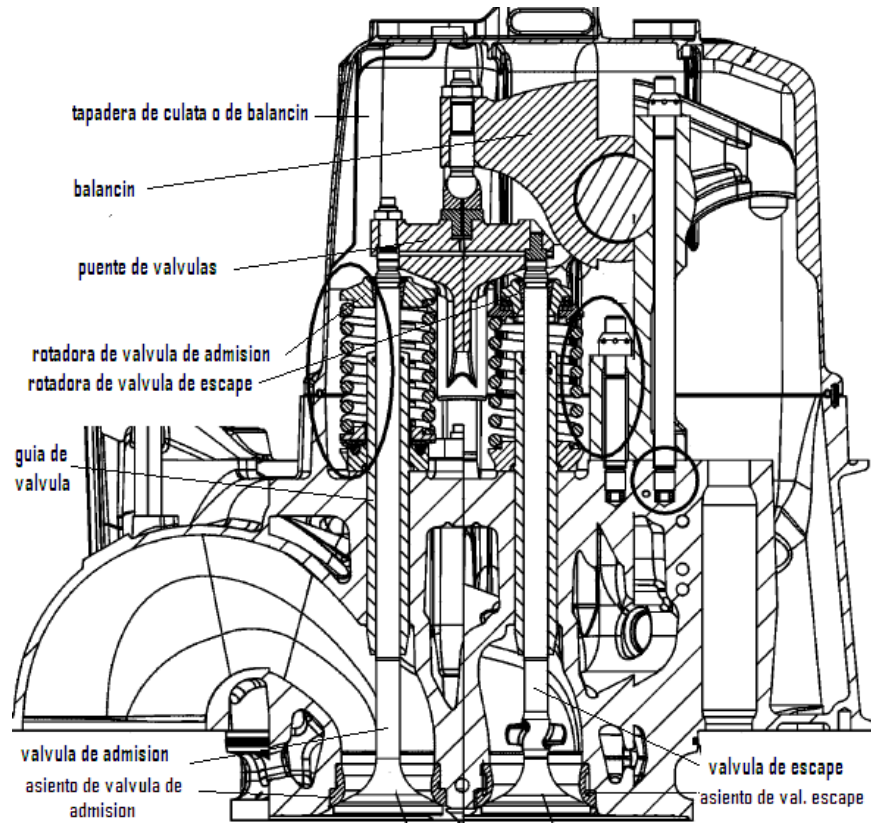
Vista posterior de culata, motor MaK CM43

Los vástagos de las válvulas de admisión y escape son guiados en las guías de válvulas, las cuales son lubricadas y selladas por medio de anillos de goma en la parte superior del vástago.

Las guías de válvulas y los asientos de válvulas al momento de instalarse son congelados con nitrógeno líquido a $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$, reduciendo así su tamaño en pequeñas milésimas de milímetro, lo cual hace la instalación fácil, regresando a su tamaño normal conforme la temperatura se incrementa al dejarlos a la temperatura ambiente, quedando así, sujetos a la carcasa de la culata. Las rotadoras de válvulas de admisión y escape hacen rotar la válvula asegurando una operación suave y de menor desgaste. Las válvulas de admisión y escape son construidas de diferentes materiales debido a las cargas térmicas que soportan, por lo que el cuidado de no mezclarlas es muy importante, en algunos casos son parecidas pero no iguales.

El mantenimiento a válvulas de admisión y escape posterior a su desmontaje de la culata es el siguiente (pueden haber algunas pequeñas variaciones entre diferentes fabricantes: MaK/Caterpillar, Wärtsilä y MAN B&W, pero en general los puntos enumerados a continuación son de uso general:

A – Limpieza de válvulas: Debido a que las válvulas provienen de culatas en uso el primer paso es sumergir las válvulas sucias en un recipiente con químico descarbonizante como el Demal durante un periodo de 48 horas, posteriormente es necesario remover los residuos de carbón más duros incrustados, la experiencia nos ha demostrado que la minuciosa limpieza y evaluación que las válvulas de admisión y escape requieren es únicamente posible por medio de una ráfaga a presión (blasting) con material de vidrio (glass beads, figura 11), las válvulas no deben de ser limpiadas con herramientas con filo o con ácidos inorgánicos como ácido sulfúrico o ráfaga a presión de arena cernida (sandblast).



Fuente: MaK CM43 O&M instructions

Figura 10

Corte de culata de motor MaK CM25



Figura 11

Máquina de ráfaga de vidrio para limpieza de válvulas

B – Inspección Visual: Al momento de realizar la inspección visual el área debe de estar bien iluminada y ventilada, poner mucha atención a los siguientes puntos:

- La superficie del cono de la válvula no debe tener ninguna indicación de desgaste ocasionado por quemaduras o soplado proveniente de la cámara de combustión (blow-by), figura 12.
- El cono y vástago de la válvula no debe tener ningún tipo de golpe o fisura visible, figura 13.
- El cono de la válvula debe estar libre de corrosión, figura 14.



Figura 12

Indicación de blow-by en cono de válvula de escape

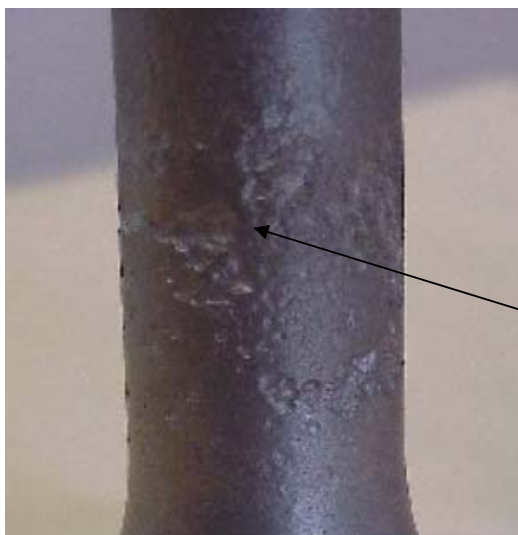


Figura 13

Indicación de golpes en vástago de válvula de admisión



Corrosión en superficie de cono de
válvula de admisión

- Si se encontraran granos ásperos en la cara del cono de la válvula que esta en contacto con los gases de escape en la cámara de combustión, la válvula tiene que ser desechada, este efecto es llamado “formación de empedrado”, figura 15.
- Si se encuentran agujeros de corrosión o daños mecánicos en la proximidad del vástago de la válvula, raíz de la válvula o en la cabeza de la válvula, figura 16.



Figura 15
Formación de
empedrado

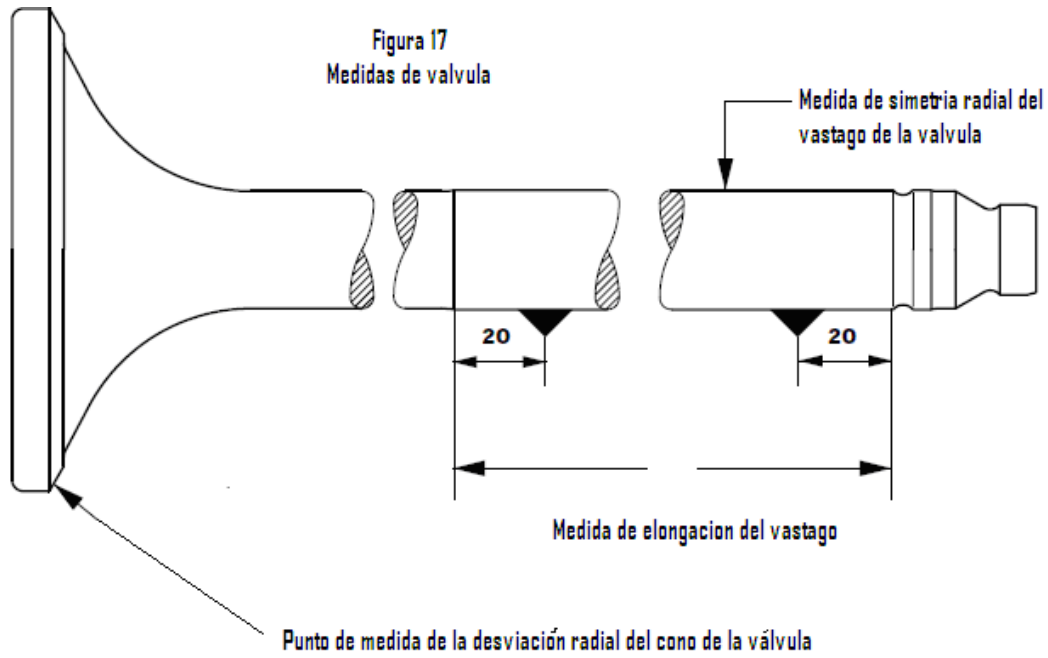


Figura 16

Agujeros de corrosión en válvula de escape

C – Mediciones: Posterior a la inspección visual de las válvulas se realizan las siguientes mediciones:

- El cuerpo del vástago de la válvula no debe mostrar ninguna deformación, tanto en medidas de elongación como la en simetría radial del diámetro en varios puntos, para ello colocar dos soportes a 20 mm. como indica figura 17, las medidas se toman con micrómetro y deben ajustarse a las instrucciones de cada fabricante acorde al modelo del motor.
- La desviación radial del cono de la válvula tampoco debe exceder las medidas proporcionadas por el fabricante, figura 17.



- Si se ha consumido el área “s” dada por el fabricante (normalmente es alrededor de 2 mm.), de la cara expuesta de la válvula a la cámara de combustión la válvula debe ser reemplazada, figura 18.

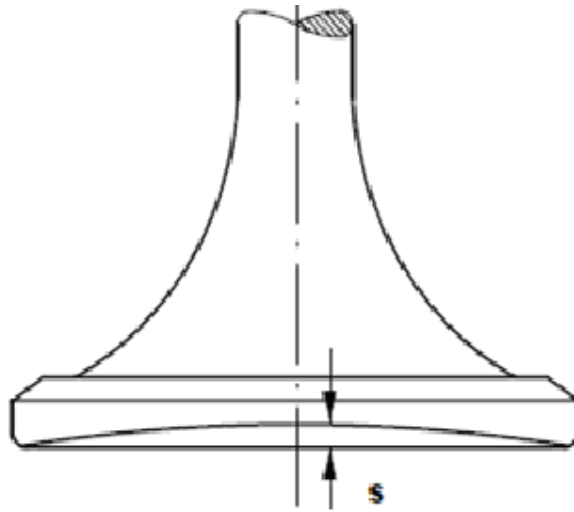


Figura 18

**Material consumido en cara expuesta de la
válvula a la cámara de combustión**

D – Repaso de la superficie de sellado: Debe ser completado por maquinas herramientas de pulido por medio de husillo de alta precisión (figura 19), éstas maquinas deben ser ajustadas al ángulo proporcionado por el fabricante, tener cuidado de no maquinar la ranura. Posterior al pulido se realiza la medición “x” del ancho del área recién pulida, si la distancia fuera menor a la requerida por el fabricante se tiene que desechar la válvula, en las figura 20 y 21 como ejemplo, se muestra el ángulo y dimensiones a chequear para válvulas de admisión y escape de un motor MaK/Caterpillar CM43.



Fuente: Chris Marine Maintenance Methods

Figura 19

Máquina de pulido de válvulas de alta precisión Chris Marine

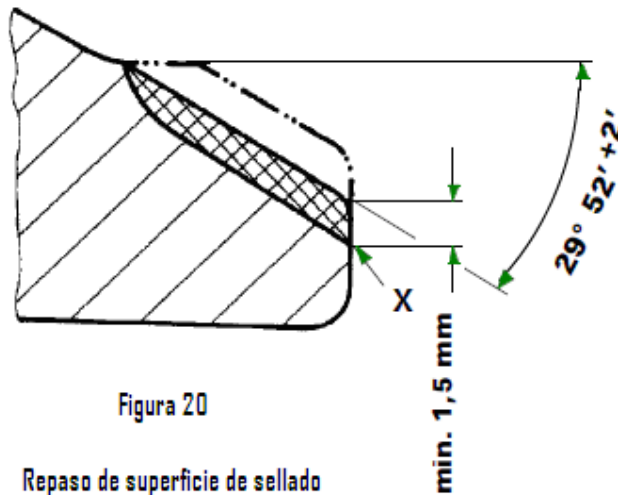


Figura 20

Repaso de superficie de sellado
válvula de escape

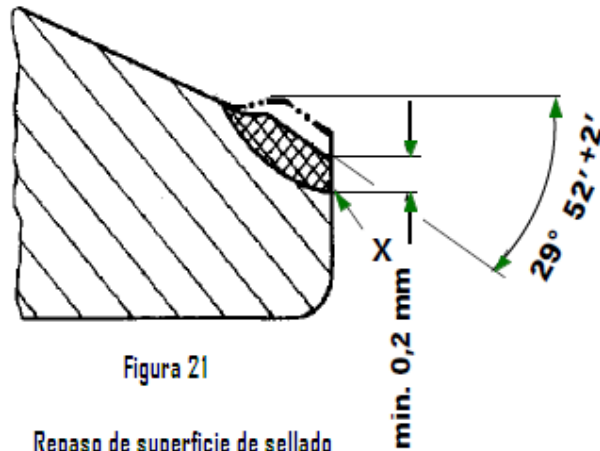


Figura 21

Repaso de superficie de sellado
valvula de admision



E – Asentamiento de válvulas: Aplicarle a la superficie de sellado recién pulida pequeñas gotas de pasta azul de Prusia con una jeringa (figura 23), posteriormente aplicar atomizado un poco de solvente en el asiento de la válvula en la carcasa de la culata para adelgazar la pasta e incrementar el control de la inspección.

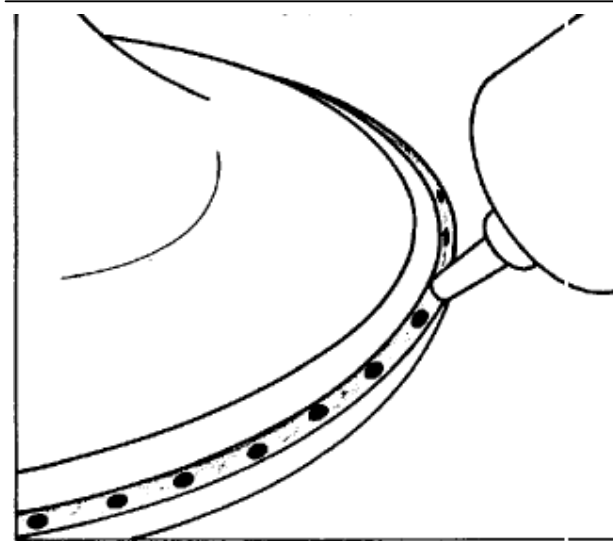


Figura 23

Aplicacion de pasta en superficie pulida

Deslice la válvula dentro de la guía de válvula, coloque la herramienta de asentamiento a la cabeza de la válvula (figura 24) y gire suavemente en ambas direcciones alrededor de 360° con moderada presión, esto permitirá inspeccionar el área de sellado entre el cono de la válvula y el asiento de la válvula en la culata .

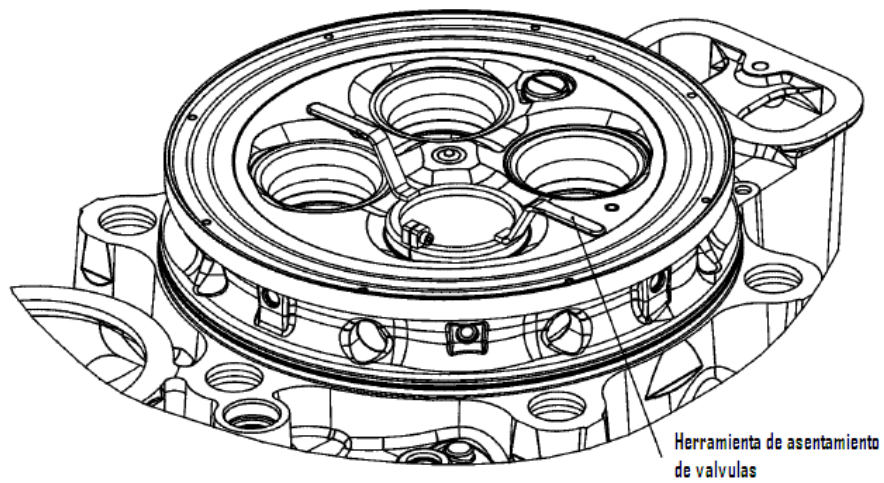


Figura 24

Fuente: MaK CM43 O&M instructions

Después de varias pasadas, la superficie de contacto puede ser revisada “a”, debe ser entre el 30% al 50% del ancho del asiento “b” empezando del diámetro exterior, figura 25. Si la superficie de contacto no cumpliera la inspección el proceso tiene que ser repetido.

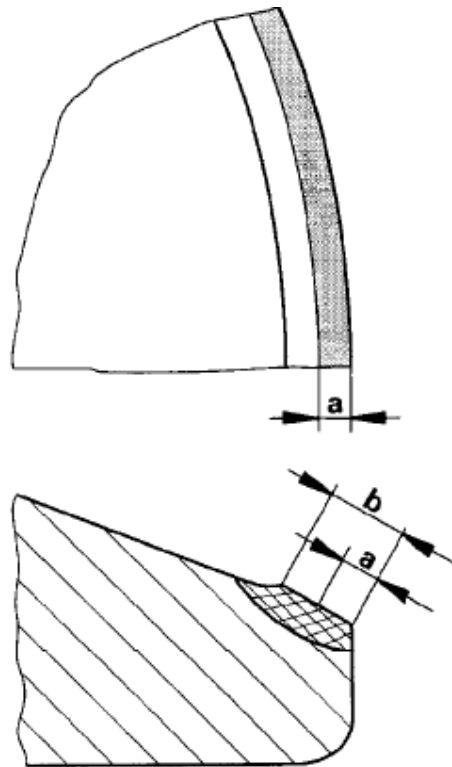


Figura 25

Inspección de superficie de contacto entre cono de válvula y asiento de válvula

F – Asiento de válvulas: Aunque no es un mantenimiento propiamente de las válvulas es importante tener en cuenta que al igual que la superficie de contacto del cono de las válvulas, el asiento de válvula también es limpiado, revisado y medido, si hubieran deficiencias similares a las descritas anteriormente serán reemplazados.

También se realiza un pulido dependiendo del ángulo asignado por el fabricante, ligeramente diferente al de la válvula con maquinas herramientas de pulido de alta precisión, figura 27.

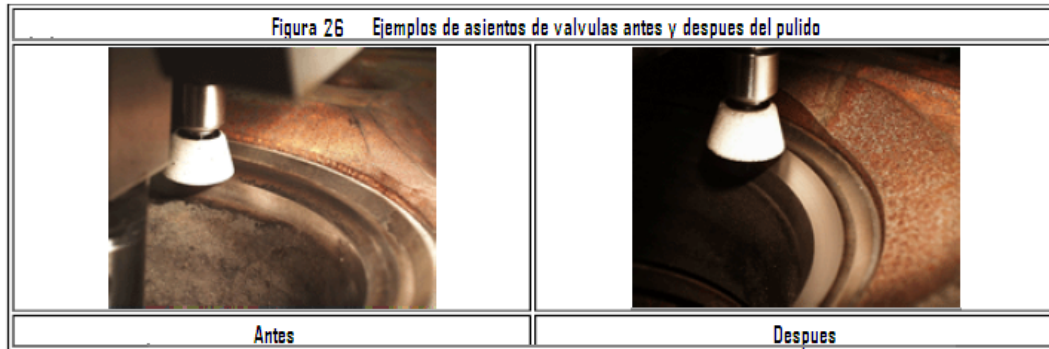


Figura 27

**Maquina herramienta de pulido de
asientos de valvulas**

Fuente: Chris Marine Maintenance Methods

Tomar en cuenta al momento de realizar el pulido en los asientos de válvulas los siguientes puntos importantes: Exactitud del ángulo, perpendicularidad exacta, redondez y concentricidad, figura 28. En el anexo 1 se puede observar una hoja de control de mantenimiento de culatas donde se incluye prácticamente todo el mantenimiento para este equipo.

