

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE ENERGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD PARA MEJORAR LA
DISPONIBILIDAD DE LOS MOTORES
CATERPILLAR 3516 DE LOS GRUPOS
ELECTRÓGENOS DE UNA REFINERÍA DE
PETRÓLEO IQUITOS - PERÚ

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO

RAÚL HUMBERTO ALVAREZ CAYCHO

Callao, 2018

PERÚ

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el auditorio Ausero Rojas Saldaña de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía, sito Av. Juan Pablo II N° 306, Bellavista - Callao, siendo las 8.10 del día miércoles 12 de diciembre de 2018, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador del I Ciclo de Tesis - Titulación por la modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis- de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía de la Universidad Nacional del Callao.

- Dr. Ing. Oscar Teodoro Tacza Casallo : Presidente
- Dr. Ing. Napoleón Jáuregui Nongrados : Secretario
- Dr. Ing. Pablo Mamani Calla : Vocal
- Mg. Ing. Yasser Hipólito Yarin Achachagua : Suplente

Designados por Resolución de Consejo de Facultad N° 155-2018-CF-FIME de fecha 24 de noviembre de 2018 y Resolución de Consejo de Facultad N° 162-2018-D-FIME a fin de proceder al acto de evaluación de la Tesis titulada: **"PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS MOTORES CATERPILLAR 3516 DE LOS GRUPOS ELECTROGENOS DE UNA REFINERÍA DE PETROLEO IQUITOS - PERÚ"**, presentada por el señor Bachiller **ALVAREZ CAYCHO RAÚL HUMBERTO**.

Contando con la presencia del Supervisor General, Decano de la Facultad de Ciencias Administrativas Dr. Hernán Ávila Morales, Supervisor de la FIME, Dr. José Hugo Tezén Campos y el representante de la Comisión de Grados y Títulos Ing. Juan Adolfo Bravo Felix.

A continuación, se dio inicio a la sustentación de la Tesis de acuerdo a lo normado en los numerales del 10.1 al 10.4 del capítulo X de la Directiva para la Titulación Profesional por la modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis en la Universidad Nacional del Callao, aprobada por Resolución Rectoral N° 754-2013-R del 21 de agosto de 2013, modificada por la Resolución Rectoral N° 777-2013-R de fecha 29 de agosto de 2013 y la Resolución Rectoral N° 281-2014-R del 14 de abril de 2014 con la que se modifica el Art. 4.5 del capítulo IV de la organización del Ciclo de Tesis, así como lo normado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU de fecha 30 de octubre de 2018.

Culminado el acto de sustentación, los señores miembros del Jurado Evaluador procedieron a formular las preguntas al indicado bachiller.

Luego de un cuarto de intermedio, para la deliberación en privado del Jurado respecto a la evaluación de la Tesis, se **ACORDÓ: CALIFICAR** la tesis sustentada por el señor bachiller **ALVAREZ CAYCHO RAÚL HUMBERTO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico por la modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, según la puntuación cuantitativa y cualitativa que a continuación se indica:

CALIFICACIÓN CUANTITATIVA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
16	Muy Buena

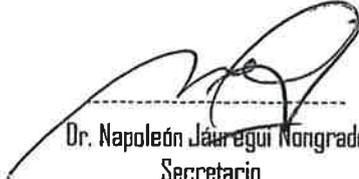
Finalmente, se procedió a leer en público el acta de sustentación.

Siendo las 8.35 del día miércoles doce de diciembre del dos mil dieciocho, el señor Presidente del Jurado Evaluador dio por concluido el acto de sustentación de Tesis.

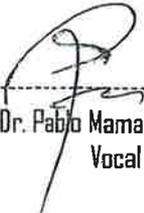
En señal de conformidad con lo actuado, se levanta la presente acta.



Dr. Oscar Teodoro Tacza Casallo
Presidente



Dr. Napoleón Jáuregui Nongrados
Secretario



Dr. Pablo Mamani Calla
Vocal



Mg. Yasser Hipólito Yarin Achachagua
Suplente

DEDICATORIA

A todos mis seres queridos que me brindaron su apoyo incondicional en mi proceso de obtención del título de ingeniero mecánico.

AGRADECIMIENTO

A todo el personal técnico de mantenimiento de la Refinería Iquitos por su apoyo en la etapa de mis prácticas profesionales.

Al Jefe Víctor Falla, los supervisores George Dávalos, Yovany Falla y Luis Tejada, por compartir conmigo su experiencia en los temas de mantenimiento en la Refinería Iquitos.

A mi jefe actual Lizandro Atuncar por transmitirme sus conocimientos sobre mantenimiento y confiabilidad.

ÍNDICE

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2.1. Problema general	14
1.2.2. Problemas específicos	14
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
1.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.4.1. Delimitante teórica	14
1.4.2. Delimitante temporal	15
1.4.3. Delimitante espacial	15
1.5. JUSTIFICACIÓN	15
1.5.1. Justificación teórica	15
1.5.2. Justificación tecnológica	15
1.5.3. Justificación económica	15
1.5.4. Justificación legal	16
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	17
2.1. ANTECEDENTES	17
2.2.1. Matriz internacional	17
2.2.2. Matriz nacional	20

2.2.	MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	24
2.2.1.	Marco teórico	24
2.2.2.	Marco conceptual	48
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	50
CAPITULO III HIPÓTESIS Y VARIABLES		54
3.1.	HIPÓTESIS	54
3.1.1.	Hipótesis general	54
3.1.2.	Hipótesis específicas	54
3.2.	DEFINICIÓN DE VARIABLES	54
3.2.1.	Variable independiente:	54
3.2.2.	Variable dependiente:	54
3.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	55
CAPITULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		56
4.1.	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	56
4.1.1.	Parámetros de diseño	56
4.1.2.	Etapas de diseño	59
4.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA	60
4.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN DOCUMENTAL	60
4.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO	60
4.5.	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS	61
4.5.1.	Determinación de la disponibilidad inicial	61
4.5.2.	Determinación de la falla con mayor frecuencia	62
4.5.3.	Selección del equipo de trabajo	64
4.5.4.	Determinación del sistema de la investigación	65
4.5.5.	Descripción de los sub-sistemas de la investigación	67

4.5.6. Determinación del contexto operacional	83
4.5.7. Desarrollo del AMEF	83
4.5.8. El diagrama de decisión	89
CAPITULO V RESULTADOS	94
CAPITULO VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
6.1. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	98
6.2. CONTRASTACIÓN DE LOS RESULTADOS CON ESTUDIOS SIMILARES	98
6.3. RESPONSABILIDAD ÉTICA	99
CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXOS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 2.1: NUEVAS EXPECTATIVAS DEL MANTENIMIENTO.....	26
FIGURA N° 2.2: CAMBIOS EN LOS PUNTOS DE VISTA SOBRE LAS FALLAS DE UN EQUIPO	27
FIGURA N° 2.3: CAMBIOS EN LAS TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO	28
FIGURA N° 2.4: PROCESO DEL RCM.....	31
FIGURA N° 2.5: EL GRUPO DE REVISIÓN DEL RCM.....	32
FIGURA N° 2.6: SISTEMAS REDUNDANTES	34
FIGURA N° 2.7: EL PUNTO DE VISTA TRADICIONAL DE LAS FALLAS	39
FIGURA N° 2.8: SEIS MODELOS DE FALLA.....	40
FIGURA N° 2.9: MODOS DE FALLA DE UNA BOMBA.....	44
FIGURA N° 2.10: HOJA DE DECISIÓN DEL RCM.....	45
FIGURA N° 2.11: EL INTERVALO P-F	49
FIGURA N° 4.1: TIEMPOS DE DISEÑO	57
FIGURA N° 4.2: PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO.....	58
FIGURA N° 4.3: SISTEMA EN SERIE	59
FIGURA N° 4.4: SISTEMA EN PARALELO	59
FIGURA N° 4.5: DIAGRAMA DE PARETO MOTOR 322-K-1D	62
FIGURA N° 4.6: DIAGRAMA DE PARETO MOTOR 322-K-1D	63
FIGURA N° 4.7: EQUIPO DE TRABAJO RCM	64
FIGURA N° 4.8: CARACTERÍSTICAS DE UN GEE DE LA SERIE 3500	66
FIGURA N° 4.9: SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE	67
FIGURA N° 4.10: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	71
FIGURA N° 4.11: SISTEMA DE LUBRICACIÓN.....	74
FIGURA N° 4.12: SISTEMA DE COMBUSTIBLE	78
FIGURA N° 4.13: SISTEMA DE ARRANQUE NEUMÁTICO	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN N° 4.1: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1D (GRUPO 4).....	66
ILUSTRACIÓN N° 4.2: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1E (GRUPO 5).....	67
ILUSTRACIÓN N°4.3: TURBOCOMPRESORES DEL MOTOR	68
ILUSTRACIÓN N° 4.4: COLECTOR DE ESCAPE DEL MOTOR	69
ILUSTRACIÓN N° 4.5: POST ENFRIADOR DEL MOTOR CAT 3516.....	69
ILUSTRACIÓN N° 4.6: CULATA DE CADA CILINDRO DEL MOTOR.....	70
ILUSTRACIÓN N° 4.7: BOMBA DE AGUA DEL MOTOR CAT 3516.....	72
ILUSTRACIÓN N° 4.8: ENFRIADOR DE ACEITE DEL MOTOR.....	73
ILUSTRACIÓN N° 4.9: CARCASA DEL REGULADOR DE TEMPERATURA	73
ILUSTRACIÓN N° 4.10: BOMBA DE ACEITE DEL MOTOR CAT 3516.....	75
ILUSTRACIÓN N° 4.11: FILTRO DE ACEITE DEL MOTOR CAT 3516	76
ILUSTRACIÓN N° 4.12: ENGRANAJES TRASEROS DEL MOTOR CAT 3516.	77
ILUSTRACIÓN N° 4.13: FILTROS SEPARADORES DE AGUA DEL MOTOR ..	79
ILUSTRACIÓN N° 4.14: BOMBA DE CEBA Y FILTRO DE COMBUSTIBLE.....	79
ILUSTRACIÓN N° 4.15: COLECTOR DE COMBUSTIBLE.....	80
ILUSTRACIÓN N° 4.16: INYECTOR DE COMBUSTIBLE	80
ILUSTRACIÓN N° 4.17: COMPRESOR Y TANQUES PULMÓN.....	82
ILUSTRACIÓN N° 4.18: POSICIÓN DEL ARRANCADOR EN EL MOTOR	82

