



Gestión del mantenimiento predictivo aplicado a motores
tipo Diesel Cummins 6BTA 5.9 para mejorar su
confiabilidad operacional

Erwin Diaz Lara
Código: 20452023101

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

Año 2022

Gestión del mantenimiento predictivo aplicado a motores tipo Diesel Cummins 6BTA 5.9 para mejorar su confiabilidad operacional

Erwin Diaz Lara

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

PhD Rafael Ramírez Restrepo

Línea de Investigación:

Desarrollo de nuevos productos y nuevas tecnologías en el sector automotor

Grupo de Investigación: Gestión del mantenimiento

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

Año 2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Gestión del mantenimiento predictivo aplicado a motores tipo Diesel Cummins 6BTA
5.9 para mejorar su confiabilidad operacional,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingeniero Mecánico,

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Barranquilla,

INDICE GENERAL

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	10
1. OBJETIVOS.....	15
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3. JUSTIFICACIÓN	15
2. MARCO TEORICO.	16
2.1. Actividades de mantenimiento.....	17
2.1.1. Actividades correctivas.....	17
2.1.2. Actividades preventivas:	18
2.1.3. Actividades predictivas.....	19
2.1.4. Tecnologías para aplicar el mantenimiento predictivo.....	21
2.1.5. Norma ISO 2372	26
2.2. Metodologías para elaborar un plan de mantenimiento.....	32
2.2.1. TPM.	33
2.2.2. RCM.	34
2.2.3. Enfoque CMD.	36
2.2.4. Modelo de costos para evaluar el mantenimiento predictivo.....	38
2.2.5. Indicadores de mantenimiento	38
3. METODOLOGIA.	39
3.1. Actividades para el objetivo 1:.....	40
3.2. Actividades para el objetivo 2.....	40
3.3. Actividades para el objetivo 3.....	41
3.4. Actividades para el objetivo 4.....	41
4. RESULTADOS Y ANALISIS.	41
4.1. Caracterización del mantenimiento actual realizado a los motores Cummins 6bta 5,9 litros. 41	
4.2. Revisión del personal técnico de mantenimiento.....	46

4.3.	Procedimiento actual de diagnóstico.....	47
4.4.	Tecnologías de mantenimiento predictivo aplicadas a motores Diesel.....	48
4.5.	Metodología para aplicar el mantenimiento predictivo a motores Diesel.....	51
4.6.	Análisis Técnico Económico Del Proyecto Sistema De Mantenimiento Predictivo. 60	
4.7.	Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento correctivo.....	60
4.8.	Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento Predictivo.....	62
4.9.	Comparativo Beneficio Del Proyecto Versus Costos De los Sistemas De Mantenimiento correctivo y mantenimiento Predictivo.	63
5.	CONCLUSION.....	65
6.	RECOMENDACION.....	67
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
	ANEXO A.....	69
	ANEXO B. IDENTIFICACIÓN DEL MOTOR. 1.	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Operaciones de puerto con 3 RM – SAAM TOWAGE. Fuente propia.....	11
Figura 2. Motor Cummins 6 BTA 5,9. fuente 1.....	11
Figura 3. Cigüeñal fracturado. fuente: autor.....	12
Figura 4. Distribución ideal de recurso humano. 14.....	18
Figura 5. Criterio base del mantenimiento predictivo.....	19
Figura 6. Medidor de temperatura típico.	22
Figura 7. Vista de cámara termográfica analizando un motor de combustión.16.....	23
Figura 8. Medición de presiones de compresión de cilindros.	23
Figura 9. Medidor estado del filtro de aire.	24
Figura 10. Medición del desgaste de válvulas.....	24
Figura 11. Onda de vibración.16.....	25
Figura 12. Armónicos de una onda base. .16.	25
Figura 13. Concepto de observación en frecuencia para vibración. .16.....	26
Figura 14. Diagrama de decisión RCM.	35
Figura 15. Modelo de la certeza del funcionamiento 16.	38
Figura 16. Pareto para causas de indisponibilidad de la nave.	42
Figura 17. Pareto de componentes fallados 2021.....	43
Figura 18. Frecuencia – Porcentaje - Acumulado.....	43
Figura 19. Pareto de fallas por costos	45
Figura 20. Combinación de costos para las fallas.	45
Figura 21. Preguntas para evaluar experiencia de técnicos.	46
Figura 22. Esquema del proceso de diagnóstico propuesto.....	47
Figura 23. Esquema para gestionar el mantenimiento en SAAM TOWAGE.	48
Figura 24. Vista explosionada del motor Cummins 6 bta 5,9 litros.1.....	49
Figura 25. Cigüeñal de motor Cummins 6 BTA. 1.....	52
Figura 26. Medidas relevantes en el cigüeñal. 1.	53
Figura 27. Detalles relevantes para la polea amortiguadora de efectos torsionales. 1.....	54
Figura 28. Contrapesos de ejes de balanceo. 1.....	54

Figura 29. Perfil de medición de desgaste en árbol de levas para equipo de ultrasonido. 2.	56
Figura 30. Detalles de ajustes para ranuras del pistón. 1.....	56
Figura 31. Espectros de ultrasonido para detectar anillos de pistón dañados. 2.	57
Figura 32. Detalles para el ajuste de cojinetes de biela. 1.	57
Figura 33. Datos de presión la para la bomba de aceite de lubricación. 1.....	58
Figura 34. Medidas límites para válvulas ensambladas en la culata. 1.....	58
Figura 35. Medición predictiva del desgaste en válvulas y asientos.....	59
Figura 36. Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento correctivo.	61
Figura 37. Estructura de Costos Mantenimiento Predictivo.	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis causa efecto	13
Tabla 2. Esquema árbol de objetivos	14
Tabla 3. Límites de severidad de vibración según norma ISO 2372. 7	27
Tabla 4. Límites permisibles o umbrales de alarma,.....	27
Tabla 5. Elementos metálicos de desgaste – Límites por marca de motor 16	29
Tabla 6. Parámetros evaluados en análisis de aceite y sus límites. 15	29
Tabla 7. Parámetros evaluados en análisis de aceite y recomendaciones. 15	30
Tabla 8. Tecnologías predictivas aplicables a motores de combustión.	32
Tabla 9. Indicadores de gestión del mantenimiento considerados.	39
Tabla 10. Datos de fallas en la flota año 2021.	42
Tabla 11. Datos de fallas vs costos.	44
Tabla 12. Personal técnico para atender motores Cummins 6BT.	46
Tabla 13. Ficha técnica del motor analizado. 1	50
Tabla 14. Relación componente crítico vs tecnología predictiva aplicable.....	51
Tabla 15. Parámetros para medición de componentes críticos.....	59
Tabla 16. Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento correctivo.....	61
Tabla 17. Estructura de Costos Mantenimiento Predictivo.	62
Tabla 18. Relación Beneficio Costo Del Sistema De Mantenimiento Predictivo.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

- CMD: Confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad
- RCM: Mantenimiento centrado en la confiabilidad
- TPM: Mantenimiento productivo total
- OEE: Efectividad global de equipos
- AMEF: Análisis de modo y efecto de la falla
- GPR: Grado de prevención de riesgo
- TFS: Tiempo fuera de servicio
- RM: Remolcador

(Dedicatoria)

*A DIOS POR SU INMESA MISERICORDIA,
GRACIA Y AMOR.*

*A mi madre y a mi padre con mucho cariño y
Amor,*

*A mi esposa Liliana Herrera Sierra por su
gran apoyo, dedicación y amor,*

*Al Ing. Edwin Malambo y Eduardo Misas,
atesoro cada consejo, Muchas Bendiciones.*

*A todos mis familiares y amigos gracias por
su apoyo incondicional.*

Agradecimientos:

A DIOS PADRE CELESTIAL, POR SU MISERICORDIA, SU GRACIA Y AMOR.

Siempre tendré gratitud infinita por todo y por tanto que la vida me ha otorgado. Por las hermosas bendiciones que Dios me ha entregado para poder llegar hasta donde ahora estoy; para superarme cada día y tener el ánimo suficiente para continuar cuando me siento desfallecer. Agradezco cada enseñanza que los momentos difíciles me dejaron, porque me han dado la fuerza para llegar hasta aquí y seguir avanzando.

Mis fuerzas y mi bendición vienen de Dios, es él quien me da el valor para enfrentar cada día, me llena de sabiduría, me protege y renueva mis capacidades. Siento una dicha muy grande al saber que Dios siempre está ahí dándome su bendición y acompañándome a todas partes.

¡LA GLORIA SEA PARA DIOS!

¡AMEN!

RESUMEN

Palabras Claves: Gestión, Mantenimiento Predictivo, Motores Diesel, Seguridad, Confiabilidad Operacional. Disponibilidad, mantenibilidad, certeza de función.

En el proyecto, se desarrolla una metodología para definir cómo combinar las tecnologías de mantenimiento predictivo disponibles como: análisis de vibraciones, detección de desgastes, análisis de aceites, termografía, ultrasonido, entre otras, que, al aplicarse a motores alternativos de combustión interna, específicamente de la marca Cummins, serie 6BTA, permiten detectar y medir parámetros y tendencias del estado operativo, lo que permite realizar mantenimiento oportuno que evita fallas imprevistas, mejorando su disponibilidad. No se aplica el análisis convencional de vibraciones, por no ser este capaz de detectar de modo específico la falla de componentes iguales que operen a la misma frecuencia. Por esto, se propone utilizar equipos de diagnóstico especializado que combina mediciones de vibraciones y ultrasonido tipo Windrock para identificar componentes que estén con daños de manera individual que operen a la misma frecuencia, estableciendo límites de amplitud de la velocidad de vibración según expresa el fabricante Cummins en su manual de taller y guías de la norma ISO 2372-10816 [7]. Además, se definen mediante análisis de Pareto, los componentes críticos de los motores analizados en su contexto operativo y sus correspondientes parámetros predictivos y rangos límites según manual del fabricante, para realizar periódicamente la evolución de los parámetros predictivos definidos.

También, se aplica un análisis técnico económico para medir la factibilidad al aplicar el enfoque de mantenimiento predictivo en la gestión de este tipo de activos. se estima un ahorro anual de 8 millones de pesos por motor, incluyendo las pérdidas por lucro cesante, lo cual hace atractiva desde la óptica monetaria, la implementación del mantenimiento predictivo en la flota de barcos, para mejorar sus indicadores de disponibilidad y utilidades. Finalmente, por ser más representativo del cálculo anual de costos para la flota, se propone un modelo de costos, basado en la tasa de fallas de estos motores, para cuantificar el ahorro anual al reducir la tasa de fallas, lo que se deja como posible investigación futura, base de un trabajo de grado complementario.

ABSTRACT

In the project, a methodology is developed to define how to combine the available predictive maintenance technologies such as: vibration analysis, wear detection, oil analysis, thermography, ultrasound, among others, which, when applied to alternative internal combustion engines, specifically of the Cummins brand, 6BTA series, they allow to detect and measure parameters and trends of the operating state, which allows timely maintenance that avoids unforeseen failures, improving its operational availability. Conventional vibration analysis is not applied, since it is not capable of specifically detecting the failure of equal components that operate at the same frequency. For this reason, it is proposed to use specialized diagnostic equipment that combines Windrock-type vibration and ultrasound measurements to identify components that are individually damaged and operate at the same frequency, establishing amplitude limits of the vibration speed as expressed by the manufacturer Cummins. in their workshop manual and guides to ISO 2372-10816 [7]. In addition, the critical components of the engines analyzed in their operating context and their corresponding predictive parameters and limit ranges according to the manufacturer's manual are defined by means of Pareto analysis, in order to periodically carry out the evolution of the defined predictive parameters.

Also, an economic technical analysis is applied to measure the feasibility when applying the predictive maintenance approach in the management of this type of assets. An annual saving of 8 million pesos per engine is estimated, including losses due to lost profits, which makes the implementation of predictive maintenance in the fleet of ships attractive from a monetary perspective, to improve their availability and profit indicators. Finally, because it is more representative of the annual calculation of costs for the fleet, a cost model is proposed, based on the failure rate of these engines, to quantify the annual savings by reducing the failure rate, which is left as possible. future research, basis of a complementary degree work.

INTRODUCCIÓN

La gestión del mantenimiento de activos productivos, para que entreguen la disponibilidad que la dirección define como mínima, para alcanzar la rentabilidad empresarial, se constituye en un aspecto clave para la competitividad. Para asegurar una alta confiabilidad operacional, factor básico para mantener una disponibilidad por encima del nivel mínimo, se han desarrollado una gran diversidad de tecnologías, enmarcadas en el concepto de mantenimiento predictivo, entre las cuales se tienen: inspecciones visuales, análisis de lubricantes, análisis termográficos, análisis de ultrasonido, análisis de vibraciones, entre otras. [2].

Para una aplicación de la tecnología de análisis de aceites, se ha revisado el trabajo “Análisis de la degradación y vida útil del lubricante motor, en un vehículo modelo actros 3353S mediante ensayos de viscosidad y TBN”. de Henry Guaman y Oswaldo Ávila, de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. expresan que el costo es alto para cada vehículo por cambio de aceite, que quiere reducirse mediante este estudio. Se concluye que la vida útil definida por el estudio es de 12.000 horas valor superior al actual cambio de 9000 horas, representando un ahorro de \$ 2.300 USD al año por vehículo. [3]. Para tener una aplicación exitosa de la tecnología de termografía y análisis de vibraciones se tiene el proyecto “Mantenimiento predictivo de motores Diesel marinos mediante correlación de imágenes termográficas y análisis de vibraciones. Por David González y Jaime Pizarro, de la Universidad Tecnológica de Bolívar. El estudio se aplica a los motores de las fragatas de la Armada Nacional sede Cartagena de Indias. Se basan en el enfoque RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad) y la aplicación de las tecnologías termográficas y de vibraciones. Esto permite medir parámetros operativos como: temperaturas, espectros de vibraciones, ruidos, que se correlacionan con el estado mecánico de componentes básicos del motor, como: cigüeñal, pistones, bielas, cojinetes, cabezas de motor, permitiendo anticiparse a fallas imprevistas y catastróficas, lo que reduce el costo por compra de repuestos en buen estado al momento de la falla, que se destruyen durante estos fallos repentinos y aumentan el daño ocurrido. Además, se permite menor tiempo en taller, lo que aumenta la disponibilidad de la flota a un menor costo operativo. Con base en datos e información de fabricantes, establecen puntos de monitoreo, parámetros a medir y tecnología de medición apropiada. Una referencia a tener en cuenta es la norma ISO 2372-10816 [7] que aplica al estudio de vibraciones.

Para disponer de una metodología de referencia, referente a cómo aplicar el análisis de vibraciones a motores alternativos, aspecto relevante para este trabajo en desarrollo, se estudia el proyecto “Análisis de vibraciones y ultrasonido en

motores MACI (motores alternativos de combustión interna)”. Por Jesús Viñuela. De la Universidad de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, España. Textualmente definen el siguiente procedimiento y expresan:

- Medición normalizada de vibraciones y ultrasonido del motor operando normalmente. Basados en lo anterior se obtienen patrones de referencia.
- Medición normalizada de vibraciones en el mismo motor, al cual se inducen fallas a propósito. Por lo anterior se obtienen patrones según fallas de componentes de interés.
- Realizar un análisis comparativo y establecer los límites aceptables para los parámetros técnicos definidos, como: holgura en anillo de pistón, holgura de casquetes, variación en el encendido, rotura de anillo de pistón, entre otros. Expresan que, al aplicar estas tecnologías, se aprovecha al máximo la vida útil de piezas básicas para la disponibilidad de los motores analizados. Advierten que el huelgo en los casquillos del cigüeñal no fue posible establecer correlaciones válidas y queda como recomendación a mejorar. [4].

En relación con la tecnología de ultrasonido, se revisa el proyecto “La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo, Por Olarte c., William. Universidad de Pereira, año 2011. Textualmente expresan: “Uno de los métodos que utiliza el mantenimiento predictivo para detectar fallas en las plantas de producción, es el ultrasonido, el cual es un método fácil, rápido, económico y eficaz de aplicar en ambientes de mucho ruido. [5]. Se expresa que el ultrasonido sirve para localizar con exactitud aquellos puntos en donde existen problemas incipientes, permitiendo la programación adecuada del mantenimiento de los equipos”. Definen que se pueden detectar problemas con flujo de fluidos gaseoso-líquidos, problemas de ajustes. Pero el principal énfasis es lo rápido y fácil y económico que es aplicar esta tecnología en comparación con otras. Adicionalmente, expresan que esta tecnología permite detectar problemas eléctricos. Esto direcciona el interés de este proyecto, dado que los motores actuales poseen un fuerte componente electrónico que causa fallas inoportunas y difíciles de diagnosticar y resolver, lo que reduce la confiabilidad y disponibilidad de cualquier flota, lo cual será un aspecto para abordar en este proyecto.

Para los intereses del proyecto, se tiene una norma de referencia ISO 2372-10816 [7], que debe complementarse con otras referencias a aplicar a las tecnologías de termografía y ultrasonido. También una táctica para generar patrones, datos y parámetros de referencia, que son valiosas al aplicar estas tecnologías y que se deben complementar en el desarrollo del presente trabajo con una metodología que facilite gestionar el mantenimiento predictivo en la empresa SAAM TOWAGE.

Un aspecto adicional pero notorio en los trabajos realizados, es que se soportan en metodologías de mantenimiento como mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM por sus siglas en inglés y mantenimiento productivo total TPM por sus siglas en inglés, entre otras, para mejorar la gestión de mantenimiento, pero no establecen como referencia lo que define el fabricante del motor, ni presentan su ficha técnica estándar, lo cual debe ser información base de referencia para establecer límites operativos seguros, lo cual será realizado en el desarrollo del presente proyecto, para acoplar con aspectos encontrados en los trabajos revisados, esto para posibilitar desarrollar una metodología que sea sencilla de implementar en relación a los resultados de diagnóstico temprano y su posterior análisis y toma de decisiones, para realizar un enfoque predictivo que sea factible desde la óptica técnico – económica.

Los procesos de mantenimiento van en continuo crecimiento y actualización para mejorar día a día la confiabilidad de equipos durante su función, se revisa el proyecto ubicado en biblioteca scopus “Mantenimiento Industrial Predictivo con Modelo de Sistemas Viables y Mantenimiento 4.0”, Cámara, R.A., Mamede, H.S., Santos, V.D.D. 2019, resaltan los ajustes automáticos para mitigar las fallas de las máquinas a través de análisis predictivos de volúmenes masivos de datos utilizando algoritmos con funciones inteligentes y Minería de Datos (DM) para estabilizar automáticamente toda la cadena del sistema de manera rápida y eficiente. [1]

El mantenimientos basados en condición (CBM), se observa articulo ubicado en biblioteca scopus, lleva por nombre Mantenimiento basado en la condición: una aplicación industrial en máquinas rotativas, Acernese, A., Del Vecchio, C., Tipaldi, M., Battilani, N., Glielmo, L, La principal contribución de este artículo radica en la demostración empírica de los beneficios del CBM y el mantenimiento predictivo en la fabricación, a través de la superación de un problema de producción específico. [2].

El desgaste tiene efectos negativos importantes en el funcionamiento de las piezas del motor, se revisa el proyecto ubicado en biblioteca scopus, lleva por nombre: “Enfoque analítico para la determinación de la tasa de desgaste para el monitoreo de la condición del motor de combustión interna basado en el análisis del aceite” nos indica que los proveedores de lubricantes y los laboratorios de análisis de aceite brindan pautas específicas para las concentraciones de metales de desgaste. Estos límites brindan buenas pautas generales para interpretar los datos del análisis de aceite, pero no tienen en cuenta los factores comunes que influyen en la concentración de residuos de desgaste y contaminantes en una muestra de aceite. Estos factores incluyen el consumo de aceite, las adiciones de aceite nuevo, etc., y características particulares como la edad del motor, el tipo de servicio, las condiciones ambientales, etc. En este documento, se desarrolla un enfoque analítico para permitir una determinación más precisa del desgaste a partir de muestras de aceite del motor. Se tienen

en cuenta los factores anteriores y se desarrolla un programa de mantenimiento mejorado para motores de combustión interna basado en análisis de aceite. [3].