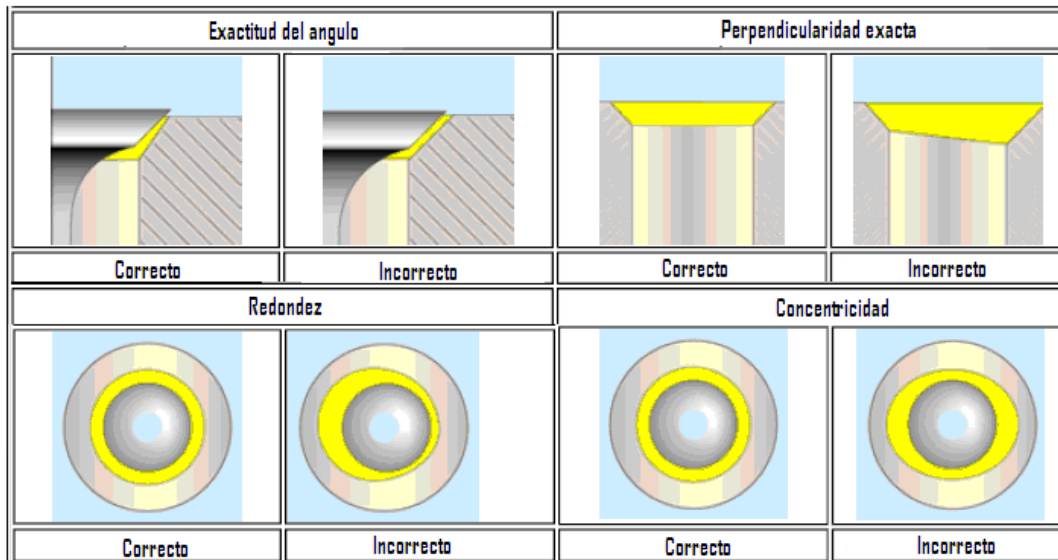


Figura 28
Correcto maquinado de asientos de válvulas

Fuente: Chris Marine Maintenance Methods

2.3 FALLA EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE Y SU INCIDENCIA EN EL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Los procedimientos de mantenimiento a las válvulas de admisión y escape descritos en la sección anterior 2.2 son aplicados normalmente por el personal de mantenimiento de las centrales diesel. La experiencia nos indica que, aunque se realice un seguimiento estricto de las indicaciones dadas por los fabricantes de motores con respecto al mantenimiento de las válvulas, se siguen encontrando fallas en los elementos por lo que se hace una revisión de estas fallas y su incidencia en los motores de combustión interna.

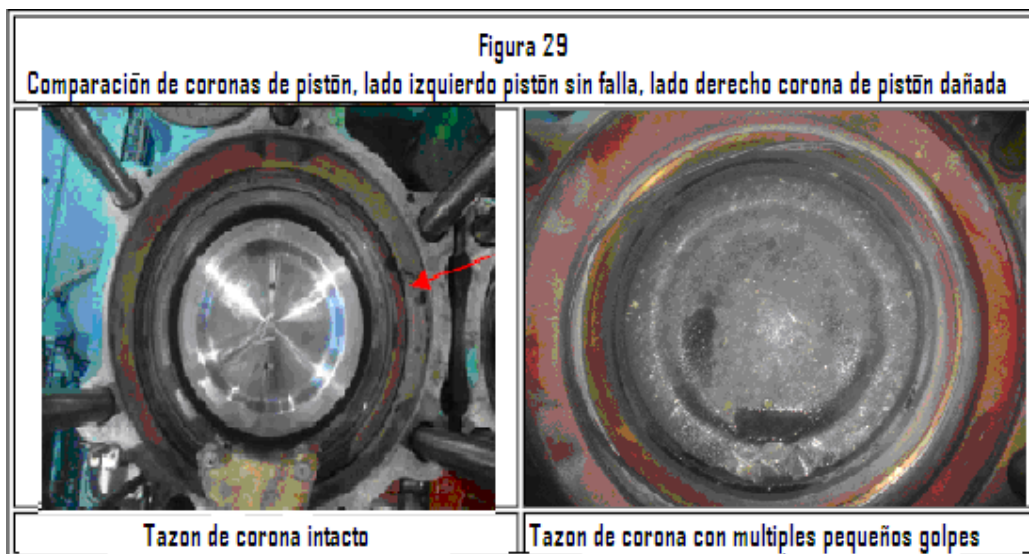
La detección de las fallas en válvulas principalmente se ha hecho de dos maneras, la primera por el súbito incremento de señales de temperatura (en el computador del motor) de gases de escape en un cilindro y de temperatura de entrada de gases de escape al turbocargador, en estos casos los motores cuentan con sistemas de protección por alta temperatura e inmediatamente se envía una señal de disparo a la máquina cuando un valor está fuera de los parámetros previamente establecidos en el programa de control.

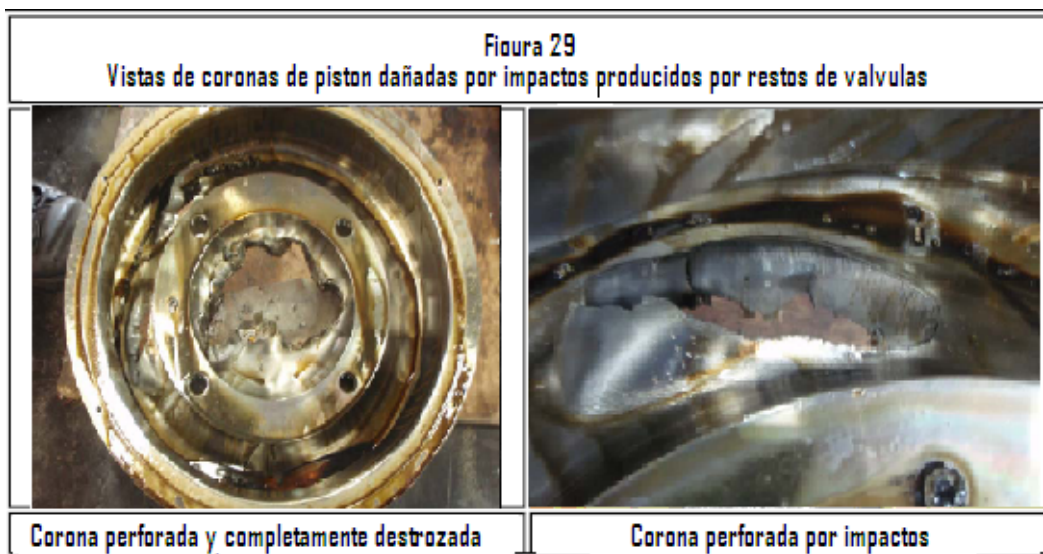
La segunda forma de determinar este tipo de fallas es cuando el personal a cargo del mantenimiento y operación del motor escuchan ruidos anormales en el interior de la máquina en operación, precisamente en el momento cuando la falla empieza, procediendo a realizar el disparo de la máquina manualmente desde la sala de máquinas.

Posterior al disparo de la máquina se realiza una inspección visual interna del motor, en las cámaras de combustión, en la entrada de gases de escape al turbocargador, manifold de gases de escape y turbocargador, encontrándose los daños que a continuación se describen.

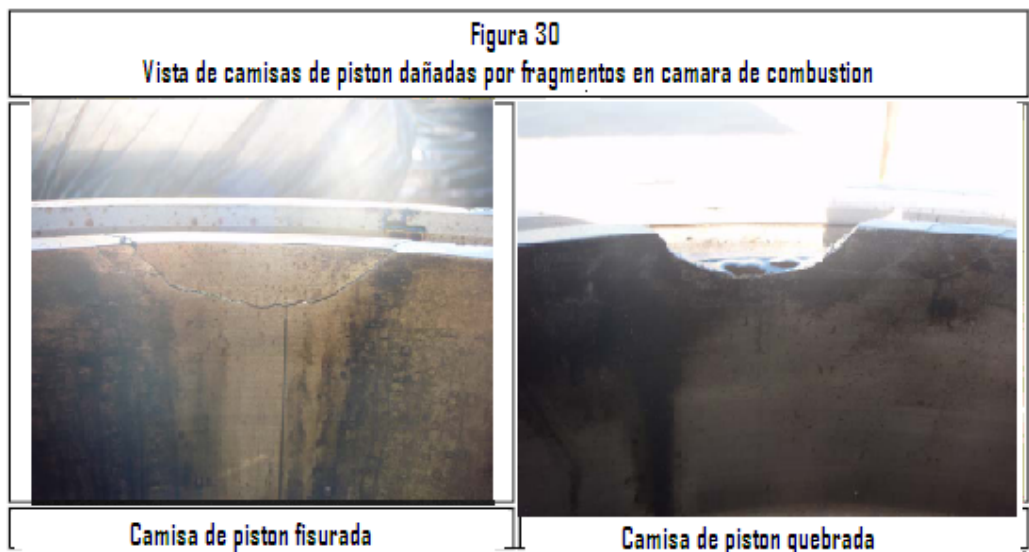
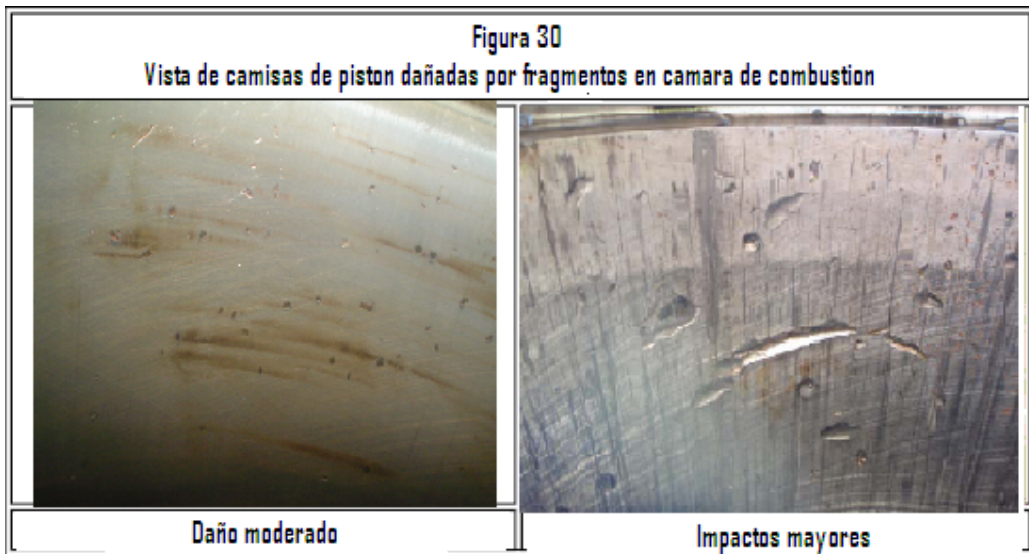
A – Corona de pistón: Pueden catalogarse los daños en las coronas de pistón desde muy leves hasta coronas completamente perforadas y destrozadas, el daño depende de la rapidez con la cual sea detectada la falla, ya sea por los sistemas de protección del motor o por el personal de operaciones y mantenimiento en sala de máquinas; entre más transcurra el tiempo, el daño será mucho mayor. En casos donde el daño al tazón de la corona es muy leve, ésta puede aun reutilizarse, realizando una inspección completa del pistón, que incluya la falda, el tazón y los elementos de sujeción entre falda y tazón.

En casos presentados en la figura 29, todas las coronas de pistón fueron desechadas.

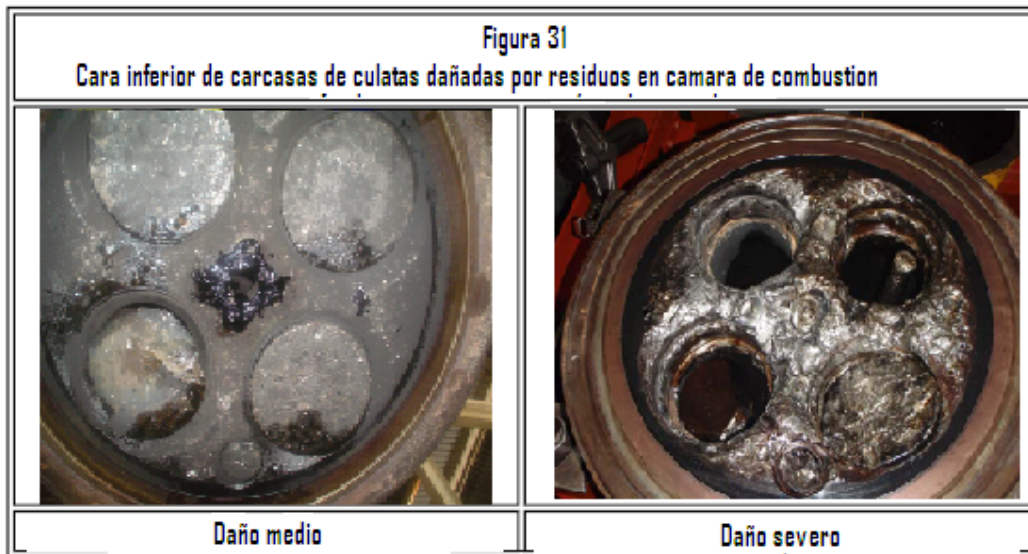
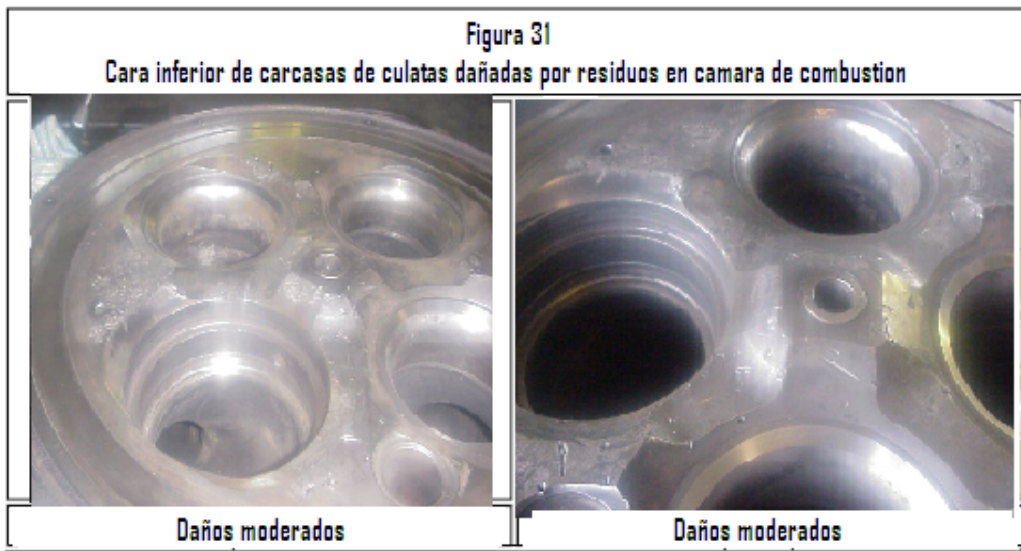




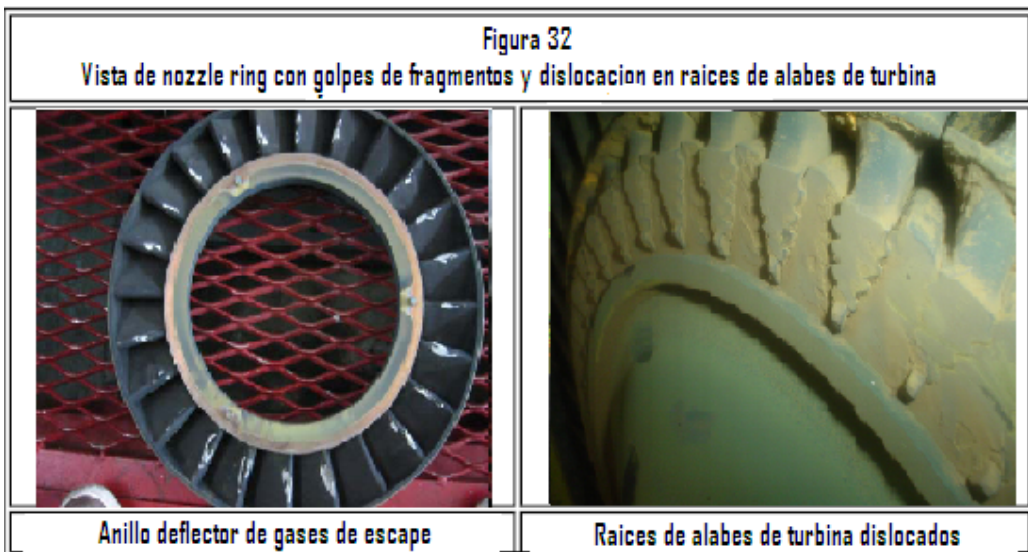
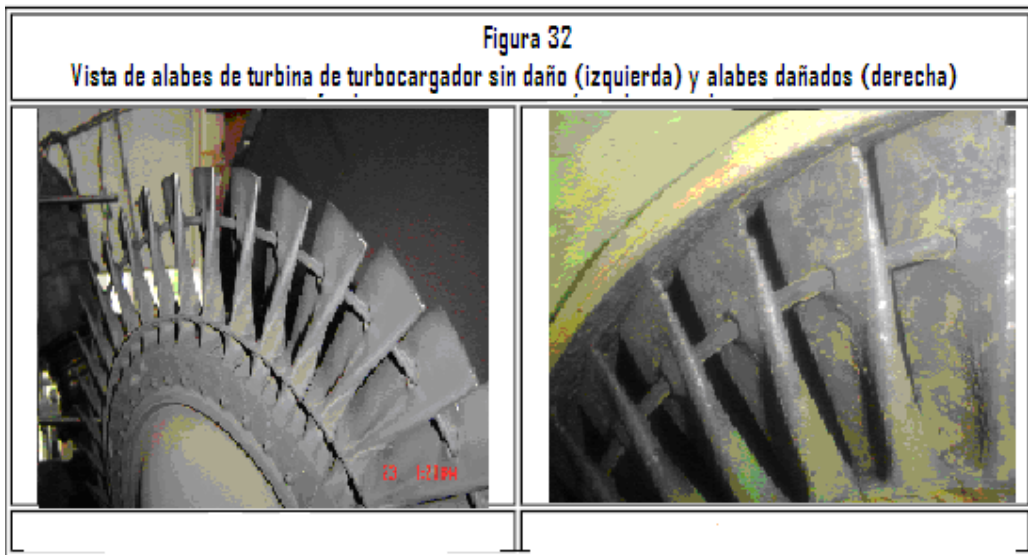
B – Camisa de Pistón: El daño en las camisas de pistón ocurre normalmente en pequeños impactos en la parte superior, cerca de la posición del anillo antipulidor, cuando un daño es muy extenso se ha observado camisas de pistón fisuradas e inclusive quebradas, figura 30, las camisas de pistón al tener el mas mínimo daño ocasionado por golpes de fragmentos deben ser reemplazadas y no podrán ser reacondicionadas.



C - Culata: Los fragmentos que quedan libres ocasionan a la cara de la culata en contacto con la cámara de combustión daños severos, los daños incluyen a los asientos de válvulas de admisión y escape, guías de válvulas de admisión y escape, puentes de válvulas, válvulas rotadoras y en algunos casos a los balancines y varillas de empuje, todos estos elementos deben reemplazarse. Los daños en la carcasa pueden ser reparados por empresas especializadas en Europa, utilizando soldadura de fusión de gas en hornos especialmente acondicionados y luego rectificación de medidas originales, figura 31.

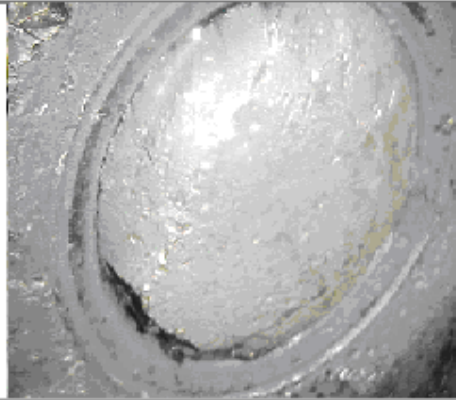


D – Turbocargador: Los daños al turbocargador provienen de los pedazos de metal que salen de la cámara de combustión en el tiempo de escape, los residuos viajan por el manifold de escape y llegan a la turbina del turbocargador golpeando al anillo deflector de gases de escape y dañando los álabes de la turbina, figura 32. Los álabes de turbina pueden reemplazarse o repararse al enviarlos al fabricante del turbocargador si el daño no es muy severo, el anillo deflector de gases de escape normalmente no sufre daños mayores.