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 4.1: DISPONIBILIDAD ANUAL DEL MOTOR 322-K-1D.....	61
TABLA N° 4.2: DISPONIBILIDAD ANUAL DEL MOTOR 322-K-1E.....	61
TABLA N° 4.3: DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA	61
TABLA N° 4.4: FRECUENCIA DE FALLAS EN EL MOTOR 322-K-1D	62
TABLA N° 4.5: FRECUENCIA DE FALLAS EN EL MOTOR 322-K-1E	63
TABLA N° 4.6: HOJA DE INFORMACIÓN – ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE ..	84
TABLA N° 4.7: HOJA DE INFORMACIÓN - REFRIGERACIÓN.....	85
TABLA N° 4.8: HOJA DE INFORMACIÓN - LUBRICACIÓN	86
TABLA N° 4.9: HOJA DE INFORMACIÓN - COMBUSTIBLE	87
TABLA N° 4.10: HOJA DE INFORMACIÓN - ARRANQUE	88
TABLA N° 4.11: HOJA DE DECISIÓN – ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE	89
TABLA N° 4.12: HOJA DE DECISIÓN - REFRIGERACIÓN	90
TABLA N° 4.13: HOJA DE DECISIÓN - LUBRICACIÓN	91
TABLA N° 4.14: HOJA DE DECISIÓN - COMBUSTIBLE	92
TABLA N° 4.15: HOJA DE DECISIÓN - ARRANQUE.....	93
TABLA N° 5.1: PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS MOTORES CAT 3516 ...	94
TABLA N° 5.2: CONTROL DE PARÁMETROS MOTOR 3516	95
TABLA N° 5.3: CHECK LIST MOTOR CAT 3516	96
TABLA N° 5.4: DISPONIBILIDAD 2017 MOTOR 322-K-1D.....	97
TABLA N° 5.5: DISPONIBILIDAD 2017 MOTOR 322-K-1E.....	97
TABLA N° 5.6: DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA 2017	97

RESUMEN

La presente investigación es de tipo tecnológica, de diseño no experimental, la cual se basa en la elaboración de un plan de mantenimiento aplicando la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en dos motores CAT 3516, puesto que por ser unos de los equipos críticos de la Refinería Iquitos y los encargados de generar toda la energía para el proceso, estos motores deben estar disponibles siempre que se requiera.

El objetivo general de esta investigación es diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos, determinando el grupo de trabajo de RCM, conociendo el contexto operacional del equipo y analizando las funciones, fallas funcionales y los posibles modos y efectos de falla de los principales sistemas que componen al motor, para luego, mediante el diagrama de decisión, determinar las tareas de mantenimiento y la periodicidad de cada tarea para la elaboración del plan de mantenimiento.

Los resultados obtenidos fueron que, mediante la aplicación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, se logró aumentar la disponibilidad de los motores, reduciendo el tiempo de reparación y aumentando el tiempo medio entre fallas, donde se concluye que el índice de disponibilidad aumentó en un 1.4% para el sistema de generación con respecto al promedio de la disponibilidad de los años de evaluación, siendo un 9.4% de aumento para el grupo 322-K-1D y un 9.7% para el grupo 322-K-1E.

Palabras Clave: Plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, disponibilidad, tiempo medio entre fallas, tiempo medio para reparar.

ABSTRACT

The present investigation is of technological type, of non-experimental design, which is based on the elaboration of a maintenance plan applying the methodology of maintenance centered on reliability (RCM) in two CAT 3516 engines since being one of the critical equipment of the Iquitos Refinery and those in charge of generating all the energy for the process, these engines must be available whenever required.

The general objective of this research is to design a maintenance plan focused on the reliability to improve the availability of the CAT 3516 engines of the Iquitos Refinery generating sets, determining the working group of RCM, knowing the operational context of the equipment and analyzing the functions, functional failures and the possible modes and effects of failure of the main systems that make up the engine and then through the decision diagram determine the maintenance tasks and the periodicity of each task for the preparation of the maintenance plan.

The results obtained were that by applying the maintenance plan focused on the reliability, it was possible to increase the availability of the motors, reducing the repair time and increasing the mean time between failures, where it is concluded that the availability index increased by 1.4 % for the generation system with respect to the average of the availability of the evaluation years, being a 9.4% increase for the group 322-K-1D and 9.7% for the group 322-K-1E.

Keywords: Reliability centered maintenance plan, availability, average time between failures, average time to repair.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen muchas empresas que cuentan con un propio sistema de generación de energía eléctrica debido a que sus instalaciones se encuentran en lugares donde no es fácil obtener un suministro de energía, o porque desean tener esta energía en caso de emergencia para la operación de sus equipos. La alternativa más rápida de conseguir esta energía es por la adquisición de grupos electrógenos (GGEE), los mismos que utilizan el proceso de combustión para generar la energía que el usuario requiera dependiendo de la capacidad de este equipo.

Tener estos grupos electrógenos operativos implica una alta responsabilidad para los responsables de operación y mantenimiento, aunque muchas veces no son cumplidas porque se realizan malas prácticas de manutención u operación y la reparación de estos GGEE puede alcanzar un monto que, en la mayoría de los casos, escapa de los presupuestos de mantenimiento por la especialidad del servicio que requiere.

Es por ello que, una buena metodología de mantenimiento aplicada en estos equipos, es de suma importancia, para tener una disponibilidad elevada; si existiese alguna falla en estos equipos, las consecuencias se traducen en la pérdida de producción y esto a su vez en una pérdida de dinero para la empresa. Es importante tener la confiabilidad de que estos equipos no fallen durante su proceso de operación con la finalidad de que la empresa se enfoque en las mejoras de sus procesos y no se preocupe porque sus equipos generadores operen de una manera confiable.

La presente tesis consta de seis capítulos. El primer capítulo trata sobre el planteamiento del problema que enfrenta la Refinería Iquitos en el área de generación con los grupos electrógenos, formulando el problema general: ¿De qué manera un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad mejora la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos

electrógenos de la Refinería Iquitos?, también se planteó el siguiente objetivo general: Diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos.

El segundo capítulo describe el marco teórico, estudiando tres antecedentes internacionales y tres nacionales referentes a esta investigación; además de la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad, cuya traducción al inglés es “*reliability centered maintenance*” (RCM), y los términos abocados al estudio del RCM.

El tercer capítulo explica las hipótesis planteadas para resolver los problemas de esta investigación y las variables, tanto independiente como dependiente; teniendo como hipótesis general: “Con el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se podrá aumentar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos”.

El cuarto capítulo versa sobre el diseño metodológico, describiendo tipo y diseño de investigación, así como técnicas e instrumentos de recolección de datos y el análisis y procesamiento de los datos.

El capítulo cinco describe los resultados del desarrollo de la metodología RCM en los motores CAT 3516.

El sexto capítulo se muestra la discusión de los resultados para finalmente detallar las conclusiones y recomendaciones de esta investigación. Adicionalmente, se muestra como anexos: la matriz de consistencia, el diagrama de decisión del RCM y los históricos de fallas de los motores.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La Refinería Iquitos (RFIQ) de Petróleos del Perú Petroperú S.A. se localiza en el margen izquierdo del río Amazonas, a 14.5 kilómetros de la ciudad de Iquitos, capital de la provincia de Maynas, departamento de Loreto. Tiene una capacidad diseñada de procesamiento de 12 MBD (Miles de Barriles Diarios), fue construida el año 1982 con una inversión de 33 millones de dólares americanos a cargo de la Compañía TECPLANT Angoste de España, convirtiéndose en la refinería de mayor capacidad de producción del oriente Peruano, cubre la demanda de combustibles de los departamentos de Loreto, San Martín, el noroeste del Perú y parte de Ucayali. Atiende también a poblados fronterizos, como Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil).