El monitoreo de la tasa de desgaste del motor Diesel, este tipo de herramienta juega un papel muy importante en las Predicciones futuras y ayudara en evitar fallas catastróficas, se revisa articulo relacionado y está ubicado en biblioteca scopus, lleva por nombre “Un modelo y la metodología para determinar la tasa de generación de partículas de desgaste y la eficiencia del filtro en un motor Diesel utilizando ferro grafía” mejorará las predicciones de motores defectuosos y/o sus componentes para permitir el mantenimiento preventivo que prolongará la vida útil del motor. Los resultados de esta investigación indican que las concentraciones de partículas de desgaste en equilibrio aumentan con el aumento de la velocidad y la carga del motor. (del resumen de los autores) Los resultados de esta investigación indican que las concentraciones de partículas de desgaste en equilibrio aumentan con el aumento de la velocidad y la carga del motor. [4]

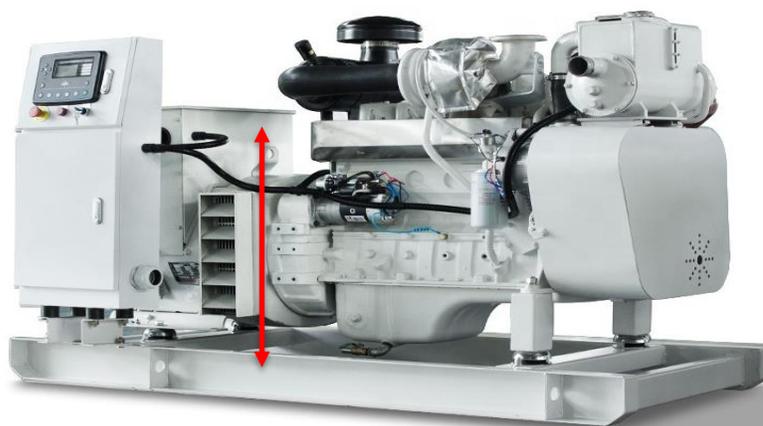
GENERALIDADES DEL PROYECTO

En la empresa de servicios marítimos SAAM TOWAGE se posee una flota de (15) embarcaciones tipo remolcador como la mostrada en la figura 1. Estas unidades participan en la operación de atraque y desatraque de buques de carga general en el puerto de STM. Esta actividad también se desarrolla en varios puerto de Colombia, los remolcadores en su diseño cuentan con amplia maquinaria interna para su desarrollo y dar aporte confiable en las operaciones que presta, donde se destacan un total de (30) generadores distribuidos en las (15) embarcaciones, estos generadores son los encargados de suplir la energía para cada sistema y se pueda efectuar la óptima función, estos equipos de generación son propulsados por motores Diesel, marca Cummins, serie 6BTA de 5,9 litros de cilindrada. La figura 2 muestra este tipo de motor. Este motor posee en su configuración normal una potencia nominal de 132 kW equivalente a 180 hp a 2200 rpm. Propulsan grupos electrógenos en la mayoría de los países, alrededor el mundo[6]. Posee 6 cilindros en línea y es de la serie B de la marca Cummins. Tiene un turbo cargador y una cilindrada de 5,9 litros.

Figura 1. Operaciones de puerto con 3 RM – SAAM TOWAGE. Fuente propia.



Figura 2. Motor Cummins 6 BTA 5,9. fuente [1].



Los problemas graves a nivel técnico van relacionados con el diagnóstico de las fallas que se dan en los componentes vitales del motor que impulsan los generadores, que al materializar la falla, se genera parada técnica no programada del equipo, por ende se genera el tiempo fuera de servicio (TFS) del activo o embarcación, esto ocurre por varios días y los costos de reparación alteran el presupuesto asignado por año, se da lugar al lucro cesante y a la responsabilidad con terceros por servicios dejados de prestar, adicional los costos de mantenimiento y reparación por lo cual se sugiere a la gerencia formular un plan de acción para minimizar las pérdidas monetarias ocasionadas por TFS de las embarcaciones.

Por ejemplo, La figura 3 presenta un cigüeñal deteriorado de uno de estos motores, donde se observa un muñón de biela con desgaste excesivo al tener una superficie con apariencia porosa y rugosa en vez de lisa y brillante, lo cual en operación se nota mediante un ruido anormal. El precio base de un componente cigüeñal es por valor de (5.000.000) COP, más

repuestos e insumos adicionales, llevando a una reparación de motores que ronda el valor de (12.000.000) COP, adicionando a esta cifra lo que se deja ganar por lucro cesante, teniendo en cuenta que este motor estará en reparación por dos semanas aproximadamente.

Los técnicos mecánicos de la empresa SAAM TOWAGE expresan que la causa de falla del cigüeñal se ubica en el sistema de lubricación porque al aumentar el huelgo en los cojinetes de bancada este componente se deforma excesivamente incrementando el efecto de la fatiga. Los colaboradores de las máquinas dicen que eso no puede ser porque se realizan los cambios de aceite según recomendaciones de catálogo del fabricante y se revisa el nivel de aceite diario, esta acción se efectúa antes de iniciar labores. En caso de fugas evidenciadas, se corrigen y en caso de bajo nivel por consumo normal, el nivel faltante de aceite se repone. Además, en operación la presión de aceite se comporta de manera normal, por lo que deducen que el problema no es de lubricación. Esta situación problemática debe resolverse de manera urgente y precisa.

Figura 3. Cigüeñal fracturado. fuente: autor.



Al afectar este problema a (10) motores y tener daños múltiples en otros componentes móviles como: pistones, bielas, tren de válvulas, cojinetes y camisas, este escenario obliga a cambiar la actual estrategia de mantenimiento preventivo, basado en lo que especifica el fabricante. En esta situación es que se plantea el plan de acción para aplicar tecnologías de mantenimiento predictivo, desarrollando una metodología que permita reducir y de ser posible eliminar las causas de fallas que resultan en eventos repentinos y catastróficos, mediante una detección temprana del desarrollo de esas causas de fallas antes de que ocurra la falla imprevista. Surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué aspectos se debe considerar en el enfoque de mantenimiento preventivo aplicado a los motores Cummins 6BTA para minimizar el TFS generado por las fallas catastróficas y consecuentes pérdidas económica? Efectuamos análisis causa efecto

La tabla 1 define un análisis causa – efecto en forma matricial, lo cual se complementa con un árbol de objetivos de la tabla 2, utilizados como medios para clarificar el desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Análisis causa efecto

ANALISIS CAUSA – EFECTO					
EFECTOS	1er. ORDEN	Operación no confiable	Equipo F/S	Imagen negativa de la compañía	afectación e impacto al medio ambiente, (EC)
	2do. ORDEN	No se cumple con la satisfacción del cliente	Altos costos de mantenimiento	Activo no disponible para la operación	Incumplimiento de la norma ambiental de emisiones contaminantes (euro IV)
	IMPACTO	ECONOMICO - SOCIAL	SOCIAL - LABORAL	ECONOMICO - CALIDAD DE SERVICIO	AMBIENTAL
PROBLEMA CENTRAL	Los problemas graves a nivel técnico van relacionado con el diagnósticos de las fallas que se dan en los componentes vitales del motor que propulsan los generadores, que al materializar la falla, se genera parada técnica no programada del equipo, por ende se genera el tiempo fuera de servicio (TFS) del activo o embarcación, esto ocurre por varios días y los costos de reparación alteran el presupuesto asignado por año, se da lugar al lucro cesante y a la responsabilidad con terceros por servicios dejados de prestar, adicional los costos de mantenimiento y reparación por lo cual se sugiere a la gerencia formular un plan de acción para minimizar las pérdidas monetarias ocasionadas por TFS de las embarcaciones				
CAUSA	1er. ORDEN	Desgaste prematuro y falla en componentes por falta de lubricación	Preventivos atrasados, calibraciones y ajustes de soportes de motor.	Temperatura alta en agua de refrigeración, no existe revisión periódica al delta de temperatura	No verificar origen del desgaste por fricción en componentes del sistema
	2do. ORDEN	Componente defectuoso, calidad del material, resultado de muestra de lubricante sin diagnóstico claro por parte de laboratorio	Vibración excesiva del motor, no existe un plan de mantenimiento o predictivo en vibraciones.	Falla en empaques culata e interiores, deterioro de componentes de otros sistemas por exceso de temperatura.	No se efectúa análisis para detección de fallas por ultrasonido, no hay personal no está certificado

Tabla 2. Esquema árbol de objetivos

ESQUEMA ARBOL DE OBJETIVOS				
FINES	Operaciones confiable	Equipo operativo S/N	Imagen positiva de la compañía	Cumplimiento al Mtto del sistema de inyección y calibraciones, emisiones contraladas
	la compañía se encuentra en cumplimiento con satisfacción del cliente	Los costos de mantenimiento van alineados a lo presupuestado	Activo disponible para la operación	Cumplimiento de la norma ambiental - control de emisiones
	Impacto económico positivo en cadena productiva del país, abastecimiento oportuno para la sociedad E-S	Horas moderadas para los colaboradores al momento de realizar el Mantenimiento S-L	Utilidad productiva positiva para la compañía E-C	Contribuir con desarrollo sostenible A
	ECONOMICO - SOCIAL	SOCIAL - LABORAL	ECONOMICO - CALIDAD DE SERVICIO	AMBIENTAL
OBJETIVO CENTRAL	Gestión del mantenimiento predictivo aplicado a motores tipo Diesel Cummins 6BTA 5.9 para mejorar su confiabilidad operacional			
MEDIO	Componentes no presentan desgaste y se evidencia una buena lubricación	Cumplimiento en la ejecución de preventivos, ajuste y calibraciones realizadas	Revisión periódica al delta T	Verificar origen del desgaste por fricción,
	Muestra de lubricante con resultado claro, para intervenir equipo de manera anticipada	Implementar CBM, donde se aplique al equipo análisis de Vibración por periodo de 06 meses	Implementar análisis termo grafico para prevenir daños prematuros en componentes	Se implementar el análisis para detección de fallas por ultrasonido, personal certificado

Esto deriva en los siguientes interrogantes específicos:

¿Qué expresa el fabricante en relación con las características técnicas, mecánicas, electrónicas y de mantenimiento, que sirvan como referencia para sus motores Cummins 6BTA 5,9 litros?

¿Qué actividades de diagnóstico preventivo y de existir predictivos se aplican en el área de mantenimiento de la empresa marítima SAAM TOWAGE para detectar de manera prematura las fallas en componentes vitales?

¿Cómo evaluar las tecnologías predictivas aplicables y establecer parámetros de referencia para seleccionar la combinación más apropiada?

¿Cómo asegurar entender y aplicar la metodología de análisis predictivo propuesto para obtener el control y la mejora de la flota analizada mediante un análisis técnico económico?

1. OBJETIVOS.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Gestionar el mantenimiento predictivo aplicado a motores tipo Diesel Cummins 6BTA 5.9 para mejorar su confiabilidad operacional.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar las actividades y procedimientos actuales de mantenimiento en la empresa SAAM TOWAGE que aplican a los motores Cummins 6BTA 5,9 litros.
2. Determinar las tecnologías de mantenimiento predictivo que pueden aplicarse al análisis de motores Diesel, con las normas que establecen su correcto uso y parámetros de medición para definir la combinación tecnológica a aplicar.
3. Desarrollar una metodología para aplicación del mantenimiento predictivo a los motores Diesel Cummins 6BTA.
4. Realizar una evaluación económica que nos permita demostrar la viabilidad económica financiera de la aplicación del nuevo sistema de mantenimiento predictivo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los beneficios futuros identificables con el desarrollo de este proyecto son:

- A nivel empresarial, se pretende mejorar la gestión de mantenimiento a nivel técnico operativo de tal manera que se pueda controlar la actual situación, ya que se desborda el presupuesto y afecta la competitividad empresarial al reducir la calidad y cantidad de servicio prestados con la flota a sus clientes actuales y potenciales, en razón a equipos fuera de servicio por daños imprevistos. con las mejoras pretendidas se espera brindar una operación con calidad y excelencia.
- A nivel académico, lograr establecer un cuerpo de conocimiento en la aplicación del enfoque tecnológico predictivo, aplicable al mantenimiento de flota de embarcaciones, específicamente en la gestión técnico-económica de los motores, el cual es el componente normalmente más costoso y que afecta negativamente con mayor impacto la disponibilidad y confiabilidad de las embarcaciones.
- A nivel tecnológico, los resultados esperados del proyecto en razón a la metodología propuesta y las mejoras indicadas, puede servir de guía, estímulo y apoyo a cualquier flota de embarcaciones que presenten situaciones similares de baja disponibilidad y altos costos, derivadas de problemas técnicos a resolver mediante tecnologías de mantenimiento predictivo.
- A nivel económico, El nuevo sistema de mantenimiento predictivo minimizará las pérdidas económicas y financieras ocasionadas por la frecuencia de TFS de los remolques que genera lucro cesante, además de los costos y gastos que conllevan estos eventos catastróficos.

2. MARCO TEORICO.

Se consideran conceptos básicos de mantenimiento como: tipos y características de actividades de mantenimiento. También se consideran metodologías actuales de mantenimiento como RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad y TPM (mantenimiento productivo total). Además, se enfatiza el enfoque llamado CMD O confiabilidad – mantenibilidad – disponibilidad, al cual se anexa el enfoque grado de prevención de riesgo (GPR), este compendio genera un resultado positivo para establecer la certeza de función.

Adicionalmente, se tratan las tecnologías utilizadas para realizar el mantenimiento predictivo y el modelo de costos aplicado en el proyecto.

El mantenimiento puede definirse como la gestión del conjunto de actividades técnicas y administrativas, necesarias para lograr el control de los factores de deterioro y fallas derivadas del uso, el paso del tiempo y factores ambientales y operativos, que permitan obtener un óptimo funcionamiento tanto de instalaciones, maquinaria y equipos. Incluyendo los trabajos de reparación y revisión necesarios, para garantizar el funcionamiento normal y

el buen estado de conservación del sistema productivo, al menor costo posible durante el ciclo de vida útil de los activos de producción.

De los equipos industriales, se espera una función productiva y los beneficios derivados, lo que se logra cuando funcionan según el diseño desde fábrica. Por lo tanto, el objetivo es maximizar la disponibilidad del equipo, entendida como el tiempo de operación calendario de este, restándole el tiempo necesario para realizar el plan de mantenimiento que define el fabricante. Sin embargo, el contexto operacional demuestra reiteradamente que aparecen fallas imprevistas a pesar de aplicar al pie de la letra el plan preventivo propuesto por el fabricante. [8].

2.1. Actividades de mantenimiento.

2.1.1. Actividades correctivas

Estas actividades implican realizar reparaciones por fallas ocurridas de modo imprevisto, donde la detección, evaluación y recambio de partes mecánicas, eléctricas y electrónicas juegan un papel vital en la demora para recuperar un equipo fuera de servicio. El correspondiente mantenimiento se lleva a cabo con el fin de corregir (reparar) una falla en el equipo. Por esto se actúa ante un hecho cierto de falla. El Mantenimiento Correctivo se clasifica en:

a.) No Planificado o correctivo de emergencia. Ocurre por una falla imprevista que debe repararse lo más pronto posible u ocurre una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc.). Este sistema resulta aplicable típicamente en componentes eléctricos, electrónicos o mecánicos en los que es imposible predecir las fallas y en los procesos que admiten ser interrumpidos en cualquier momento.

b.) Planificado: Se define a priori qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se detiene el equipo para efectuar la reparación, se ha definido el personal, repuestos y recursos técnicos necesarios para realizar la reparación correctamente sin interferir con las tareas productivas. Se hace necesario tener una infraestructura definida en un programa de mantenimiento preventivo, que buscan minimizar los mantenimientos no planeados, así como las emergencias. permite programar la detención del equipo, donde se acumulan tareas a realizar sobre el mismo y programar su ejecución en dicha oportunidad, aprovechando para ejecutar toda tarea de mantenimiento que no se puedan hacer con el equipo en funcionamiento.

2.1.2. Actividades preventivas:

Son actividades consideradas planeadas, realizadas con el propósito de asegurar una mayor disponibilidad respecto al enfoque de mantenimiento correctivo. Lo que se trata de lograr al anticipar la ocurrencia de fallas, controlando las posibles causas de estas. En este caso, las actividades están controladas por el tiempo o frecuencia y se conocen como plan de mantenimiento preventivo. este se basa en realizar actividades básicas, como: limpieza, lubricación, recambios programados. En este tipo de mantenimiento, se encuentran la Inspección, Cambio o reposición de aceite, y re-engrase de rodamientos, ajustes periódicos, cambio de partes deterioradas, entre otros.

El Mantenimiento Preventivo Directo, asume que los equipos e instalaciones siguen cierta clase de comportamiento estadístico. En caso de ocurrir este comportamiento el éxito de un mantenimiento preventivo es alto, de lo contrario se presenta una alta incidencia de fallas imprevistas.

Adicional a actividades correctivas y preventivas, se definen actividades de mantenimiento complementarias como: rediseño, tareas de búsqueda de fallas ocultas, entre otras.

La figura 4 presenta la relación ideal entre un mantenimiento preventivo y uno correctivo para el factor humano. Un enfoque complementario define dos grupos de actividades de mantenimiento, estas son: actividades reactivas y proactivas. las reactivas aparecen cuando ocurre la falla. las proactivas se planifican y aplican de manera programada para controlar las causas de fallas y así evitar que se presenten fallas imprevistas. El accionar del mantenimiento es una mezcla de este tipo de actividades en alguna medida porcentual entre las mismas como

Figura 4. Distribución ideal de recurso humano. [14].



La posible desventaja de realizar actividades preventivas programadas es que estas pueden ser de intervalos de tiempo muy cortos o largos para las causas de fallas que pretenden controlar.

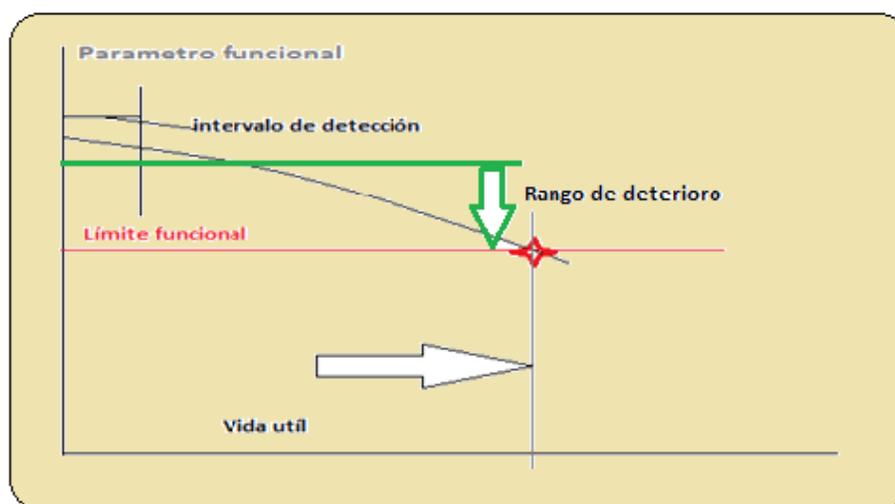
2.1.3. Actividades predictivas.

Estas actividades o tareas de mantenimiento se caracterizan porque al aplicarlas permiten detectar de manera temprana el inicio de procesos de deterioro. Esto permite que las actividades de mantenimiento para controlar las fallas se programan cuando se detecta el acercamiento a un límite cercano a la falla.

la figura 5 presenta el criterio para medir y controlar parámetros de funcionamiento de un equipo. Se considera deterioro de un parámetro de referencia su cambio en el tiempo respecto a su valor de nuevo o luego de una reparación correcta. Este cambio en el parámetro tomado como relevante se considera que no afecta sustancialmente el desempeño del equipo, mientras que no se llegue al límite funcional. La tecnología de diagnóstico que se utilice debe permitir medir el parámetro y su cambio en el tiempo a través del tiempo de uso del equipo.

El límite funcional es un valor o rango dado por el fabricante, con datos en la respectiva ficha técnica, donde se considera aceptable el desempeño de un parámetro. Se considera deterioro al desvío de una característica funcional desde su referencia de fábrica, pero que no llega a afectar en mayor medida el servicio del equipo. Superado el límite funcional se asume ocurre la falla, considerada esta como un estado al que llega el equipo, dónde se pierde parcial o totalmente su funcionalidad.

Figura 5. Criterio base del mantenimiento predictivo.