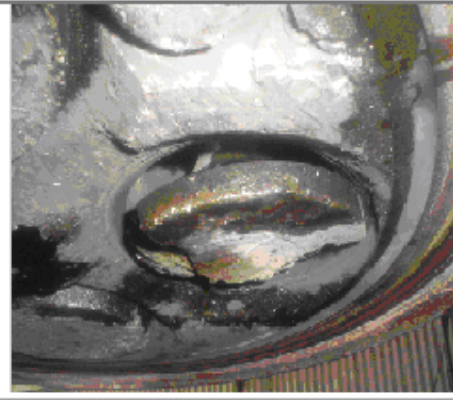


E- Válvulas de admisión y escape: El problema principal que ocasionan las fallas de las válvulas de admisión y escape es la pérdida del material del cono de la válvula el cual ocasiona prácticamente el 90% de los daños a otras partes del motor como se menciona previamente, en la figura 33 observamos cómo quedan las válvulas (o sus residuos) después de una falla de esta magnitud.

Figura 33
Vistas de fallas de válvulas de admisión y escape

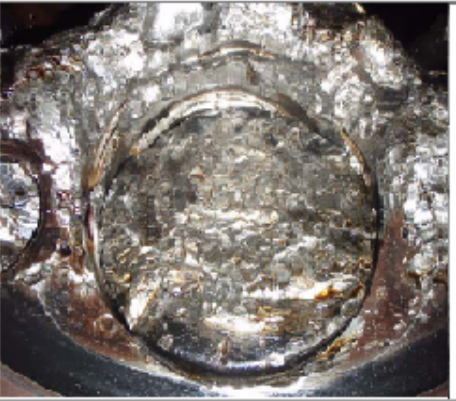


Valvula de admision



Valvula de escape

Figura 33
Vistas de fallas de válvulas de admision y escape



Valvula de admision

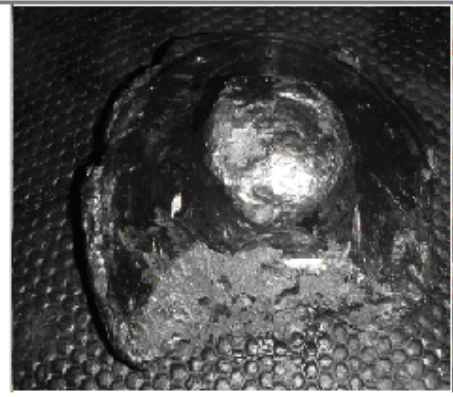


Valvula de escape

Figura 33
Vistas de fallas de válvulas de admisión y escape



Restos de válvulas y asientos de válvulas



Válvula de escape

2.4 ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA

Los métodos usados para fijar la política de mantenimiento son insuficientes por sí mismos para asegurar la mejora continua en mantenimiento. Será la experiencia la que mostrará desviaciones respecto a los resultados previstos. Por tal motivo, es imperativo establecer una estrategia que, además de corregir las citadas desviaciones, asegure que todos los involucrados en el proceso de mantenimiento se involucren en la de mejora del mismo.

Desde este punto de vista, el análisis de fallas se podría definir como: el conjunto de actividades de investigación que, aplicadas sistemáticamente, trata de identificar las causas raíz de las averías y establecer un plan que permita su eliminación.

Se trata, por tanto, de no conformarse con devolver a los equipos a su estado de buen funcionamiento tras la falla, sino identificar la causa raíz para evitar, si es posible, su repetición. Si ello no es posible se tratará de disminuir la frecuencia de la citada avería o la detección precoz de la misma, de manera que las consecuencias sean tolerables o simplemente se pueda mantener controlada. El fin principal es mejorar la confiabilidad, aumentar la disponibilidad y reducir los costos.

Además de las razones generales que justifican la búsqueda de la mejora continua en cualquier proceso, en el caso particular del proceso de mantenimiento son varias las razones específicas que se suelen presentar y que justifican sobradamente esta práctica como objetivo prioritario:

- Evitar la tendencia a convivir con problemas: Los pequeños problemas suelen tener el efecto de indiferencia; él que los sufre termina conviviendo con ellos y considerándolos como una situación normal.

Para evitar caer en esta rutina se precisa establecer claramente que situación se va a establecer como normal y cual como inadmisible. De esta forma se desencadenaran en automático las acciones necesarias para analizar y eliminar las situaciones inadmisibles. El análisis de fallas requiere, en este sentido, establecer los criterios de máximo riesgo admitido.

- Evitar la tendencia a simplificar los problemas: Con frecuencia superior a lo deseable, los problemas suelen ser múltiples e interrelacionados. En tales circunstancias, se impone un análisis para poder separar los distintos elementos del problema, para asignar prioridades y, en definitiva, establecer un plan de acción para evitarlos. Con demasiada frecuencia la escasez de recursos o la simple falta de método, lleva a simplificar el análisis e induce a tomar medidas de nula o escasa efectividad. Este es el caso que se presenta cuando se detiene el análisis de la causa física (por ejemplo fallos de cojinetes por desalineación), y no se profundiza hasta llegar a la causa latente (que podría ser falta de entrenamiento o supervisión) lo que permitiría eliminar no solamente este caso sino otros relacionados con la misma causa. El análisis de fallas permite, en este sentido, aprovechar excelentes oportunidades de mejora de todo tipo.
- Evitar la tendencia a centrarse en el problema del día: La presión del día a día hace olvidar rápidamente el pasado, lo que impide hacer un seguimiento de la efectividad de las medidas aplicadas. Hasta que el problema vuelve a aparecer, convirtiéndose en un círculo vicioso, que lleva a convivir con el problema. El análisis de fallas, en este sentido, ayuda a implantar un estilo o cultura de mantenimiento basado en la prevención.

Antes de proceder al análisis de fallas hay que delimitar el alcance del mismo. Esto se consigue definiendo los límites del sistema.

El sistema es un conjunto de elementos discretos, denominados generalmente componentes, interconectados o en interacción, cuya misión es realizar una o varias funciones, en unas condiciones determinadas.

El análisis de fallas debe contemplar una fase en que se defina el sistema, sus funciones y las condiciones de funcionamiento. En el caso que estudiamos, el sistema es el motor de combustión interna, su función es la generación de energía eléctrica y las condiciones de funcionamiento son en base a parámetros de operación y mantenimiento dadas por el fabricante, dependiendo de cada instalación.

El fallo de un sistema se define como la pérdida de aptitud para cumplir una determinada función, en este sentido se puede clasificar el fallo de este estudio como: un fallo evidente de magnitud parcial, por degradación, de tasa de fallo constante, de efecto crítico y de causa primaria (causa en el propio sistema).

La avería es el estado del sistema tras la aparición del fallo.

La metodología para análisis de solución de problemas, en general, suele ser adoptada y adaptada por cada empresa en función de sus peculiaridades. Haciendo un análisis comparativo de los más habituales, se puede decir que hay dos aspectos fundamentales en los que coinciden:

* El recorrido del proceso: El análisis debe centrarse primero en el problema, segundo en la causa y tercero en la solución.

* La metodología a utilizar: Las condiciones que debe de reunir para garantizar su eficacia son:

a) Estar bien estructurada, de forma que se desarrolle un orden lógico.

b) Ser rígida, de manera que no de opción a pasar ninguna etapa fundamental.

c) Ser completa, es decir, que cada etapa sea imprescindible por sí misma y como punto de partida para la siguiente.

Es evidente la necesidad de fijar unos criterios, que dependerán de cada caso particular, para decidir cuándo llevar a cabo el análisis de averías.

Para la mayoría de los casos sería suficiente asignar a un especialista la organización y confección de los análisis (ingeniero de fiabilidad). Sin embargo cuando los problemas sobrepasan los límites técnicos y organizativos de un especialista, pueden ser mejor analizados por un grupo multidisciplinario: mantenimiento, operaciones, procesos, seguridad industrial, bodega etc.

Esto tiene como beneficio añadido lo siguiente:

- Mejora la comunicación entre departamentos.
- Mejora el conocimiento del funcionamiento de los departamentos.
- Mejora la transparencia.
- Mejora el conocimiento de los procedimientos.

Las causas de las fallas pueden determinarse por:

- Causas relacionadas con el diseño.
- Causas relacionadas con los materiales.
- Causas relacionadas con el proceso y manufactura.
- Causas relacionadas con el montaje e instalación.
- Causas relacionadas con las condiciones de servicio inapropiadas.
- Causas relacionadas con el mantenimiento.
- Causas relacionadas con la operación.

De entre las diversas herramientas existentes para el análisis de averías como por ejemplo el diagrama de Ishikawa, etc. se ha seleccionado para el análisis de falla de las válvulas de escape y admisión al FMEA de las siglas en inglés de Failure Mode and Effects Analysis que traducido en al español es Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).

El FMEA fue desarrollado en base a las necesidades específicas de confiabilidad en la industria aeronáutica, puesto que si una aeronave falla las consecuencias son catastróficas. Se enfoca en la necesidad de conocer los tipos de problemas que pueden presentarse, qué tan probable es que ocurran y que consecuencias tendrán.

En la industria militar surgió como un proyecto hace 60 años, específicamente era utilizado para evaluar la confiabilidad y para buscar la causa de las fallas en sus equipos.

Hoy en día entre algunos procesos normados debe incluirse esta herramienta. Un ejemplo claro es la industria automotriz Estadounidense que utiliza el FMEA para evaluar sus procesos y diseños.

El FMEA es una de varias herramientas que en la industria la ingeniería utiliza para el análisis de los efectos que son productos de fallas, y la evaluación profunda de los modos de falla. Como resultado se obtiene una lista de acciones preventivas, correctivas y proactivas.

Su enfoque principal consiste en conocer la historia de uno o varios equipos, las fallas potenciales, cuándo y por que ocurren y conocer el riesgo. El objeto radica en concluir en decisiones acertadas que sean la plataforma para determinar niveles de mantenimiento basados en la consecuencia de dichas fallas. Debe enfocarse en los equipos críticos. Para determinar cuándo es rentable y necesario utilizar el FMEA, se utiliza un Perfil de riesgo, el cual es la primera herramienta de tres que utiliza el FMEA.

Se debe reunir toda la información posible, y hacer una sinopsis clara para que el ingeniero de confiabilidad o el grupo participante puedan partir de una misma plataforma de decisión.

Aplicar la herramienta representa un esfuerzo considerable, puesto que es necesario dedicarle tiempo y en muchos casos invertir recursos. Por esa razón debe darse prioridad a las fallas con base a la criticidad de equipos, lo mejor es diseñar un perfil de riesgo que esté de acuerdo a las características del proceso. Aplicarlo a cada una de las fallas que ocurren en una planta no es práctico ni efectivo desde un punto de vista costo-beneficio. Una buena práctica consiste en priorizar partiendo de un análisis de Pareto de disponibilidad y eficiencia. Esta herramienta nos orienta en la historia hacia los equipos que han causado mayores pérdidas.

Los pasos que seguiremos en la realización del FMEA para la investigación de la falla de válvulas de admisión y escape son:

- Seleccionar equipo crítico con falla a analizar
- Verificar consecuencia en el perfil de riesgo
- Recopilar información de falla
- Definir falla real que ocurrió
- Identificar causas raíz de la falla
- Definir consecuencias de la falla
- Verificar consecuencias en el perfil de riesgo
- Definir acciones de prevención para la falla
- Hoja de seguimiento
- Documentación final

Una vez realizado el análisis, es necesario tomar decisiones sobre los pasos a seguir para llevar cada modalidad de falla a niveles aceptables de efecto. En algunos casos esto significará hacer lo que sea necesario para que dicha modalidad ocurra, en otros habrán de determinarse acciones que sólo lleven los

efectos negativos a niveles predeterminados considerados como aceptables con base a su gravedad o frecuencia.

En cualquiera de los casos, lo importante es asegurar que se implementen las acciones acordadas, porque de lo contrario los beneficios que esta herramienta nos brinda no podrán obtenerse.

A – Selección de equipo crítico con falla a analizar: El motor de combustión interna por ende es el equipo que estará bajo análisis.

B – Perfil de Riesgo: La tabla III es el formato utilizado para verificar las consecuencias en el perfil de riesgo, esta matriz consta en el eje vertical de las probabilidades de falla desde Muy frecuente hasta Imposible, cada una con su respectiva frecuencia de falla, en el eje horizontal los tipos de falla desde Despreciable hasta Catastrófico, por último una pequeña matriz de consecuencias donde nos ubicamos en la celda de consecuencia de daños a equipo con sus respectivos tiempos de paro, el cual se ajusta a la falla en estudio. En esta pequeña matriz de consecuencias pueden añadirse otros parámetros de tiempos de paro dependiendo del área en que se requiera hacer un estudio (Seguridad, Medio Ambiente, Operacional, etc.) siempre y cuando coincida con los parámetros de aceptabilidad o no aceptabilidad de la matriz de perfil de riesgo (si este fuera el caso se tiene que realizar otra matriz de riesgo por separado). El tipo de falla en estudio se ubica en la matriz de perfil de riesgo, en la celda D II, debido a que la probabilidad de falla es Remota (1 vez entre 6 meses y 1 año) y la gravedad se cataloga como Crítica, debido a que fallas de este tipo ocasiona que el motor se encuentre con una indisponibilidad forzada de 72 horas, tiempo que dura la reparación. Los valores de tiempo en las celdas de probabilidad, la delimitación de áreas de aceptación o no aceptación en la matriz de Perfil de Riesgo y valores de tiempo de falla en la matriz de consecuencia se establecen a criterio del Ingeniero de fiabilidad que realiza el estudio o por normativas propias de la empresa, Tabla III es un ejemplo utilizado en una central diesel.

Tabla III

Matriz de Perfil de Riesgo

PERFIL DE RIESGO MOTOR DE COMBUSTION INTERNA EN PLANTAS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA												
PROBABILIDAD	A	Muy Frecuente	1 vez c/semana	1 vez entre 1 semana y 1 Mes	1 vez entre 1 y 6 Meses	1 vez entre 6 Meses y 1 Año	1 vez entre 1 y 5 Años	1 vez Más de 5 Años	IV DESPRECIABLE	III MARGINAL	II CRITICO	I CATASTROFICO
		Frecuente										
	B	Ocacional	1 vez entre 1 y 6 Meses	1 vez entre 6 Meses y 1 Año	1 vez entre 1 y 5 Años	1 vez Más de 5 Años	IV DESPRECIABLE	III MARGINAL	II CRITICO	I CATASTROFICO		
		Remoto										
	C	Improbable	1 vez entre 1 y 5 Años	1 vez Más de 5 Años	IV DESPRECIABLE	III MARGINAL	II CRITICO	I CATASTROFICO				
		Imposible										
D	Seguridad	0- 4 HORAS	4-24 HORAS	24 - 72 HORAS	+ 72 HORAS	IV DESPRECIABLE	III MARGINAL	II CRITICO	I CATASTROFICO			
	Medio Ambiente											
E	Operacional	0- 4 HORAS	4-24 HORAS	24 - 72 HORAS	+ 72 HORAS	IV DESPRECIABLE	III MARGINAL	II CRITICO	I CATASTROFICO			
	Equipo (daño)											

C – Recopilar información de falla: Es importante que, tanto si el análisis se hace en grupo o por un especialista, se empiece lo antes posible, una vez haya tenido lugar la falla. De esta forma se evita que se pierdan datos muy importantes para el análisis como detalles de la falla (fotografías), como en las figuras 29 a la 33, evidencias físicas (muestras para análisis) y aportaciones de los operadores que estaban presentes; como dato importante se observa que los casos en donde la falla ha ocurrido es en válvulas de admisión y escape con 7,500 a 10,000 horas de operación; en los demás elementos como pistones, camisas de pistón, anillos antipulidores, etc., la falla se ha manifestado con diferentes horas de operación sin ningún punto en común. Los fabricantes de motores normalmente dan un estimado de vida de las válvulas de admisión y escape nuevas de alrededor de 15,000 horas de operación, aunque pueden variar dependiendo de las condiciones de combustible y de la mantenibilidad del motor.

D – Definir falla real que ocurrió: Al realizar el análisis de falla nos guiamos acorde a los pasos sugeridos por Neville Sach en su libro Practical Plant Failure Analysis, traducido al castellano “Análisis Práctico de Fallas en Plantas”.

- Realizar un análisis preliminar de las piezas falladas: Acorde a la información recopilada en las figuras 29 a la 33 a primera vista las piezas con mayor daño son las válvulas de admisión y escape y corona de pistón, en menor grado la camisa del pistón, turbocargador y la carcasa de la culata.
- Recolección de datos en el entorno a la pieza o equipo que falló: En el inciso C mencionamos los datos importantes a recolectar, fotografías y muestras de piezas dañadas, figura 34; la información obtenida en la computadora del motor indica que el motor se encuentra en operación normal, la falla ocurre con un repentino aumento de temperatura de gases de escape en el cilindro dañado y aumento de la temperatura de gases de escape a la entrada del turbocargador.



Figura 34

Recolección de muestras de piezas dañadas

- Preguntar al respecto de la falla con el personal involucrado con la operación del equipo: los operadores de sala de control corroboran la información del computador ya que al momento de la falla se observa un incremento repentino de temperatura de gases de escape en el cilindro fallado e incremento de temperatura a la entrada del turbocargador, en algunos casos el programa de computación de alarmas del motor ha disparado la máquina por desviaciones en las tendencias de las lecturas previamente mencionadas, es importante aclarar que el tiempo transcurrido desde la falla hasta el disparo de la máquina (ya sea por el programa de computación del motor o disparo manual por operadores en sala de control) ocurre en un lapso de pocos segundos, el personal en sala de máquinas informa de ruido anormal en el motor durante operación al momento de iniciar la falla, en algunos casos también el personal en sala de máquinas ha disparado manualmente el motor al momento de escuchar un ruido extraño .

- Volver a revisar las piezas en busca de fracturas y/o fisuras en las superficies: Dependiendo de las fallas estudiadas, se ha encontrado válvulas partidas de la cabeza de la válvula o con pedazos faltantes, allí tenemos un buen indicio que el problema se originó en las válvulas ya que normalmente las válvulas son estructuras de metal que no deberían de desprenderse en pedazos, figura 35.

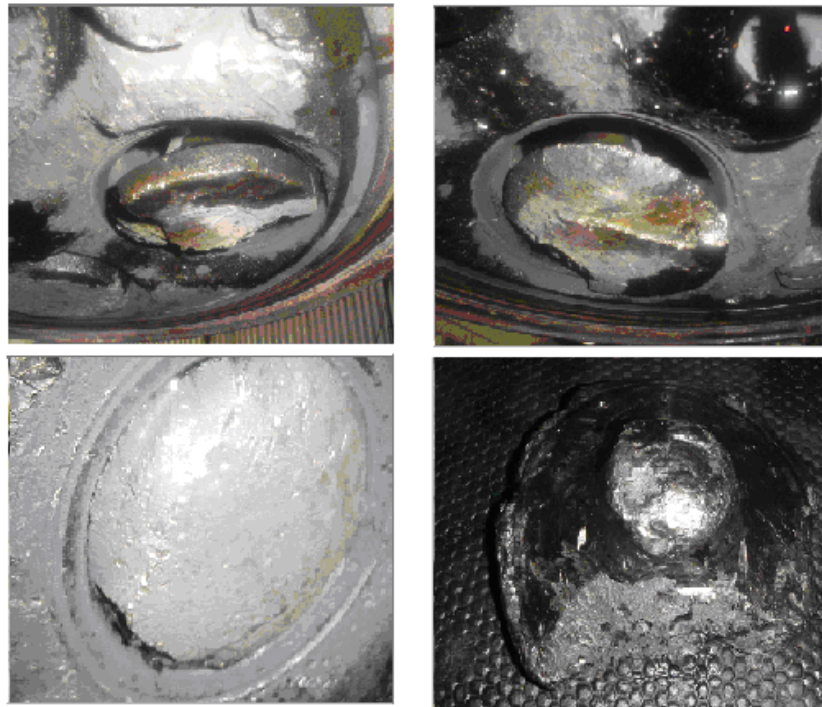


Figura 35

Válvulas quebradas o con pedazos faltantes

- Desarrollar un árbol lógico que determine las posibles causas de la falla: Es una representación gráfica de los múltiples fallos o eventos y su secuencia lógica desde el evento inicial hasta el evento objeto del análisis pasando por los distintos eventos contribuyentes.

Tiene el valor de centrar la atención en los hechos relevantes, adicionalmente conduce la investigación hacia causas latentes; esta presentación grafica permite, igual que el diagrama de Ishikawa, resumir y presentar la causas, conclusiones y recomendaciones.

Es por tanto una herramienta de análisis, muy recomendable para determinar las causas de un fallo. Se utilizan símbolos para expresar las relaciones lógicas entre los distintos sucesos, figura 36.