Debido a su situación geográfica, esta refinería opera con su propia energía eléctrica proveniente de los grupos electrógenos 322-K-1D (Grupo N°4) y 322-K-1E (Grupo N°5), los cuales poseen una potencia de generación de 1125 KW y 1250 KW respectivamente, pero que operan a una potencia promedio de 950 KW y fueron adquiridos en los años 2004 y 2014 respectivamente.

Se realizó el overhaul al Grupo N°4 después de 11 años de su puesta en servicio, de igual manera se realizó un overhaul al Grupo N°5 en el 2016 por aplicación de malas prácticas de mantenimiento, que deterioraron el funcionamiento del motor en sus pocos años de operación. Estos grupos, por ser equipos críticos en la refinería, son de suma importancia que tengan una alta disponibilidad para alimentar de energía a la planta, considerando que la falla de uno de éstos puede causar que la capacidad de la planta disminuya y hasta la parada de planta total.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿De qué manera un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad mejora la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos?

1.2.2. Problemas específicos

P1: ¿De qué manera el análisis de modos y efectos de falla podrá reducir el tiempo de reparación de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos?

P2: ¿De qué manera la selección de las tareas de mantenimiento según el diagrama de decisión del RCM podrá aumentar los tiempos entre falla de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos.

1.3.2. Objetivos específicos

O1: Disminuir el tiempo de mantenimiento y reparación de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos.

O2: Obtener un aumento del tiempo medio entre fallas de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos.

1.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Delimitante teórica

El alcance de esta investigación abarca la propuesta de un plan de mantenimiento basado en la metodología de la confiabilidad aplicada a los motores de combustión interna CAT 3516 de los grupos electrógenos de la

Refinería Iquitos, analizando las funciones, modos de falla y efectos de falla de cada sistema que compone al motor.

1.4.2. Delimitante temporal

Los datos en estudio de esta investigación fueron tomados de la bitácora del operador de los grupos electrógenos durante el periodo de producción del 2014 al 2016.

1.4.3. Delimitante espacial

La presente investigación se desarrolla en la sala de Generación de la Refinería Iquitos, la cual está ubicada en el margen izquierdo del río Amazonas, en el departamento de Loreto - Perú.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. Justificación teórica

Esta investigación tiene como propósito aportar al conocimiento sobre análisis de confiabilidad aplicada al mantenimiento de los motores de combustión interna.

1.5.2. Justificación tecnológica

Debido a la evaluación tomada de la bitácora del operador de los grupos electrógenos, la implementación de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) garantizará una mejora en la disponibilidad de estos equipos.

1.5.3. Justificación económica

La inoperatividad de estos grupos electrógenos ocasionaría una pérdida económica considerable al no producir la cantidad de barriles diarios de capacidad de la planta.

1.5.4. Justificación legal

El buen mantenimiento de los motores de los GGEE repercute en la disminución de emisiones gaseosas contaminantes a la atmósfera gobernada por la norma del sistema de gestión ambiental ISO 14001.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.2.1. Matriz internacional

Vázquez Oyarzún, David Esteban en el año 2008, presentó la tesis titulada: **“Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM en motores Detroit 16V-149TI en Codelco división andina”** para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico en la Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería en la ciudad de Valdivia, donde se detalla:

La compañía minera Codelco posee tres grupos generadores de 1 MW de potencia cada uno y son accionados por tres motores Detroit Diesel 16V-149TI. Estos generadores son utilizados cuando se pierden los suministros de 66 y 220 KV del sistema interconectado, también como abastecimiento eléctrico de iluminación de emergencia y principalmente para disminuir la facturación por demanda eléctrica en las horas punta durante los meses de Abril y septiembre.

Por lo expuesto, la pérdida de las funciones de estos equipos durante una situación de emergencia eléctrica causaría serios problemas en los servicios eléctricos del sector industrial y una detención en los equipos críticos del proceso. La justificación fue que estos equipos tuvieron altos costos por mantenimiento y reparación y estuvieron fuera de servicio durante períodos prolongados.

El objetivo de la investigación fue elaborar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM para aumentar la disponibilidad de los motores Detroit Diesel 16V-149TI, de la sala de generación de emergencia en Codelco división andina.

La metodología aplicada fue el análisis RCM, es decir, se evaluaron los sistemas principales del motor, se realizaron los análisis de modos y efectos de falla y se desarrollaron hojas de decisión por cada sistema, determinando las tareas de mantenimiento, la frecuencia y la persona encargada a ejecutar. La información obtenida se introdujo en el software RCM Toolkit que administra todos los resultados de un análisis RCM.

Se pudo concluir que, por medio de la aplicación del RCM, la descomposición del equipo en sub sistemas para la descripción de funciones, determinación de los modos de falla y consecuencias de falla se determinaron las tareas a realizar en los motores de los generadores para la elaboración del plan de mantenimiento.

Cajas Maldonado, Carlos Alberto y Janeta Melo, Alberto Darwin en el año 2009, presentaron la tesis titulada: **“Planificación de mantenimiento basado en el método de confiabilidad RCM para motores estacionarios de la planta TERMOPICHINCHA S.A. Central Guangopolo”** para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico en la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica en la ciudad de Quito, donde se detalla:

La central termoeléctrica Guangopolo, ubicada en la zona más baja del valle de los Chillos en el cantón Quito a 2440 msnm, cuenta con 06 grupos generadores del tipo Mitsubishi MAN v9v 40/54 que generan 7.3 MW a nivel del mar cada uno, pero por su ubicación operacional trabajan a una potencia de 5.2 MW debido a la pérdida de potencia aproximada de 10% por cada 1000 metros de altura. Estos motores trabajaron a su máxima capacidad (5.2 MW) hasta el inicio del año 2007 pero se tomó la decisión de que operen a 5.1 MW para evitar alguna sobrecarga o falla de los sistemas por los años de trabajo. A inicios de ese año la producción se vio afectada por fallas funcionales producidas en 02 de estos motores, dejando pérdidas económicas para la empresa y reflejándose en una disminución

de la producción del año en mención. Frente a esta pérdida de generación, la empresa apostó por el cuidado y mantenimiento de los equipos para lograr disponer de ellos el mayor tiempo posible.

El objetivo de esta investigación fue la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad basado en las normas SAE JA1011 y SAE JA1012 a los motores estacionarios para aumentar su disponibilidad operacional.

La metodología fue la aplicación del proceso RCM, recolectando datos de modos y efectos de fallas de manuales, registros y del personal de mantenimiento y operación; explicando la forma de procesar y decidir sobre la información recolectada en la base de datos y mediante un algoritmo explícito en la norma SAE JA1012 se desarrollaron las tareas de mantenimiento apropiadas para disminuir o evitar las consecuencias de los modos de fallas.

Se llegó a la conclusión de que los modos de falla de los motores Mitsubishi v9v 40/54 fueron valorados por medio del mantenimiento centrado en confiabilidad, determinando que varios de los modos de falla son causados por la mala ejecución del mantenimiento, así como fallas en el arranque por malas prácticas en el mantenimiento correctivo.

Castillo Santillán, Ángel Vinicio en el año 2017, presentó la tesis titulada: **“Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema Power Oil de la estación Atacapi del B57-LI de Petroamazonas EP”** para obtener el grado de Magister en Gestión del Mantenimiento Industrial en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Instituto de Posgrado y Educación Continua en la ciudad de Riobamba, donde se detalla:

La unidad de bombeo horizontal multietapas HPS del sistema Power Oil, ubicada dentro del bloque 57 Libertador, provincia de Sucumbios, estación Atacapi, presentaba una alta tasa de fallas imprevistas, ocasionando que

el sistema esté inoperativo por tiempos prolongados, provocando pérdidas que comprometen a la producción de petróleo del campo.

La presente tesis tiene como objetivo realizar la propuesta de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) a la unidad de bombeo horizontal multietapas HPS del sistema Power Oil.

Se analizó el contexto operacional de los equipos que componen la unidad HPS, confirmando que estaban dentro de su contexto de diseño, se recaudaron los datos históricos del sistema de los años 2014 - 2015, determinando la tasa de fallas de los equipos y la unidad HPS, se valoró los modos de falla según la norma ISO 14224-2006, realizando el análisis de modos de falla (AMEF) y se aplicó el diagrama de decisión obteniendo las tareas propuestas para controlar cada uno de los modos de falla.

Se llegó a la conclusión que con la aplicación de la metodología RCM es factible la reducción de la tasa de fallas, obteniendo una mejora desde una tasa de fallos 0.00142 a 0.0006, con una mejora en el tiempo medio entre fallas de 29 a 69 días.