El mantenimiento Predictivo pretende detectar las fallas antes de que se desarrollen en una pérdida parcial o total de la función u otras interferencias en producción. El Mantenimiento Predictivo verifica muy de cerca la operación de cada máquina operando en su entorno real,

aplicando diversas herramientas tecnológicas disponibles. Sus beneficios son difíciles de cuantificar ya que no se dispone de métodos tipo para el cálculo de los beneficios o del valor derivado de su aplicación. Por ello, muchas empresas usan sistemas informales basados en los costos evitados, indicándose que, por cada dólar gastado en su empleo, se economizan 10 dólares en costos de mantenimiento.[16].

El Mantenimiento Preventivo se conecta con el Mantenimiento Predictivo, permitiendo decidir cuándo hacer el Preventivo. En algunos casos, arrojan indicios evidentes de una futura falla, indicios que pueden detectarse. En otros casos, es posible advertir la tendencia a entrar en falla, mediante el monitoreo de condición, es decir, mediante la elección, medición y seguimiento, de algunos parámetros relevantes, que representan el funcionamiento del equipo en análisis. Actualmente existen aparatos de medición sumamente precisos, que permiten analizar ruidos y vibraciones, aceites aislantes o espesores de chapa, mediante las aplicaciones de la electrónica en equipos de ultrasonidos, cromatografía líquida y gaseosa, y otros métodos tecnológicos.

Algunos beneficios esperados con implementar un mantenimiento predictivo son

- Cuando la máquina se somete a una parada técnica de servicio, las partes necesarias para su reparación estarán listas, el personal necesario estará listo, por lo cual la reparación se ejecutará más rápidamente, logrando retornar a la mayor brevedad el equipo a la línea de producción.
- Se logra aprovechar al máximo la vida Útil de los equipos y sus componentes. Los equipos son costosos y a menudo imposible de reemplazar en un corto periodo de tiempo, por ello, mantener el equipo existente en operación, el mayor tiempo posible, permite obtener ahorros sustanciales.
- Midiendo parámetros relevantes como la vibración, presión, temperatura, flujo y otros y manteniendo la máquina mecánicamente sana, se extiende su vida útil, previniendo y controlando la ocurrencia de las fallas catastróficas. Por monitoreo continuo de la máquina podemos normalmente detectar un problema mayor, permitiendo pararla antes de que se autodestruya.
- Se logran importantes ahorros monetarios: Al anticiparse a fallas imprevistas se reduce el costo del ciclo de vida de la máquina, reduciendo o eliminando posibles lesiones en personal, destrucción del equipo y pérdidas de producción. Una máquina con problemas mecánicos cuesta más operarla que una máquina sana, ya que se necesita más energía para moverla. Un compresor, una bomba, un equipo rotatorio que se encuentren desbalanceados, consumen más energía, porque se requiere suministrar más fuerza a sus motores para mantener la carga, incluyendo la energía de la vibración. La energía suministrada, bien puede ser en forma de electricidad, vapor, combustible, etc.

Una posible desventaja del mantenimiento preventivo es que el trabajo en realidad puede aumentar debido a una evaluación incorrecta del deterioro de las máquinas. Para rastrear las tendencias poco saludables en vibración, temperatura, lubricación u otras, se requiere que la instalación adquiera equipo especializado para monitorear estos parámetros y brindar capacitación al personal (o contratar personal calificado). La alternativa es subcontratar esta tarea a un contratista experto para realizar los deberes de monitoreo de las máquinas.

2.1.4. Tecnologías para aplicar el mantenimiento predictivo.

Las actividades de mantenimiento predictivo son de diversos niveles de complejidad. También pueden realizarse de manera continua cuando el equipo funciona o de modo periódico según se defina conveniente. El aspecto distintivo de estas tareas son su capacidad de medir el deterioro antes que el componente llegue al límite de este y aparezca la falla. Esto permite anticiparse a la ocurrencia de las fallas, posibilitando realizar tareas planificadas para corregir antes de que se presente la falla imprevista.

Una posible clasificación de las tareas predictivas para aplicar a motores de combustión es:

- Inspecciones visuales de grietas, aflojamientos, estado de superficies.
- Medición de temperaturas.
- Medición de presiones.
- Medición de flujos.
- Medición de desgaste
- Medición de vibraciones, desplazamientos, velocidades, aceleraciones.
- Medición de consumo de combustible.
- Mediciones eléctricas y electrónicas.
- Medición de holguras.
- Análisis de aceite.
- Análisis de combustible.

Los posibles análisis de parámetros de desempeño en los motores Diesel, son:

- ✓ Análisis de vibraciones.
- ✓ Análisis de aceites.
- ✓ Análisis de ultrasonido
- ✓ Análisis termográfico.
- ✓ Análisis de presiones.
- ✓ Análisis ópticos

Algunos detalles de las actividades predictivas y su correspondiente análisis son:

➤ **Inspecciones y análisis visuales.**

La técnica de inspección visual puede realizarse directamente con el ojo humano y, además, auxiliarse de iluminación y/o intensificadores de imagen para iluminar el interior del motor y de fibras ópticas tipo manguera flexible o endoscopios para llegar a sitios inaccesibles. Durante las revisiones periódicas, se puede examinar el estado superficial y geométrico de piezas como: de las válvulas, pistones, camisas, entre otros, así como evidencias de contaminación. La inspección puede utilizar una videocámara; de esta manera, los resultados pueden almacenarse con facilidad en un computador, para evaluar la evolución de los componentes observados. El análisis visual permite observar distorsiones en válvulas, pistones, incrustaciones en la cámara de combustión, inyectores, rajaduras, aflojamiento, huelgos, rajaduras en la culata, entre otros, que facilitan analizar y predecir la vida residual de componentes agrietados antes que lleguen al estado de falla.

- **Medición y análisis de temperaturas.** En motores Diesel como máquinas térmicas, el parámetro de temperatura es representativo de su condición operativa y del estado técnico. En estos motores, es típica la medición de la temperatura del agua del sistema de enfriamiento. La figura 6 presenta el medidor típico de temperatura de tipo análogo.

Figura 6. Medidor de temperatura típico.



Dependiendo de la temperatura ambiente, el valor de la temperatura del agua de refrigeración del motor normalmente está entre 85 y 90 °C. Por encima de 100 °C el motor se sobrecalienta, lo que puede causar daños severos.

También existen los termómetros ópticos que no necesitan del contacto superficial para medir la temperatura. Otra técnica es la cámara termográfica. La figura 7 presenta su aplicación. Se observan diferentes colores que identifican el perfil de temperatura de las piezas del motor. En el análisis de temperatura pueden identificarse piezas o zonas con valores inusuales que indican posibles problemas y su localización. Las mediciones continuas o periódicas y los cambios detectados en las temperaturas permiten analizar y predecir el grado de deterioro del sistema de enfriamiento y eléctrico en puntos de contacto

con alta resistencia eléctrica y en componentes electrónicos sucios o con problemas de enfriamiento.

Figura 7. Vista de cámara termográfica analizando un motor de combustión.[16].



➤ Medición y análisis de presiones

Esta variable puede revelar múltiples problemas en un motor. Existen los llamados vacuómetros para medir presiones menores a la atmosférica y manómetros que mide presiones por encima de la atmosférica. La presión interna de los cilindros es un buen parámetro para indicar el estado de las válvulas, asientos, resortes de válvulas, pistones, camisas, anillos. Para el motor Cummins analizando los valores de referencia desde fabricante son presión interna mínima en cilindros de 200 psi. Si se tienen valores menores, ingresar una cucharada de aceite en el cilindro con baja presión, si la presión sube en esta prueba, es indicación de anillos desgastados, camisas desgastadas o excesivo huelgo pistón – camisa. Estos parámetros pueden medirse de manera continua o periódica. La figura 8 presenta una medición de la compresión de cilindros. Esta prueba es esporádica, pero puede revelar la condición interna de piezas vitales como: anillos, pistones, camisas, válvulas y asientos.

Figura 8. Medición de presiones de compresión de cilindros.



➤ Medición y análisis de flujos

Los flujos de aire y combustible son parámetros claves para determinar el correcto funcionamiento del motor. Para el caso de flujo de aire, el sistema de admisión en motores Diesel posee un filtro de aire que al capturar partículas se satura y reduce el flujo de aire, esto implica para sistemas que no posee control electrónico de la relación aire – combustible que se aumenta el consumo de combustible porque la mezcla llega a ser rica. Esto se observa en los humos del escape donde poseen un color negrozco en ciertos regímenes de operación. La figura 9 presenta el medidor de estado de flujo para el aire de admisión.

Mide presiones en pulgadas de mercurio y posee una anda de color verde que indica condición normal del filtro de aire. Otra amarilla y otra roja. cuando aparece la amarilla advierte la necesidad de realizar limpieza o recambio.

Figura 9. Medidor estado del filtro de aire.

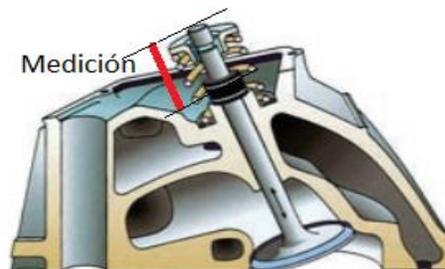


➤ Medición y análisis de desgaste

El desgaste es un claro indicador de deterioro. Esto es relevante para el caso de desgaste de las válvulas de admisión y de escape. La medición periódica de la figura 10 puede medir la evolución del desgaste y predecir cuándo reparar la culata.

Para esta medición no debe desmontarse el tren de válvulas. A medida que ocurre el desgaste esta medida aumenta. Su valor límite para cada válvula es de 82 mm.

Figura 10. Medición del desgaste de válvulas.



➤ Medición y análisis de consumo de combustible

La tecnología ha evolucionado de tal manera que utilizando el computador de a bordo que gestiona el consumo de combustible puede medirse su valor de manera continua y entregar el rendimiento en km / litro u otra unidad dimensional conveniente. Por esto, se puede aprovechar el dato del fabricante del motor en relación con el consumo específico de combustible para entregar la potencia nominal máxima, el cual se convierte en el referente de este importante parámetro. Como es un componente clave de la combustión se tiene en cuenta que en los motores Diesel se diseñan con exceso de aire y se controla el deterioro con medidores de presión en la tubería de admisión como se muestra en la figura 9.

➤ Medición y Análisis de vibraciones

la vibración se entiende como un movimiento repetitivo, simétrico y continuo en el tiempo de una variable física a partir de una posición de equilibrio. Se modela matemáticamente con funciones seno o coseno. Las variables representativas son: desplazamiento, velocidad y aceleración, las cuales se relacionan entre si mediante el concepto matemático de derivación o integración. La figura 11 presenta el concepto para un movimiento en el tiempo. Aspectos como amplitud, frecuencia, fase, entre otros aplica en común a estas variables. La amplitud es el valor máximo de la onda respecto al eje de simetría el tiempo.

Figura 11. Onda de vibración.[16].



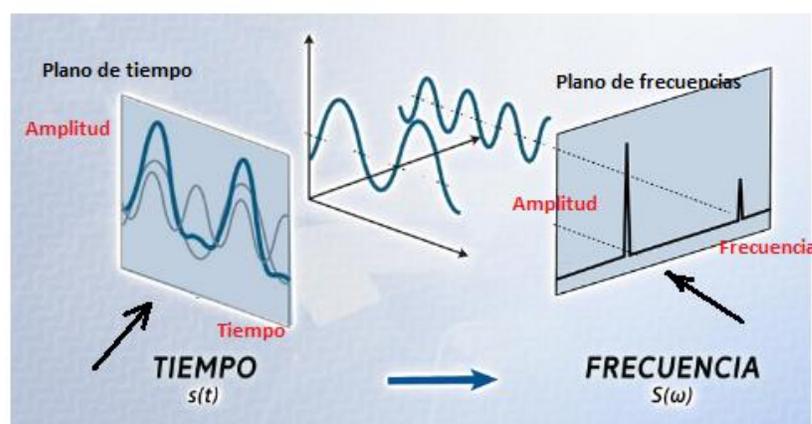
Para el caso de movimientos que son múltiplos enteros pares y/o impares de la frecuencia de una onda base aparece el concepto de armónicos mostrado en la figura 12.

Figura 12. Armónicos de una onda base. .[16].



Para el caso de la tecnología de vibración, se aplica el concepto de transformada de Fourier, esto implica ver el comportamiento del movimiento en el plano del tiempo en coordenadas amplitud – tiempo, convertido al plano de frecuencias en coordenadas amplitud- frecuencia. El concepto es mostrado en la figura 13. Lo importante de todo esto, es que cada pieza durante la operación de la máquina genera frecuencias propias o características de su geometría particular y por lo tanto se convierten en una huella que puede identificar la incidencia de cada pieza en el estado de la máquina, mediante observar el valor de su amplitud y compararlo con algún límite o referencia definida por ejemplo por una norma.

Figura 13. Concepto de observación en frecuencia para vibración. .[16].



Algunas normas de referencia para definir límites de la amplitud de vibración son: ISO 2372, API 610, entre otras.

2.1.5. Norma ISO 2372

La norma más utilizada como indicador de la gravedad de las vibraciones es la ISO 2372 (BS 4675). El estándar se puede utilizar para determinar los niveles de vibración aceptables para varias clases de maquinaria. Por lo tanto, para utilizar esta norma ISO, primero es necesario clasificar las máquinas de interés. Al leer el gráfico, el estándar utiliza el parámetro de velocidad-rms para indicar la gravedad de la amplitud de vibración medida. Las letras A, B, C y D, como se ve en la tabla 3 -4 clasifican la severidad de la amplitud de vibración. [7].

El parámetro relevante es la velocidad, medida en in/s o mm/s. Esto porque la frecuencia apropiada para este parámetro se ubica en el rango 600 a 15000 rpm y el motor analizado opera a 1800 rpm al propulsar el generador eléctrico.

Tabla 3. Límites de severidad de vibración según norma ISO 2372. [7].

Tabla de Severidad, ISO 2372						
RANGO DE VIBRACIÓN			CLASES DE MÁQUINAS			
VELOCIDAD RMS (mm/s)	VELOCIDAD 0-P (mm/s)	VELOCIDAD 0-P (pul/s)	Máquinas Pequeñas	Máquinas Medianas	Máquinas Grandes	
			CLASE I	CLASE II	Soporte rígido CLASE III	soporte flexible CLASE IV
0.28	0.396	0.016	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO
0.45	0.636	0.025				
0.71	1.004	0.040				
1.12	1.584	0.062				
1.80	2.546	0.100	ACEPTABLE	ACEPTABLE	ACEPTABLE	ACEPTABLE
2.80	3.960	0.156				
4.50	6.364	0.251	INSATISFACTORIO	INSATISFACTORIO	INSATISFACTORIO	INSATISFACTORIO
7.10	10.041	0.395				
11.20	15.839	0.624				
18.00	25.456	1.002	INACEPTABLE	INACEPTABLE	INACEPTABLE	INACEPTABLE
28.00	39.598	1.559				
45.00	63.640	2.505				
71.00	100.409	3.953				

Tabla 4. Límites permisibles o umbrales de alarma,

Speed [rpm]	Vel RMS 1X [mm/s]	Vel RMS 2Y [mm/s]	Vel RMS 3Z [mm/s]
650	1,88	1,04	1,79
973	2,30	2,12	2,02
1136	3,76	2,31	5,98
1232	5,73	2,73	7,74
1301	6,50	2,70	8,51

Speed [rpm]	Acc RMS 1X [g]	Acc RMS 2Y [g]	Acc RMS 3Z [g]
650	0,84	0,13	0,44
973	1,06	0,18	0,64
1136	1,24	0,27	0,94
1232	1,49	0,28	1,19
1301	1,55	0,27	1,41

DIN ISO 20283/4 vibration velocity (RMS) [mm/s]	A	B	C
Zone	≤4,5	≤11,2	>11,2

Las mediciones de amplitud de vibraciones se realizan con equipo especializado manejado por personal certificado. Con esta tecnología pueden identificarse múltiples causas de estas, Algunas son:

- Desbalanceo
- Ejes doblados
- Excentricidades
- Desalineamientos
- Aflojamientos
- Defectos en correas y poleas.
- Defectos en engranajes
- Defectos en rodamientos y cojinetes
- Fallas en equipo eléctrico (motores, generadores)
- Ejes agrietados

Para resolver las causas anotadas, se tienen algunas opciones para su solución, son.

- Balanceo
- Alineamiento
- Amortiguación

➤ **Medición y Análisis de aceite.**

En el caso de los motores Diesel, el aceite del sistema de lubricación recoge todas las partículas derivadas del desgaste de las diversas piezas en movimiento como: pistones, camisas, cojinetes, árbol de levas, seguidores de leva, entre otros. Además, también puede contener la contaminación de fluidos como el agua del sistema de enfriamiento y el combustible.

La tecnología para realizar el análisis de aceite puede identificar y cuantificar todos los elementos de contaminación y desgaste que están presentes en los motores Diesel. La tabla 5 presenta elementos de desgaste que contaminan el aceite y las posibles piezas del motor que contienen estos metales.

La tabla 6 - 7 muestra los valores límites de diversos elementos de desgaste y contaminación que se encuentran en los análisis de aceite para motores Diesel. Se observan valores de referencia para motores de la marca Cummins.

Los procedimientos de tomas de muestra de aceite, definiendo puntos y momentos, están definidos por norma y se asume se realizan correctamente para evitar errores en el proceso de análisis de aceite.

Estos análisis se realizan en cada cambio de aceite y se registra su evolución en el tiempo para definir las acciones y decisiones de mantenimiento.

Tabla 5. Elementos metálicos de desgaste – Límites por marca de motor [16].

MATERIAL	CATERPILLAR	CUMMINS	DETROIT
Hierro	100 ppm	84 ppm	150 ppm
Cobre	45 ppm	20 ppm	90 ppm
Plomo	100 ppm	100 ppm	No específica
Aluminio	15 ppm	15 ppm	No específica
Cromo	15 ppm	15 ppm	No específica
Estaño	20 ppm	20 ppm	No específica
Sodio	40 ppm	20 ppm	50 ppm
Boro	20 ppm	25 ppm	20 ppm
Silicio	10 ppm	15 ppm	No específica
Viscosidad	+20% a -10%	± 1 grado SAE o 4 cSt del nuevo a 100° C	+40% a -15%
Agua	0.25% max.	0.20% max.	0.30% max.
TBN	1.0 KOH/g min.	2.0 KOH/g min. 50% del original o igual al TAN	1.0 KOH/g min.
Combustible	5% max.	5% max.	2.5% max.
Glicol	0.1% max.	0.1% max.	0.1% max.

Tabla 6. Parámetros evaluados en análisis de aceite y sus límites. [15].

MATERIAL	NORMAL	ANORMAL	CRITICO
Fe Hierro (Iron)	<100 ppm	100 a 200 ppm	>200 ppm
Pb Plomo (Lead)	<30 ppm	30 a 75 ppm	>75 ppm
Cu Cobre (Copper)	<30 ppm	30 a 75 ppm	>75 ppm
CR Cromo (Chromium)	<10 ppm	10 a 25 ppm	>25 ppm
Al Aluminio (Aluminum)	<20 ppm	20 a 30 ppm	>30 ppm
Ni Níquel (Nickel)	<10 ppm	10 a 20 ppm	>20 ppm
Ag Plata (Silver)	<3 ppm	3 a 15 ppm	>15 ppm
Sn Estaño (Tin)	<20 ppm	20 a 30 ppm	>30 ppm
Na Sodio (Sodium)	<50 ppm	50 a 200 ppm	>200 ppm
Si Silicio (Silicon)	<20 ppm	20 a 50 ppm	>50 ppm
Dilución por combustible (Fuel)	<2%	2 a 6%	>6%
Hollín (Soot)	<2%	2 a 6%	>6%

Tabla 7. Parámetros evaluados en análisis de aceite y recomendaciones. [15].