Símbolo	Significado
	Suceso primario
	Suceso secundario Combinación lógica de sucesos previos
	Cadena repetida
	Puerta O, permite suceso siguiente
	Puerta Y, existe coincidencia

Figura 36
Símbolos de árbol de fallas

Fuente: Manual del Ingeniero de Planta

Los pasos a seguir para la construcción del árbol de falla son:

1- Determinar el suceso final (daño de elementos de cámara de combustión) que ocupara la cúspide del árbol, 2- Desarrollo del árbol mediante puertas lógicas y sucesos, para cada suceso hay que responder ¿Por qué ocurre?, la evaluación cualitativa en la que se transforma el árbol en una función lógica aplicando algebra de Boole, la expresión resultante representa las combinaciones mínimas de sucesos primarios, cuya ocurrencia simultanea conduce al suceso no deseado, 3- El suceso no deseado viene representado por la unión lógica de todos los conjuntos mínimos de fallo, figura 37.

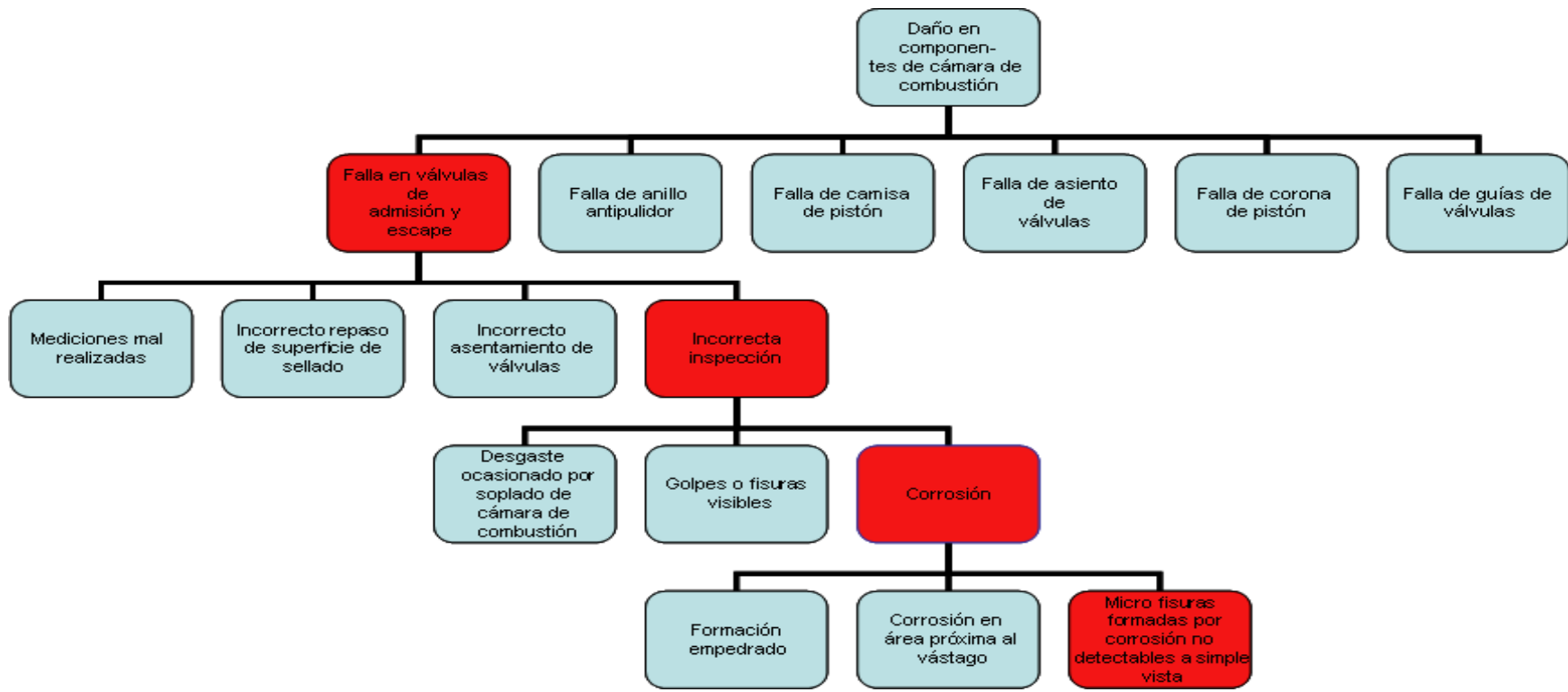


Figura 37
Árbol de falla

- Determinar mecanismos físicos de falla: Posterior a la realización del árbol de falla, la secuencia de falla es más fácil de visualizar, la determinación del mecanismo de falla se basa principalmente en determinar cual o cuáles de ellos (sobrecarga, fatiga, corrosión y desgaste) están involucrados en la falla de estudio.

Fatiga: Las válvulas de escape y admisión al estar el motor en operación se encuentran en movimiento recíprocante en la cámara de combustión, realizando este movimiento aproximadamente unas 4 a 5 veces por segundo, si fuera un motor que gira a 500 rpm, en 7500 horas de operación se tiene un aproximado de 120 millones de ciclos, las fallas por fatiga de alto ciclo ocurren en componentes que tienen más de 10,000 ciclos de tensión, para que una falla de fatiga ocurra, la pieza tiene que estar de un periodo de tensión a un periodo de relajación, y este ciclo tiene que repetirse muchas veces. Especialmente bajo cargas variables y si hay presencia de corrosión, no es inusual encontrar fracturas que toman de 40 a 50 millones de ciclos para propagarse, esta situación es el resultado de una larga incubación antes que las fisuras aparezcan y den como resultado fracturas.

Corrosión: Podemos encontrar corrosión por alta temperatura en las válvulas siguiendo la ecuación del Premio Nóbel Svante Arrhenius, la cual indica que a mayor temperatura el coeficiente de corrosión aumenta de forma exponencial, recordemos que en la cámara de combustión la alta temperatura está presente durante el tiempo de trabajo o explosión; otra forma de corrosión es provocada en la cabeza de la válvula por el contacto de gases de escape que actúan como agente corrosivo, debido a los productos que contiene del proceso de combustión (agua, vanadio, azufre, etc.), la siguiente forma de corrosión se

manifiesta en las válvulas como “corrosión acelerada de flujo” o erosión-corrosión, es el resultado de la combinación de condiciones de turbulencia y alta velocidad que sucede en la cámara de combustión al ingresar el aire de admisión y en la evacuación de los gases de escape; la última forma de corrosión (y la mas dañina) aparece en las válvulas como “corrosión de agujeros”, figuras 15 y 16, los agujeros frecuentemente aparecen localizados, pequeños, grandes y profundos, la corrosión de agujeros frecuentemente actúa como un factor de concentración de esfuerzos y son el punto de inicio de fallas por fisuras de fatiga, éstas fisuras son muy difíciles de detectar ya que empiezan en áreas de la superficie del material o en depósitos cubiertos por productos de corrosión y del proceso de combustión. La conclusión obtenida es que debido a los diferentes y fuertes tipos de corrosión que se encuentran expuestas las válvulas de admisión y escape, ocasiona que se generen concentración de esfuerzos los cuales generan microfisuras en áreas de la superficie del material que no son detectables a simple vista y que tienden a fracturarse en un aproximado de 120 millones de ciclos. Prácticamente la falla en las válvulas de admisión y escape es ocasionada por la combinación de dos mecanismos físicos de falla, la fatiga de alto ciclo y corrosión.

- Determinar secuencia de la falla: Con la información recopilada del daño sufrido por un motor en la cámara de combustión, sección 2.3, podemos darnos una idea general del evento apoyándonos en la figura 38, que es la vista de corte de un motor en V con la cámara de combustión expuesta.

Las válvulas de admisión y escape fallan en un periodo entre las 7,500 a 15,000 horas de operación, fracturándose como consecuencia de la combinación de corrosión y fatiga, la fractura ocasiona que partículas metálicas desprendidas de las válvulas caigan en la cámara de combustión donde chocan con

el tazón de la corona del pistón, llevándolas hasta el punto muerto superior del cilindro , dependiendo del tamaño de las partículas empezaran a dañar la cara inferior de la culata que da hacia la cámara de combustión en donde se encuentran las válvulas de admisión y escape y la punta de la tobera del inyector, continuarán dañando el tazón de la corona del pistón, esto ocasiona que un número mayor de partes de metal continúen desprendiéndose de las válvulas y el ciclo recíprocante del pistón continua con el daño a más elementos de la cámara como la camisa del pistón, el anillo antipulidor y en algunas ocasiones el anillo de fuego del pistón. Al mismo tiempo otras partículas ingresan en la carcasa interna de la culata cuando el motor alcanza el tiempo de escape dañando las guías de válvulas y los asientos de las válvulas; las partículas que escapan de la cámara de combustión se dirigen hacia el manifold de escape y de éste entran al anillo deflector de gases de escape golpeándolo, y por ultimo chocando a gran velocidad en los alabes de la turbina del turbocargador. El aceite que se encuentra en la cámara de combustión queda totalmente contaminado con partículas metálicas muy pequeñas por lo que es necesario desechar el aceite del motor y realizar una limpieza general de todas las galerías internas de la máquina y revisión de los elementos principales como pistones, tejas de biela, tejas de bancada central, bomba de aceite etc. Los elementos auxiliares del motor como la centrifuga de aceite, el filtro automático de aceite, filtro duplex de aceite y el enfriador de aceite debe ser inspeccionado y limpiados ya que tendrán partículas de metal, normalmente estos filtros tienen capacidad de atrapar partículas muy pequeñas hasta de 34 micrones. Es recomendable hacer inspecciones en la tubería que llega hacia los sensores eléctricos de presión de aceite, también inspeccionar el manifold de aire de carga proveniente del postenfriador del aire de carga.

Si las galerías internas de enfriamiento por agua de la culata o asientos de válvulas de escape quedaran dañadas es recomendable hacer un lavado del sistema de agua de enfriamiento del motor y cambiar el agua del circuito de alta temperatura.

E – Identificar causa raíz de la falla: Proviene del árbol de fallas, la cual es añadida a la hoja de trabajo del FMEA, tabla IV, la causa raíz es la relación causa-efecto (es una relación con base en el axioma para toda acción hay una reacción), el efecto es la reacción y la causa es la acción, usualmente lo que siempre observamos son los efectos.

F – Definir consecuencias de la falla: Son las consecuencias derivadas de cada causa raíz, en la hoja de trabajo del FMEA se apuntan a continuación de la columna de causas, tabla V.

G – Verificar consecuencias en el perfil de riesgo: El tipo de falla en estudio se ubica en la matriz de perfil de riesgo, en la celda D II, debido a que la probabilidad de falla es Remota (1 vez entre 6 meses y 1 año) y la gravedad se cataloga como Crítica, debido a que fallas de este tipo ocasiona que el motor se encuentre con una indisponibilidad forzada de 72 horas, tiempo que dura la reparación.

H – Definir acciones de prevención de falla: La tabla VI, en la hoja de decisión de FMEA, se completa la primera columna con el código de la falla (función + falla funcional + modo de falla + causa raíz). La segunda columna se escribe el riesgo acorde a la matriz de perfil de riesgo. La tercera columna se explica la tarea o propuesta de solución del problema (la solución al presente problema es “La realización de ultrasonido a válvulas de admisión y escape, posterior a la limpieza, inspección visual y toma de medidas en cara expuesta a la cámara de combustión para detección de grietas ocasionadas por corrosión y fatiga de alto ciclo después de 7500 horas de uso”. En la cuarta columna se indica la frecuencia con la que se realizara la tarea propuesta. La quinta columna con la o las personas a cargo de realizar la tarea (en este caso puede observarse que la tarea se contratara por medio de una empresa externa a la empresa que brinde el servicio de ultrasonido).

Tabla IV Hoja de trabajo FMEA

Identificación de causas raíces de la falla

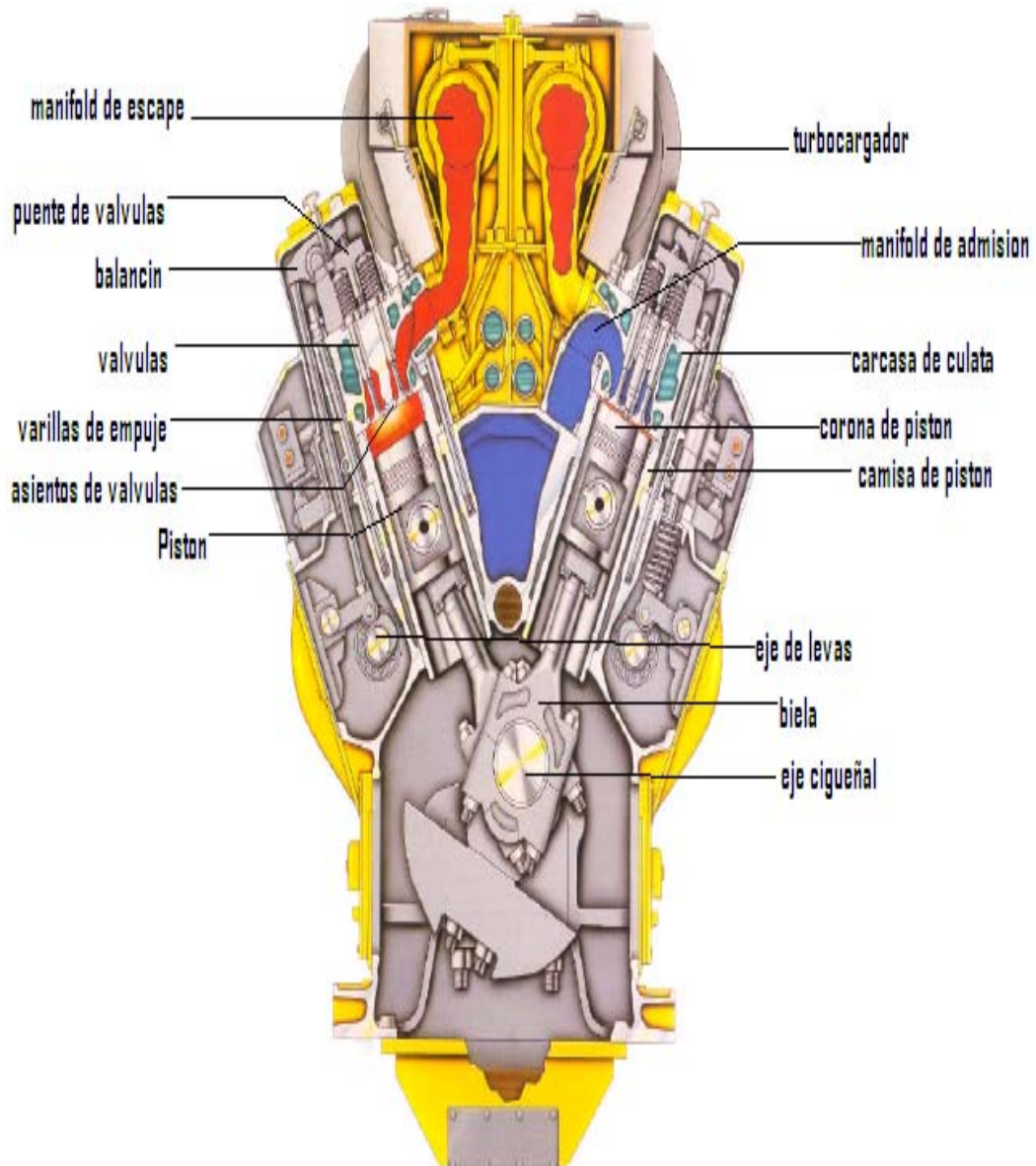
		FMEA		Planta Generadora:		Realizado por:			
		Hoja de trabajo		Equipo en estudio: Motor con daños en camara de combustion		Fecha:			
Función				Falla funcional		Modo de Falla		Causa Raíz	Consecuencias
1	Generacion de Energia		A	Indisponibilidad forzada	1	Daños en camara de	A	Microfisuras formadas por corrosion	
	Electrica			sin generacion de E. E.		combustion		no visibles a simple vista mas fatiga de	
								alto ciclo HCF	

Tabla V Hoja de trabajo FMEA

Definición de consecuencias de la falla

FMEA		Planta Generadora:		Realizado por:					
Hoja de trabajo		Equipo en estudio: Motor con daños en camara de combustion		Fecha:					
Función		Falla funcional		Modo de Falla		Causa Raíz		Consecuencias	
1	Generacion de Energia	A	Indisponibilidad forzada	1	Daños en camara de combustion	A	Microfisuras formadas por corrosion	Grietas en valvulas de admision y escape, ocasionando desprendimiento de material de la valvula causando daño a la camara de combustion.	
	Electrica		sin generacion de E. E.				no visibles a simple vista mas fatiga de alto ciclo HCF		

I – Hoja de seguimiento: Por ultimo tenemos la hoja de seguimiento del FMEA en donde se apuntan las fechas de verificación del cumplimiento de tareas, Tabla VII, en los Anexos 2 y 3 se puede apreciar reporte de inspección por ultrasonido a válvulas de escape y admisión, encontrándose un total de 7 válvulas con grietas.



Fuente: MaK CM32 O&M instructions

Figura 38

Vista de corte motor MaK / Caterpillar CM32

Tabla VI Hoja de decisión FMEA

Verificación de consecuencia en perfil de riesgo

	FMEA	Planta Generadora:		Realizado por:	Hoja	
	Hoja de Decisión	Equipo en estudio: Motor con daños en camara de combustion		Fecha:	1	
Código	Riesgo	Tarea (sobre la causa raíz)	Frec.	Tiempo	Quién	Riesgo
1A1A	DII	Realizar ultrasonido a valvulas de admision y escape, posterior a limpieza,	Despues	1/2 hora	El servicio	DII
		inspeccion visual y medidas, en cara expuesta a camara de combustion	de cada	para cada	se hara	
		para deteccion de las grietas ocasionadas por corrosion	manteni-	valvula	medio de	
		y fatiga de alto ciclo	miento de		Outsourcing	
			7500 hrs			

Tabla VII Hoja de seguimiento FMEA

Verificación de cumplimiento de tareas

	FMEA	Planta Generadora:	Realizado por:
	Hoja de Seguimiento	Equipo en estudio: Motor con daños en camara de combustion	Fecha:
Código	Riesgo	Tarea (sobre la causa raiz)	Seguimiento
1A1A	DII	Realizar ultrasonido a valvulas de admision y escape, posterior a limpieza,	Completa primera inspeccion
		inspeccion visual y medidas, en cara expuesta a camara de combustion	de valvulas de admision y
		para deteccion de las grietas ocasionadas por corrosion	escape, encontrandose un total
		y fatiga de alto ciclo	de 7 valvulas dañadas.

2.5 INCREMENTO EN COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO POR FALLA EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

La falla de válvulas de admisión y escape tiene consecuencias muy fuertes, no sólo los daños al motor de combustión interna sino la consecuencia de gastos en repuestos, aceite lubricante, energía eléctrica no vendida, moral del personal de Operación y Mantenimiento y su repercusión en los costos variables de producción de energía eléctrica en la Central Diesel.

La sección 1.4 “costos de Operación y Mantenimiento”, contiene el detalle de los costos involucrados en la producción. En la presente sección se explica la incidencia de la falla en los costos uno por uno.

En la Tabla I, se encuentran los valores iniciales para cálculo de costo de Operación y Mantenimiento de una Central Diesel de pequeño tamaño de 7Mw.

- El valor del precio de combustible fuel oil pesado y el precio del aceite lubricante no sufren ninguna alteración por la falla.
- Los repuestos para periodo de 5 años se ve afectado, por la reparación de la culata y turbocargador; instalación de los siguientes repuestos nuevos: válvulas de admisión y escape, guías de válvulas, puente de válvulas, asientos de válvulas de admisión y escape, anillo antipulidor, camisa de pistón, pistón, inyector etc. El valor de reparación y repuestos nuevos asciende a un total aproximado de US\$ 200,000. El valor inicial estimado de repuestos era de US\$ 800,000 por lo que el nuevo valor es de US\$ 1, 000,000.
- El costo de Operación y Mantenimiento y el consumo específico de combustible, tampoco se ven afectados.
- El consumo de aceite lubricante se incrementa de 2.30 Kg./h a 6.40 Kg./h debido a la necesidad de hacer cambio completo del

lubricante en el motor debido a la contaminación sufrida por partículas pequeñas de metal.

- Las horas de funcionamiento de planta anual se reducen de 7,000 a 6,900 debido al tiempo estimado de reparación.
- Factor de carga no tiene alteración
- La producción de Kwh./año se reduce de 49 millones a 48,300,000 por el tiempo de indisponibilidad forzada ocasionado por la falla.