2.2.2. Matriz nacional

Da Costa Burga, Martin en el año 2010, presentó la tesis titulada: **“Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a motores a gas de dos tiempos en pozos de alta producción”**, para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería en la ciudad de Lima, donde se detalla:

La situación geográfica se encuentra ubicada en la zona del Lote X, distrito El Alto, departamento de Piura (Perú), se cuenta con una cantidad de 320 motores distribuidos en toda la superficie del lote. Estos motores activan las unidades de bombeo para la extracción del crudo y esta investigación se basó en los motores AJAX que operan en los pozos de tipo A de alta producción, los cuales son de clasificación crítica y por lo tanto, es necesario que su confiabilidad sea la mayor posible. Debido a la falta de

una estrategia de mantenimiento, se cuestionó si es posible calcular y mejorar los parámetros de confiabilidad que afectan a los motores de dos tiempos que funcionan en los pozos de alta producción con la aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

El objetivo de esta investigación fue calcular e identificar los parámetros característicos de los motores de combustión interna, determinando su vida útil, evaluando la confiabilidad de manera individual como del sistema para realizar mejoras en los mantenimientos preventivos y correctivos.

La metodología se basó en la identificación de los problemas que dificultan la eficiencia de los motores a través del análisis de modos y efectos de fallas, se estableció la criticidad de cada falla y su impacto en las metas de producción, mantenimiento y medio ambiente y se desarrollaron estrategias de mantenimiento para la eliminación de las causas de las fallas identificadas.

Se pudo concluir que mediante la aplicación del RCM se estableció como prioridad la eliminación de las fallas inaceptables por medio del análisis de modos y efectos de falla, se determinaron las partes críticas del motor para un mayor control en el estado de conservación así como en el stock de repuestos, y se propusieron estrategias para controlar las fallas mediante un plan de mantenimiento preventivo y otras herramientas de predicción y monitoreo.

Córdova Morales, Carlos Roberto en el año 2005, presentó la tesis titulada: **“Implantación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a los hornos convertidores PEIRCE SMITH de la fundición de cobre de SOUTHERN PERÚ COPPER CORPORATION”** para obtener el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica en la ciudad de Lima, donde se detalla:

La fundición de cobre de Southern Copper Corporation se encuentra a nivel del mar en la parte oeste del departamento de Moquegua, provincia de Ilo,

a 18 Km al norte de la ciudad. Inició sus operaciones en el año 1960 con cuatro hornos convertidores Peirce Smith (PS), posteriormente en la ampliación del año 1976 se agregaron tres hornos convertidores de mayor capacidad. En el año 2004 se desarrollaron diversos estudios que concluyeron que se debería incrementar la disponibilidad de los hornos convertidores PS para asegurar el cumplimiento de las metas de producción, reduciendo los tiempos de parada causados por las principales fallas que afectan a los hornos.

El objetivo principal de la tesis es demostrar que la implantación del mantenimiento centrado en la confiabilidad como filosofía de mantenimiento incrementará el índice de disponibilidad de los hornos convertidores PS de la fundición de cobre de Southern Perú.

El presente trabajo contempla el estudio y el uso efectivo de estrategias de mantenimiento propuestos por la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) aplicado a los hornos convertidores Peirce Smith, usando herramientas de evaluación como el análisis de modos y efectos de falla el cual permitió establecer los modos de falla de los sistemas del equipo.

Se pudo concluir que la implementación efectiva de las estrategias de mantenimiento, incrementó la disponibilidad operacional de la Grúa puente y Hornos convertidores en un 1.81% y 3.69% para fines del 2004, atacando los respectivos modos de falla, que reducen el tiempo de operación, proponiendo que para el año 2005 el incremento de la disponibilidad operacional sería del 1.89% para finalmente incrementar la disponibilidad en un 14.9% para la modernización de la fundición en el año 2007.

Valentín Vicente, Víctor Frank en el año 2014, presentó la tesis titulada: **“Mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejora la disponibilidad mecánica de las excavadoras CAT 336DL en el proyecto Toromocho”** para obtener el título de Ingeniero Mecánico en la

Universidad Nacional del Centro, Facultad de Ingeniería Mecánica en la ciudad de Huancayo, donde se detalla:

La minera Chinalco Perú S.A. tiene como meta convertirse en una compañía minera polimetálica con presencia mundial, para cumplir este objetivo creó el proyecto Toromocho que como primera etapa consistía en el movimiento de tierras y transporte de material, usando la Excavadora 336DL, la cual presentaba frecuentes paradas inesperadas debido al mal control y ejecución del mantenimiento.

El objetivo de esta tesis fue la aplicación del conocimiento científico del mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad mecánica de las excavadoras CAT 336DL de la empresa ICCSA en el proyecto Toromocho.

Se realizó un plan de mantenimiento basado en RCM, identificando las funciones, fallas funcionales, modos de falla, cuadro de criticidad (AMEF), que fue la base del estudio, determinando cual serían las fallas correctivas y las tareas de mantenimiento.

Se pudo concluir que con la aplicación del RCM se superó el target mínimo de 85% de la disponibilidad mecánica de las excavadoras 336DL, mejorando un 7.9% la disponibilidad mecánica, disminuyendo el número de paradas imprevistas así como aumentando el tiempo medio entre fallas en 27.7 horas.

2.2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.2.1. Marco teórico

2.2.1.1. La evolución del Reliability centered maintenance (RCM)

En las dos últimas décadas el mantenimiento ha estado en constantes cambios, ésto es debido a la evolución de la industria y a la aparición de numerosas disciplinas y modos de ejecutar un plan de mantenimiento, los encargados ya no quieren arriesgarse a incurrir en un nuevo método por temor al salto al vacío y se conforman con llevar un control correctivo y preventivo de los equipos de la industria. La aplicación correcta de la metodología del RCM transforma las relaciones que se tiene entre las personas, equipos y recursos; a diferencia de las demás, esta disciplina se anticipa a cualquier modo de falla que pueda ocurrir. Pero como nacen estas nuevas disciplinas de mantenimiento, si se remonta al año 1930, la evolución del mantenimiento puede describirse a través de tres generaciones:

a) La primera generación

La primera generación cubre los periodos hasta la segunda guerra mundial cuando la industria no estaba altamente mecanizada; en consecuencia, los tiempos de parada no eran de suma importancia. Esto llevó a que la prevención de fallas del equipo no tenía una prioridad alta para las cabezas de las empresas, así mismo muchos de los equipos simples estaban sobredimensionados, ésto hacía que fueran confiables y fáciles de reparar. Por ende, no existía la necesidad de un mantenimiento sistemático más allá de una simple rutina de limpieza y lubricación.

b) La segunda generación

Durante la segunda guerra mundial las presiones de tiempo aumentaron la demanda de los bienes de todo tipo, al mismo tiempo que la demanda de mano de obra industrial decaía considerablemente; por consiguiente, se

produjo un aumento en la mecanización y por los años de 1950 la industria empezó a depender de numerosas máquinas y complejas.

Al incremento de esta dependencia, el tiempo fuera de servicio entró en un agudo enfoque. Ésto condujo a que las fallas en un equipo pudieran y debieron prevenirse dando lugar al concepto de mantenimiento preventivo. En los 1960 ésto significó principalmente en reparaciones de los equipos a intervalos fijos. El costo de mantenimiento se elevó rápidamente en comparación con otros costos operacionales que conllevó al desarrollo de sistemas de planificación y control de mantenimiento para buscar la manera de maximizar el tiempo de vida de los recursos.

c) La tercera generación

Desde mediados de los años 1970 el proceso de cambio en la industria se ha manifestado con mayor rapidez. Estos cambios son clasificados como: nuevas expectativas, nueva investigación y nuevas técnicas.

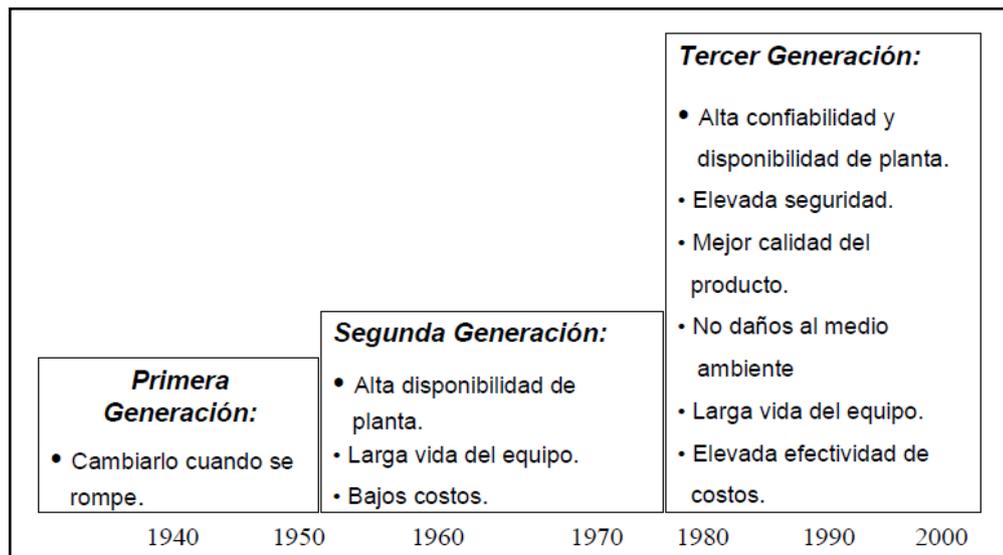
Nuevas expectativas

La Figura 2.1 muestra cómo ha ido evolucionando las expectativas de mantenimiento. En los años 1960 y 1970 el tiempo fuera de servicio afecta a la capacidad de producción de los recursos aumentando los costos operativos y esto se volvió una preocupación para muchas industrias. Los efectos que causaban una reducción de stock de materiales llevaban a la idea de que las averías bastante pequeñas pueden probablemente detener una planta entera.