MATERIAL	NORMAL	RECOMENDACION
Fe Hierro (Iron)	5 a 50 ppm	Niveles encima de 15 ppm indican mayor desgaste que lo posible
Pb Plomo (Lead)	2 a 10 ppm	Más de 10 ppm indica un motor parado mucho tiempo, contaminación, aceite muy delgado o aceite muy viscoso.
Cu Cobre (Copper)	2 a 5 ppm	Motores con enfriadores de aceite pueden tener más sin preocuparse.
CR Cromo (Chromium)	1 a 8 ppm	Alto desgaste de Cromo frecuentemente viene de alto hollín o tierra lijando los anillos y el árbol de levas.
Al Aluminio (Aluminum)	2 a 15 ppm	Normalmente será 30% del valor de silicio. El valor sobre eso es preocupante.
Ni Níquel (Nickel)	1 a 2 ppm	Alto desgaste de níquel normalmente indica alta contaminación por hollín y tierra.
Ag Plata (Silver)	0	Son pocos los motores con cojinetes de plata
Sn Estaño (Tin)	1 a 2 ppm	Operación del motor a bajas revoluciones con alta carga causa la degradación de los cojinetes.
Na Sodio (Sodium)	0 a 10 ppm	Alto sodio indica una entrada de agua del radiador, a no ser que se opere cerca del mar o un salar. Sodio es muy corrosivo.
Si Silicio (Silicon)	5 a 10 ppm	Motores nuevos o rectificados pueden tener un cambio o dos con niveles mayores. Después de ello, todo es tierra entrando para lijar las piezas. El Silicio es el enemigo N° 1 para el motor.
Dilución por combustible	0 a 2%	Cuando se toma la muestra caliente como debería ser, todo el combustible debería evaporarse. El Combustible diluye el aceite y "come" los cojinetes.
Hollín (Soot)	0 a 2%	Niveles sobre esto son anti-económicos por el alto consumo de combustible y poco aprovechamiento para la conversión del mismo a potencia. El Hollín es el enemigo N° 2 para el motor.

- **Medición y Análisis de ultrasonido:** El sonido es una oscilación microscópica en el nivel molecular de una sustancia. La vibración es una oscilación macroscópica de estructuras – en otras palabras, estructuras físicas que se mueven. El ultrasonido se define como ondas sonoras que tienen niveles de frecuencia superiores a 20 kHz, valores más alto que el rango del oído humano.

La mayoría de las máquinas emiten patrones de sonido constantes en condiciones normales de funcionamiento. Estos patrones de sonido o firmas sónicas se pueden definir y ser reconocidos. Por lo tanto, los cambios en estas firmas pueden ser vistos como cambios en los componentes cuando comienzan a desgastarse o deteriorarse. En cierto sentido, el sonido es una forma de vibraciones mecánicas.

Las propiedades del ultrasonido se aprovechan para convertirlo en una técnica útil.

en el suministro de información temprana en casos de:

- Detección de fugas en sistemas de presión y vacío (por ejemplo, calderas, intercambiadores, condensadores, enfriadores, columnas de destilación, hornos de vacío, sistemas de gases especiales)
- Inspección de los cojinetes
- Inspección de trampas de vapor
- Válvula de escape
- Integridad de sellos y juntas en tanques, sistemas de tuberías y grandes cajas de paso
- Cavitaciones de bomba
- Detección de corona en interruptores
- Análisis de válvulas de compresores
- Otros

La tabla 8 es un condensado de las tecnologías predictivas descritas y su capacidad de diagnóstico. Se tiene en cuenta la capacidad de detectar diversos aspectos físicos propios de un motor de combustión interna funcionando.

Se observa que ninguna tecnología posee la capacidad de medir todos los aspectos físicos implicados en evaluar de manera predictiva un motor de combustión interna. Por lo tanto, se requiere combinar estas tecnologías del modo más económico posible, permitiendo diagnosticar el real estado del motor para detectar de manera anticipada los posibles patrones de falla, adicional se hace necesario observar los comportamientos de función y capturar cada variable en tiempo real, esta acción nos ayudara en la trazabilidad del proceso de mantenimiento y en lo posible evitar fallas cíclicas o secuencias de fallas, las cuales afectan a gran escala nuestra actividad económica.

Tabla 8. Tecnologías predictivas aplicables a motores de combustión.

TECNOLOGIA	DETECTAR MOVIENTOS PEQUEÑOS	DETECTAR SONIDO ANORMAL	DETECTAR CONTAMINANTES	DETECTAR FUGAS	DETECTAR FISURAS	DETECTAR TEMPERATURAS	DETECTAR PRESIONES
INSPECCION VISUAL	●	●		●	●		
TERMOGRAFIA						●	
PRESIONES							●
ANALISIS DE VIBRACION	●	●			●		
ANALISIS DE LUBRICANTE			●				
ANALISIS DE FLUJO				●			
ANALISIS DE DESGASTE	●	●		●	●		
ULTRASONIDO	●	●		●	●		

2.2. Metodologías para elaborar un plan de mantenimiento.

La empresa SAAM TOWAGE aplica el plan de mantenimiento preventivo que establece el fabricante Cummins para sus plantas de generación eléctrica. Este plan contiene actividades de lubricación, limpiezas, revisión de parámetros de temperaturas, presiones, voltajes, amperajes, entre otros. Sin embargo, se presentan fallas imprevistas las cuales han aumentado en número para el año 2021, que denotan la necesidad de ajustar las actividades planeadas en mantenimiento según define el fabricante. Teniendo en cuenta lo que el manual de operación y mantenimiento preventivo expresa “Este plan de mantenimiento podrá ser ajustado por el usuario según el contexto operacional específico si esto es necesario”, lo cual se interpreta que, según un contexto operacional, de presentarse fallas no previstas, el usuario puede agregar o ajustar actividades definidas desde el plan preventivo entregado por el fabricante. En esta situación, es donde se requiere alguna guía metodológica que ayude a ajustar de modo particular el plan original de mantenimiento desde el fabricante.

Las metodologías guía tomadas de referencia son: el enfoque TPM o mantenimiento productivo total y RCM o mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Estas metodologías definen planes de mantenimiento, que aplican actividades correctivas, preventivas, predictivas, de rediseño, entre otras. Algunas actividades de planes previos de mantenimiento preventivo pueden seguirse aplicando sea sin modificaciones o ajustando frecuencias, procedimientos u otros aspectos que se consideren necesarios.

2.2.1. TPM.

Esta metodología basa su enfoque en semejar un equipo a una persona, luego la premisa es la siguiente “Para que una persona tenga una vida productiva larga lo que implica tener pocas enfermedades en su vida útil, solo necesita realizar actividades básicas como: dormir, comer, asearse y visitar periódicamente al médico para prevenir avance de posibles enfermedades ocultas o en incubación. De modo análogo, un equipo puede tener una vida útil productiva larga si se aplican actividades básicas como: limpieza, lubricaciones, ajustes, cambio preventivo de partes deterioradas, entre otros. Lo notable, es que estas actividades en su mayoría son relativamente rápidas de realizar y poco costosas en comparación con reparaciones complejas. Los cambios de piezas y ajustes se soportan en los manuales de servicio del fabricante para el respectivo equipo.

Esta metodología para lograr mejorar la productividad identifica las llamadas 6 grandes pérdidas para eliminarlas. Estas son.

- Fallas en el equipo.
- Operación a carga parcial y paradas menores.
- Configuración y ajustes.
- velocidad menor a la nominal.
- Defectos de proceso.
- Rendimiento reducido.

Esta metodología se acopla de forma natural al actual plan de mantenimiento preventivo que se aplique en cada caso. el procedimiento TPM a seguir para eliminar las fallas en el equipo, consiste en identificar las actividades del plan preventivo del fabricante y relacionarlo con las potenciales causas de fallas en el equipo que el mismo pretende controlar. De manera paralela, se definen las fallas imprevistas y como estas se relacionan con las actividades preventivas del fabricante y que ajustes se requieren en esas actividades o su frecuencia. De otro lado, si no existen actividades de mantenimiento en el actual plan de mantenimiento preventivo para controlar las fallas imprevistas, estas deben definirse, incluyendo como realizarlas, los medios que se deben aplicar, frecuencias y recursos necesarios. Aquí, se tiene un gran aporte del enfoque de mantenimiento predictivo al permitir hacer un seguimiento de parámetros relacionados con las causas de esas fallas imprevistas, permitiendo planificar acciones preventivas programadas de manera oportuna, evitando que lleguen a ocurrir las fallas catastróficas imprevistas y también sus negativas consecuencias en seguridad, calidad, producción y efecto medio ambiental.

Los otros 5 tipos de grandes pérdidas se controlan con medidas organizativas y posible rediseño. En algunos casos incluso se considera el remplazo si económicamente es lo más conveniente.

Para finalizar se dejarán plasmadas en el documento los indicadores con los cuales se podrá medir de manera cualitativa las mejoras en la efectividad total del equipo mediante el indicador de efectividad global de equipos OEE (Overall Equipment Effectiveness), por sus siglas en inglés. el cual permite medir la disponibilidad, calidad y productividad de los activos empresariales en un indicador de gestión.

Sin embargo, así como una persona puede desarrollar una enfermedad que requiere especialistas para resolver, de modo análogo un equipo puede llegar a desarrollar una falla difícil de resolver, requiriendo técnicos especialistas incluso desde el fabricante para superarla. En este contexto es que se define oportuna y se aplica la metodología RCM

2.2.2. RCM.

La metodología RCM basa su enfoque en guiar al personal de mantenimiento a conocer de manera profunda los aspectos técnicos de sus equipos especialmente de gran complejidad tecnológica, mediante aplicar el enfoque funcional en el contexto operacional, lo que convierte al grupo de mantenimiento en especialista técnico en el manejo del equipamiento que se tiene a mano.

El propósito de la norma SAE JA1011, publicada en 1999, es establecer los criterios que cualquier proceso debe cumplir para ser llamado “RCM”. El documento de doce páginas, revisado en agosto de 2009, describe los requerimientos mínimos para que un proceso se considere un método en conformidad con RCM. La norma proporciona los criterios para establecer si un proceso dado sigue los credos de RCM como se propuso originalmente. También puede servir como una guía para las organizaciones que buscan capacitación, facilitación y consultoría de RCM.

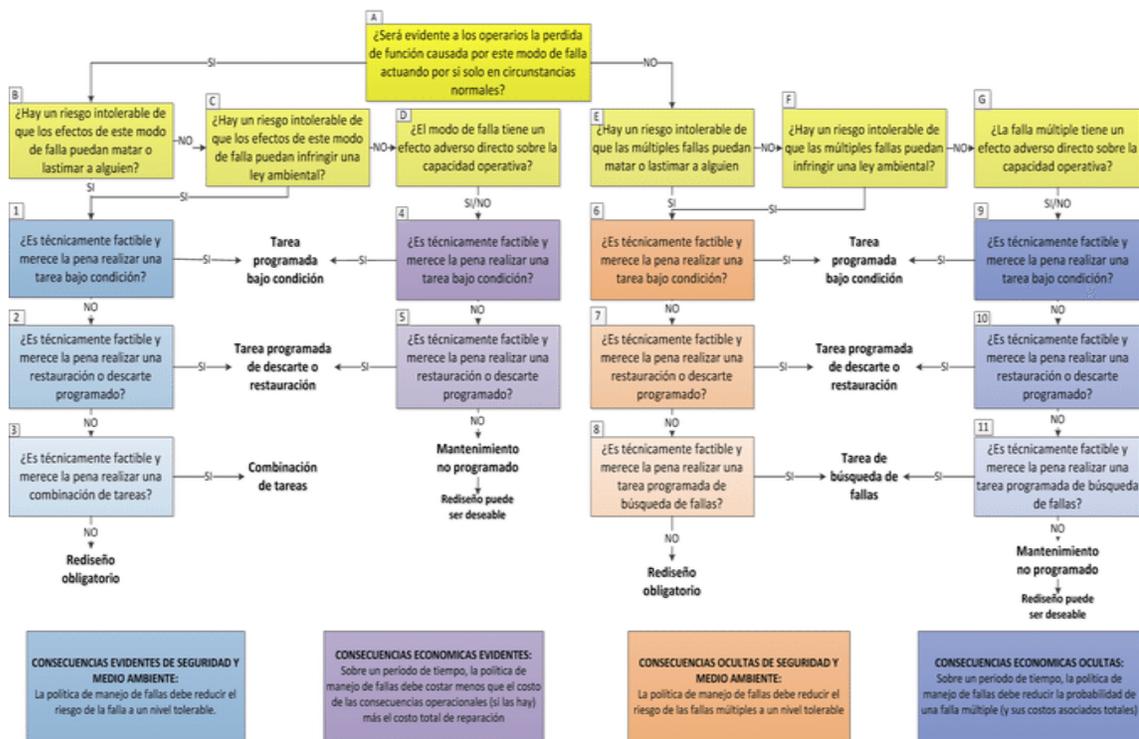
La norma SAE JA1011, de AGO 2009, establece que para que un proceso sea reconocido como RCM debe seguir los siete pasos en el orden que se muestra a continuación:

1. Delimitar el contexto operativo, las funciones y los estándares de desempeño deseados asociados al activo (contexto operacional y funciones).
2. Determinar cómo un activo puede fallar en el cumplimiento de sus funciones (fallas funcionales).
3. Definir las causas de cada falla funcional (modos de falla).
4. Describir qué sucede cuando ocurre cada falla (efectos de falla).
5. Clasificar los efectos de las fallas (consecuencias de la falla).
6. Determinar qué se debe realizar para predecir o prevenir cada falla (tareas e intervalos de tareas).
7. Decidir si otras estrategias de gestión de fallas pueden ser más efectivas (cambios de una sola vez).

Para aplicar esta metodología, normalmente se requiere la participación de expertos en el tipo de equipo que se tenga en la empresa, para definir un listado matricial de las posibles causas de las fallas de componentes o piezas al ejecutar su función particular. El nivel más detallado es el procesamiento de cada pieza. Esto genera un volumen de información que puede ser extremadamente grande. Por esto, la metodología aplica criterios de escala o categoría de importancia para atender el perfil de fallas identificado, mediante calcular el llamado número prioritario de riesgo o NPR. Esto permite filtrar las causas de falla a atender con el plan de mantenimiento ajustado que se propone, mediante aplicar la metodología RCM y obtener un listado de causas de falla a controlar, especialmente aquellas relacionadas con fallas imprevistas que han ocurrido.

Posterior a definir las causas de falla priorizadas a atender, sigue por definir qué tipo de acción de mantenimiento aplicar para controlar cada causa de falla en lista. La figura 14 define lo que se denomina diagrama de decisión RCM. Cada causa de falla requiere una o más actividades de mantenimiento, sea correctivo, preventivo, rediseño, detección de fallas ocultas y otras. El diagrama de decisión mediante una secuencia lógica de preguntas define el tipo de actividad a aplicar para controlar cada causa de falla, en las categorías de: correctiva, preventiva programada según condición (predictiva), descarte, tarea búsqueda de falla, rediseño, entre otras. Definida el tipo de tarea según la causa a controlar, se definen las características de estas, su frecuencia y recursos para su ejecución.

Figura 14. Diagrama de decisión RCM.



2.2.3. Enfoque CMD.

El enfoque CMD (confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad), requiere definir estos conceptos para asegurar la mayor productividad de los activos y se cumpla con la certeza de función.

Confiabilidad. Es un concepto relacionado con ausencia o poco número de fallas de un equipo para un periodo de tiempo definido. Se mide como una probabilidad de funcionar correctamente en ese periodo, donde pocas fallas significan alta confiabilidad y muchas fallas poca o baja confiabilidad.

La mantenibilidad es el grado de facilidad con la que puede repararse un activo y define su capacidad de mantenimiento. Una mantenibilidad alta se debe al bajo tiempo medio de reparación – o sea, un corto período de tiempo hasta que se reanuda el funcionamiento normal después de una avería. Un indicador de la capacidad del departamento de mantenimiento es el MTTR o tiempo medio para reparar.

La disponibilidad significa que el activo está en un estado operacional normal. Por esto, una alta disponibilidad depende de que el equipo posea alta confiabilidad y mantenibilidad.

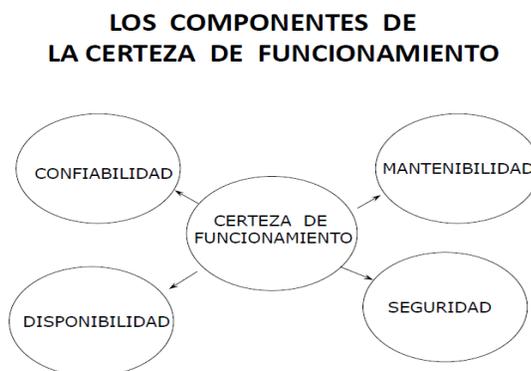
Es claro que la disponibilidad al menor costo es el fin en el mantenimiento de los equipos y la confiabilidad y mantenibilidad son los medios para lograrlo. Para un equipo existente, las oportunidades de mejorar en la disponibilidad se presentan principalmente en el área de mantenimiento, mediante reparar rápidamente las fallas que se presenten, lo cual implica dominar aspectos como:

- Disponer de manuales de servicio del motor a operar y mantener. Para realizar tareas de mantenimiento, especialmente las complejas que implican una secuencia de muchos pasos en un orden determinado y poseer experticia en realizar cada tarea correctamente, muchas veces no es suficiente la experiencia. Por eso, disponer del manual de servicio para el motor es relevante porque se tiene información importante sobre procedimientos y detalles técnicos como ajustes, sincronizaciones, huelgos, evaluación de componentes, diagramas eléctricos, electrónicos, de líneas de fluidos y otros, que, de no conocerse, dificultan el desarme, armado o puesta a punto.
- Apropiaada comunicación con operarios. Los operarios son las primeras personas en advertir de problemas técnicos en los equipos a su cargo. Aspectos como ruidos, olores, vibraciones, luces, lecturas inusuales de instrumentación, respuestas erráticas, entre otros, son indicios que sirven para direccionar que componentes pueden estar fallando.
- Capacidad de detectar las piezas o componentes que se acercan al límite del deterioro en equipos aun funcionando. Aquí es relevante aplicar tecnologías de mantenimiento predictivo, las cuales pueden medir de manera periódica o continua, parámetros claves de funcionamiento o desempeño.

- Capacidad de diagnosticar cuales piezas han fallado cuando el equipo presenta indicios de falla parcial o total. Aquí es relevante poseer equipos apropiados de diagnóstico de tipo mecánico, eléctrico, electrónico, hidráulico, neumático y otros. aquí también es relevante el accionar predictivo. tecnologías de diagnóstico a bordo tipo OBD para identificar componentes electrónicos que han fallado, se utilizan en la tecnología de los motores Diesel actualmente.
- Rapidez en desarmar ordenadamente. Desarme es una actividad que debe realizarse cuidadosamente para evitar daños adicionales al equipo. Aspectos como marcar cables y conexiones eléctricas, electrónicas, hidráulicas y neumáticas es vital para conectar erróneamente al armar durante la reparación. También, es posible causar daños colaterales involuntarios o por descuidos en estas mismas líneas al apretarlas, aplastarlas, cortarlas o afectarlas de alguna manera. Adicionalmente, deben tener las herramientas apropiadas, procedimientos de desarme e información disponible en los manuales de servicio. Si se considera necesario al encontrarse ante dudas para el desarme, no debe dudarse en consultar a expertos en el tipo de equipo en reparación.
- Rapidez en armar. Esto requiere conocimiento y experiencia por lo cual debe ser realizado por personal con la suficiente capacidad para obtener resultados idóneos. Es vital disponer del manual de servicio y entender los aspectos de secuencias de armado, puesta punto, sincronizaciones, ajustes, niveles de apriete de pares torsores en uniones atornilladas, entre otros. También debe tenerse a mano equipo necesario para realizar calibraciones, posicionados y mediciones necesarias de verificar durante el armado.
- Rapidez en poner a punto los equipos. En el caso de los motores Diesel, además de un correcto desarme y armado, deben realizarse tareas como expulsión del aire atrapado en el sistema de combustible, verificación de no existencia de fugas de líquidos en general (agua, combustible, aceite, otros) y otras, necesarias para asegurar que el motor encienda sin problemas después de la reparación y opere de manera normal una vez encendido y aplicado a producción.

Al tener control de los aspectos comentados en mantenimiento para realizar reparaciones y tareas preventivas, se asegura poseer una estructura y recursos necesarios para realizar las tareas reactivas y proactivas a los motores, que asegura una rápida respuesta ante los eventos de deterioro y fallas que puedan ocurrir, lo que implica tener una alta disponibilidad de las plantas de generación eléctrica en las embarcaciones y por tanto el servicio productivo de estas.

Figura 15. Modelo de la certeza del funcionamiento



Grado de prevención de riesgos: Probabilidad de no producir daños catastróficos.

2.2.4. Modelo de costos para evaluar el mantenimiento predictivo.

Implementar un mantenimiento predictivo, requiere de una inversión que puede ser alta y esta debe ser justificada en relación con los beneficios derivados. El costo de equipos para realizar análisis de vibración, aceite o ultrasonido es elevado, sin embargo, existen empresas especializadas en estas tecnologías predictivas que prestan sus servicios y debe cuantificarse económicamente esta opción de contratar.