Con los nuevos valores, la tabla VIII, Valores para cálculo de costo de Operación y Mantenimiento posterior a la falla de válvulas de admisión y escape queda de la siguiente forma:

Tabla VIII

Valores para cálculo de costo Operación y Mantenimiento posterior a falla

* Precio de combustible fuel oil pesado, con poder calorífico de 42700 KJ/Kg. y acorde a la norma CIMAC K35 de requerimientos para combustibles residuales para motores diesel.	300 US\$/ton
* Precio de aceite lubricante.	2200 US\$/ton
* Repuestos para período de 5 años.	1, 000,000 US\$
* Costo de Operación y Mantenimiento para período de 5 años.	400,000 US\$
* Consumo específico de combustible (cec).	210 g/Kwh.
* Consumo de aceite lubricante.	6.40 Kg. /h
* Horas de funcionamiento de planta, anual.	6900
* Factor de carga.	100 %
* Producción Kwh. al año.	48, 300,000

El cambio en los resultados de costo de Operación y Mantenimiento posterior a la falla se enumera a continuación:

- Costo de lubricante se incrementa un 268% de 0.00075 US\$/Kwh. a 0.00201 US\$/Kwh. Debido al incremento en el consumo de aceite y la disminución de las horas de funcionamiento de planta anual y producción de Kwh. al año.
- Costo de repuestos se incrementa un 27% de 0.00326 US\$/Kwh. a 0.00414 US\$/Kwh. Debido al aumento en los repuestos y la disminución de producción de Kwh. al año.
- Costo de mantenimiento se incrementa un 1.2% de 0.00163 US\$/Kwh. a 0.00165 US\$/Kwh. Debido a la disminución de producción de Kwh. al año.
- Costo total de Mantenimiento aumenta un 38% de **0.00562 US\$/Kwh. a 0.00781 US\$/Kwh.** Debido a la sumatoria de los costos anteriores.
- Costo de combustible no tiene variación.
- Costo total de Operaciones y Mantenimiento aumenta un 13.7% de **0.0686 US\$/Kwh. a 0.0780 US\$/Kwh.** Debido al aumento del costo total de Mantenimiento.
- Costo de inversión aumenta un 1.4% de 0.02122 US\$/Kwh. a 0.02153 US\$/Kwh. Debido a la disminución de producción de Kwh. al año.
- **Costo total de Operaciones y Mantenimiento incluyendo amortización de la planta aumenta un 2.7% de 0.08985 US\$/Kwh. a 0.09234 US\$/Kwh.**

Evidentemente podemos observar como afecta duramente los costos de Operación y Mantenimiento la falla de válvulas de admisión y escape, estos cálculos son realizados si la falla pasara una vez, he observado que este tipo de falla ocurre más de una vez a lo largo de un año.

La diferencia del Costo total de Operaciones y Mantenimiento es de US\$ 0.0025, si observamos en la tabla IX supera al costo de lubricante y al costo de mantenimiento, lo que es una cantidad considerable de dinero que la empresa dejaría de recibir, más los gastos ya mencionados de repuestos, lubricante etc.

Tabla IX

Resultados de costo de Operación y Mantenimiento posterior a falla

* Costos de Lubricante. = (consumo de lubricante * precio del lubricante * horas de operación anual) / Kwh. producidos al año	0.00201 US\$/Kwh.
* Costo de Repuestos = (Repuestos para periodo de 1 año) / Kwh. producidos al año.	0.00414 US\$/Kwh.
* Costo de Mantenimiento = (Costo O&M para periodo de 1 año) / Kwh. producidos al año.	0.00165 US\$/Kwh.
* Total costo de Mantenimiento.	<u>0.00781 US\$/Kwh.</u>
* Costo Combustible = ((Consumo específico de combustible, cec) * (Kwh. producidos al año)/1,000,000) * (Precio de combustible) / Kwh. producidos al año	0.0630 US\$/Kwh.
* Costo total de Operaciones y Mantenimiento = (Costo total mantenimiento + Costo de combustible). Suponiendo un precio de US\$ 5, 200,000 para una planta de estas características y su depreciación en 5 años.	<u>0.0780 US\$/Kwh.</u>
* Costo de inversión = (Precio de planta / No. de años a amortizar) / Kwh. producidos al año.	0.02153 US\$/Kwh.
* Costo total de Operaciones y Mantenimiento incluyendo amortización de la planta.	<u>0.09234 US\$/Kwh.</u>

3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

3.1 MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

El desarrollo de nuevas tecnologías, ha marcado sensiblemente la actualidad industrial mundial. En los últimos años la industria de generación por motores de combustión interna se ha visto bajo la influencia determinante de la electrónica y la automatización, exigiendo mayor preparación en el personal, no sólo desde el punto de vista de la operación de los motores, sino desde el punto de vista del mantenimiento industrial.

En nuestra realidad industrial, matizada por la enorme necesidad de explotar eficaz y eficientemente los motores instalados y elevar a niveles superiores la actividad del mantenimiento, no remediamos nada con grandes soluciones que presuponen diseños, innovaciones, y tecnologías de recuperación, si no mantenemos una alta disponibilidad en la central diesel.

Es decir, la planta de generación tiene que distinguirse por una correcta explotación y un mantenimiento eficaz. En otras palabras, la operación correcta y el mantenimiento oportuno constituyen caminos decisivos para cuidar el equipo que se tiene bajo responsabilidad.

El Mantenimiento Predictivo es utilizado en la Central Diesel como una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de un motor o máquina de los sistemas auxiliares, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

Los objetivos del Mantenimiento Predictivo en la Central son:

- Eliminar incorrecta Operación de los motores y equipos auxiliares.
- Anticipar y planificar con precisión futuras fallas o daños a los motores y equipos auxiliares.
- Incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los motores para la producción de energía eléctrica de la planta.
- Mantener la capacidad operacional del sistema.
- Permitir al personal de mantenimiento programar trabajos en horas predecibles y razonables.

Las ventajas que se encuentran en la realización de Mantenimientos Predictivos en la Central Diesel son:

- Reducción de tiempos de Mantenimientos Correctivos no Planificados.
- Supervisión de la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimización de la gestión del personal de mantenimiento.
- Realización de un archivo histórico del comportamiento mecánico de motores y equipos auxiliares.
- Conocimiento con exactitud del tiempo límite de vida de un elemento que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
- Toma de decisiones sobre el paro de un motor en momentos críticos.
- Comprensión de formas internas de funcionamiento de los equipos de la Central
- Facilita el análisis de las fallas.
- Permite el análisis estadístico del sistema.

Las desventajas del Mantenimiento Predictivo son:

- La implementación de un sistema de Mantenimiento Predictivo requiere una inversión inicial fuerte, los equipos tienen un costo elevado, y al subcontratarse tiene también un costo.
- El personal que realice los Mantenimientos Predictivos debe ser capaz de interpretar los datos que generan los equipos y tomar conclusiones en base a ellos, trabajo que requiere un conocimiento técnico elevado de la aplicación.

La implementación del sistema de Mantenimiento Predictivo se justifica en las instalaciones de la Central Diesel ya que los paros por Mantenimiento Correctivo no Programado ocasionan grandes pérdidas de producción de energía eléctrica.

El Mantenimiento Predictivo supone la medición de diversos parámetros que muestren una relación predecible con el ciclo de vida de los componentes de la planta, algunos ejemplos de dichos parámetros son los siguientes:

- Vibración de centrifugas de aceite.
- Temperatura de las conexiones eléctricas.
- Análisis de aceite de un actuador de gobernador.

El uso del Mantenimiento Predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Esto se logra mediante la toma de lecturas (por ejemplo la vibración de un cojinete en un motor eléctrico) en intervalos periódicos hasta que el componente falle.

Una vez determinada la factibilidad y conveniencia de realizar un Mantenimiento Predictivo a un motor o elemento del motor o equipo auxiliar, el paso siguiente es determinar la o las variables físicas a controlar que sean indicativas de la condición de la máquina. El objetivo de esta parte es revisar en forma detallada las técnicas comúnmente usadas en el monitoreo según condición, de manera que sirvan de guía para su selección general. La finalidad

del monitoreo es obtener una indicación de la condición mecánica o estado de la máquina, de manera que pueda ser operada y mantenida con seguridad y economía.

Por monitoreo se entiende la medición de una variable física que se considera representativa de la condición de la máquina y su comparación con valores que indican si la máquina está en buen estado o deteriorada. Con la actual automatización de estas técnicas, se ha extendido la acepción de la palabra monitoreo también a la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos, de acuerdo a los objetivos que se pretende alcanzar con el monitoreo de la condición de un motor o equipo auxiliar y debe distinguirse entre vigilancia, protección, diagnóstico y pronóstico.

- Vigilancia de máquinas: Su objetivo es indicar cuándo existe un problema. Debe distinguir entre condición buena y mala.
- Protección de máquinas. Su objetivo es evitar fallas catastróficas. Una máquina está protegida si los valores que indican su condición llegan a valores considerados peligrosos, el motor o equipo auxiliar se dispara automáticamente.
- Diagnóstico de fallas: Su objetivo es definir cuál es el problema específico, también estimar cuánto tiempo más podría funcionar el motor o equipo auxiliar sin riesgo de una falla catastrófica. Últimamente se ha dado la tendencia a aplicar mantenimiento predictivo mediante vibro análisis, análisis de aceite usado, control de desgastes, etc.

Existen varias técnicas aplicadas al Mantenimiento Preventivo entre las cuales tenemos las siguientes:

- Análisis de Vibraciones: El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento de la Central de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en un motor o equipo

auxiliar, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a mediano plazo. El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos en el ambiente, etc.

- **Análisis de Lubricantes:** Estos se ejecutan dependiendo de la necesidad. 1- Los análisis iniciales se realizan a productos de aquellos equipos que presenten dudas provenientes de los resultados del Estudio de Lubricación y permiten correcciones en la selección del producto, motivadas a cambios en condiciones de operación. 2- Los análisis rutinarios se aplican para equipos considerados como críticos o de gran capacidad, en los cuales se define una frecuencia de muestreo, siendo el objetivo principal de los análisis la determinación del estado del aceite, nivel de desgaste y contaminación, entre otros. 3- Los análisis de emergencia se efectúan para detectar cualquier anomalía en el equipo y/o lubricante, por contaminación con agua, sólidos uso de un producto inadecuado. El método de análisis de aceite asegura que tendremos máxima reducción de los costos operativos, máxima vida útil de los componentes con mínimo desgaste, máximo aprovechamiento del lubricante utilizado, mínima generación de efluentes. En cada muestra podemos conseguir o estudiar los siguientes factores que afectan a nuestra motor o equipo auxiliar: elementos de desgaste, conteo de partículas, determinación de la limpieza, ferrografía, contaminantes, aditivos y condiciones del lubricante, gráficos e historial para la evaluación de las tendencias a lo largo del tiempo.

De este modo, mediante la implementación de técnicas ampliamente investigadas y experimentadas, y con la utilización de equipos de la más avanzada tecnología, se logra disminuir drásticamente el tiempo perdido en producción de energía eléctrica por razón de desperfectos mecánicos, desgaste en los motores o equipos auxiliares, horas hombre dedicadas al mantenimiento y consumo general de lubricantes.

- **Análisis de ultrasonido:** Este método estudia las ondas de sonido de baja frecuencia producidas por los equipos que no son perceptibles por el oído humano. El Ultrasonido es producido por mecanismos rotantes, fugas de fluido, y arcos eléctricos, pudiéndose detectar mediante la tecnología apropiada. El Ultrasonido permite la detección de fricción en motores y equipos auxiliares rotativos, la detección de fallas y/o fugas en válvulas, la detección de fugas de fluidos, y la detección de arco eléctrico. El sonido cuya frecuencia está por encima del rango de captación del oído humano (20 a 20.000 Hertz) se considera ultrasonido. Casi todas las fricciones mecánicas, arcos eléctricos y fugas de presión producen ultrasonido en un rango aproximado a los 40 Khz. es ésta frecuencia con características muy aprovechables en el Mantenimiento Predictivo, puesto que las ondas sonoras son de corta longitud atenuándose rápidamente sin producir rebotes. Por esta razón, el ruido ambiental de la sala de maquinas por más intenso que sea no interfiere en la detección del ultrasonido. Además, la alta direccionalidad del ultrasonido en 40 Khz. permite con rapidez y precisión la ubicación de la falla.
- **Termografía:** La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión. Los ojos humanos no son sensibles a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero las cámaras termográficas son capaces de medir la energía con sensores infrarrojos, capacitados para "ver" en estas

- longitudes de onda. Esto nos permite medir la energía radiante emitida por objetos y por consiguiente determinar la temperatura de la superficie a distancia, en tiempo real y sin contacto. La gran mayoría de los problemas y averías en el entorno de la Central Diesel, ya sea de tipo mecánico, eléctrico y de fabricación están precedidos por cambios de temperatura que pueden ser detectados mediante la inspección de temperatura con sistema por Infrarrojos. Con la implementación de programas de inspecciones termográficas en la instalación es posible minimizar el riesgo de una falla de equipos y sus consecuencias, a la vez que ofrece una herramienta para el control de calidad de las reparaciones efectuadas. El análisis mediante Termografía infrarroja debe complementarse con otras técnicas y sistemas de ensayo conocidos, como pueden ser el análisis de aceites lubricantes, el análisis de vibraciones y el análisis de ultrasonido. Pueden añadirse los ensayos no destructivos como el ensayo radiográfico, partículas magnéticas, etc.
- Inspección VOSO: La técnica VOSO es la primera línea de defensa dentro de las muchas que tenemos disponibles en mantenimiento, es muy barata, es una técnica muy sencilla de aprender y utiliza mucho el sentido común, las iniciales de la técnica significan ver, oler, sentir y oír. Esta técnica se basa principalmente en la inspección periódica de maquinaria y es realizada principalmente por el personal a cargo de la operación del equipo.

Es importante considerar que la productividad de la industria de generación aumentará en la medida que las fallas en las máquinas disminuyan de una forma sustentable en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento más apropiada y con personal capacitado tanto en el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de fallas implementadas como también con conocimiento suficiente sobre las características de diseño y funcionamiento de las máquinas.

Los Ensayos No Destructivos, END o pruebas no destructivas, son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente.

Los Ensayos No Destructivos END, debido a razones de seguridad y calidad, fueron desarrollados en las industrias relacionadas con la aeronáutica, la petroquímica y primordialmente en el sector nuclear.

Las técnicas de Ensayos No Destructivos, que eran relativamente desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en la industria de generación de energía eléctrica que desea mantenerse en la vanguardia de la detección de fallas en piezas.

Las actividades que revisten mayor importancia para los fines de este documento son las pruebas e inspecciones que normalmente se practican a los materiales y que se pueden dividir de diferentes formas. Una de las clasificaciones más usuales es la siguiente:

- Pruebas Destructivas.
- Pruebas No Destructivas

Las pruebas no destructivas PND son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, etc., y que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas.

No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad.

Las pruebas no destructivas, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen.

De acuerdo con su aplicación, los Ensayos no Destructivos (nombre más comúnmente usado para las pruebas no destructivas) se dividen en:

- Técnicas de Inspección Superficial.
- Técnicas de Inspección Volumétrica.
- Técnicas de Inspección de la Integridad o hermeticidad

Se utilizan para la detección y evaluación de discontinuidades y defectos en materiales, para inspeccionar componentes y su integridad en operación y con ello poder hacer una correcta evaluación de las necesidades y los daños potenciales, contribuyendo así a realizar una ajustada valoración de las causas de riesgo en la operación de la Central Diesel.

Los Ensayos No Destructivos que la industria de generación de energía eléctrica por motores de combustión interna utiliza son los enumerados a continuación:

- Inspección visual.
- Líquidos penetrantes y fluorescentes.
- Ultrasonido Pulso eco.
- Partículas Magnéticas.
- Inspección mediante corrientes inducidas.
- Radiografía Industrial por rayos gamma o equis.

3.2 PRINCIPIOS DE ULTRASONIDO

El ultrasonido es utilizado en la naturaleza, que dotó a ciertos animales con la capacidad de emitir ondas ultrasónicas. Los murciélagos, delfines, y mariposas se movilizan, encuentran alimentos, y huyen del peligro a través de ondas ultrasónicas que ellos mismos emiten.

Con la observación del procedimiento de esos animales se desarrolló la idea del sonar, durante la Segunda Guerra Mundial. El sonar sirve para detectar objetos sobre el agua, como barcos, y también para evaluar la profundidad de los mares. Después de la Segunda Guerra Mundial hubo un incremento en las aplicaciones del ultrasonido en diversos campos.

Como el ultrasonido está fuera de la banda de frecuencia audible para el hombre, puede ser empleado con intensidad bastante alta.

Definimos al ultrasonido como una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en Hertz con ayuda de un aparato creado para ese fin.

La naturaleza de las ondas ultrasónicas quedan como ondas mecánicas vibratorias, para que se propague el ultrasonido se requiere que las partículas del medio ya sea líquido, aire o sólido oscilen alrededor de sus posiciones de equilibrio.

El método de Ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales.

La aplicación del ultrasonido tiene como propósito transmitir la energía a través de un medio y con esto obtener informaciones del mismo.

Como ejemplo de esas aplicaciones podemos citar:

- Ensayo no destructivo de materiales.
- Medidas de propiedades elásticas de los materiales.
- Diagnóstico médico.

Las aplicaciones de alta intensidad tienen como objetivo producir alteración del medio a través del cual la onda se propaga. Como ejemplo

citaremos la Terapia médica, Atomización de líquidos, Limpieza por cavitación, Ruptura de células biológicas y homogenización de materiales.

El ultrasonido de baja intensidad en medicina para diagnóstico, se basa en la Reflexión de ondas ultrasónicas. El diagnóstico con ultrasonido es más seguro que la radiación ionizante, como los Rayos X, por eso es preferible en exámenes prenatales.

Las ventajas del diagnóstico con ultrasonido son su seguridad, conveniencia por no ser invasivo y no traumático, además de su capacidad en detectar fenómenos no perceptibles por los Rayos X.

Los principios del ultrasonido son:

- La impedancia acústica que es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica.
- Ondas acústicas iguales a las ondas sónicas.
- La transmisión de energía entre partículas que propicia el oscilamiento.
- El número de oscilaciones son de acuerdo al tipo de onda que se trata.
- Las ondas ultrasónicas se propagan en todos los medios elásticos donde exista fracciones de materia (átomos o moléculas capaces de vibrar).
- La vibración depende de la separación de las partículas.

El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propaga a través del material hasta que pierde por completo su intensidad ó hasta que topa con una interfase, es decir, algún otro material tal como el aire o el agua y, como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, distorsión, etc. Lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales.

De esta manera, es posible aplicar el método de ultrasonido para determinar ciertas características de los materiales tales como:

- Detección y caracterización de discontinuidades: grietas, poros, laminaciones, etc.
- Medición de espesores, extensión y grado de corrosión.
- Determinación de características físicas.
- Características de enlace entre materiales.
- Velocidad de propagación de ondas.
- Adhesión entre materiales.
- Inspección de soldaduras.
- Medición de espesores de pared.

Las ventajas que encontramos al ultrasonido son:

- La prueba se efectúa mas rápidamente obteniendo resultados inmediatos.
- Se tiene mayor exactitud al determinar la posición de las discontinuidades internas; estimando sus dimensiones, orientación y naturaleza.
- Alta sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.
- Alta capacidad de penetración, lo que permite localizar discontinuidades a gran profundidad del material.
- Buena resolución que permite diferenciar dos discontinuidades próximas entre si.
- Solo requiere acceso por un lado del objeto a inspeccionar.
- No requiere de condiciones especiales de seguridad.

Las limitaciones que encontramos en el ultrasonido:

- Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales, si se tienen que revisar cantidades grandes de productos.

- Requiere de personal con una buena preparación técnica y gran experiencia.
- Dificultad para inspeccionar piezas con geometría compleja, espesores muy delgados o de configuración irregular.
- Requiere de patrones de calibración y referencia.
- Es afectado por la estructura del material. (tamaño de grano, tipo de material).
- Alto costo del equipo.
- Se requiere de agente acoplante.

Principios acústicos y físicos:

- Oscilación (Ciclos): La definimos como cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo, como ejemplo tenemos el movimiento de un péndulo.
- Amplitud (A): Es el desplazamiento máximo de una partícula desde su posición de cero.
- Periodo (t): Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.
- Frecuencia (F): Se define como el número de veces que ocurre un evento repetitivo (ciclo) por unidad de tiempo. Es la inversa del periodo. La frecuencia se designa como “F”, dando la relación:

$$F = \frac{1}{t}$$

La unidad de la frecuencia es el “Hertz” (Hz.)