Actualmente, el crecimiento de la mecanización y automatización ha significado que la confiabilidad y disponibilidad se hayan vuelto factores claves, una mayor automatización también significa que más fallas afectan a mantener los parámetros de calidad así como cada vez más fallas tienen consecuencias serias en la seguridad o en la conservación del medio ambiente por la existencia de las normas a tal punto que las organizaciones o satisfacen la seguridad de la sociedad y las expectativas

medioambientales o dejan de operar. Por todo ésto, los costos de mantenimiento siguen aumentando y en algunas industrias es el segundo más alto o incluso el componente más alto de los costos operativos.

FIGURA N° 2.1: NUEVAS EXPECTATIVAS DEL MANTENIMIENTO

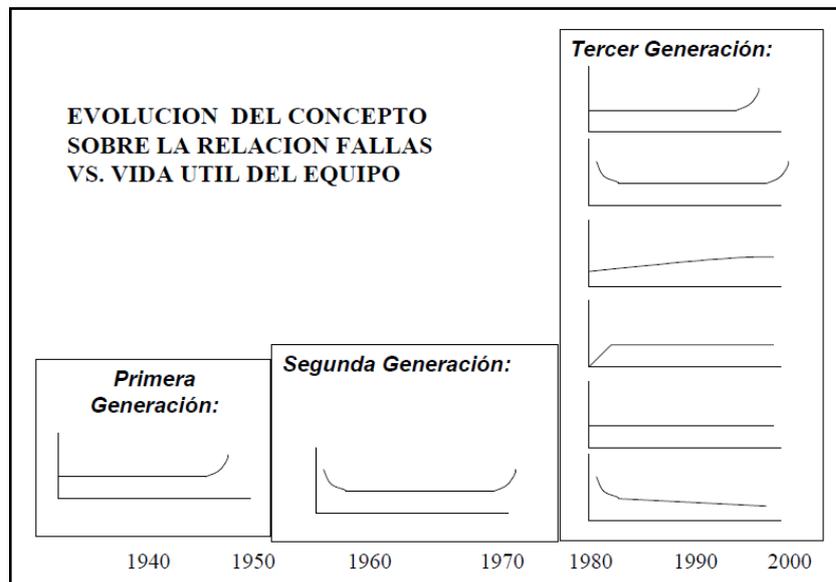


Fuente: (MOUBRAY, 2004)

Nueva investigación

La nueva investigación cambió muchas de las creencias sobre la edad y la falla. La Figura 2.2 muestra como en un comienzo existía la creencia que a medida que las cosas envejecían eran más propensas a fallar, la segunda generación llevó a un conocimiento creciente de “mortalidad infantil” y en consecuencia a la “curva de la bañera”; sin embargo, la tercera generación revela que existen 6 modelos de falla que ocurren en la práctica.

FIGURA N° 2.2: CAMBIOS EN LOS PUNTOS DE VISTA SOBRE LAS FALLAS DE UN EQUIPO



Fuente: (MOUBRAY, 2004)

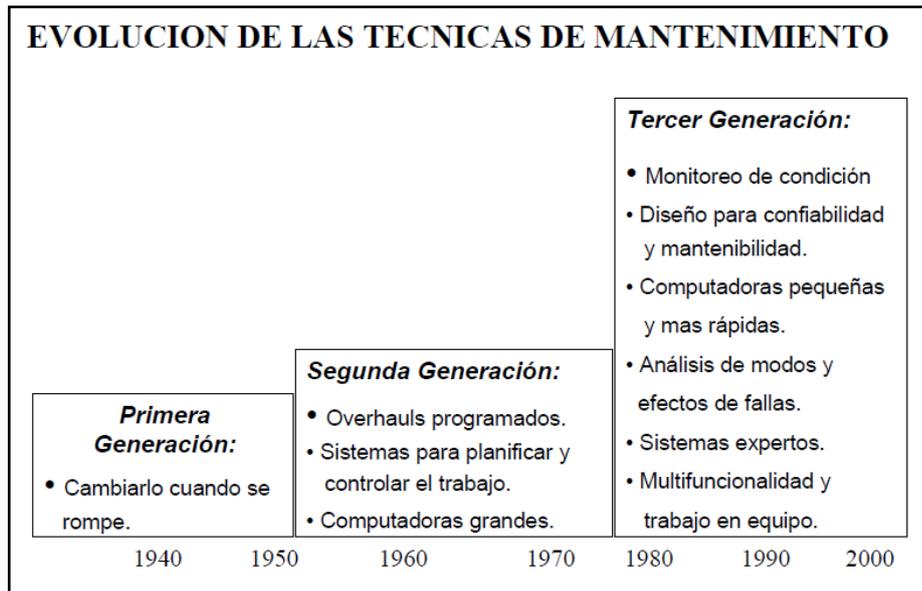
Nuevas técnicas

En los últimos 20 años se han desarrollado nuevas técnicas y conceptos de mantenimiento, los cuales siguen emergiendo constantemente. La Figura 2.3 muestra cómo ha crecido el énfasis en los sistemas clásicos y de control para incluir nuevos desarrollos que incluyen:

- Herramientas de apoyo para la toma de decisiones como estudios de riesgo, análisis de modo y efectos de falla y sistemas expertos.
- Nuevas técnicas de mantenimiento como monitoreo de condición.
- Diseño de equipos con un mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.
- Un cambio en el pensamiento orgánico hacia la participación, trabajo en equipo y flexibilidad. (MOUBRAY, 2004)

El desafío que hoy en día enfrenta el personal de mantenimiento no sólo es aprender que son estas nuevas técnicas sino decidir que vale la pena y que no en sus organizaciones.

FIGURA N° 2.3: CAMBIOS EN LAS TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO



Fuente: (MOUBRAY, 2004)

2.2.1.2. Los desafíos que el mantenimiento enfrenta

La primera industria en enfrentar estos desafíos fue la industria de la aviación comercial, el elemento crucial que generó la iniciativa fue el darse cuenta que se debe dedicar tanto esfuerzo en asegurarse que se realicen correctamente las tareas como en realizar las tareas correctas. Esto dio lugar al desarrollo de procesos de toma de decisión que se conocieron dentro de la industria aeronáutica con el nombre de MSNG3 y fuera de ésta como mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM. En casi todos los campos de esfuerzos humanos organizados, RCM se está volviendo fundamental para la custodia responsable de los activos físicos, no existe ninguna otra técnica comparable para determinar la cantidad mínima segura de tareas que deben ser hechas para preservar las funciones de los activos físicos, especialmente en situaciones críticas o peligrosas. La importancia de aplicar RCM correctamente condujo a la American Society of Automotive Engineers a publicar la norma SAE JA1011: "criterio de evaluación del proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)". (MOUBRAY, 2004)

Tomando en cuenta lo descrito, los desafíos más importantes que hoy enfrentan los Gerentes de Mantenimiento moderno pueden resumirse de la siguiente manera:

- Seleccionar las técnicas más apropiadas.
- Tratar con cada tipo de proceso de falla.
- Colmar de todas las expectativas de los dueños de los recursos, los usuarios de los recursos y de la sociedad en su conjunto.
- Establecer métodos de mantenimiento del modo más rentable y durable.
- Tener el apoyo activo y cooperativo de todas las personas involucradas en el mantenimiento. (TECSUP, 2016)

EL RCM proporciona una estructura que permite tomar acción de manera rápida sobre estos desafíos y esto es porque se enfoca en el mantenimiento de los recursos físicos. Si estos recursos no existieran, la propia función del mantenimiento no existiera. (TECSUP, 2016)

2.2.1.3. El mantenimiento y el RCM

Desde el punto de vista de la ingeniería, hay dos conceptos para la gestión de cualquier activo físico: mantenerse y modificarse. Cuando se parte por mantener algo, se desea que continúe haciendo algo en un determinado estado de conservación para realizar una función específica, cuando se mantiene un recurso, el estado en el que se desea conservarlo debe ser uno en el cual continúe haciendo lo que los usuarios deseen que hagan. Esto nos lleva a la siguiente definición:

“Mantenimiento: Asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan.” (MOUBRAY, 2004)

Lo que los usuarios deseen depende de donde se está usando el recurso (contexto operacional); dicho esto, podríamos definir el siguiente concepto:

“Mantenimiento centrado en confiabilidad: Un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico

continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan en su contexto operacional actual.” (MOUBRAY, 2004)

2.2.1.4. Las siete preguntas básicas del RCM

Cualquier proceso de RCM debe asegurarse de responder satisfactoriamente las siguientes siete preguntas según la siguiente secuencia:

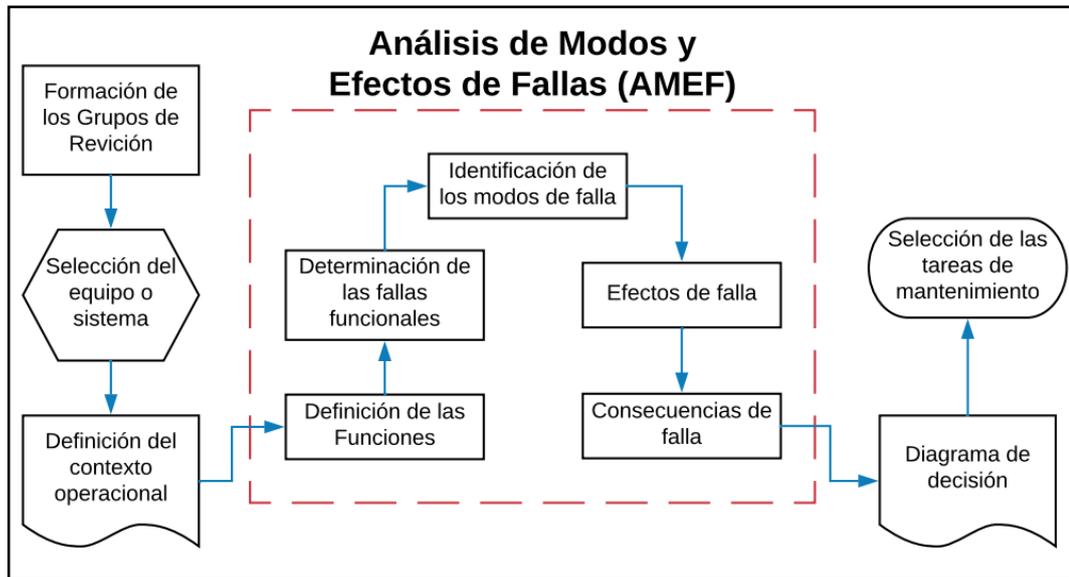
- ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional actual (funciones)?
- ¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
- ¿Qué causa cada falla funcional (modo de falla)?
- ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efecto de falla)?
- ¿De qué manera afecta cada falla (consecuencia de falla)?
- ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de tareas)?
- ¿Qué se debe hacer si no se encuentra una adecuada tarea proactiva (acciones predeterminadas)? (SAE JA 1011, 1999)

Para responder cada una de las preguntas anteriores de manera exitosa, se debe seguir un proceso y tomar ciertas decisiones; además, toda la información debe ser documentada de manera que esté disponible para los usuarios. (SAE JA 1011, 1999)

2.2.1.5. Aplicando el proceso de RCM

En la figura 2.4 se muestra la secuencia del proceso del RCM, la cual se alinea con los requerimientos establecidos en la norma SAE JA1011. A continuación, se detallará en que consiste cada parte del proceso.

FIGURA N° 2.4: PROCESO DEL RCM



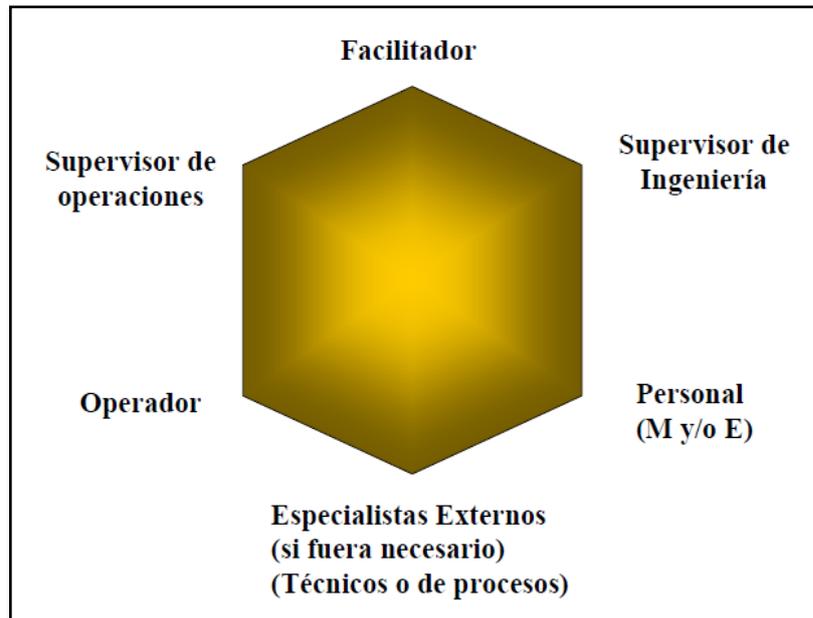
Fuente: Elaboración Propia

a) Grupos de revisión

Como se vio anteriormente, en la aplicación del RCM incluye siete preguntas básicas, las cuales deben ser respondidas para llevar con éxito el proceso, pero en la práctica el personal de mantenimiento no está en la capacidad de responder a todas ellas, muchas de estas respuestas son contestadas por el personal de operaciones o producción (preguntas como las funciones, funcionamiento deseado, efectos de falla y consecuencias de falla).

Por esta razón y para realizar un buen análisis de los requisitos en mantenimiento, debe de haber como mínimo una persona del área de mantenimiento y una de operaciones; esto sin dejar de lado que deben de tener un completo conocimiento del equipo en observación. En la figura 2.5 veremos el esquema típico del grupo de revisión de RCM, para lo cual cada integrante debe haber sido entrenado en RCM.

FIGURA N° 2.5: EL GRUPO DE REVISIÓN DEL RCM



Fuente: (MOUBRAY, 2004)

Facilitadores

Estos son los especialistas, las personas más importantes en el proceso de revisión del RCM, cuya función es asegurar que:

- El análisis del RCM se lleve a cabo a un nivel correcto, que los límites del sistema sean claramente definidos, que ningún componente sea pasado por alto, y que los resultados del análisis sean debidamente registrados.
 - El RCM sea claramente comprendido y aplicado por los miembros del grupo.
 - El grupo llegue a un acuerdo de forma rápida y ordenada.
 - El análisis progrese razonablemente rápido y termine a tiempo.
- (MOUBRAY, 2004)

b) Planificación y selección del equipo o sistema

Para empezar, se necesitará saber cuáles serán los recursos de la organización que estarán sometidos al proceso del RCM, y para esto, es imprescindible el “registro de los activos de la planta”, el cual la mayoría de

las empresas industriales cuenta con uno por ser adecuados para este propósito.

Cuando se aplica correctamente el RCM, éste conlleva a mejoras en la efectividad del mantenimiento, pero esto depende de una planificación y preparación meticulosa. Los elementos importantes de la planificación son los siguientes:

- Decidir qué recurso se beneficiará con el proceso de RCM y como se beneficiará.
- Evaluar los recursos requeridos para la aplicación del proceso en los equipos seleccionados.
- En los casos que los beneficios justifican la inversión, decidir quien realizará y quien auditará cada análisis.
- Asegurar que el contexto operacional de cada activo se entienda claramente. (MOUBRAY, 2004)

c) El contexto operacional

Cuando se habla del contexto operacional, se refiere a todos los factores que influyen en el funcionamiento deseado del equipo o sistema en cuestión, a medida de ejemplo, no es lo mismo que una determinada bomba opere con agua a que con aceite, o que este instalada a nivel del mar o a 4800 msnm, las condiciones de funcionamiento no serán las mismas y esto lo determina las funciones asignadas al equipo o sistema.

El contexto operacional no sólo puede influenciar drásticamente en las funciones y las necesidades de funcionamiento, sino también en la naturaleza de los modos de falla que pueden ocurrir, sus efectos y consecuencias. Todo esto significa que, cualquiera que comience a aplicar RCM a cualquier proceso o activo físico, debe asegurarse de tener un claro entendimiento del contexto operacional antes de comenzar. Algunos de los factores importantes que deben ser considerados se discuten a continuación:

Proceso por lotes y continuos

En plantas industriales, la característica más importante del contexto operacional es el tipo de proceso. Ésto va desde operaciones de procesos continuos en los cuales casi todos los equipos están interconectados, hasta operaciones de trabajo donde la mayoría de las máquinas trabajan independientemente. En plantas que trabajan con proceso continuos, la falla de un activo puede parar toda la planta o reducir drásticamente la producción; mientras que, en las plantas que trabajan por lotes, la mayoría de las fallas afectará solamente la producción de una máquina o una línea. (MOUBRAY, 2004)

Redundancia

Cuando existen equipos o sistemas redundantes o formas alternativas de producción, en la figura 2.6 se muestra un sistema con una bomba y otro con una bomba y su stand by.

FIGURA N° 2.6: SISTEMAS REDUNDANTES



Fuente: (MOUBRAY, 2004)

Estándares de calidad

Los estándares de calidad y los estándares de servicio al cliente son otros dos aspectos del contexto operativo, que pueden dar lugar a descripciones diferentes de funciones de máquinas que de otra manera serían idénticas. (MOUBRAY, 2004)

Estándares medio ambientales

Se refieren a las exigencias medio ambientales que debe cumplir un activo cuando entra en operación, cumpliendo funciones para los usuarios y para la sociedad como un todo.