Cuantificar los posibles beneficios al evitar fallas imprevistas resultado de aplicar el mantenimiento predictivo versus el costo por los servicios tecnológicos, determina que tan beneficioso es aplicar esta estrategia de mantenimiento. Los costos de mantenimiento realizados con la técnica de Pareto incluyen los correspondientes a las reparaciones más los de lucro cesante de la embarcación.

2.2.5. Indicadores de mantenimiento

Al ejecutar las tareas de mantenimiento se tiene resultados, estos deben medirse y compararse con alguna referencia, para evaluar el grado de estabilidad o mejoras que se van obteniendo. Los medios de medición para la gestión son los indicadores en este caso de mantenimiento. Se deben medir factores relacionados con la confiabilidad, la mantenibilidad y su efecto en la disponibilidad.

La tabla 9 presenta los indicadores a considerar en el proyecto. Para evaluar la confiabilidad, aunque puede relacionarse el número de fallas en un periodo trabajado, se define aplicar un tiempo total entre fallas, obtenido de datos de tiempo entre fallas correctivas, dividido entre

el número total de fallas, dado que esto contiene además del número de fallas, el tiempo promedio de ocurrencia entre ellas.

Para mantenibilidad se definen los mostrados para posibilitar el control de los aspectos relevantes en la gestión del mantenimiento.

Para disponibilidad se define el indicador mostrado por la facilidad de obtener y procesar datos de tiempos de operación mensual.

Tabla 9. Indicadores de gestión del mantenimiento considerados.

Aspecto Factor	Confiabilidad	Mantenibilidad	Disponibilidad
Tiempo promedio entre fallas	O		
Tiempo promedio para reparar		O	
Tiempo operativo mensual / tiempo calendario mensual			O
Numero fallas correctivas / número fallas totales		O	
Numero actividades preventivas / número total actividades		O	
Tiempo promedio para diagnosticar fallas		O	

3. METODOLOGIA.

La metodología que se aplica es de tipo descriptiva explicativa, y el tipo de investigación será cuantitativa, cualitativa y de campo. Se describe el sistema del motor y sus partes. posteriormente se explican las tecnologías predictivas disponibles y formas de aplicarlas a los motores CUMMINS 6BTA, así como también se definen los instrumentos requeridos para recolección de información y para establecer los procedimientos para la combinación de tecnologías a implementar.

A continuación, se cita cada objetivo específico y las actividades asociadas para alcanzar su cumplimiento.

3.1. Actividades para el objetivo 1:

Caracterizar las actividades y procedimientos actuales de mantenimiento en la empresa SAAM TOWAGE que aplican a los motores Cummins 6BTA 5,9 litros.

- Estudio de catálogos de operación, mantenimiento y reparaciones de motores Cummins 6bta.
- Se identificarán procedimientos de diagnóstico preventivos en los manuales de servicio. ajustes, puestas a punto. herramientas y equipos de servicio. Adicionalmente, se aplica el análisis de modo y efecto de fallas según la metodología AMEF. Con este se pueden identificar todas las probables fallas, riesgo asociado y criticidad. Con esta información, más las identificadas en los catálogos de fabricante del motor, se podrán analizar que tecnologías de diagnóstico son óptimas para detectar el momento en que cada falla particular a controlar se acerca a un límite de alerta y así proceder a corregir antes que ocurra la falla imprevista y sus consecuencias no deseadas. Resultado esperado: Perfil de fallas a controlar, parámetros de monitoreo identificados, tecnología de medición predictiva a aplicar.
- Verificación en taller para observar si los mecánicos conocen y aplican el enfoque preventivo y predictivo del mantenimiento a los motores referenciados. De encontrar vacíos, se elabora un instructivo para subsanar la deficiencia.
- Evaluación del sistema actual de mantenimiento aplicado a estos motores. Se propone realizar charla con los técnicos mecánicos y electricistas de la flota. Se utilizará la observación directa sobre la manera de hacer sus actividades (diagnósticos, desarmes, armado, puesta a punto). Identificando grado de concordancia con lo expresado por el manual de fabricante.
- Análisis de procedimientos de diagnóstico de fallas a los motores 6bta. identificar qué proceso lógico siguen y si este es idóneo respecto a instrucciones de catálogos y metodologías de diagnóstico pertinentes como: árbol de fallas, técnicas del ¿por qué? y similares.

3.2. Actividades para el objetivo 2.

Determinar las tecnologías de mantenimiento predictivo que pueden aplicarse al análisis de motores Diesel, con las normas que establecen su correcto uso y parámetros de medición para definir la combinación tecnológica a aplicar.

- Investigación bibliográfica sobre tecnologías de mantenimiento predictivo aplicadas al análisis de motores Diesel. Revisión de artículos científicos, libros, catálogos, manuales de servicio, entre otros.
- Definición y selección de la norma a seguir para diseñar el procedimiento de diagnóstico correspondiente según cada tecnología a aplicar, definiendo parámetros y puntos de medición junto con su correspondiente protocolo.

3.3. Actividades para el objetivo 3.

Desarrollar una metodología para aplicación del mantenimiento predictivo a los motores Diesel 6BTA.

- Con las fallas identificadas a controlar en forma predictiva en los motores Diesel 6BTA y la evaluación del sistema de mantenimiento actual, se procede a evaluar las diferentes tecnologías de diagnóstico y se selecciona la combinación de tecnología predictiva a aplicar, en cada falla, teniendo en cuenta los parámetros asociados.
- Determinación de valores y parámetros límites o de referencia para establecerlos como referencia de pre-alarma, permitiendo la detección temprana y oportuna de los procesos de degradación, controlando para no llegar las fallas imprevistas.
- Se procederá a la creación de procedimientos a aplicar según cada norma correspondiente, organizando la información en forma matricial para facilitar su análisis y comprensión.

3.4. Actividades para el objetivo 4.

Realizar un análisis técnico económico que defina cuando es ventajoso aplicar el enfoque predictivo en los motores gestionados.

- Se realizará una evaluación de los costos asociados a las diferentes pruebas realizadas con tecnologías predictivas. Para esto se utilizarán algunos equipos de la empresa y otros costos se solicitarán a las empresas especializadas contratadas para prestarlos en los casos que ello amerite.
- Cuantificación en la reducción de costos al evitar fallas catastróficas y lucro cesante.
- Determinación de las condiciones en que es ventajoso aplicar la tecnología predictiva a estos motores en las condiciones actuales de la empresa

4. RESULTADOS Y ANALISIS.

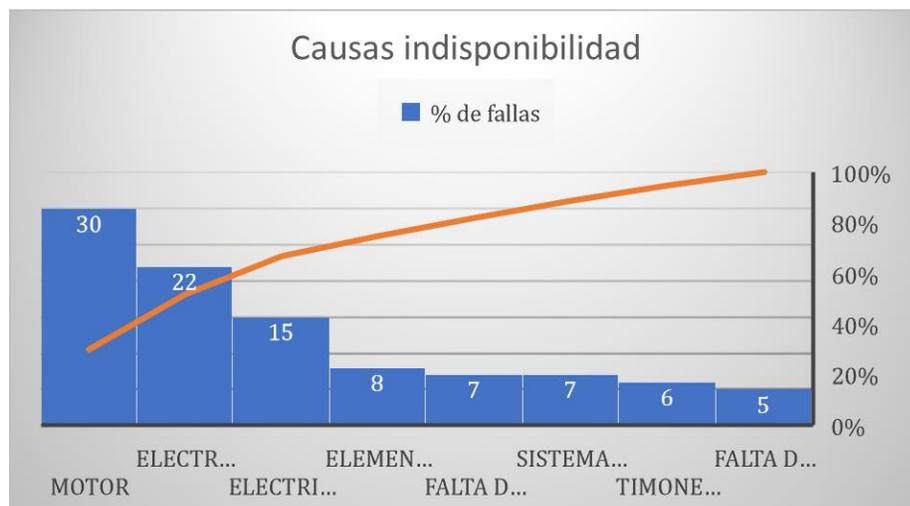
4.1. Caracterización del mantenimiento actual realizado a los motores Cummins 6bta 5,9 litros.

Los motores Cummins 6bta de 5,9 litros analizados propulsan las plantas de generación eléctrica de las embarcaciones navales en la empresa SAAM TOWAGE. La falla de estas plantas de energía eléctrica tiene como consecuencia la suspensión del servicio de los barcos, por lo que es vital asegurar la máxima disponibilidad de estos equipos. Por esto, el enfoque predictivo que se propone se basa en el enfoque CMD o confiabilidad – mantenibilidad – disponibilidad.

Para caracterizar el mantenimiento aplicado a los barcos de la flota, se realiza un análisis de Pareto para determinar cuáles son las fallas relevantes en estas naves. La figura 16 muestra que el 30 % de la indisponibilidad de la flota es por fallas en los motores de combustión tipo

Diesel que propulsan a los generadores eléctricos. Por esto, se aplica el énfasis del mantenimiento en mejorar la disponibilidad de las embarcaciones, a través de aumentar la confiabilidad y la mantenibilidad de estos motores marca Cummins serie 6bta de 5,9 litros.

Figura 16. Pareto para causas de indisponibilidad de la nave.



La tabla 10 presenta el perfil de componentes que han presentado falla imprevista en los motores de la flota para el año 2021. La figura 17 presenta el Pareto de los datos de la tabla 10.

Tabla 10. Datos de fallas en la flota año 2021.

Descripción de falla	Frecuencia	Porcentaje	acumulado
Falla en cojinetes de bielas	104	17,75%	104
Falla en filtros de aire	90	15,36%	194
Falla en sistema de balancines	84	14,33%	278
Falla en correas	58	9,90%	336
Falla en pistones	43	7,34%	379
Falla en sistema de lubricación	40	6,83%	419
Falla en sistema de enfriamiento	34	5,80%	453
Falla en retenedores de aceite	32	5,46%	485
Falla en sensores del motor	25	4,27%	510
Falla en cigüeñal	19	3,24%	529
Falla en árbol de levas	16	2,73%	545
Falla en engranajes de sincronización	15	2,56%	560
Falla en bomba de combustible	14	2,39%	574
Falla en instrumentación (termómetro, manómetro, amperímetro)	12	2,05%	586
Σ	586	100,00%	5952

Figura 17. Pareto de componentes fallados 2021.

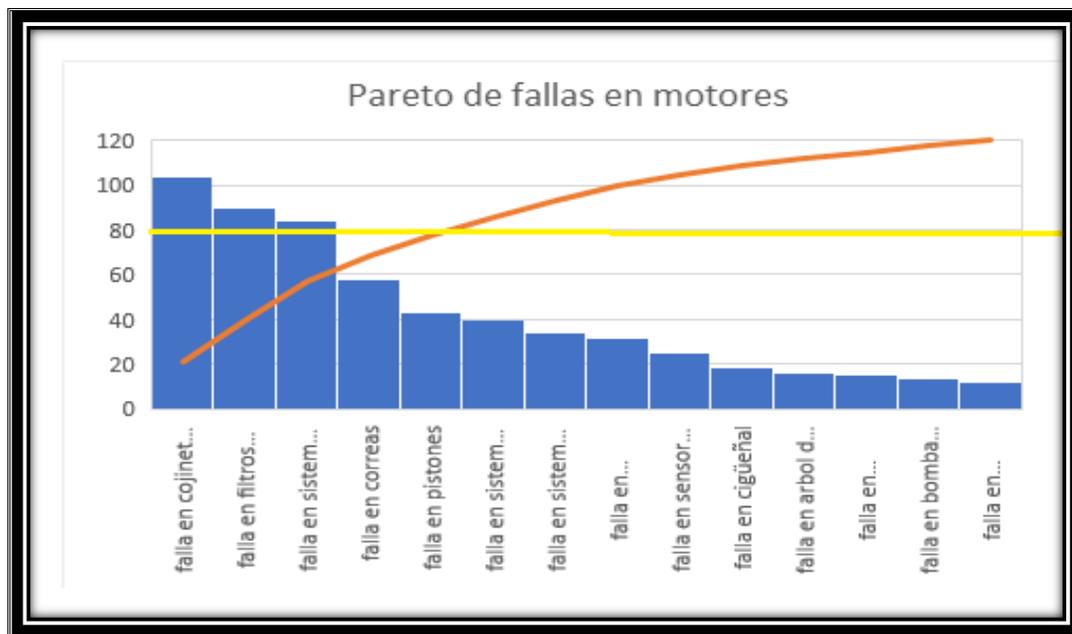
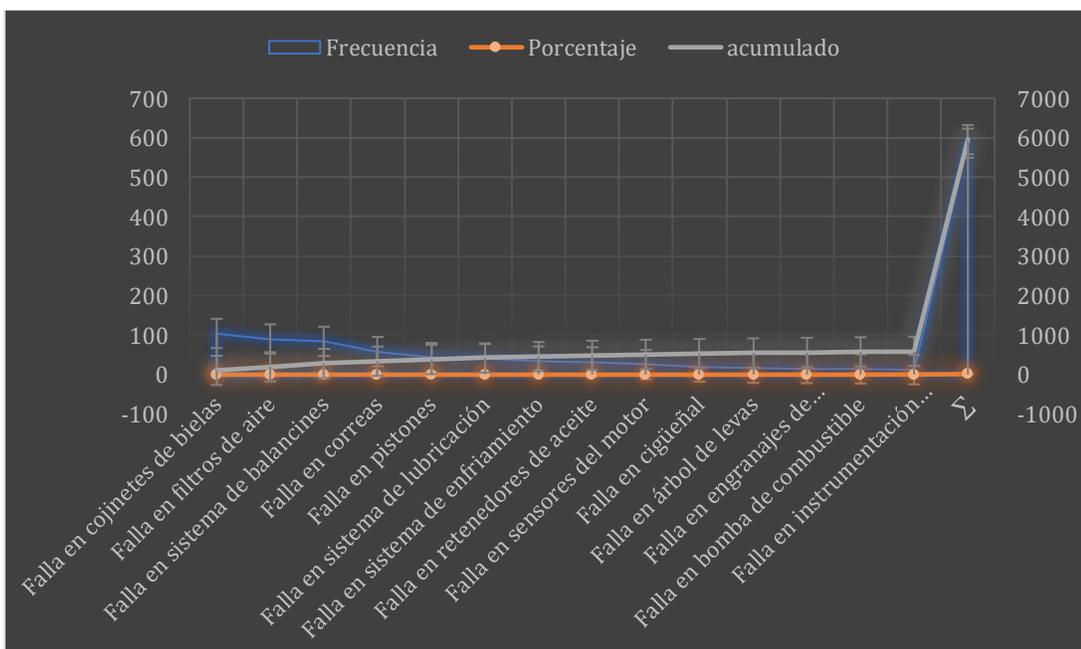


Figura 18. Frecuencia – Porcentaje - Acumulado



El Pareto correspondiente de la figura 17 para las fallas registradas por la empresa, indica que los componentes críticos a analizar son: cojinetes de biela, filtros de aire, sistema de

balancines, correas y pistones. Sin embargo, la tabla 11 agrega los costos a las fallas de la tabla 10 y la figura 18 presenta el Pareto correspondiente referente al impacto de los costos.

Tabla 11. Datos de fallas vs costos.

Descripción de falla	Frecuencia	Costo unitario c.o.p	Costo total c.o.p
Falla en cojinetes de bielas	104	850000	88400000
Falla en filtros de aire	90	120000	10800000
Falla en sistema de balancines	84	650000	54600000
Falla en correas	58	120000	6950000
Falla en pistones	43	3500000	150500000
Falla en sistema de lubricación	40	1550000	62000000
Falla en sistema de enfriamiento	34	1800000	61200000
Falla en retenedores de aceite	32	150000	4800000
Falla en sensores del motor	25	750000	18750000
Falla en cigüeñal	19	15000000	285000000
Falla en árbol de levas	16	2500000	40000000
Falla en engranajes de sincronización	15	2800000	42000000
Falla en bomba de combustible	14	3500000	49000000
Falla en instrumentación (termómetro, manómetro, amperímetro)	12	650000	7800000
Σ	586	33940000	881800000

La figura 19 indica que los costos relevantes implican los siguientes componentes: cigüeñal, cojinetes, pistones, bomba de aceite de sistema de lubricación y partes del sistema de balancines y válvulas. En estos, se concentra el 80 % de los costos de la flota por fallas imprevistas. Estos son los componentes objeto del análisis para implementar mantenimiento predictivo, en la figura 20 se observan la combinación de costos por fallas.

En los valores totales presentados se han incluido costos por las reparaciones y por lucro cesante si ello implica. Son valores máximos porque en las reparaciones de los sistemas implicados se realizan los recambios de piezas falladas y de piezas compañeras que, si bien conservan alguna vida residual, normalmente el valor que queda de vida residual no compensa repetir la reparación por no realizar el recambio. La filosofía de la empresa es “hacer overhaul al sistema con fallas.

Figura 19. Pareto de fallas por costos

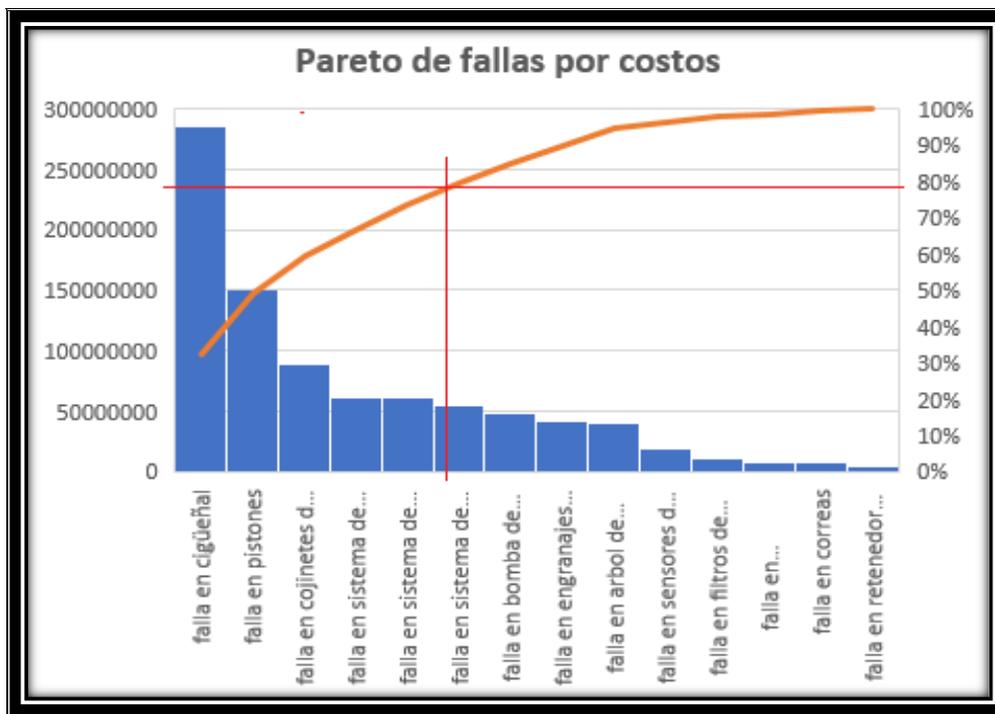


Figura 20. Combinación de costos para las fallas.



A los componentes críticos anotados, se analiza cómo aplicar tecnologías del mantenimiento predictivo, con el propósito de reducir los costos y aumentar la disponibilidad de la flota.

4.2. Revisión del personal técnico de mantenimiento

El personal técnico para atender los motores Cummins serie 6 BTA de 5,9 litros, se presenta en la tabla 12.

La experiencia anotada para los técnicos se refiere a su capacidad para resolver problemas. se ha definido teniendo como referente el formulario de preguntas presentado en la figura 21. Se persigue relacionar el actuar de los técnicos encargados del mantenimiento de los motores con las fallas correctivas críticas detectadas. La escala es del (1) baja a 5 (alta). No se expresan datos específicos de las respuestas con el objeto de proteger a los operarios mencionados.

Tabla 12. Personal técnico para atender motores Cummins 6BT.