1 Hertz (Hz) = 1 ciclo por segundo

1 Kilohertz (Khz.) = 1000 ciclos por segundo

1 Megahertz (MHz) = 1 millón de ciclos por segundo

1 Gigahertz (GHz) = 10 a la nueve ciclos por segundo.

- Longitud de onda (λ): Es la distancia ocupada por una onda completa y es igual a la distancia a través de la cual se mueve la onda por periodo de ciclo. Amplitud (A).
- Velocidad de propagación o velocidad acústica (V): Es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio.
- Impedancia acústica (Z): Es la resistencia de un material a las vibraciones de las ondas ultrasónicas. Es el producto de la velocidad máxima de vibración por la densidad del material.

Una Onda es una perturbación o disturbio transmitido a través del vacío o de un medio gaseoso, líquido o sólido.

Conocemos que existe una gran variedad de ondas; por ejemplo: las ondas del mar, las ondas en una cuerda, en un resorte, las ondas sonoras y las ondas electromagnéticas, etc. Esas ondas pueden diferir en muchos aspectos, pero todas pueden transmitir energía de un punto a otro.

Dependiendo del medio de propagación de las ondas, ellas pueden ser clasificadas en mecánicas y no mecánicas.

Las ondas mecánicas son las que se propagan en medios deformables o elásticos. Como ejemplo, podemos citar las ondas sonoras, ondas en una cuerda, en un resorte, ondas en el agua. Son originadas de una perturbación o disturbio en una región de un medio elástico. Teniendo el medio propiedades elásticas, el disturbio es transmitido sucesivamente de un punto a otro. Las partículas del medio vibran solamente alrededor de sus posiciones de equilibrio, si no se desarticulan juntamente como un todo, como la cuerda.

Las ondas no mecánicas, como las electromagnéticas, no necesitan de un medio material para su propagación. Un ejemplo es la luz, que atraviesa el espacio interestelar prácticamente vacío.

Las ondas se pueden clasificar de acuerdo a su desplazamiento (figura 39) como:

- Ondas longitudinales: Sus desplazamientos de las partículas son paralelos a la propagación del ultrasonido.
- Ondas transversales: Los desplazamientos de las partículas son en forma perpendicular a la dirección del haz ultrasónico.
- Ondas superficiales: Son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, también son conocidas como ondas de Rayleigh.

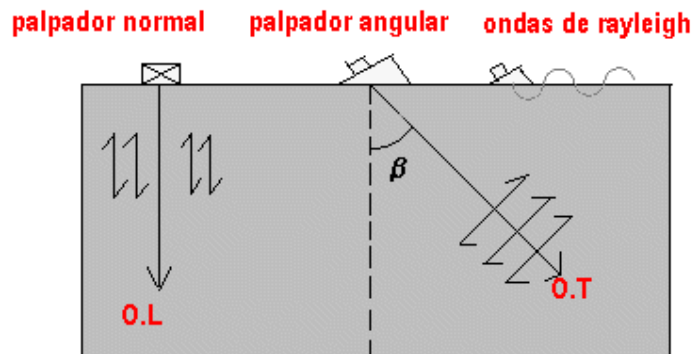


Figura 39

La diferencia entre ondas sonicas y ultrasónicas es su frecuencia aunque son prácticamente de la misma naturaleza, así:

- Las ondas sonicas tienen frecuencia entre 16 y 20,000 ciclos por segundo.
- Las ondas ultrasónicas tienen frecuencias mucho mayores a 20,000 ciclos por segundo.
- Para inspección de materiales metálicos se opera entre 1 y 5 MHz. aunque se pueden trabajar con frecuencias mucho mayores.
- Para inspección de materiales no metálicos como cerámicos, se trabajan con frecuencias menores a 1 MHz.

Los rangos de sonido quedan:

Infrasónica =	1 – 16 Hz.
Sónica o audible =	16 Hz. a 20 KHz.
Ultrasónica =	20 KHz. en adelante

Para formar un sistema de ultrasonido son necesarios un emisor ultrasónico que pueda emitir ondas puras de alta frecuencia y un receptor de estas ondas. Ambos elementos se usan en un circuito como el que se muestra en la Figura 40. El emisor emite ondas ultrasónicas cuando se lo excita con una tensión de frecuencia variable provista por un generador de funciones.

La señal de excitación se deriva a uno de los canales de un osciloscopio y en otro canal se mide la salida del receptor.

De esta manera se pueden comparar las formas de onda de las señales y medir sus amplitudes y fases relativas, lo que permite caracterizar el sistema y hacer un estudio completo de la propagación de estas ondas.

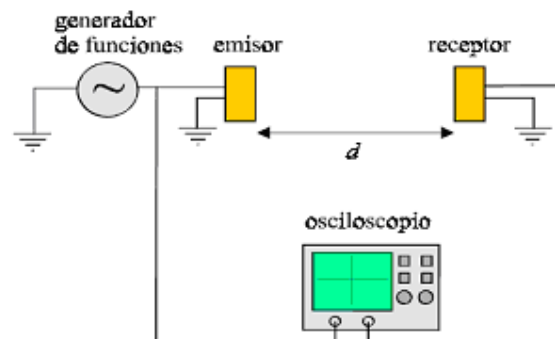


Figura 40 Dispositivo experimental para estudiar la propagación de ondas de ultrasonido.

Las pruebas por ultrasonido usan ondas sonoras de alta frecuencia y altamente direccionales para medir el espesor de materiales, encontrar defectos escondidos en el interior de la pieza o analizar las propiedades de los metales, plásticos, materiales compuestos, cerámica, caucho y vidrio.

Los instrumentos de tecnología por ultrasonido, usando frecuencias por encima del límite perceptible por el oído humano, emiten ráfagas de energía sobre la pieza de ensayo y luego recopilan y analizan las formas de onda reflejadas o transmitidas para generar los resultados de las pruebas.

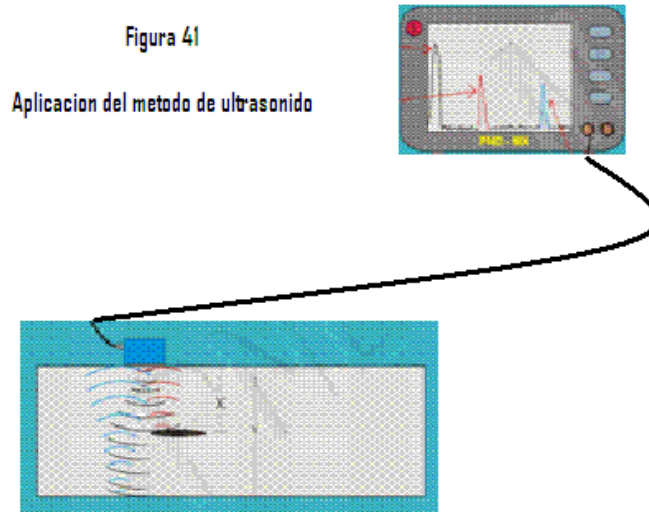
Parámetros que deben ser controlados en un sistema ultrasónico:

- Sensibilidad: Es la capacidad de un transductor para detectar discontinuidades pequeñas.
- Resolución: Es la capacidad para separar dos señales cercanas en tiempo o profundidad.
- Frecuencia central: Los transductores deben utilizar un rango de frecuencia especificado para obtener una aplicación óptima.
- Atenuación del haz: Es la pérdida de energía de una onda ultrasónica al desplazarse a través de un material. Las causas principales son la dispersión y la absorción.
- Reflexión: Cantidad de energía ultrasónica que es reflejada al incidir en una interfase acústica. Ley de reflexión: El ángulo de onda reflejada es igual al ángulo de la onda incidente de la misma especie.
- Refracción: Se lleva a cabo cuando un haz ultrasónico pasa de un medio a otro, siendo su velocidad del medio diferente entre sí y cambia la dirección en relación con la dirección de incidencia.

Los Transductores es el medio por el cual la energía eléctrica se convierte en energía mecánica (ondas sonoras) o viceversa.

Por lo general los transductores están basados en cristales piezoeléctricos cuyas frecuencias de oscilación están bien definidas, dependiendo del tipo de cristal y de su geometría.

Los equipos de Ultrasonido pulso eco, están formados por un sensor o transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material, Figura 41.



Este sensor, contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de Mega Hertz que es inaudible al oído humano. El sensor opera debido al efecto piezoeléctrico, el cual consiste en que ciertos cristales cuando se tensionan, se polarizan eléctricamente y generan voltaje eléctrico entre las superficies opuestas.

Esto es reversible en el sentido de que al aplicar un voltaje a través las caras de un cristal, se produce una deformación del mismo.

Este efecto microscópico se origina por las propiedades de simetría de algunos cristales.

Los materiales Piezoeléctricos son:

- Cuarzo: Se obtiene a partir de cristales naturales. Posee excelentes características estabilidad térmica, química y eléctrica. Es muy duro y resistente al desgaste así como al envejecimiento. Desafortunadamente, sufre interferencias en el modo de conversión y es el menos eficiente de los generadores de energía acústica. Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias. Se debe emplear a temperaturas menores de 550 °C, pues por arriba de ésta pierde sus propiedades piezoeléctricas.
- Sulfato de Litio: Este material se considera como uno de los receptores más eficientes. Su ventaja principal es su facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima lo que mejora el poder de resolución, no envejece y es poco afectado por la interferencia en el modo de conversión. Sus desventajas son que es muy frágil, soluble en agua y se debe emplear a temperaturas menores de 75 °C.
- Cerámicas Polarizadas: Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación. Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación. Prácticamente no son afectados por la humedad y algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300 °C. Sus principales limitaciones son: resistencia mecánica relativamente baja, en algunos casos existe interferencia en el modo de conversión, presentan tendencia al envejecimiento. Además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.

La elección del transductor se hace por:

- Clase de cristal. Con la elección de cada clase de cristal se puede variar el poder resolutivo y la sensibilidad de los transductores.

- Diámetro del cristal. Entre mayor sea el diámetro del cristal se obtiene una mayor profundidad de penetración, asimismo una mayor longitud en un campo cercano y una menor divergencia.
- Frecuencia. Con la elección de una mayor frecuencia se obtiene mayor posibilidad para la identificación de discontinuidades pequeñas, mayor longitud de campo cercano, mayor poder resolutivo, menor profundidad de penetración y mínima divergencia.

Tipos de Palpadores:

- Palpador de contacto. Se coloca directamente en la superficie de prueba aplicando presión y un medio de acoplamiento. Se fabrica para inspecciones de haz recto. Para proteger el transductor de la abrasión, se cubre con un material duro como el oxido de aluminio.
- Palpadores de haz recto. Emite ondas longitudinales con frecuencias de 0.5 a 10 MHz. Se emplea generalmente para la inspección de piezas en las que se puede colocar directamente la unidad de prueba sobre el área de interés las discontinuidades son paralelas a la superficie de contacto. También es útil en la detección de discontinuidades y en la medición de espesores, Figura 42.

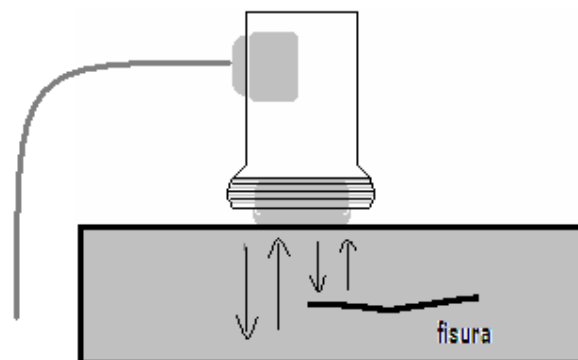


Figura 42
Palpador de haz recto

- Palpadores de incidencia angular. Genera ondas de corte, de superficie y de placa. Se construye acoplando una unidad de haz recto a una de las caras de una zapata de plástico, al cual presenta determinado ángulo de refracción. Se emplean los equipos de pulso eco y su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie de prueba. Tipos de palpadores angulares: Se diferencian de acuerdo a la magnitud de la frecuencia, forma, tipo e ínter cambiabilidad de la zapata. Tienen marcado en la zapata el ángulo de refracción del sonido dentro del material de prueba, los ángulos comerciales para el acero son 35, 45, 60, 70, 80, 90 grados.

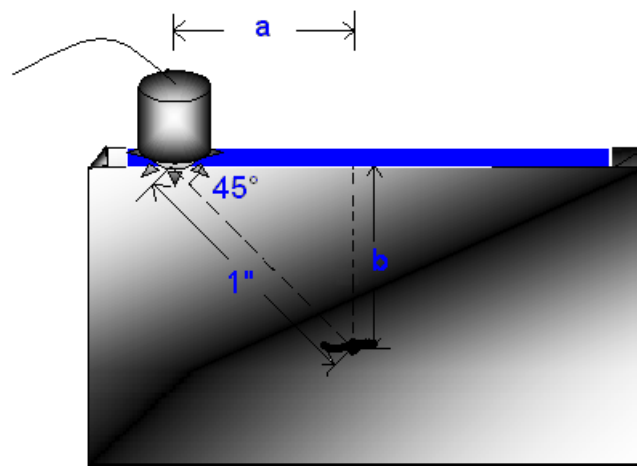


Figura 43
Palpador de incidencia angular

Acoplante:

- Líquido más o menos viscoso que se utiliza para permitir el paso de las ondas del transductor a la pieza bajo examinación, ya que las frecuencias que se utilizan para materiales metálicos no se transmiten en el aire.
- Características Del Líquido Acoplante: Humectabilidad (capaz de mojar la superficie y el palpador), Viscosidad

adecuada, Baja atenuación. (que el sonido se transmita al 100%), Bajo costo, Removible, No toxico, No corrosivo, Impedancia acústica adecuada.

- Los tipos de acoplante mas utilizados son agua, aceite ,grasa, glicerina y vaselina

3.3 EQUIPO EMPLEADO PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE ULTRASONIDO EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

Los equipos de ultrasonido que se utilizan para la inspección de válvulas de admisión y escape son:

- Panametrics NDT modelo Epoch XT con transductor Panametrics modelo A109S con frecuencia de 5 MHz. y diámetro de 0.5 pulgadas, el acoplante utilizado es un ultragel marca Sonotech Figura 44.



Figura 44
Panametrics NDT
modelo Epoch XT

- Sonatest modelo Master Scan 380M con transductor Panametrics modelo A109S con frecuencia de 5 MHz. y diámetro de 0.5 pulgadas, el acoplante utilizado es un ultragel marca Sonotech, Figura 45.



Figura 45
Sonatest modelo Master Scan 380M

3.4 PROCEDIMIENTO PARA INSPECCION DE ULTRASONIDO EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

Al momento de iniciar las pruebas, el primer paso es la calibración del osciloscopio con una válvula nueva, se agrega el acoplante Ultragel de Sonotech para eliminar el aire entre el palpador y la cara de la válvula que se expone a la cámara de combustión.

Esta válvula nueva servirá como patrón de referencia que será empleada para calibrar el equipo de ultrasonido y para evaluar las indicaciones de discontinuidades.

Esta válvula patrón tiene las mismas propiedades físicas, químicas y de estructura que las válvulas usadas que se inspeccionan.

Por medio de la válvula patrón se puede verificar que el sistema compuesto por transductor, cable coaxial y el equipo de ultrasonido funcione correctamente.

Se fijan la ganancia y sensibilidad del equipo con las cuales se detectaran las discontinuidades equivalentes a un tamaño especificado.

Se conecta el palpador al osciloscopio por medio del cable coaxial, el palpador se coloca sobre la cara de la válvula para que se inicie la emisión de ondas ultrasónicas.

Ya en el osciloscopio se ajustan los ecos (ondas) a una onda de entrada y una o dos de fondo, según las normas de calibración.

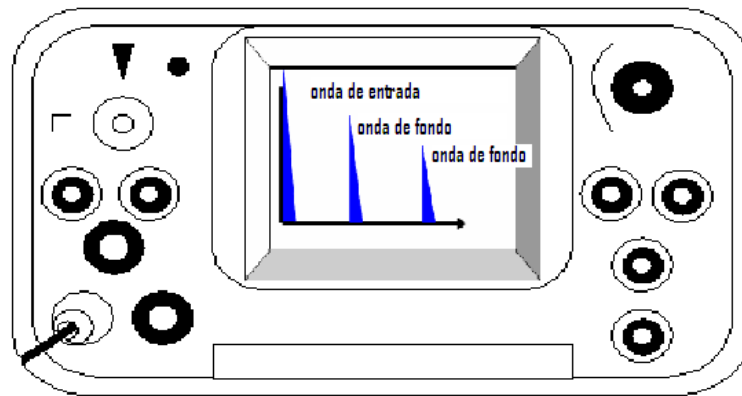


Figura 46
Calibración y ajuste de equipo de ultrasonido

Una vez ajustado en la pantalla del osciloscopio se le confirma al equipo los parámetros iniciales, para empezar con las mediciones.

Para detectar ondas secundarias en el osciloscopio, es necesario deslizar el palpador sobre toda la superficie de la cara de la válvula, ya que la aparición de ondas secundarias indica el lugar donde se encuentran los defectos o fallas que pueden ser grietas, poros, burbujas etc. Estas ondas secundarias son diferentes a las normalizadas para calibrar, es decir, la de entrada y una o dos de fondo.

La imagen que puede resultar de esta prueba es la siguiente:

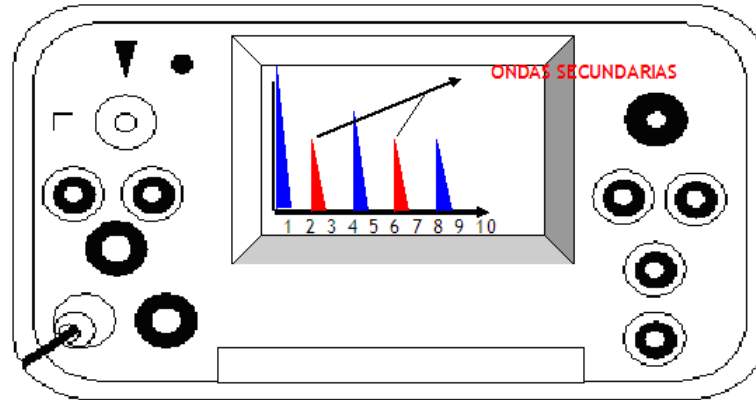


Figura 47
Pantalla de osciloscopio con ondas secundarias

La figura 48 muestra la forma en que se realiza la inspección de ultrasonido a las válvulas de admisión y escape.

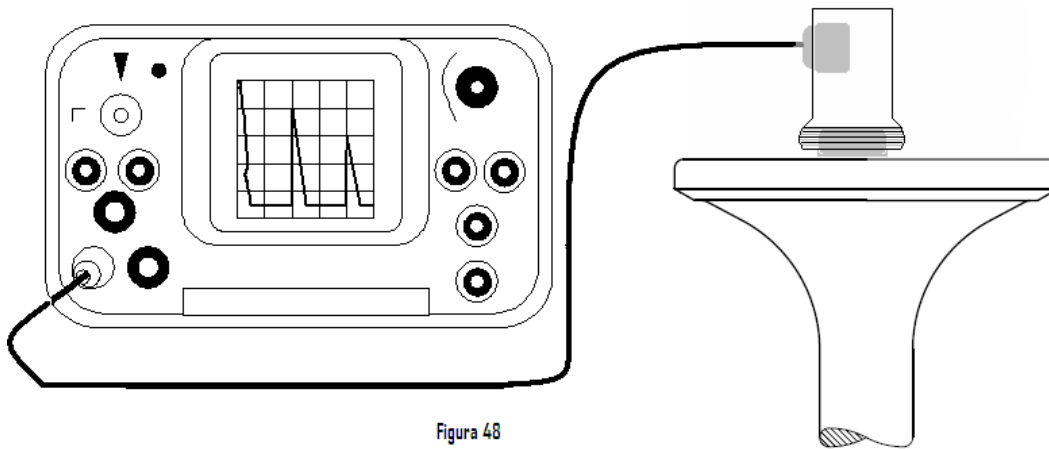


Figura 48
Forma de inspección de válvulas

Ahora se hace un estudio de la proporcionalidad de respuesta de linealidad de la señal ultrasónica en diferentes casos.

- Comportamiento del haz ultrasónico con respecto a una discontinuidad ubicada a diferente profundidad.