Riesgos por la seguridad

Son los requerimientos de seguridad que debe cumplir un equipo o sistema al momento de realizar su operación.

Turnos de trabajo

La organización de los turnos de trabajo afecta profundamente al contexto operacional. Algunas plantas operan ocho horas por día, cinco días a la semana, algunas operan continuamente durante los siete días de la semana y otras operan entre estos dos extremos. (MOUBRAY, 2004)

Tiempo de reparación

El tiempo de reparación está influido por la velocidad de respuesta de la falla que está a su vez determinada por el sistema de reportes de falla, por el nivel del personal, y por la velocidad de reparación de la misma. (MOUBRAY, 2004)

Repuestos

Los repuestos van relacionados con el contexto operacional en el sentido de que si un equipo falla y se necesita cambiar un repuesto, cual es la disponibilidad de este repuesto para proceder con la reparación del equipo.

d) Funciones y estándares de rendimiento

Antes de aplicar cualquier proceso y para tener la certeza de que cualquier recurso físico continúe haciendo lo que requieran sus usuarios, se debe realizar dos cosas:

- Determinar qué es lo que los usuarios quieren que haga.
- Asegurar que es capaz de hacer lo que los usuarios requieren.

Por lo tanto, el primer paso en el proceso del RCM es determinar las funciones de cada recurso en su contexto operacional junto con los parámetros de funcionamiento deseado. Estas funciones pueden dividirse en dos categorías:

- **Funciones primarias**, que resume por qué el recurso fue adquirido. Esta categoría cubre temas como velocidad, producción, capacidad de almacenamiento o carga, calidad del producto y servicio al cliente.
- **Funciones secundarias**, que reconoce que más se espera de cada recurso además de completar sus funciones primarias. Esta categoría cubre temas como confort, seguridad, control, economía, protección, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales hasta apariencia del activo. (MOUBRAY, 2004)

Los usuarios de los recursos son los más indicados para saber exactamente que contribuciones físicas y financieras hace el recurso para el bienestar de la organización; por ello, es esencial que estén involucrados en el proceso del RCM desde el comienzo.

e) Fallas funcionales

Las funciones y expectativas de rendimiento asociadas a cada recurso definen los objetivos del mantenimiento. Para lograr estos objetivos tomando en cuenta que el recurso no puede desempeñarse conforme a los parámetros establecidos por los usuarios es algún tipo de falla. Ésto indica que el mantenimiento logra sus objetivos, adquiriendo alguna política de gestión de una falla; sin embargo, antes de aplicar cualquier herramienta de gestión de falla, se necesita saber que fallas pueden ocurrir. El proceso de RCM lo hace en dos niveles:

- Identificando que circunstancias conllevan al estado de falla.
- Preguntando que eventos puede ocasionar que el recurso falle.

En el mundo del RCM, los estados de falla son conocidos como fallas funcionales porque se dan cuando un recurso no puede cumplir una función de acuerdo a los estándares de rendimiento aceptados por el usuario. Además de una incapacidad para funcionar, esta definición abarca fallas parciales donde el recurso aún funciona, pero con un nivel de desempeño inaceptable. Ésto sólo es detectable después que se ha definido las funciones y parámetros de rendimiento del recurso. (MOUBRAY, 2004)

f) Modos de falla

Una vez identificada cada falla funcional, el siguiente paso es identificar todos los eventos posibles que puedan haber causado los estados de falla. Estos eventos son conocidos como modos de falla. Los modos de fallas, que son “razonablemente posibles”, son aquellos que han ocurrido en el mismo equipo o similar que opera en el mismo contexto, fallas que son prevenidas actualmente por tareas de mantenimiento y fallas que están consideradas pero que aún no han ocurrido en el contexto en cuestión. La mayoría de las listas de modos de falla incorporan fallas por deterioro y desgaste normal. Sin embargo, en las listas se debe incluir errores humanos (por parte del personal de operación y mantenimiento) y fallas por diseño tal que todas las causas de fallas en los equipos pueda clasificarse apropiadamente, también es importante identificar la causa de cada falla con bastante detalle para no perder tiempo en buscar dichas causas y ocuparlo en cuales son los síntomas. Por otro lado, es importante asegurar que este tiempo no se pierda en el análisis propio por entrar con demasiado detalle. (MOUBRAY, 2004)

g) Efectos de falla

Este proceso describe que es lo que pasa cuando ocurre cada modo de falla. Esta descripción debe contener toda la información necesaria para facilitar la evaluación de las consecuencias de las fallas. Para esto, se debe tener en cuenta las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las evidencias de que la falla ha ocurrido?
- ¿De qué manera la falla afecta a la seguridad o al medio ambiente?
- ¿De qué manera afecta a la producción y a las operaciones?
- ¿Cuáles son los daños físicos causados por las fallas?
- ¿Qué es lo que debe hacerse para reparar cada falla? (MOUBRAY, 2004)

h) Consecuencias de las fallas

Como se sabe, cada equipo posee diferentes modos de falla y cada falla afecta a la organización de alguna u otra manera, pero en cada caso los efectos que producen estas fallas son diferentes, afectando a diversos sectores de dicha organización. Estas consecuencias obligan a tomar acciones para prevenirlas dependiendo de su magnitud; es decir, si una falla tiene consecuencias serias, se implementará las mejores técnicas para prevenirla o evitarla; sin embargo, si una falla no trae consecuencias serias, entonces no se ejecutará ninguna técnica más allá de una rutina de limpieza y lubricación.

El RCM reconoce que la razón de aplicar cualquier tipo de mantenimiento no sólo es evitar las fallas sino también evitar o reducir las consecuencias de las fallas.

El RCM clasifica a estas consecuencias en cuatro grupos:

- Consecuencias de fallas ocultas: Estas no tiene un impacto directo en la organización pero pueden traer consigo consecuencias serias hasta catastróficas.
- Consecuencias de seguridad y medio ambiente: Una falla tiene consecuencias de seguridad si causa daño o muerte a una persona y tiene consecuencias medioambientales si incumple alguna norma o reglamento ambiental.
- Consecuencias operacionales: Una falla trae consecuencias operacionales si afecta a la producción.

- Consecuencias no-operacionales: Estas fallas no afectan a la seguridad ni a la producción, sólo afectan a los costos directos de reparación.

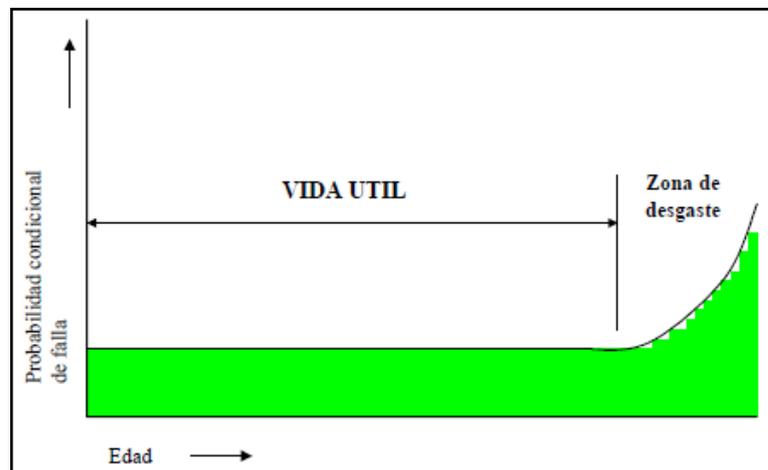
El proceso de evaluación de las consecuencias se enfoca en la gestión de falla en lugar de concentrarse en la prevención de la falla. Las técnicas de la gestión de falla están divididas en dos categorías:

- Tareas proactivas: estas técnicas son realizadas antes de que ocurra una falla para prevenir un estado de falla.
- Acciones predefinidas: estas técnicas tratan con el estado de falla y son realizadas cuando no es posible identificar una tarea proactiva.

Tareas proactivas

En la antigüedad se pensaba que para optimizar la disponibilidad de una planta se debía hacer algún tipo de mantenimiento proactivo que sea rutinario; llámese inspección visual, limpieza, lubricación o cambio de algún componente.