Nombre	Título	Años de experiencia	Observaciones
Juan Betancourt	Oficial de Maquinas SENA	20	Experiencia
Joe Cardona	Oficial de Maquinas SENA	18	Compromiso y buena actitud
Carlos Camargo	Oficial de Maquinas (ENAP)	24	Experiencia
Tomas Figueroa	Oficial de Maquinas SENA	22	Experiencia
Rolfen Martinez	Oficial de Maquinas SENA	20	Compromiso y buena actitud
Harlyn Santodomingo	Oficial de Maquinas (ENAP)	14	Compromiso y buena actitud
Carlos Gonzales	Oficial de Maquinas SENA	18	Compromiso y buena actitud

Figura 21. Preguntas para evaluar experiencia de técnicos.

- P1. Ante una falla mecánica a resolver. ¿Que pasos sigue para ubicar el componente mecanico fallado?
- P2. Ante una falla electronica ¿Que equipos utiliza para identificar el componente fallado?
- P3. Cuando aparecen sintomas de vibraciones ¿Como procede para detectar la causa de la vibracion?
- P4. ¿Que acciones técnicas aplicaría para maximizar la vida util de pistones, sistema de balancines y cojinetes?
- P5. Antela rotura de cigueñales ¿Que causas piensa usted llevan a la rotura de este componente cuando el motor ha sido intervenido?

De la revisión de respuestas, se ha detectado que los mecánicos diagnostican en base a experiencias pasadas. Esto es, relacionan síntomas actuales con los que creen similares en

fallas pasadas y definen que piezas o componentes tienen problemas, que son las piezas que en evento pasado que asumen similares ellos cambiaron para resolver el problema. Igual proceder tienen cuando se trata de armado y puesta a punto en las reparaciones, las cuales realizan según lo hacen antes, verificándose según el cuestionario, que la mayoría de las veces no tienen como referencia lo expresado en los manuales de reparación.

4.3. Procedimiento actual de diagnóstico.

Un paso clave para resolver una falla es el diagnóstico. Este es variado y depende del tipo de falla a tratar. Del análisis de experiencia para los operarios se ha detectado que no poseen un proceder lógico por lo que se propone uno presentado en la figura 22. Se presentan los pasos lógicos para identificar piezas dañadas de tipo mecánico.

Se advierte sobre realizar pruebas cuando se crea es necesario encender el motor. Aquí, lo preferible es verificar antes de intentar prender el motor que el cigüeñal gira 4 vueltas sin ningún tipo de trabamiento o atascos anormales. De ser así, no intentar encender el motor. Más bien, desarmar secuencialmente según se crea cual es el sistema afectado.

Las opciones de desarme para identificar piezas dañadas son:

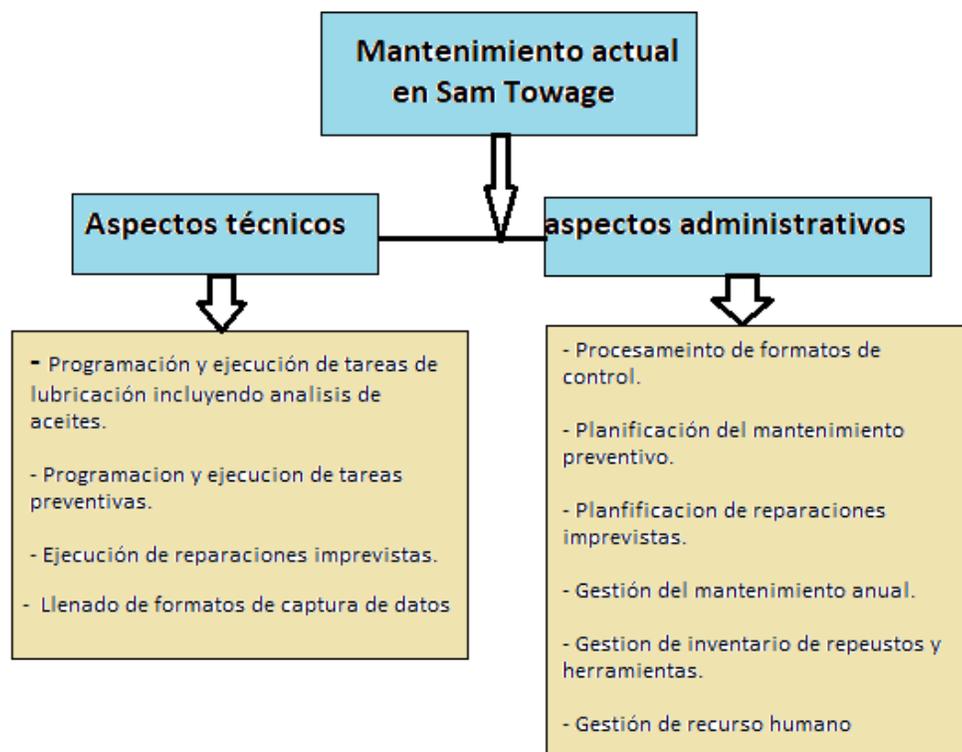
- Iniciar por las tapas válvulas y culatas si se observan problemas en la parte superior, en balancines, válvulas, etc.
- Iniciar por la parte inferior, quitando el Carter si se piensa existen problemas en cojinetes, cigüeñal o piezas relacionadas.

Figura 22. Esquema del proceso de diagnóstico propuesto.

1. Preguntar a los operarios de las plantas generadoras sobre posibles ruidos y localización, olores, temperaturas anormales, síntomas de vibraciones, presiones anormales u otros.
2. Revisar visualmente para confirmar lo expresado por los operarios en lo posible con equipo detenido.
3. Realizar pruebas que se sepan darán luces sobre que piezas están dañadas.
4. Hacer desarme de manera ordenada, realizando el desarme y anotando aspectos relevantes. marcando posiciones y conexiones eléctricas, hidráulicas y neumáticas.
5. Verificar el estado de las piezas dañadas y relacionar posibles causas de esta falla.

La figura 23 presenta los aspectos técnicos y administrativos. Dentro de los aspectos técnicos, se tienen las actividades de lubricación de los motores. El cambio de aceite es riguroso y se realizan análisis de aceites para determinar contaminantes, elementos propios del desgaste y evaluar si es razonable la tasa de desgaste observada.

Figura 23. Esquema para gestionar el mantenimiento en SAAM TOWAGE.



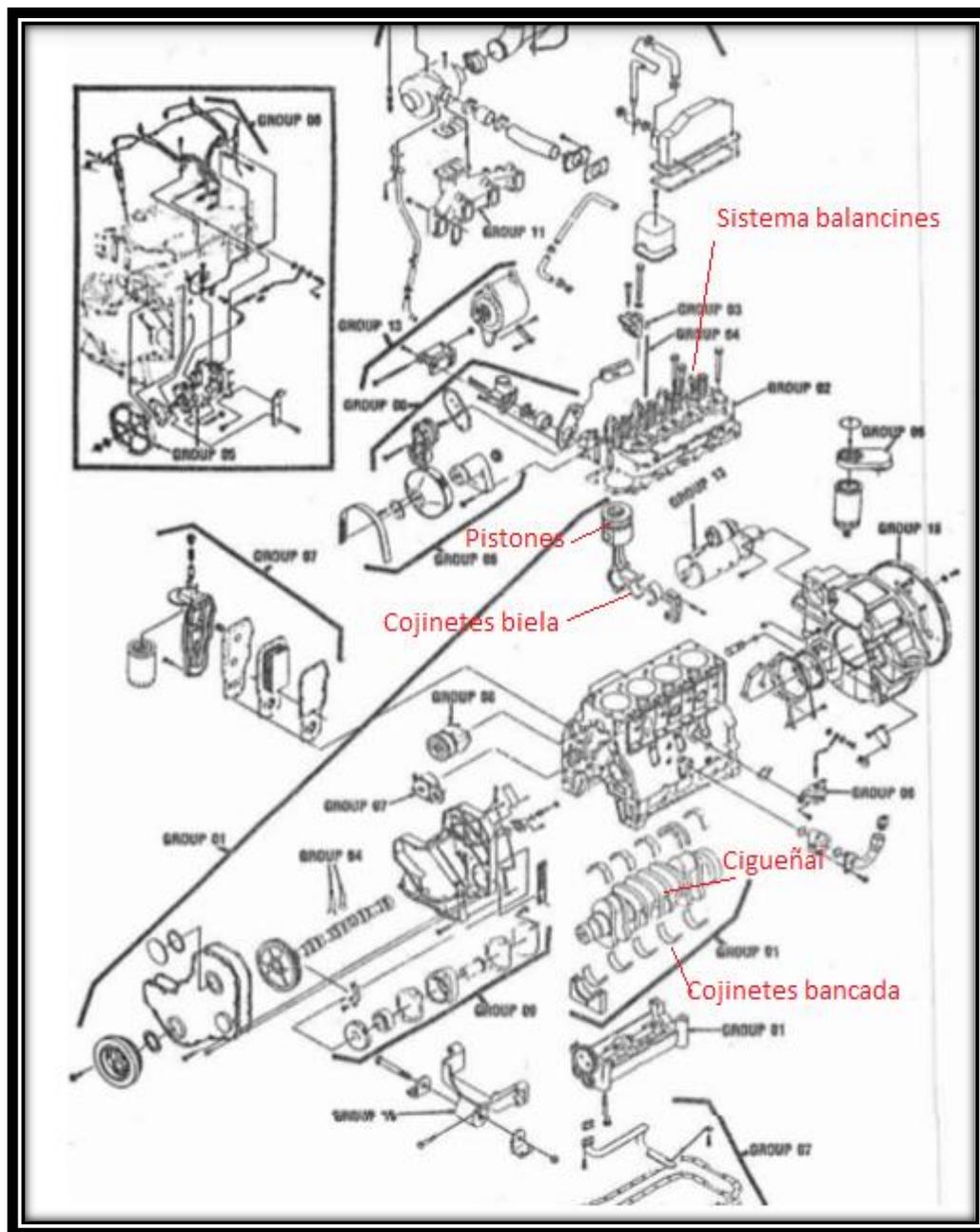
4.4. Tecnologías de mantenimiento predictivo aplicadas a motores Diesel.

El énfasis en mantenimiento predictivo se aplica en detectar de manera prematura posible rotura de cigueñales y el efecto del inevitable desgaste en piezas como válvulas, asientos de válvulas, cojinetes, bomba de lubricación del motor.

La figura 24 presenta una vista explosionada del motor Cummins analizado, tomada del manual de reparación del correspondiente motor. Se identifican en letras color rojo los componentes críticos a atender con el enfoque de mantenimiento predictivo.

El criterio base que se establece para aplicar las tecnologías de mantenimiento predictivo es “Definir primero los parámetros a medir justificando su elección y relación con las piezas a controlar con el accionar predictivo, teniendo como referencia valores o rangos de los parámetros, preferiblemente de datos e información del fabricante”.

Figura 24. Vista explosionada del motor Cummins 6 bta 5,9 litros.[1].



La tabla 13 presenta la ficha técnica de este motor. la potencia máxima continua es de 116 kW a 1500 rpm reguladas. Se indican características para los sistemas de combustible, lubricación, refrigeración, admisión de aire, sistema de escape y sistema de arranque, los cuales definen valores de referencia del estado operativo normal y se constituyen en información relevante para aplicar el mantenimiento predictivo.

Tabla 13. Ficha técnica del motor analizado. [1].

GENERADOR DIESEL FICHA TÉCNICA			
3. DATOS DEL MOTOR			
Modelo del motor	6BTA5.9-G2	Potencia del motor	116 kW
Aspiración	Turbo Aspiración y post enfriado	Desplazamiento	5.9 L
Tipo	en línea	Diámetro x Carrera	102x120 mm
Nº de cilindros	6	Índice de compresión	17.3:1
Tipo de regulación	Regulación electrónico	Velocidad nominal	1.500 RPM
Sistema de Combustible			
Consumo de Combustible	27 l/h	Consumo de combustible	27 L/h
Potencia Prime		Potencia Standby	
Combustible	Diesel	Sistema de Inyección	BYC A
Capacidad de estanque	Tipo abierto 230 L	Tipo silencioso	270 L
Sistema de Lubricación			
Capacidad de aceite lubricante	16.4 L	Consumo de aceite lubricante	0.081 l/h
Lubricante	API CF-4 15W40	Máx. Temperatura	121°C
Sistema Refrigerante			
Capacidad del refrigerante	25.9 L	Máx. Temp. del tanque superior:	100 °C
Termostato rango estándar (modulación)	82 - 95 °C	Tipo de controlador del ventilador:	
Volumen de aire de salida	248 m ³ /min	Eje de transmisión para ventilador	
		Potencia del ventilador	2.7 kW
Sistema de Consumo de aire			
Capacidad de consumo de aire	6.72/7.08 m ³ /min	Presión de aire	3.7 kPa
Sistema de Salida			
Flujo de gas de escape	18.3/20.04 m ³ /min	Máx. Presión trasera	10 kPa
Temperatura del gas de salida	≤565 °C	Tamaño del tubo de salida	φ76 mm
Sistema de Arranque			
Modo inicial	DC24V Inicio eléctrico	Batería	120x2 Ah

La tabla 14 presenta la relación entre la falla incipiente en el componente crítico a controlar y las posibles tecnologías predictivas aplicables.

4.5. Metodología para aplicar el mantenimiento predictivo a motores Diesel.

El concepto de metodología se define como una guía que contiene las fases lógicas y secuenciales, en este caso, para aplicar las tecnologías predictivas que se han considerado en el proyecto. Las fases propuestas de la metodología son:

- **Definir el perfil de fallas relevantes por su criticidad.** Esto se ha realizado mediante aplicar análisis de Pareto para identificar piezas críticas a atender de manera predictiva. Los componentes críticos atender en este caso, son: cigüeñales. pistones. cojinetes de biela, bomba de aceite y sistema de enfriamiento.
- **Identificar las posibles causas de fallas** en relación con el perfil disponible.
- **Determinar los parámetros predictivos** relacionados con las posibles causas.
- **Determinar las tecnologías predictivas** a aplicar para controlar fallas imprevistas en piezas críticas.
- **Estimar los beneficios económicos** de la implementación.

Tabla 14. Relación componente critico vs tecnología predictiva aplicable.

Componente	Tecnología	Observaciones
Cigüeñal	<ul style="list-style-type: none"> - inspección visual - detección de desgaste - Vibraciones - Análisis de aceite 	<ul style="list-style-type: none"> - La inspección visual requiere desarme, quitando el cárter del motor. - La detección de desgaste o huelgos requiere desarme de tapas de bielas y bancadas. - Los análisis de vibraciones requieren equipo especial tipo Windrock. Ver anexo A - Los análisis de aceite permiten un análisis relativo lo cual puede ser no concluyente
Pistones	<ul style="list-style-type: none"> - inspección visual - medida de desgaste - Vibraciones - Ultrasonido - Análisis de aceite 	<ul style="list-style-type: none"> - La inspección visual es posible con sonda visual, detectando posibles grietas o roturas. - El análisis por ultrasonido requiere desarrollar espectros de referencia con motor nuevo o reparado y hacer seguimiento mensual
Cojinetes de bielas	<ul style="list-style-type: none"> - medida de desgaste - vibraciones - ultrasonido - Análisis de aceite 	<ul style="list-style-type: none"> - requiere desmontar el cárter del motor y medidores micrométricos con soporte especial
Bomba de aceite	<ul style="list-style-type: none"> - medición de presiones - medición de caudal - Ultrasonido - Análisis lub. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para medir presiones puede utilizarse un manómetro analógico o digital externo. -

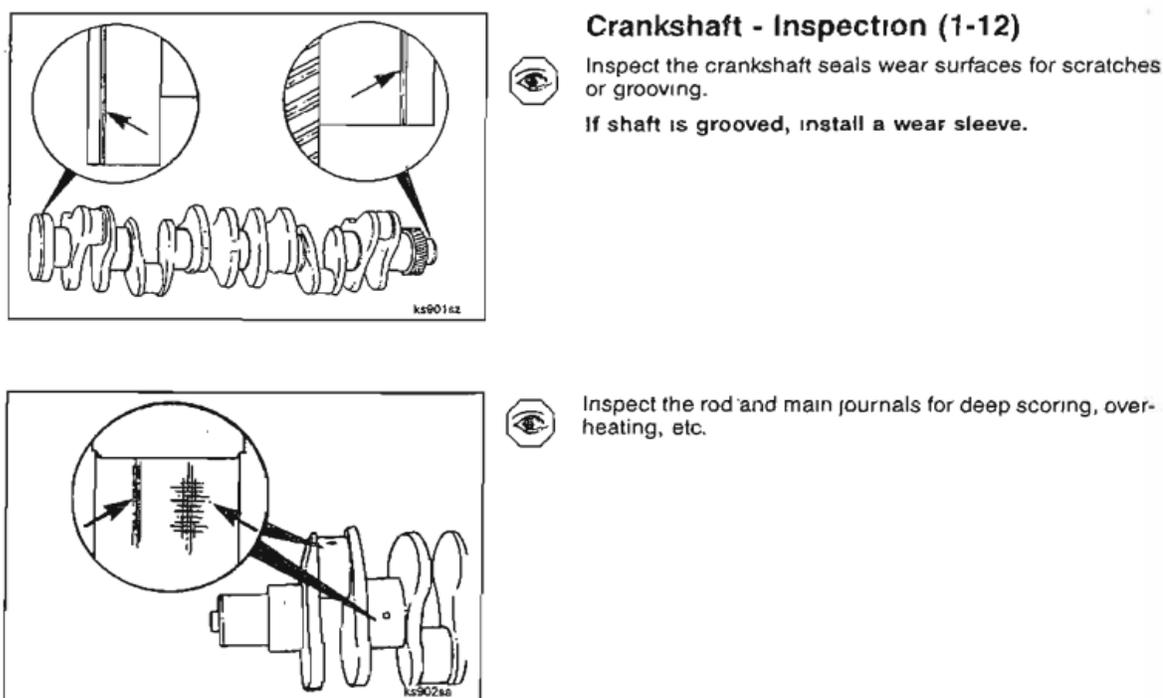
Sistemas de balancines y válvulas	<ul style="list-style-type: none"> - Inspección visual - Ultrasonido - Vibraciones 	<ul style="list-style-type: none"> - la inspección visual y medición del desgaste permite medir la evolución del desgaste en válvulas y asientos, determinando posible límite de vida útil
-----------------------------------	---	---

A continuación, se detallan los componentes o sistemas analizar y los posibles parámetros predictivos y como se medirían periódica o continuamente.

4.5.1. Cigüeñal.

La figura 25 presenta el cigüeñal de este motor. El manual indica que debe revisarse el área de trabajo con el retenedor de aceite del lado de la volanta de inercia y del lado de la polea de amortiguamiento. Si la inspección visual detecta afectación en las superficies de contacto en el cigüeñal debe procederse a la rectificación o recambio.

Figura 25. Cigüeñal de motor Cummins 6 BTA. [1].



La figura 26 presenta las medidas relevantes en los muñones de soporte para las bancadas y los muñones correspondientes en las bielas.

Figura 26. Medidas relevantes en el cigüeñal. [1].

Section 1 Cylinder Block Group 1
B Series Shop Manual

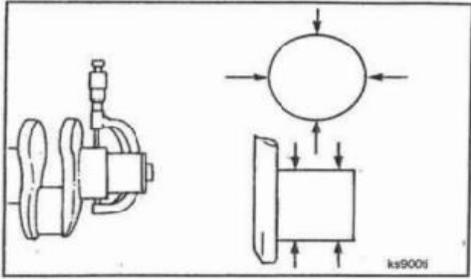
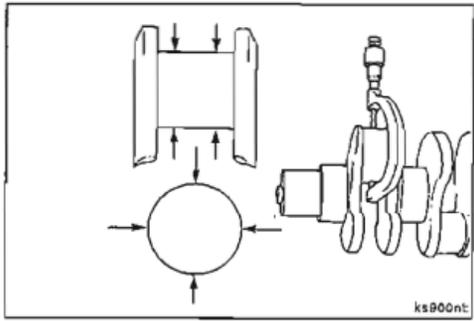
Crankshaft Gear Replacement (1-13)
Page 1-27

Determining Main Bearing Clearance
Measure the main journal diameters and determine main bearing clearance.

Main Bearing Journal Diameter		
mm		in
82.962	MIN	3.2662
83.013	MAX	3.2682

Out-of-Roundness: 0.050mm [0.002 in]
Taper: 0.013mm [0.0005 in]

Bearing Clearance = Main Bore Diameter with bearing installed minus (-) Crankshaft Main Journal Diameter.
Maximum Bearing Clearance: 0.119mm [0.0047 in]

Measure and record the mean diameter of rod journal on the crankshaft.