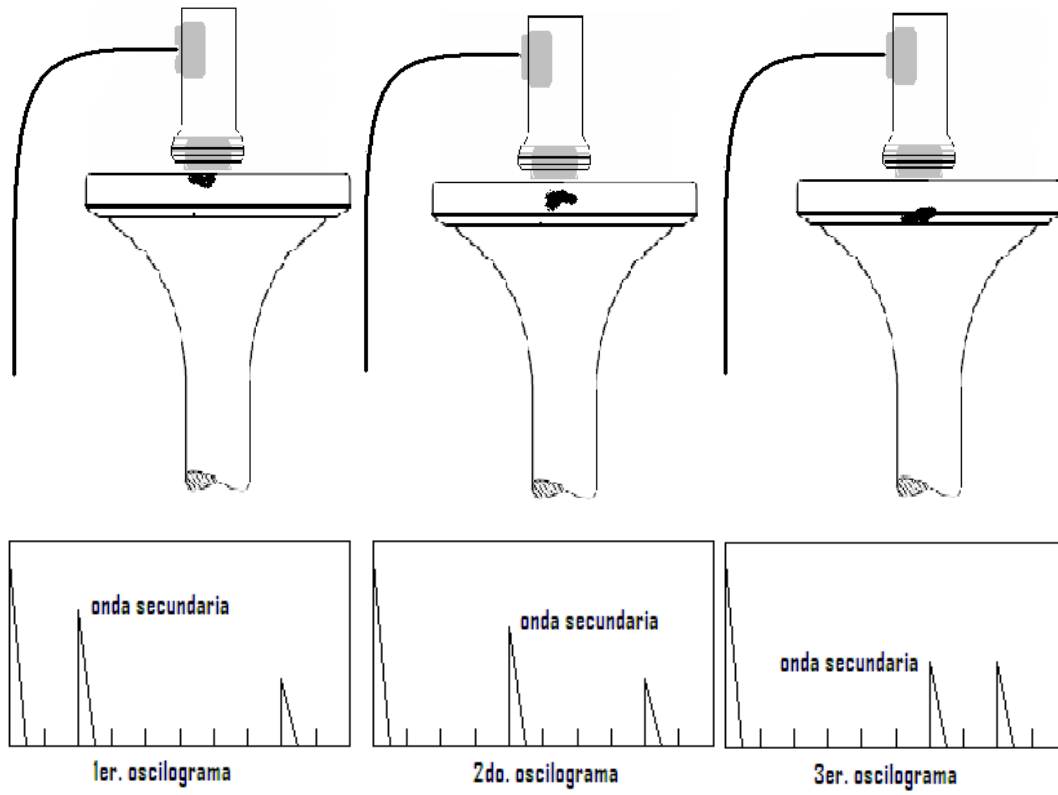
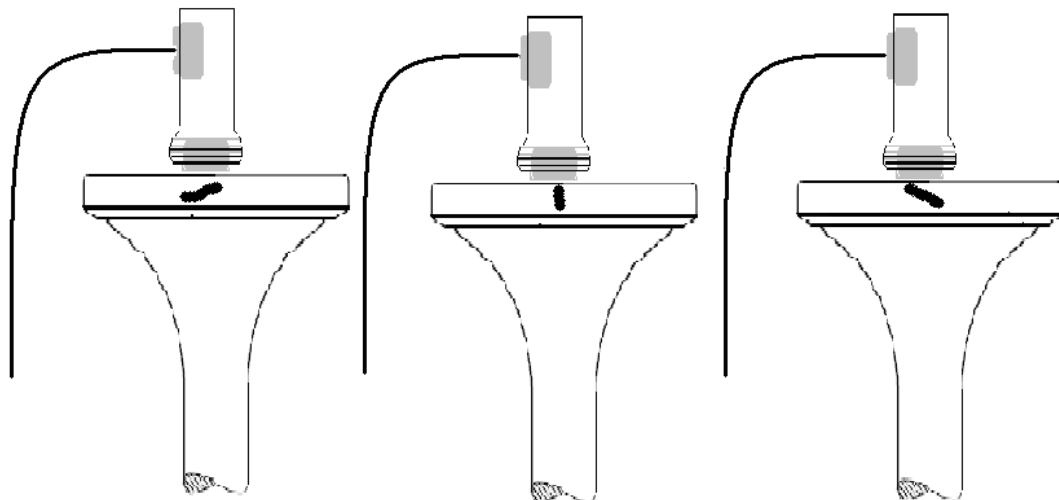


Figura 49
Señal de discontinuidad a diferente profundidad

- Comportamiento del haz ultrasónico con respecto a la orientación de la discontinuidad.



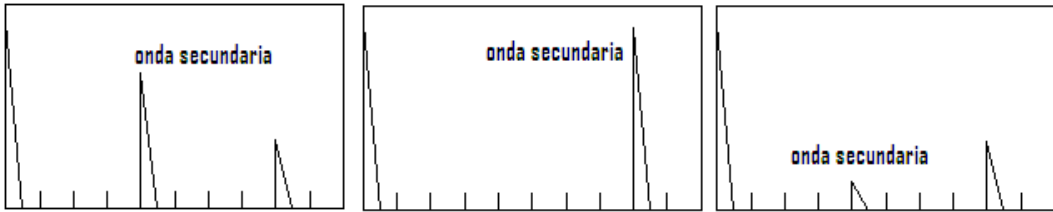


Figura 50
Señal de discontinuidad con respecto a la orientación

- Comportamiento del haz ultrasónico en fisuras de localización especial.

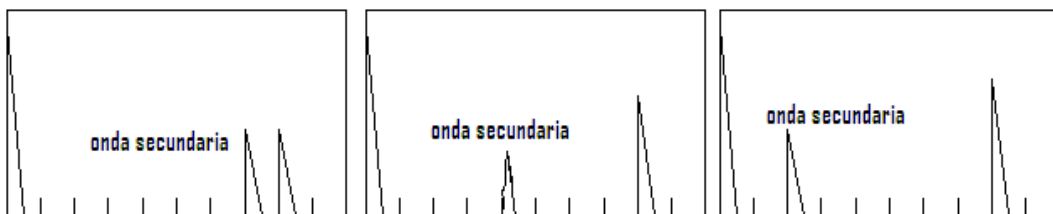
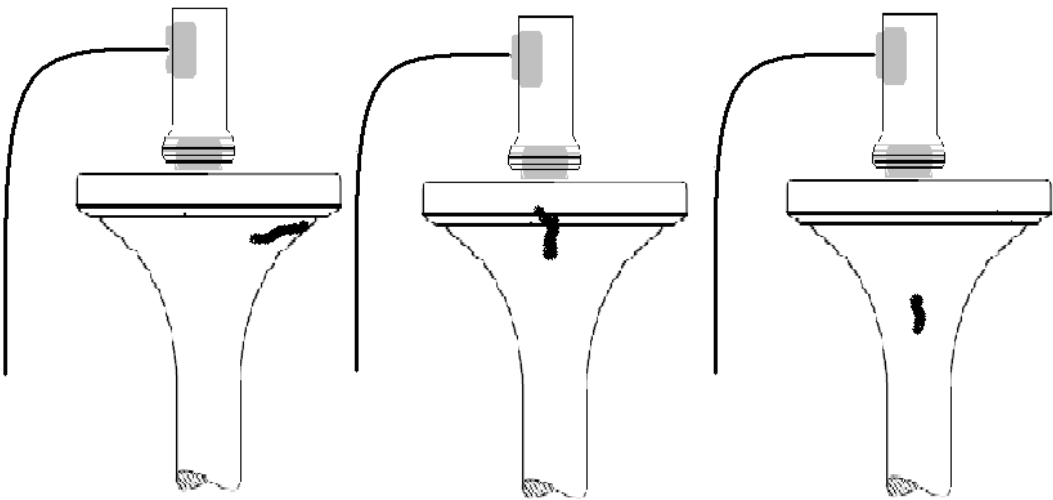


Figura 51
Señal de discontinuidad en fisuras de localización especial



Figura 52
Inspección ultrasónica de válvulas

4. EVALUACION DE RESULTADOS DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO EN VALVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

4.1 PRUEBAS DE CAMPO

La prueba de campo que se realiza en base a una muestra de tres motores que han tenido esta falla. Nombramos a los motores en estudio como Motor A, B y C respectivamente.

El procedimiento de la prueba de campo es determinar durante un periodo de 7,500 horas de operación si se encuentra alguna falla de válvulas de admisión y escape.

Por lo que durante el Mantenimiento Preventivo de 7,500 horas se agrega el Ensayo No Destructivo por inspección de ultrasonido (sección 3.4) a las válvulas de admisión y escape posterior a la evaluación rutinaria realizada durante el mantenimiento mencionado (sección 2.2)

El periodo de evaluación de operación de las válvulas de admisión y escape es de 12 meses, tiempo en el cual los motores completan aproximadamente 7500 horas de operación para proceder a evaluarlas de nuevo en el siguiente Mantenimiento Preventivo.

El Mantenimiento Predictivo por ultrasonido se realiza a válvulas con más de 7,500 horas de operación, ya que en los casos de fallas se ha determinado que la falla ocurre las válvulas entre 7,500 a 15,000 horas de operación, en las válvulas nuevas que reemplazan a las válvulas desechadas por no aprobar en la inspección de Mantenimiento Preventivo (sección 2.2).

Otro punto importante es acotar que las válvulas de admisión y escape no tienen un tiempo de vida útil mayor a 15,000 horas de operación, la experiencia nos indica que las válvulas que alcanzan el segundo Mantenimiento Preventivo de 7500 horas son desechadas ya que sus condiciones físicas no son aptas en la segunda evaluación.

La descripción de los motores es la siguiente:

- Motor A: de 6 cilindros en línea con una potencia de 5 Mw., con total de 12 válvulas de admisión y 12 válvulas de escape, horometro al cual tuvo falla de válvulas de admisión y escape: 21,514 hrs., horometro de 1er Mantenimiento Predictivo 22,535 hrs. de operación, Prueba de válvulas sometidas a ultrasonido hasta 30,000 hrs. de operación.
- Motor B: de 9 cilindros en línea con una potencia de 7.5 Mw., con total de 18 válvulas de admisión y 18 válvulas de escape, horometro al cual tuvo falla de válvulas de admisión y escape: 9,327 hrs., horometro de 1er Mantenimiento Predictivo 15,289 hrs. de operación, Prueba de válvulas sometidas a ultrasonido hasta 22,500 hrs. de operación.
- Motor C: de 12 cilindros en V con una potencia de 10 Mw., con un total de 24 válvulas de admisión y 24 válvulas de escape, horometro al cual tuvo falla de válvulas de admisión y escape: 8,938 hrs., horometro de 1er Mantenimiento Predictivo 15,885 hrs. de operación, prueba de válvulas sometidas a ultrasonido hasta 22500 hrs. de operación.

En la tabla X se observa los resultados de las pruebas de ultrasonido realizadas a las válvulas de admisión y escape a los motores A, B y C respectivamente durante el primer Mantenimiento Predictivo.

La tabla XI juntamente con la tabla X, establece un control de las válvulas que son sometidas a ultrasonido y que quedan a prueba de operación, los datos que encontramos en la tabla XI son la identificación del motor, el horometro del motor cuando ocurrieron las fallas de válvulas, el horometro del Mantenimiento Preventivo y Predictivo cuando se realiza la inspección ultrasónica a las válvulas, el total de válvulas inspeccionadas con mas de 7,500 horas de operación, total de válvulas desechadas por ultrasonido y el total de válvulas que entran a prueba de operación.

Tabla X

Resultados de pruebas de ultrasonido realizadas en válvulas de admisión y

Escape en motores A, B y C

<u>Prueba de ultrasonido a valvulas</u>								
Motor A	valvulas de admision				valvulas de escape			
	No. Valvula	Horometro	Aceptado	Rechazado	No. Valvula	Horometro	Aceptado	Rechazado
	300	7330	X		8755	7330	X	
Horometro	318	7330	X		8677	7330	X	
22535 hrs	526A	7330	X		8111B	14995		X
	456	7330	X		8042A	14995		X
1er. Man-	239A	7330	X					
tenimiento	877	7330	X					
Predictivo	842B	7330	X					
	875	7330		X				
	454	7330		X				
	201A	14995		X				

Nota: El restante de 5 valvulas de admision fue completado con valvulas nuevas para completar un total de 12, al momento de armado de culatas.

Nota: El restante de 10 valvulas de escape fue completado con valvulas nuevas para completar un total de 12, al momento de armado de culatas.

Motor B	válvulas de admisión				válvulas de escape			
	No. Válvula	Horometro	Aceptado	Rechazado	No. Válvula	Horometro	Aceptado	Rechazado
Horometro 15289 hrs	677B	7789	X		9127	7789	X	
	721A	7789	X		9478A	7789	X	
	840A	7789	X		10143	7789	X	
	861	7789	X		10010	7789	X	
	773B	7789	X		9335	7789	X	
	877	7789	X		8967	7789	X	
	821	7789	X		8342	7789	X	
	875	7789		X	10522	7789	X	
	582	15289		X	9732A	7789	X	
	499	15289		X	8956A	7789	X	
1er. Man- tenimiento Predictivo	602	15289		X	10133	7789	X	
	608B	15289		X	10116A	7789	X	
	924A	7789		X	9624A	7789		X
	737B	7789		X	8718B	15289		X
	692B	7789		X				
	Nota: El restante de 11 válvulas de admisión fue completado con válvulas nuevas para completar un total de 18, al momento de armado de culatas.				Nota: El restante de 6 válvulas de escape fue completado con válvulas nuevas para completar un total de 18, al momento de armado de culatas.			

Motor C	válvulas de admisión				válvulas de escape			
	No. Válvula	Horometro	Aceptado	Rechazado	No. Válvula	Horometro	Aceptado	Rechazado
Horometro 15885 hrs	1222	8245	X		10677A	8245	X	
	981	8245	X		10023	8245	X	
	975A	8245	X		10131	8245	X	
	1116	8245	X		10264B	8245	X	
	1119B	8245	X		10570	8245	X	
	1284	8245	X		10427B	8245	X	
	1174	8245	X		11003	8245	X	
	1047	8245	X		11057	8245	X	
	1285B	8245	X		11081	8245	X	
	1273	8245	X		11193A	8245	X	
1er. Man- tenimiento Predictivo	1266	8245	X		10204	8245	X	
	1238	8245	X		10172	8245	X	
	1241B	8245	X		10083	8245		X
	1111	8245	X		11012A	8245		X
	1056B	8245	X		10751	15885		X
	1040	8245	X		10754	15885		X
	1215	8245	X		10386	15885		X
	1007	8245	X		10327B	15885		X
	1293A	8245		X	10119	15885		X
	1056B	8245		X	10158	15885		X
	983	15885		X				
	Nota: El restante de 6 válvulas de admisión fue completado con válvulas nuevas para completar un total de 24, al momento de armado de culatas.				Nota: El restante de 12 válvulas de escape fue completado con válvulas nuevas para completar un total de 24, al momento de armado de culatas.			

Tabla XI

Control de válvulas de admisión y escape en prueba de operación

	Horometro de motor en falla de válvulas	Horometro de 1er. Mantenimiento Predictivo de 7500 hrs	Total de válvulas inspeccionadas	Total de válvulas desechadas por ultrasonido	Total de válvulas a prueba de operación
Motor A	19111 y 21514	22535	14	5	9
Motor B	9327 y 12677	15289	29	10	19
Motor C	8938 y 9960	15885	41	11	30

4.2 EVALUACION DE RESULTADOS DE OPERACIÓN DE MOTORES

La evaluación de resultados desde el punto de vista operativo se realiza con el cálculo de los índices de Disponibilidad y Confiabilidad de los motores sección (1.3).

El procedimiento utilizado es: primero se realiza el cálculo de Disponibilidad de los motores A, B y C en el periodo de 7,500 horas cuando ocurrieron las fallas, utilizando la formula de Disponibilidad de la sección 1.3, se tiene:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by})}{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by} + \sum \text{ horas mtto correctivo no planificado} + \sum \text{ horas de mtto correctivo planificado} + \sum \text{ horas de mtto preventivo})} \times 100$$

Realizando el cálculo para el motor A:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(6570 + 1690)}{(6570 + 1690 + 150 + 0 + 350)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{94.3 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor B:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(7008 + 1152)}{(7008 + 1152 + 160 + 0 + 440)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{93.2 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor C:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(7446 + 629)}{(7446 + 629 + 160 + 0 + 525)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{92.2 \%}$$

De la misma manera se realiza el cálculo de Confiabilidad de los motores A, B y C en el periodo de 7,500 horas cuando ocurrieron las fallas, utilizando la formula de Confiabilidad de la sección 1.3, se tiene:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by})}{(\sum \text{ horas de operación} + \sum \text{ horas en stand by} + \sum \text{ horas mto correctivo no planificado})} \times 100$$

Realizando el cálculo para el motor A:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(6570 + 1690)}{(6570 + 1690 + 150)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{98.2 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor B:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(7446 + 629)}{(7446 + 629 + 160)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{98.1 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor C:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(6570 + 1690)}{(6570 + 1690 + 150)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{98.1 \%}$$

Es importante señalar que al realizar los cálculos de los índices de Confiabilidad y Disponibilidad, no se toma ningún otro tipo de Mantenimiento Correctivo no Planificado ya que el estudio se realiza únicamente sobre las fallas provocadas por válvulas de admisión y escape. Ahora el procedimiento a utilizar es determinar los índices de Disponibilidad y Confiabilidad durante el periodo de 7,500 horas de operación entre el primer y segundo Mantenimiento Predictivo, tiempo en el cual las válvulas usadas que entraron a operación ya tienen inspección ultrasónica, también se determina que ninguna válvula fallo durante este tiempo, utilizamos de nuevo las formulas de la sección 1.3.

Realizando el cálculo para el motor A:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(7095 + 1305)}{(7095 + 1305 + 0 + 0 + 360)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{96 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor B:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(7533 + 777)}{(7533 + 777 + 0 + 0 + 450)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{95 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor C:

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(7971 + 249)}{(7971 + 249 + 0 + 0 + 540)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{93.8 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor A:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(7095 + 1305)}{(7095 + 1305 + 0)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{100 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor B:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(7533 + 777)}{(7533 + 777 + 0)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{100 \%}$$

Realizando el cálculo para el motor C:

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(7971 + 249)}{(7971 + 249 + 0)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{100 \%}$$

La Tabla XII es un compendio de la información recopilada respecto a los índices de Disponibilidad y Confiabilidad, evidentemente se observa que al realizar inspecciones ultrasónicas a válvulas usadas se incrementa la Disponibilidad en un promedio de 1.7% y la Confiabilidad aumenta en 1.9%, no se ha observado que ninguna de las válvulas tenga un comportamiento anormal o de indicios de falla.

Importante notación es que la Confiabilidad de los motores alcanza un 100% con respecto a fallas provocadas por válvulas de admisión y escape, se tiene la confianza que las válvulas expuestas a inspección ultrasónica no provocará ningún tipo de falla en la cámara de combustión.

Tabla XII

Índices de Disponibilidad y Confiabilidad antes y durante la prueba de válvulas inspeccionadas por ultrasonido

	Horometro de motor en falla de valvulas	Horometro de 1er. Mantenimiento Preventivo	Total de valvulas a prueba de oper.	valvulas falladas entre 1er y 2do mtto.	Horometro de 2co. Mantenimiento Preventivo	confiabilidad anual antes 1er Mtto. Pred	disponibilidad anual antes 1er Mtto. Pred	confiabilidad anual entre 1er y 2do mtto.	disponibilidad anual entre 1er y 2do mtto.
Motor A	19111 y 21514	22535	9	0	30130	98.20%	94.30%	100%	96%
Motor B	9327 y 12677	15289	19	0	22616	98.10%	93.20%	100%	95%
Motor C	8938 y 9960	15885	30	0	22550	98.10%	92.20%	100%	93.80%

El cálculo anterior también se aplica al ejemplo que hemos venido desarrollando en las secciones 1.4 y 2.5 respecto a la planta de generación de 7 Mw. y sus cálculos de costos variables de Operación y Mantenimiento. A continuación se realizan los cálculos.

Calculo de Disponibilidad y Confiabilidad con una falla anual en válvulas de admisión y escape en planta del ejemplo de 7 Mw. con datos proporcionados de tabla VIII.

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(6900 + 1320)}{(6900 + 1320 + 100 + 0 + 440)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{93.8 \%}$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(6900 + 1320)}{(6900 + 1320 + 100)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{98.7 \%}$$

Calculo de Disponibilidad y Confiabilidad sin falla en válvulas de admisión y escape en planta de ejemplo de 7 Mw. con datos proporcionados de tabla I

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \frac{(7000 + 1320)}{(7000 + 1320 + 0 + 0 + 440)} \times 100$$

$$\text{DISPONIBILIDAD \%} = \mathbf{95 \%}$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \frac{(7000 + 1320)}{(7000 + 1320 + 0)} \times 100$$

$$\text{CONFIABILIDAD \%} = \mathbf{100 \%}$$

Los valores obtenidos son muy cercanos en nuestro ejemplo comparado con los datos reales de los motores A, B y C.

4.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS EN COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Para la evaluación de resultados enfocado a los costos de Operación y Mantenimiento nos referimos al mismo procedimiento utilizado en las tablas de las secciones 1.4 y 2.5 en donde se ha tomado el ejemplo de costos de Operación y Mantenimiento en una planta hipotética de 7 Mw., tablas I y II con los costos iniciales de operación y tablas VIII y IX con los costos en el caso de una falla por válvulas de admisión y escape. Ahora se desarrollan las tablas de “Valores para calculo de costo de Operación y Mantenimiento” y “Resultados de costo de Operaciones y Mantenimiento” en el caso final de la aplicación del Ensayo No Destructivo por ultrasonido aplicado a las válvulas de admisión y escape.

Con los datos de la Tabla I, revisamos de nuevo cada uno de los valores de costos de Operación y Mantenimiento.

- El valor del precio de combustible fuel oil pesado y el precio del aceite lubricante no sufren ninguna alteración.
- Los repuestos para periodo de 5 años ahora no se vera afectado, permanece igual al valor inicial de US\$ 800,000.
- El costo de Operación y Mantenimiento se vera incrementado en una pequeña cantidad, ya que en un periodo de 5 años el total de inspecciones por ultrasonido será de cinco veces (una vez por año) a un precio promedio de US\$ 2,000 cada inspección, el valor final es de US\$ 410,000.
- El consumo especifico de combustible y el consumo de aceite tampoco se ven afectados.
- Las horas de funcionamiento de planta anual vuelve a ser 7000.

- Factor de carga no tiene alteración
- La producción de Kwh./año retorna a 49 millones.

Con los nuevos valores la tabla XIII, “Valores para cálculo de costo de Operación y Mantenimiento con la inspección por ultrasonido de válvulas de Admisión y Escape” queda de la siguiente manera:

Tabla XIII

Valores para cálculo de costo Operación y Mantenimiento con inspección

Ultrasonica a válvulas de Admisión y Escape.

* Precio de combustible fuel oil pesado, con poder calorífico de 42,700 KJ/Kg. y acorde a la norma CIMAC K35 de requerimientos para combustibles residuales para motores diesel.	300 US\$/ton
* Precio de aceite lubricante.	2200 US\$/ton
* Repuestos para período de 5 años.	800,000 US\$
* Costo de Operación y Mantenimiento para período de 5 años.	410,000 US\$
* Consumo específico de combustible (cec).	210 g/Kwh.
* Consumo de aceite lubricante.	2.30 Kg. /h
* Horas de funcionamiento de planta, anual.	7000
* Factor de carga.	100 %
* Producción Kwh. al año.	49, 000,000

El cambio en los resultados de costo de Operación y Mantenimiento con el costo de la inspección ultrasónica a válvulas de Admisión y Escape se enumera a continuación:

- Costo de lubricante y de repuestos no tienen variación.
- Costo de mantenimiento se incrementa un 2.45% de 0.00163 US\$/Kwh. a 0.00167 US\$/Kwh. Debido al incremento de US\$ 10,000 por el costo de las inspecciones ultrasónicas en el periodo de cinco años.
- Costo total de Mantenimiento aumenta un 0.7% de **0.00562 US\$/Kwh. a 0.00566 US\$/Kwh.** Debido a la sumatoria de los costos anteriores.
- Costo de combustible no tiene variación.
- Costo total de Operaciones y Mantenimiento aumenta relativamente muy poco de **0.06862 US\$/Kwh. a 0.06866 US\$/Kwh.** Debido al aumento del costo total de Mantenimiento.
- Costo de inversión no tiene cambios.
- **Costo total de Operaciones y Mantenimiento incluyendo amortización de la planta aumenta un 4.45% de 0.08985 US\$/Kwh. a 0.08989 US\$/Kwh.**
- **El costo de oportunidad se reduce por paradas no previstas ya que al incrementarse la Disponibilidad y Confiabilidad, prácticamente en este punto radica el ahorro al utilizar ultrasonido.**

Tabla XIV

Resultados de costo de Operación y Mantenimiento con inspección
Ultrasónica a válvulas de Admisión y Escape.

* Costos de Lubricante. = (consumo de lubricante * precio del lubricante * horas de operación anual) / Kwh. producidos al año	0.00075 US\$/Kwh.
* Costo de Repuestos = (Repuestos para periodo de 1 año) / Kwh. producidos al año.	0.00326 US\$/Kwh.
* Costo de Mantenimiento = (Costo O&M para periodo de 1 año) / Kwh. producidos al año.	0.00167 US\$/Kwh.
* Total costo de Mantenimiento.	<u>0.00566 US\$/Kwh.</u>
* Costo Combustible = ((Consumo específico de combustible, cec) * (Kwh. producidos al año)/1,000,000) * (Precio de combustible) / Kwh. producidos al año	0.0630 US\$/Kwh.
* Costo total de Operaciones y Mantenimiento = (Costo total mantenimiento + Costo de combustible).	<u>0.06866 US\$/Kwh.</u>
Suponiendo un precio de US\$ 5, 200,000 para una planta de estas características y su depreciación en 5 años.	
* Costo de inversión = (Precio de planta / No. de años a amortizar) / Kwh. producidos al año.	0.02122 US\$/Kwh.
* Costo total de Operaciones y Mantenimiento incluyendo amortización de la planta.	<u>0.08989 US\$/Kwh.</u>

Los costos de Operación y Mantenimiento aumentan con la inspección de ultrasonido a válvulas únicamente 0.00004 US\$/Kwh., el cual es un valor mínimo y no representa un valor crítico en el costo de Operación y Mantenimiento de la Central Diesel.

El punto más importante de este ejemplo es la importancia e incidencia que tiene en el Mantenimiento de la planta los Ensayos No Destructivos que, con un costo bajo se puede evitar una serie de pérdidas de producción de energía eléctrica y gastos en repuestos y lubricantes muy fuertes. En la tabla XV tenemos un cuadro comparativo de los valores para costos de Operación y Mantenimiento de la central Diesel de 7Mw. con los tres escenarios, el primero Costos Iniciales de Operación, el segundo Costos posterior a una falla de válvulas de Admisión y Escape y tercero Costos de Operación y Mantenimiento incluyendo inspección de ultrasonido a válvulas.

Tabla XV

Comparativo de costos de Operación y Mantenimiento.

	Precio de combustible	Precio de aceite	Repuestos para 5 años	Costo de O&M 5 años	Consumo específico de comb.	Consumo de lubricante	Horas de funcionamiento	Factor de carga	Producción Kwh. año
Costos iniciales	300 US\$/ton	2200 US\$/ton	US\$ 000,000	US\$ 400,000	210 g/Kwh.	2.3 Kg/h	7000	100%	49,000,000
Costos despues de falla	300 US\$/ton	2200 US\$/ton	US\$ 1,000,000	US\$ 400,000	210 g/Kwh.	6.4 Kg/h	6900	100%	48,300,000
Costos con ultrasonido	300 US\$/ton	2200 US\$/ton	US\$ 800,000	US\$ 410,000	210 g/Kwh.	2.3 Kg/h	7000	100%	49,000,000

En la tabla XVI se muestra un segundo cuadro comparativo de los resultados de costos de Operación y Mantenimiento de la central Diesel con los tres escenarios ya mencionados, Costos Iniciales de Operación, Costos posterior a una falla de válvulas de Admisión y Escape y Costos de Operación y Mantenimiento incluyendo inspección de ultrasonido a válvulas.

Tabla XVI

Comparativo de resultados de costos de Operación y Mantenimiento.

	Costos de lubricante	Costo de repuestos	Costo de Mantenimiento	Costo total de Martenimiento	Costo de combustible	Costo total O & M	Costo de inversion	Costo total O&M con amortizacion de planta
Costos Iniciales	0.00075	0.00325	0.00163	0.00562	0.063	0.06862	0.0212	0.08985
Costos despues de falla	0.00201	0.00414	0.00165	0.00780	0.063	0.07080	0.0215	0.09234
Costos con ultrasonido	0.00075	0.00325	0.00167	0.00566	0.063	0.06866	0.0212	0.08989

Nota: Costos en US\$/Kwh.

CONCLUSIONES

- 1.- Los motores de combustión interna, frente a otro tipo de accionamiento primario, como turbinas de gas, turbinas de vapor o ciclos combinados, ofrecen la ventaja de un mejor rendimiento, superior al 40%. Las limitaciones de las plantas diesel es el tamaño unitario de las máquinas, las unidades instaladas de mayor potencia son de 60 Mw. por medio de motores diesel de dos tiempos. Los Motores de Combustión Interna para Generación de Energía Eléctrica son capaces de mantener un mejor rendimiento trabajando a carga completa y baja carga, en comparación a lo que pueden ofrecer otras soluciones de Generación Térmica.
- 2.- Los indicadores de gestión permiten tener control adecuado sobre una situación dada, su importancia radica en que es posible predecir y actuar con base a las tendencias positivas o negativas observadas en su desempeño global.
- 3.- Los costos variables de producción de energía eléctrica en una Central Diesel principalmente dependen del precio internacional del combustible, el restante es el costo de Operación y Mantenimiento de la planta.
- 4.- El análisis de fallas determina que no hay que conformarse con devolver a los equipos a su estado de buen funcionamiento tras la falla, sino identificar la causa raíz para evitar, si es posible, su repetición. Si ello no es posible se tratara de disminuir la frecuencia de la citada avería o la detección precoz de la misma de manera que las consecuencias sean tolerables o simplemente se pueda mantener controlada. El fin principal es mejorar la confiabilidad, aumentar la disponibilidad de los equipos y reducir costos.
- 5.- El FMEA es una de varias herramientas que en la industria la ingeniería utiliza para el análisis de los efectos que son productos de fallas, y la

evaluación profunda de los modos de falla. Como resultado se obtiene una lista de acciones preventivas, correctivas y lo más importante acciones proactivas.

- 6.- Las válvulas de admisión y escape en la central diesel fallan en un periodo entre las 7,500 a 15,000 horas de operación, fracturándose como consecuencia de la combinación de corrosión y fatiga.
- 7.- Los costos variables de producción de O&M se incrementan aproximadamente en un 3% cada vez que falla una válvula de admisión o escape.
- 8.- El Mantenimiento Predictivo es utilizado en la Central Diesel como una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de un motor o máquina de los sistemas auxiliares, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.
- 9.- De 25 a 35% es el promedio de válvulas usadas de admisión y escape desechadas al no aprobar la inspección de ultrasonido.
- 10.-Al realizar inspecciones ultrasónicas a válvulas usadas de admisión y escape se incrementa la Disponibilidad de los motores en un promedio de 1.7 % y la Confiabilidad aumenta en 1.9 %, no se ha observado que ninguna de las válvulas tenga un comportamiento anormal o de indicios de falla, la Confiabilidad de los motores alcanza un 100% con respecto a fallas provocadas por válvulas de Admisión y Escape, se tiene la confianza que las válvulas aprobadas en la inspección ultrasónica no provocara ningún tipo de falla y daños en la cámara de combustión.
- 11.- Los costos de Operación y Mantenimiento aumentan con la inspección de

ultrasonido a válvulas únicamente 0.00004 US\$/Kwh., el cual es un valor mínimo y no representa un valor crítico en el costo de Operación y Mantenimiento de la Central Diesel.

12.-El punto de mayor relevancia de este estudio es la importancia e incidencia que tienen en el Mantenimiento de la planta los Ensayos No Destructivos ya que, con un costo bajo se puede evitar una serie de pérdidas de producción de energía eléctrica y gastos altos en repuestos y lubricantes.

13.-Debido a los diferentes y fuertes tipos de corrosión que se encuentran expuestas las válvulas de admisión y escape, ocasiona que se generen concentración de esfuerzos los cuales generan microfisuras en áreas de la superficie del material de las válvulas expuestas a la cámara de combustión que no son detectables a simple vista y que tienden a fracturarse en un aproximado de 120 millones de ciclos.

14.-Aunque existe otro tipo de Ensayo No Destructivo el cual puede aplicarse a la detección de grietas en válvulas de admisión y escape como Las Corrientes Parásitas, el ultrasonido fue escogido para éste estudio debido a menor costo y disponibilidad de equipos en el mercado nacional.

RECOMENDACIONES

- 1.- Aún realizando las indicaciones y seguimiento estricto del Mantenimiento Preventivo para válvulas de admisión y escape, dadas por los fabricantes de motores, se ha encontrado fallas en las válvulas, se recomienda realizar inspecciones de Ensayos No Destructivos (Ultrasonido) para complementar el ciclo de Mantenimiento, así evitar daños en los elementos de la cámara de combustión, pérdidas en producción de energía eléctrica e incremento de costos de producción.
- 2.- El control sobre el desempeño global de la Central Diesel es por medio de indicadores de gestión en Operaciones y Mantenimiento, por lo que se recomienda su utilización y análisis diario, semanal, mensual y anual.
- 3.- El Mantenimiento Predictivo es utilizado como una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de componentes de maquinaria, por lo que se recomienda la realización de un extensivo plan predictivo de monitoreo de condición en los equipos de la planta.
- 4.- Debido a que el combustible es el principal agente de acelerado desgaste en válvulas de admisión y escape, se recomienda que los parámetros proporcionados por los fabricantes de motores para compra de bunker sean seguidos estrictamente, principalmente el porcentaje de azufre no sea mayor al 3%.

BIBLIOGRAFIA

1. Industrial Management and Consulting Inc. (2008). **Gestión Estratégica de Mantenimiento de Clase Mundial**. Guatemala.
2. MaK / Caterpillar. (2006) **General Operation and Maintenance Instructions, Engine type M43**. Germany.
3. Stork-Wärtsilä Diesel (1998). **Wärtsilä 38, Training manual**. Netherlands.
4. Man B&W (2002). **Four stroke diesel engine L58/64**. Germany
5. ABB Turbochargers. (2006). **ABB Exhaust gas turbochargers type TPL77**. Baden, Switzerland.
6. European Gas Turbines. (1997). **Instruction manual for Napier 457 Turbocharger**. England
7. Chris Marine. (2007). **Maintenance methods for valve spindle reconditioning**. USA.
8. Chris Marine. (2007). **Maintenance methods for valve seat reconditioning**. USA.
9. Sach, Neville (2007). **Practical Plant Failure Analysis**. Taylor & Francis Group Editor. USA.
10. Gutiérrez, Javier (2006). **Anales de Mecánica y Electricidad**. España.

ANEXOS

Anexo 1

Ficha de reporte de mantenimiento preventivo de culata

HOJA DE CONTROL PARA CULATAS				
Planta generadora			Modelo de motor	9CM43
1/2 Overhaul del motor	9		No. serie del motor	
No. de culata	643		Puesta en cilindro	9
Fecha reparada	08/03/2008		Fecha instalacion	15/03/2008
			Horometro motor	22500
			Horometro de culata	17620
			* Viene del motor 7 cil. 5	
1) Limpieza	SI	NO		
2) Revision	SI	NO		
3) Medicion				
a) medicion de guias de valvulas				
valvula	holgura mm	diametro guia - diametro vastago		diferencia
Escape	0.22 - 0.29	32 19-31.92		0.27
	0.22 - 0.29	32 19-31.92		0.27
Admision	0.15 - 0.22	32 13-31.92		0.21
	0.15 - 0.22	32 13-31.92		0.21
b) Ondulacion de vastago de las valvulas				
Nota: La zona de medicion de ondulacion en el vastago de las valvulas debe hacerse en un espacio de 495.6 mm (495.6 mm) a lo largo del vastago y los puntos de apoyo para el dispositivo de medicion deben estar a 20 mm de cada extremo de la zona de medicion.				
valvula	holgura max.	I	II	
Escape	0.04	0.01	0	
Admision	0.04	0	0.01	
c) Desviacion radial del cono de la valvula				
valvula	holgura max.	I	II	
Escape	0.03	0	0.01	
Admision	0.03	0	0	
c.1) Altura de resortes de culata (cms)				
		I	II	
	escape	23.9	23.9	
	admision	23.9	23.8	
d) Concavidad en las caras de las valvulas (Altura max.1.3 mm)				
No.	Admision	Escape		
1	0.07	0.57		
2	0.09	0.98		
e) Claros entre insertos de valvulas y culatas				
valvula	holgura max.	I	II	
Escape	0.6 + 0.5 mm	0.6	0.7	
Admision	0	0	0	
f) Diametro exterior del inserto de valvula (cota maxima de rectificaco)				
valvula	holgura max.	I	II	
Escape	148 + 0.2mm	146.46	146.11	
Admision	148 + 0.2mm	145.55	146.19	
g) Torque de ajuste para insertos nuevos				
		SI	NO	torque
				150 N.m
h) Material base de las valvulas (revisar luego del rectificaco)				
valvula	holgura min	I	II	
Escape	1.5 mm	4.05	3.31	
Admision	0.2 mm	1.74	2.02	
i) Apriete de camisa del inyector				
	SI	NO	altura	torque
			26 cms.	300 N.m
j) Apriete de valvula de venteo				
	SI	NO	torque	
			50 N.m	
k) Apriete de valvula de arranque				
	SI	NO	torque	
			80 N.m	
l) Prueba de Presion: (135 psi)				
	SI	NO		
4) Repuestos utilizados				
Cantidad	Repuesto		No. de repuesto	
4	oring para vastago de valvulas		1 7082-518	
2	oring para vaso de inyector		17084-660 y 1.7082-623	
1	oring para tapa de vav. Starter		1.7084662	
5) Numero de valvulas:				
	Escape	Admision		
	2263	6133		
	7587	3070		

Anexo 2

Reporte de inspección de ultrasonido a válvulas de admisión

REPORTE DE INSPECCION

No. DE REPORTE: MIS-4906 FECHA: 05 / 06 / 2008


Componente: Válvulas de admisión Cantidad: 14 en total **motor 14**

EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS:

ULTRASONIDO	FABRICANTE	PANAMETRICS NDI
	MODELO	EPOCH XT
	S/N	70063102
	EXPIRACION	02/12/2009
TRANSDUCERS	FABRICANTE	PANAMETRICS
	S/N	A109S
	FRECUENCIA	5 MHz.
	DIAMETRO	0.5 PULG.
ACOPLANTE	FABRICANTE	SONOTECH
	MARCA	ULTRAGEL

RESULTADOS DE LA INSPECCION:

Numero de serie	Aceptado	Rechazado	Área de delaminación	Comentario
52177	X			Las válvulas fueron inspeccionadas en la cara expuesta a los gases de combustión
52205		X	2.5 Cm ²	
0093		X	0.5 Cm ²	
3070	X			
0082	X			
2158		X	2.0 Cm ²	
1326	X			
4110	X			
0008	X			
2168	X			
3572		X	1.5 Cm ²	
1291		X	2.0 Cm ²	
0083		X	2.5 Cm ²	
0017	X			


FIRMA DEL INSPECTOR
NDT LEVEL II
SNT-TC-1A

Anexo 3

Reporte de inspección de ultrasonido a válvulas de escape

REPORTE DE INSPECCION

No. DE REPORTE: MS-4906 FECHA: 05 / 06 / 2008


Componente: <u>Válvulas de escape</u>	Cantidad: <u>11 en total</u>	Referencia: <u>M9</u>
---------------------------------------	------------------------------	-----------------------

EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS:

ULTRASONIDO	FABRICANTE	PANAMETRICS-NDI
	MODELO	EPOCH XT
	S/N	70063402
	EXPIRACION	02/12/2008
TRANSDUCERS	FABRICANTE	PANAMETRICS
	S/N	A10ES
	FRECUENCIA	5 MHz
	DIAMETRO	0.5 FULG.
ACOPLANTE	FABRICANTE	SONOTECH
	MARCA	ULTRAGEL

RESULTADOS DE LA INSPECCION:

Numero de serie	Aceptado	Rechazado	Área de delaminación	Comentario
8142	X			Las válvulas fueron Inspeccionadas en la cara expuesta a los gases de combustión
8340	X			
2239	X			
7828		X	2.5 Cm ²	
8222	X			
9587	X			
2256	X			
8358	X			
8220	X			
8372	X			
8200	X			


FIRMA DEL INSPECTOR
NDT LEVEL II
SNT-TC-1A