Diameter		
mm		in
68.962	MIN	[2.7150]
69.013	MAX	[2.7170]

Out-of-Roundness: 0.050mm [0.002 in]
Taper: 0.013mm [0.0005 in]

Bearing clearance = Rod Inside Diameter Minus Crankshaft Journal Diameter.
Clearance: 0.114mm [0.0045 in] maximum

La figura 27 presenta el aspecto relacionado con la polea amortiguadora de los efectos torsionales que ocurren con el motor encendido. El manual de taller del fabricante para este motor presenta claramente que esta pieza desde fábrica se balancea con el cigüeñal y se tienen dos marcas en esta polea entre las dos partes de esta, unidas por un anillo de elastómero desde fábrica. El fabricante expresa que la distancia máxima permitida entre estas marcas es de 1,59 mm. Esta medida es susceptible de observarse visualmente. Con el trabajo paulatinamente esa distancia supera el límite y se pierde el balanceo original apareciendo dañinas vibraciones que acortan la vida útil del motor, incluso causando la rotura del cigüeñal como señala el manual.

Otro aspecto relacionado con posibles problemas de vibraciones es el relacionado con el eje balanceador. Por diseño, los motores alternativos presentan diversos armónicos que deben compensarse para asegurar que no causen peligrosas vibraciones. La figura 28 muestra detalles relevantes de esta pieza. Se observa que existen 2 ejes de balanceo, que poseen unos contrapesos atornillados a un eje para propósitos de balanceo. Por esto, es de vital importancia marcar localización y posicionado de los contrapesos y ejes para colocarlos en su posición desde fábrica.

Los aspectos técnicos puntuales detallados para el motor deben conocerse por los mecánicos para asegurar una reparación de calidad en relación con lo expresado en el manual del fabricante. En charla con estos, ellos conocen muy bien el posicionado relativo de las piezas, pero desconocen la relevancia de marcar para reposicionar las mismas como vienen desde fábrica. Esto ocasiona problemas de vibraciones normalmente imperceptibles a menos que se aplique la tecnología del análisis de vibraciones, pero que origina esfuerzos inerciales superpuestos a los de operación, elevando la probabilidad de desarrollar roturas por fatiga como ha ocurrido en 5 ocasiones.

Figura 27. Detalles relevantes para la polea amortiguadora de efectos torsionales. [1].

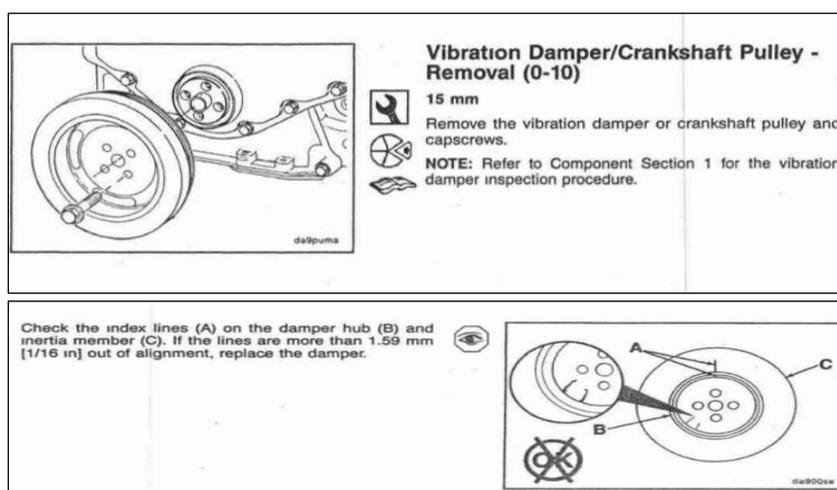
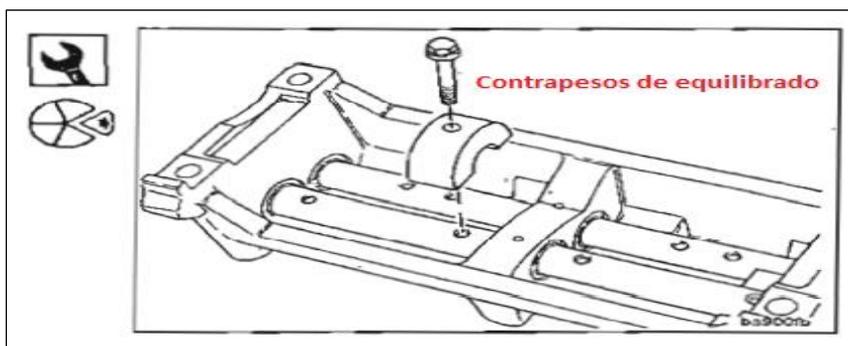


Figura 28. Contrapesos de ejes de balanceo. [1].



Para el cigüeñal, con un sistema de lubricación operando normalmente, realizando los cambios de aceite a tiempo y el motor reparado correctamente. Con cuidado de aplicar la carga cuando el manómetro de lubricación muestra el valor normal de presión lo que asegura lubricación con parámetros desde fábrica los cojinetes de bielas y bancadas, así como tren de válvulas y pistones, entonces, la falla del cigüeñal no será por desgaste y la otra opción

será rotura por fatiga, impacto o deformación plástica por sobrecarga. Quedando como última opción de falla la rotura por fatiga inducida por vibración, aspecto fundamental a controlar.

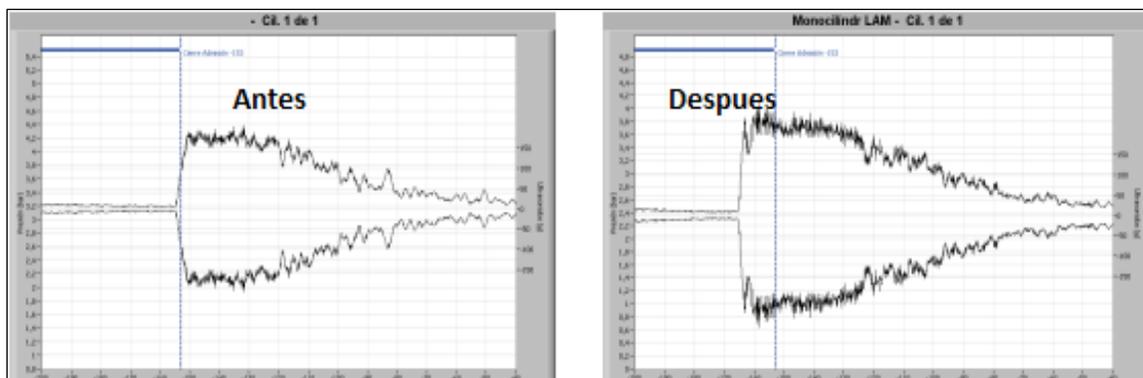
Las opciones predictivas susceptibles de aplicar al cigüeñal son:

- Ultrasonido.
- Vibraciones
- Inspección visual.
- Medición de desgaste.

Las opciones posibles para aplicar estas tecnologías son:

- A.** Realizar una inspección visual periódica cada 10 meses, midiendo desgastes de casquetes de biela mediante micrómetro analógico o digital y verificar apropiada distancia límite en la polea amortiguadora de vibraciones torsionales. Se asume no existencia de causa de vibraciones por los dos ejes de balanceo o equilibrado.
- B.** Medición por ultrasonido, realizando una medición y grabación del perfil para tenerlo de referencia. La figura 25 presenta una medición con equipo ultrasónico. Se observa que se tiene un patrón del antes y al ocurrir una desviación o defecto se puede ver cómo cambia el perfil y se tiene la indicación de ese cambio o falla, lo cual puede tomarse como una acción predictiva.
- C.** Medición por vibraciones. Es una tecnología similar a la del ultrasonido, donde se genera un perfil del antes y el después. Por lo tanto, se tiene la misma complicación. Esto es, durante una medición por equipo ultrasonido o de vibraciones, se tienen simultáneamente muchos elementos o piezas del motor generando un perfil complejo. Estos equipos poseen la capacidad mediante la transformada de Fourier de separar la influencia de esos elementos mediante el plano amplitud – frecuencia (ver figura 29). Sin embargo, identificar a que pieza precisamente corresponde cada dato medido no es claro, dado que, por ejemplo, existen 6 bielas operando a la misma frecuencia e identificar cuál de las puede tener problemas, es un asunto que sobrepasa la capacidad de un analista de espectros de vibraciones. Por ello, existen con base en estas tecnologías, equipos especializados que incorporan un software capaz de realizar esas interpretaciones. Ver anexo A.
- D.** La medición con tecnología de vibraciones o ultrasonido para ser útil requiere primero medir y registrar perfiles que se toman como referencia y posteriormente generar una falla específica y obtener el correspondiente perfil para mediante la comparación identificar la diferencia y la falla específica. Esta opción para medición predictiva se considera no es posible de aplicar, porque la gerencia de la empresa no aprueba este tipo de experimentos en sus equipos.

Figura 29. Perfil de medición de desgaste en árbol de levas para equipo de ultrasonido. [2].



4.5.2. Pistones.

La figura 30 presenta las medidas de referencia desde fabrica para los pistones. estas mediciones solo son posibles al armar el motor. Sin embargo, el desgaste en las ranuras de los anillos puede detectarse mediante análisis de ultrasonido. La figura 31 presenta el espectro de anillos normales y anillos dañados que permiten el llamado soplado o Blowing, que consiste en que parte de los gases de la carrera de explosión pasan al cárter. El espectro ultrasónico para el antes, en este caso puede servir como referencia al ser realizado en un motor de geometría y características similares.

La opción complementaria y de medición más fácil es la prueba de compresión, complementada con inspección visual por sonda para detectar grietas y desgaste evidente.

Figura 30. Detalles de ajustes para ranuras del pistón. [1].

Use a new piston ring to measure the clearance in the ring groove. 

	Ring Clearance		
	mm		in
Top (Turbocharged)	No Check Needed		
(Naturally Aspirated)	0.075	MIN	[0.003]
	0.150	MAX	[0.006]
Intermediate	0.075	MIN	[0.003]
	0.150	MAX	[0.006]
Oil Control	0.040	MIN	[0.002]
	0.130	MAX	[0.005]

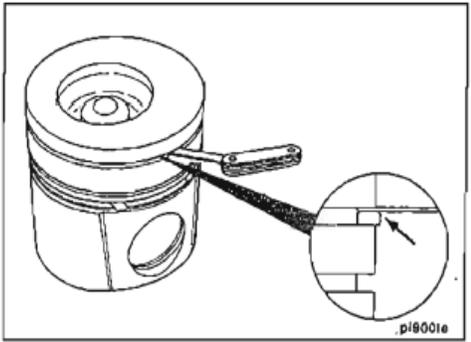
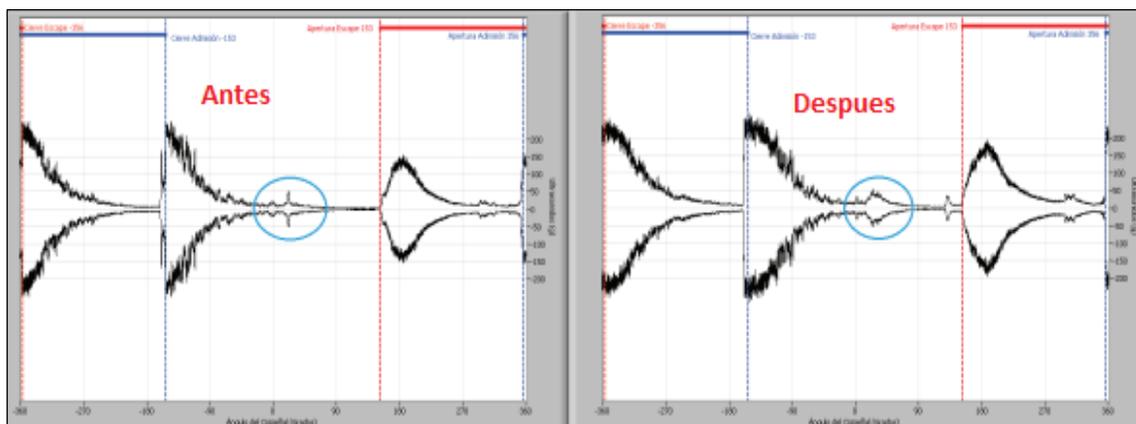


Figura 31. Espectros de ultrasonido para detectar anillos de pistón dañados. [2].

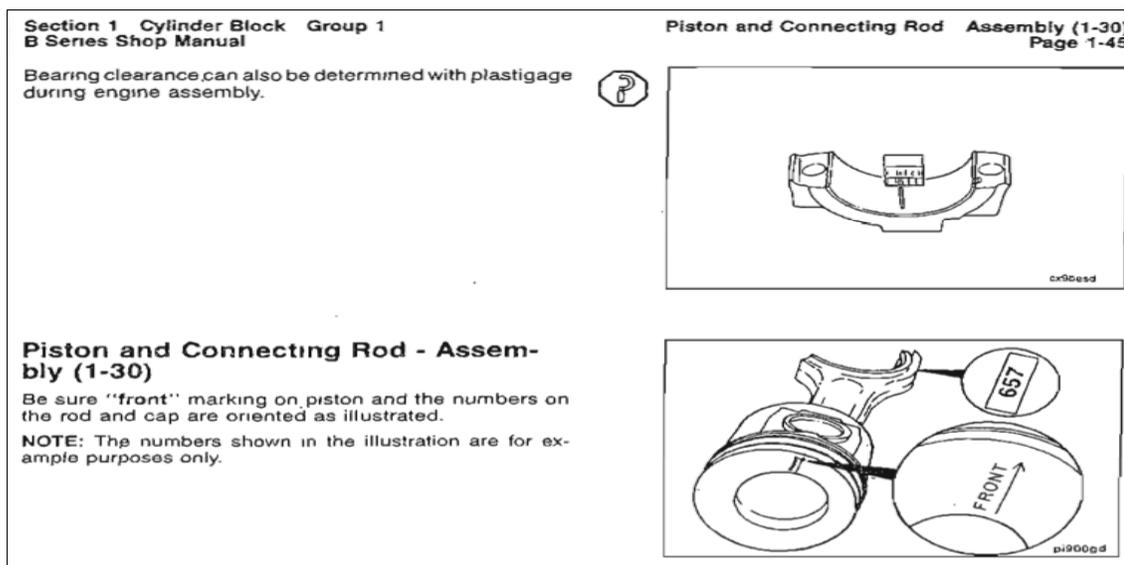


4.5.3. Cojinetes de bielas.

Para el caso de los cojinetes de biela que es dónde ocurren las fallas registradas, la figura 32 presenta la medición durante el armado del juego u holgura entre muñón y cojinete. El fabricante define un rango de ajuste correcto para este ajuste entre 2 y 2,5 milésimas de pulgada.

Un aspecto adicional es la importante posición relativa de la biela con el pistón. La referencia conveniente es la ranura que el pistón posee en su cabeza como muestra la figura 33.

Figura 32. Detalles para el ajuste de cojinetes de biela. [1].



4.5.4. Bomba de aceite.

El aspecto relevante en la bomba de aceite es la presión, bajo el supuesto que las holguras en los cojinetes de bielas, bancadas, eje de elevación y ejes balanceadores están dentro de las tolerancias definidas por el fabricante. Si esto se cumple y ocurre una presión inferior a la mínima de 10 psi en marcha mínima, las opciones son aceite con viscosidad inferior a la definida por el fabricante u ocurre desgaste en la bomba, lo cual puede medirse indirectamente a través de la presión en la galería del aceite de lubricación del motor. La figura 29 presenta los valores del parámetro de presión en la bomba de aceite.

Figura 33. Datos de presión para la bomba de aceite de lubricación. [1].

Oil Pressure	
• Low Idle (minimum allowable)	69 kPa [10 psi]
• Rated Speed (minimum allowable)	207 kPa [30 psi]
Fuel Filter Restriction (Maximum pressure drop across filter)	
• Dirty Filter	35 kPa [5 psi]
Fuel Return Restriction (Maximum)	518 mm Hg [20.4 in hg]
NOTE: Due to variations in ratings of different engine models, refer to the specific engine data sheet for the particular engine model being tested.	

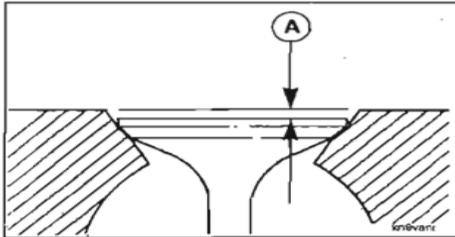
Para el caso de presión del aceite de lubricación superior a 30 psi a 1800 rpm en el supuesto de ajuste y aceite correctos, indican filtro de aceite saturado de contaminantes.

4.5.5. Sistema de balancines y válvulas.

La figura 34 presenta las medidas límites para válvulas en un motor nuevo según el manual de taller Cummins. A medida que ocurre desgaste en las caras de contacto de las válvulas y/o asientos de estas, estas medidas cambian. Sin embargo, estas mediciones solo pueden realizarse con motor desarmado. Por esto, para fines de mantenimiento predictivo se cambia una medida posible de obtener sin desarmar un motor en evaluación.

Figura 34. Medidas límites para válvulas ensambladas en la culata. [1].

Cylinder Head Group 2 B Series Shop Manual			Valve Seats Grinding (2-12) Page 2-17	
The valve depth is the distance from the valve face to the head deck.				
Record the depth of each valve as (A).				
Valve Depth				
mm	MIN	MAX	in	
0.99			0.039	
1.52			0.060	
If valve depth does not meet specification the valve seat must be replaced.				



La figura 35 presenta esta medición alterna y posible de realizar con motor armado. la altura de referencia mostrada en la figura es de 49,35 mm medida con un micrómetro de caratula mostrado en el anexo C.

A medida que ocurre desgaste en la cara de válvulas y / o asientos esta medida aumenta y el límite máximo determinado con medida en culata con problemas iniciales de sellado es de 52,25 mm. Por esto, realizando mediciones periódicas puede determinarse de modo predictivo el estado de estas piezas. Se observa en la figura 30 que no es estrictamente necesario desmontar los balancines para medir este parámetro.

Figura 35. Medición predictiva del desgaste en válvulas y asientos.



La tabla 15 resume los componentes y los parámetros de medición predictiva. Todas las mediciones predictivas propuestas pueden realizarse periódicamente, logrando minimizar los costos de implementación.

Tabla 15. Parámetros para medición de componentes críticos.

Componente	Parámetros	Tecnología
Cigüeñal	<ul style="list-style-type: none"> • Grietas en el cigüeñal • Balanceo del cigüeñal 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibraciones con equipos Windrock • Ultrasonido

Pistones	<ul style="list-style-type: none"> • Holguras en anillos • Holguras pistón - camisa • Partículas de desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrasonido • Vibraciones • Análisis de aceite
Cojinetes de biela	<ul style="list-style-type: none"> • Holgura cojinetes cigüeñal 	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrasonido
Bomba de aceite	<ul style="list-style-type: none"> • Presión • Cavitación 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de presión • Ultrasonido
Sistema de enfriamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura refrigerante 	<ul style="list-style-type: none"> • Termografía
Sistema de balancines y válvulas	<ul style="list-style-type: none"> • Altura válvulas • Huelgo válvulas – balancines 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de desgaste

4.6. Análisis Técnico Económico Del Proyecto Sistema De Mantenimiento Predictivo.

Para la evaluación técnico económico del Proyecto “Sistema de Mantenimiento Predictivo Motores Diesel Cummins 6BTA 5.9”, se ha tomado en consideración los siguientes aspectos:

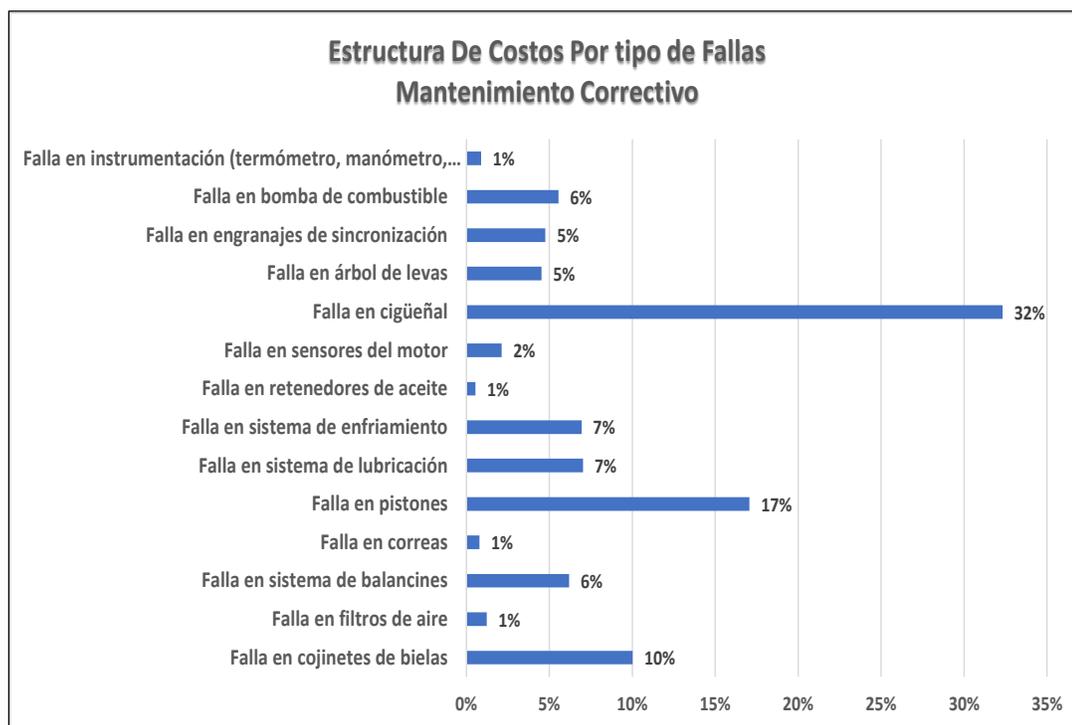
4.7. Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento correctivo.

Los costos totales anual que genera el sistema de mantenimiento correctivo que actualmente utiliza la empresa asciende a la suma de 881.800.000 COP anuales (ver tabla 16), los costos más representativos son: Falla en cigüeñal con un 32%, Falla en pistones 17%, Falla en cojinetes 10% para un acumulado del 59% y en otros diversos de menor porcentaje el 41% del costo total (ver figura 36), También se puede apreciar que con este sistema se presentan 586 fallas anuales de los cuales el 18% corresponde a fallas en cojinetes, 15% fallas en filtro de aire, 14% fallas en balancines, 10 % fallas en correas para un subtotal del 57% y el 43% corresponde a otras fallas por razones diversas (ver figura 37). Estas fallas ocasionan TFS (tiempo fuera de servicio) de 5 eventos mensuales, 60 eventos al año, en cada evento se deja de realizar dos operaciones de servicios y cada operación tiene un costo aproximado 2.500 USD por lo cual cada evento por TFS tiene un costo aproximado de 5.000 USD y mensualmente ocurren en promedio 5 eventos mensuales lo cual acarrea un lucro cesante de 25.000 USD mensuales y 300.000 USD anuales que aun tipo de cambio del día 4.056,33 COP por 1 USD, que al año es de 1.216.899.000 COP por concepto de lucro cesante o ingresos dejados de percibir por concepto de servicios dejados de prestar.

Tabla 16. Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento correctivo.

Descripción de falla	Frecuencia	Porcentaje frecuencia de ocurrencia	Costo unitario c.o.p	Costo total c.o.p	Pocentaje
Falla en cojinetes de bielas	104	18%	850.000	88.400.000	10%
Falla en filtros de aire	90	15%	120.000	10.800.000	1%
Falla en sistema de balancines	84	14%	650.000	54.600.000	6%
Falla en correas	58	10%	120.000	6.950.000	1%
Falla en pistones	43	7%	3.500.000	150.500.000	17%
Falla en sistema de lubricación	40	7%	1.550.000	62.000.000	7%
Falla en sistema de enfriamiento	34	6%	1.800.000	61.200.000	7%
Falla en retenedores de aceite	32	5%	150.000	4.800.000	1%
Falla en sensores del motor	25	4%	750.000	18.750.000	2%
Falla en cigüeñal	19	3%	15.000.000	285.000.000	32%
Falla en árbol de levas	16	3%	2.500.000	40.000.000	5%
Falla en engranajes de sincronización	15	3%	2.800.000	42.000.000	5%
Falla en bomba de combustible	14	2%	3.500.000	49.000.000	6%
Falla en instrumentación (termómetro, manómetro, amperímetro)	12	2%	650.000	7.800.000	1%
Total	586	100%	33.940.000	881.800.000	100%

Figura 36. Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento correctivo.



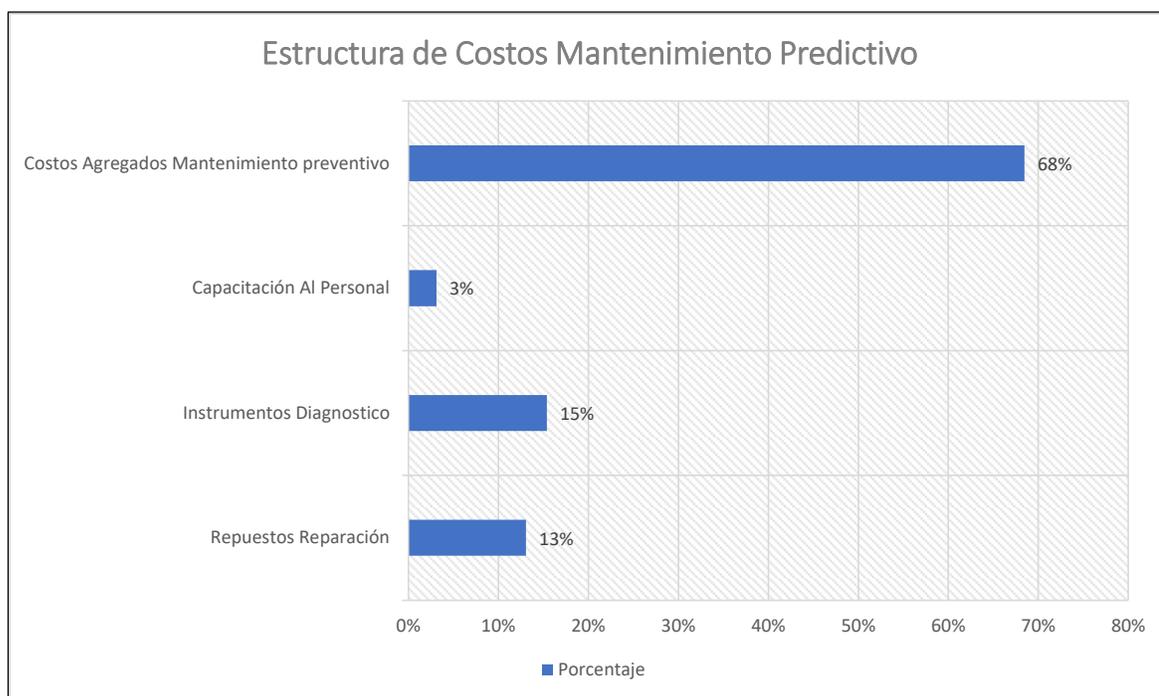
4.8. Estructura de Costos por Tipo de Falla Mantenimiento Predictivo.

Los costos totales anual que genera el sistema de mantenimiento predictivo que es el proyecto objeto de evaluación asciende a la suma de 322.450.000 COP anuales, distribuidos porcentualmente en 13% Costos repuestos reparación, 15% en actividades de diagnóstico, 3% capacitación al personal técnico y 68 % en Costos agregados por mantenimiento preventivo que se reduce a un 25 % del costo total del mantenimiento correctivo (ver tabla 17 y figura 37).

Tabla 17. Estructura de Costos Mantenimiento Predictivo.

COSTOS MANTENIMIENTO PREDICTIVO					
Costos Repuestos					
Actividad predictiva	Componente	Costo unitario	Cantidad	Costo de actividad	Porcentaje
Medición con equipos Windrock	Cigüeñal	15.000.000	2	30.000.000	
Medición con equipos Windrock	Pistones	3.500.000	2	7.000.000	
Medición del desgaste	Cojinetes de bielas	850.000	2	1.500.000	
Medición de presión	Bomba de aceite	500000	2	1.000.000	
Medición del desgaste	Sistema de balancines y válvulas	650.000	4	2.600.000	
Sub Total Costo Respuestos				42.100.000	
Costos Instrumentos De Diagnostico					
Diagnostico	Analizador de vibration	22.000.000	1	22.000.000	
	Camara thermographic	15.000.000	1	15.000.000	
	Medidor ultrasonido	5.000.000	1	5.000.000	
	Medidor de presion	4.000.000	1	4.000.000	
	kit de ensayo para aceite	2.500.000	1	2.500.000	
	Boroscopio portátil	1.000.000	1	1.000.000	
Sub Total Costos Instrumentos de diagnostico				49.500.000	15%
Costos de Capacitación Personal Técnico					
Analysis de vibration	Capacitación de personal técnico	10.000.000	1	10.000.000	3%
Costos agregados por mantenimiento preventivo que se reduce al 25% del costo del mantenimiento correctivo				220.450.000	68%
Total Costos Mantenimineto Predictivo				322.050.000	100%

Figura 37. Estructura de Costos Mantenimiento Predictivo.



4.9.Comparativo Beneficio Del Proyecto Versus Costos De los Sistemas De Mantenimiento correctivo y mantenimiento Predictivo.

Constituyen beneficios del proyecto de mantenimiento predictivo los beneficios por diferencia de costos generados en el mantenimiento correctivo que ascienden a 881.800.000 COP anuales en tanto que los costos del proyecto mantenimiento predictivo ascienden a 322.050.000 COP por lo cual la implementación del nuevo sistema generaría un beneficio de 559.750.000; además de los beneficios generados por evitar TFS que genera un lucro cesante del orden de 1.216.899.000 COP anuales en total la implementación del nuevo sistema generaría beneficios anuales por el orden de 1.776.649.000 COP. En caso de implementarse el nuevo sistema la relación beneficio costo sería 5 es decir por cada COP de costo se tendría 5 COP de beneficios. En términos porcentuales un 552%, Por otra parte, comparando los beneficios del nuevo proyecto frente a los costos de mantenimiento correctivo del sistema actual nos da una relación beneficio costo de 2 es quiere decir que por cada COP de costo los beneficios de nuevo proyecto frente a los costos del sistema vigente sería de 2 COP que en términos porcentuales sería del 201% (ver tabla 18). De lo cual se concluye que en ambos casos en el mantenimiento correctivo o en el mantenimiento predictivo los beneficios del nuevo proyecto son mayores que sus costos lo cual económicamente hace viable económicamente la implementación del nuevo sistema.

Tabla 18. Relación Beneficio Costo Del Sistema De Mantenimiento Predictivo.

CONCEPTO	PARCIAL	TOTAL	R(B/C)
COSTOS			
Alternativa Actual - Mantenimiento correctivo		881.800.000	201%
Costos agregados mantenimiento correctivo	881.800.000		
Alternativa Nueva - Mantenimiento predictivo		322.050.000	552%
Costos agregados mantenimiento predictivo	101.600.000		
Costos agregados mantenimiento preventivo se reduce al 25% del mantenimiento correctivo	220.450.000		
BENEFICIOS DEL PROYECTO			
Beneficios por sustitución de sistema		559.750.000	
Por evitar el lucro cesante por el tiempo fuera de servicios de la maquinaria		1.216.899.000	
TOTAL BENEFICIOS DEL PROYECTO		1.776.649.000	100%

5. CONCLUSION

En relación con los objetivos específicos se definen lo siguiente.

- Objetivo 1, Se revisaron el accionar de los mecánicos y los posibles procedimientos existentes, identificando que estos técnicos realizan sus trabajos con base en su experiencia y parámetros genéricos según define el manual de operaciones de taller para estos motores especialmente en relación con los ajustes, pero no existe ni definen un procedimiento de diagnóstico, lo que implica cambiar componentes que aun poseen una vida útil residual que se pierde. Por ello, se ha propuesto un proceso lógico de diagnóstico que permite detectar las piezas dañadas reduciendo el tiempo de detección y reparación, lo que acorta el tiempo por lucro cesante de los barcos en servicio.
- Objetivo 2, En relación con las tecnologías de mantenimiento predictivo, se identifica mediante análisis de Pareto los componentes críticos en relación con los costos por reparación y lucro cesante. Posteriormente se definen los parámetros predictivos relevantes por componente crítico: cigüeñal, pistones, cojinetes de biela en muñón, bomba de aceite y sistema de balancines y válvulas. En relación con el análisis de vibración y ultrasonido se propone utilizar la tecnología del fabricante de equipos de diagnóstico Windrock que es especializado para el diagnóstico de motores alternativos multi cilíndricos, el cual, además de la transformada rápida de Fourier para presentar los perfiles amplitud de velocidad – frecuencia, permite mediante un software adicional identificar los valores de amplitud y frecuencia con piezas individuales específicas de un motor. Por ejemplo, de seis bielas iguales numeradas del 1 hasta el 6, este sistema es capaz de identificar el huelgo de cada una de manera específica, permitiendo separar la influencia de las piezas por su sola frecuencia que es lo que entrega aplicar únicamente el análisis de la transformada de Fourier.
- Objetivo 3, Mediante una metodología propuesta, se define la combinación de tecnologías predictivas que se aplican a la evaluación predictiva de un motor de combustión tipo alternativo, resaltando en esta aplicación la medición directa de desgaste por considerarla más acertada que el análisis de vibración ultrasonido. Por todas las consideraciones técnicas explicadas con anterioridad el proyecto es factible desde el punto de vista técnico.
- Objetivo 4, En lo concerniente al análisis técnico económico del proyecto sistema de mantenimiento predictivo, se concluye que desde el punto de vista económico financiero es factible dado que la implementación del sistema de mantenimiento predictivo generará beneficios anuales por el orden de 1.776.649.000 COP. Con una

relación beneficio costo de 5 COP es decir que por cada COP de costos el nuevo sistema genera 5 COP de beneficios. En términos porcentuales generaría beneficios por el orden de 552% sobre sus costos.

6. RECOMENDACION

- Implementar software de analítica predictiva para la trazabilidad de los datos
- Documentar los conocimientos sobre los procesos y sistematizar
- Continuar capacitaciones del personal técnico con nuevas tecnologías del mercado
- Contar con herramientas confiables para las mediciones de variables
- Conseguir procesos de desarrollo y optimizar los procesos de mantenimiento
- No sobrepasar las horas del mantenimiento preventivo
- Monitorización del funcionamiento del motor después del mantenimiento
- Consolidar los indicadores de mantenimiento como practica para mejorar
- Democratizar los datos y comunicarse de manera efectiva
- Incrementar la satisfacción del cliente y brindar un servicio de calidad

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual de Taller Cummins. Año 2018.
- [2] Anubla E, Domínguez D y Pérez M. Desarrollo e implementación de mantenimiento predictivo en los motores Diesel de vehículos s/592. Universidad de Coruña. Unidad de mantenimiento integral de trenes. Año 2019.
- [3] Guaman H y Ávila O. “Análisis de la degradación y vida útil del lubricante motor, en un vehículo modelo actross 3353S mediante ensayos de viscosidad y TBN”. de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Año 2014.
- [4] González D Y Pizarro J, “Mantenimiento predictivo de motores Diesel marinos mediante correlación de imágenes termográficas y análisis de vibraciones. de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Año 2010.
- [5] Viñuela J. “Análisis de vibraciones y ultrasonido en motores MACI (motores alternativos de combustión interna)”. De la Universidad de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, España. Año 2014.
- [6] Olarte c., William; Botero y A., Marcela. “La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo”. Universidad de Pereira, año 2011.
- [7] NORMA ISO 2372-10816.
- [8] MOUBRAY John. RCM ii Reability- Centered Maintenance. Second edition
- [9] WOWK Victor. Machinery Vibración Measurement and Análisis. Mc Graw Hill. 1995.
- [10] Palomino Marín Evelio. La Medición y el Análisis de Vibraciones en el Diagnostico de Maquinas Rotatorias. División de INGENIERIA DE LAS VIBRACIONES Y DIAGNOSTICO. Cuba, 1997.
- [11] Minor de Mantenimiento industrial. módulo de mantenimiento industrial. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- [12] Newport, R. - "Analizing Mechanical systems using Infrared Thermography". International Maintenance Congress EFNMS. Swenden - 2000.
- [13] F. V. Tinaut, A. Melgar, A.J. Horrillo, «Faults Detection in reciprocating interna [combustión engine from instantaneus engine speecl>> International Congres on Combustion Engines 1.998.
- [14] Sánchez Ana M Técnicas de mantenimiento predictivo. Metodología de aplicación en las organizaciones. Trabajo de grado. Universidad católica de Colombia. Año 2017.
- [15] Arévalo David. Propuesta del mantenimiento para el equipo pesado de la constructora coandes s.a basado en el análisis de aceites. Trabajo de grado. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Año 2015.
- [16] Cornelius Scheffer. Machinery Vibrations Analysis and. predictive maintenace. Elseiver. 2004.
- [17] NORMA ISO 20283-5:201

ANEXO A

A continuación, se expresa textualmente lo expresado por el fabricante de equipos para medir y analizar vibraciones en motores de combustión interna tipo Otto y Diesel.

“A diferencia de las máquinas rotativas, las máquinas alternativas (motores de explosión, compresores a pistón y bombas de desplazamiento positivo) no son susceptibles de aplicar el análisis espectral FFT de vibraciones para el control de su condición operativa y la detección prematura de fallos mecánicos. En una máquina alternativa de varios cilindros, el espectro de vibraciones es tan nutrido que no pueden desprenderse resultados concluyentes de su análisis.

Para estos casos se utiliza equipos Windrock, los cuales ofrecen sus sistemas portátiles 6300 (Off-line) como permanentes 6100 (On-line), que basan todo su potencial en diagnósticos del análisis multicanal y congelación de variables en el tiempo o ángulo del cigüeñal: Presión, Vibración, Ultrasonido, Encendido, Cinemática rotacional, etc. Los defectos mecánicos y operacionales que pueden ser detectados en motores de explosión con los sistemas Windrock son: - Desequilibrio de presiones de encendido - Fugas en válvulas y segmentos de pistón - Camisas de cilindro desgastadas o rayadas - Defectos en articulaciones de bielas - Daños en apoyos de cojinetes - Defectos en turbo - cargadores y bombas de agua y aceite - Exceso de vibración en la estructura de bancada”.

El fabricante de estos equipos expresa que sus equipos combinan lecturas de vibración y ultrasonido para detectar problemas mecánicos y eléctricos en motores de combustión interna, define claramente que en estos motores el espectro de vibración de amplitud versus tiempo es muy complejo y adicional a la transformada de Fourier han desarrollado un software especial para generar el perfil amplitud versus frecuencia que permite identificar cada componente del motor y el valor límite de amplitud teniendo como referentes las tolerancias que cada fabricante expresa en su correspondiente manual de taller, lo cual permite realizar de manera precisa y confiable una medición y análisis del estado mecánico de piezas como: cigüeñal incluyendo grietas y desbalanceo, huelgo de biela en pasador de pistón y muñón de cigüeñal, Daño en ranuras de anillo y huelgo pistón – camisa, incluyendo detección de huelgo excesivo en balancines y válvulas.

ANEXO B. IDENTIFICACIÓN DEL MOTOR. [1].

MADE IN GREAT BRITAIN BY CUMMINS INC. www.cummins.com		1 of 2	Engine No. 22502003	EPA	FEL	CARB
Date of Mfg 07OCT21		Model 6BT5.9-DM	Family 402	NOx + NMHC		NOx + NMHC
CPL 1523	FR90437	CID/L 359 / 5.9	E/C		PM	PM
Ref No. JV-M5 9-MXDR-PR-01		Valve Lash Cold 0.254 Int 0.508 Exh		Timing - TDC		LINE ON LINE
		Fuel rate at adv. HP/kW 102mm ³ /st		Firing Order		1 5 3 6 2 4
		Gross kW 91 at 1500 rpm		Idle Speed (rpm)		1050
ECS						



5619553
2 of 2
22502003

EX-EMP ENGINE NOT FOR USE IN EU NON-ROAD MOBILE MACHINERY

WARNING: Injury may result and warranty is voided if fuel rate, rpm or altitudes exceed published maximum values for this model and application.

Automotive Engine Nomenclature

The model name for Automotive engines provides the following engine data:

B 5.9 190

└───┘

└───┘

└───┘

Horsepower Rating

Displacement in Liters

Engine Series