FIGURA N° 2.7: EL PUNTO DE VISTA TRADICIONAL DE LAS FALLAS



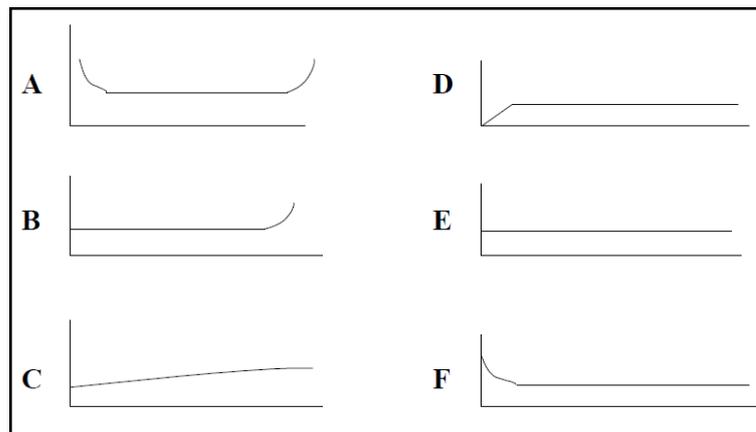
Fuente: (MOUBRAY, 2004)

La Figura 2.7 nos da referencia del punto de vista de la probabilidad condicional de falla que se tenía anteriormente, donde los equipos presentaban una probabilidad de falla constante hasta que entraban en la zona de desgaste, frente a esto se tenía los registros de falla del equipo

que de alguna u otra manera nos ayudaba a prevenir que el equipo entre en la zona de desgaste, realizando un overhaul o un reemplazo de componentes.

En la actualidad se cuenta con diversos modelos de probabilidad de falla, como lo detalla la figura 2.8.

FIGURA N° 2.8: SEIS MODELOS DE FALLA



Fuente: (MOUBRAY, 2004)

El modelo A es la famosa “curva de la bañera”, donde empieza con una alta incidencia de falla llamada “mortalidad infantil”, para luego presentar una constante probabilidad de falla y terminar en una zona de desgaste.

El modelo B muestra una probabilidad constante de fallas desde el inicio hasta que entra en una zona de desgaste.

El modelo C muestra un aumento lento en la probabilidad de falla a lo largo de la vida útil del equipo.

El modelo D muestra una baja probabilidad de falla en el inicio o al momento en que sale de la tienda, para luego producirse un aumento rápido y terminar con una probabilidad constante.

El modelo E nos muestra una probabilidad de falla constante a lo largo de la vida útil del equipo.

El modelo F empieza con una mortalidad infantil, para luego terminar en una probabilidad constante de falla.

Estudios hechos en la aviación civil mostraron que el 4% de los componentes conforman el modelo A, 2% al B, 5% al C, 7% al D, 14% al E y no menos del 68% al modelo F. (MOUBRAY, 2004)

Debido a estos conocimientos muchas industrias dejaron de aplicar un mantenimiento proactivo debido a que muchas de las reparaciones programadas incrementaban la tasa de fallas del equipo; esto es posible cuando se tiene fallas con consecuencias menores, pero cuando se tiene consecuencias significativas es necesario la implementación de técnicas para prevenir las fallas o reducir las consecuencias. Por tal motivo, las tareas proactivas se dividen en:

- **Tareas de restauración programadas:** Es cuando se tiene que realizar la reconstrucción de un componente o la reparación de un ensamble antes de un cierto límite de edad.
- **Tareas de desecho programadas:** Es cuando se desecha un componente en un tiempo determinado sin considerar el estado en que se encuentra.
- **Tareas de condición programadas:** Los nuevos tipos de gestión de fallas confían en el hecho de que la mayoría de las fallas dan alguna advertencia antes de ocurrir, las cuales son conocidas como fallas potenciales. Las nuevas técnicas son llamadas tareas a condición porque los componentes quedan en servicio bajo la condición de que sigan presentándose las condiciones normales de operación.

Acciones predefinidas

- **Búsqueda de fallas:** se trata del chequeo periódico de fallas ocultas para verificar si han fallado.
- **Rediseños:** Son las acciones que realiza cualquier cambio antes de definir la capacidad de un sistema.
- **Ningún mantenimiento programado:** Como su nombre lo indica, esta acción trae consigo no hacer ningún tipo de mantenimiento programado para prevenir la falla. (TECSUP, 2016)

i) El proceso de selección de tareas de RCM

El proceso de RCM da la opción de seleccionar que tareas proactivas son factibles para realizar dentro del contexto operacional que se encuentre el recurso en estudio, dependiendo de las características técnicas de la tarea y de las consecuencias de la falla que ocasiona; y a la vez, indica la frecuencia y la cantidad de veces a realizar dicha tarea. Si no se encuentra la tarea a realizarse, se debe de elegir una opción “a falta de” adecuada. Para la selección de las tareas se tiene el siguiente proceso:

- Para fallas ocultas, merece la pena una tarea proactiva si reduce el riesgo de falla asociado a un nivel aceptablemente bajo. Si no se puede determinar tal tarea, entonces se debe de realizar una búsqueda de fallas programada. En caso no se pueda encontrar una tarea de búsqueda de fallas, entonces la decisión por defecto es el rediseño dependiendo de las consecuencias de falla.
- Para fallas con consecuencias sobre la seguridad y el medio ambiente, merece una tarea proactiva si reduce el riesgo de falla a un nivel muy bajo si es que no lo elimina totalmente. Si no se encuentra una tarea que reduzca el nivel de falla a un nivel aceptablemente bajo, el equipo debe rediseñarse o debe de cambiar el proceso.
- Para fallas con consecuencias operacionales y no-operacionales, merece la pena una tarea proactiva si el costo total de hacerlo en un periodo de tiempo es menor que el costo de consecuencias operacionales y el costo de reparación en el mismo periodo; en otras

palabras, la tarea debe justificarse en el campo económico. Si no se justifica, la decisión inicial por defecto es ningún mantenimiento programado. Si esto ocurre y las consecuencias operacionales son aun inaceptables, la decisión por defecto es el rediseño. (MOUBRAY, 2004)

Según el proceso anterior, el RCM sólo se enfoca en las tareas proactivas para las fallas que realmente las necesitan; haciendo esto, podremos aligerar la sobrecarga de trabajo rutinaria y así poder realizar las tareas restantes apropiadamente y al no ser necesario cortar la producción para realizar los trabajos de mantenimiento, aumentamos la eficacia del mismo. Tradicionalmente, se evaluaba que mantenimiento requería cada equipo en función a sus características reales, dejando de lado las consecuencias de falla que puede ocasionar. Esto producía un gran número de programas en desperdicio porque no lograban nada y muchas veces los equipos caían en el rediseño sin ser necesario.

j) La hoja de información del AMEF

En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de detalle de los posibles modos de falla para un sistema de bombeo, donde en la parte superior se determina el sistema de análisis, luego en la primera columna se detalla la función que cumple el sistema como lo menciona la norma SAE JA1011 *“Todos los enunciados de una función deben contener un verbo, un objeto, y un estándar de desempeño (cuantificado en cada caso en que se pueda hacer)”*, que para el caso del ejemplo es la función primaria de la bomba.

FIGURA N° 2.9: MODOS DE FALLA DE UNA BOMBA

ACTIVO: Sistema de Bombeo		
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de la Función)	Modo de Falla (Causa de la Falla)
1 Transferir agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto.	A No disponible para transferir ninguna cantidad de agua	1 Cojinete atascado 2 Motor quemado 3 Impulsor suelto 4 Cizallas en el cubo del acople debido a la fatiga 5 Válvula de entrada atascada en posición cerrada 6 Impulsor atascado por un objeto extraño.....etc.
	B Transfiere menos de 800 litros por minuto	1 Impulsor desgastado 2 Línea de succión parcialmente bloqueada....etc.

Fuente: (SAE JA 1012, 2002)

En la segunda columna se menciona las fallas funcionales para la función detallada, las cuales deben responder a la pregunta ¿De qué manera puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?, Para responder satisfactoriamente esta pregunta, SAE JA1011 en la sección 5.2 declara que “Se deben definir todos los estados de falla asociados con cada función”.

En la tercera columna se indican los posibles modos de falla asociados a cada falla funcional, respondiendo a la pregunta ¿Qué causa cada falla funcional (modo de falla)?,

Adicionalmente al ejemplo de la figura 4.3, se añade una columna que evalúa las consecuencias de cada modo de falla respondiendo a la pregunta ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efecto de falla)?

k) El diagrama de decisión de RCM

Es un esquema que permite la toma de decisiones analizando para cada sub-sistema, sus modos de falla (véase en anexos). En función de dicho análisis, podremos registrar:

- Que mantenimiento de rutina (si lo hay) será realizado, con qué frecuencia será realizado y quien lo hará.
- Que fallas son lo suficientemente serias como para justificar el rediseño.
- Casos en los que se toma la decisión deliberada de dejar que las fallas ocurran. (MOUBRAY, 2004)

l) La hoja de decisión del AMEF

En la figura 2.10 se muestra los detalles que deben ser analizados en la hoja de decisión del AMEF. En esta etapa determinaremos las tareas propuestas según el algoritmo del diagrama de decisión del RCM.

FIGURA N° 2.10: HOJA DE DECISIÓN DEL RCM

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)																
HOJA DE DECISION RCM																
SISTEMA:												REALIZADO POR:		HOJA		
SUB-SISTEMA												FECHA DE ANÁLISIS:		DE		
REFERENCIA DE				EVALUACIÓN DE				H1	H2	H3	TAREAS "A"			MODO DE CONTROL (Tarea propuesta)	PERIODICIDAD (Horas)	REALIZADA POR
F.	F. F.	M. F.	E. F.	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4			
								O1	O2	O3						

Fuente: (MOUBRAY, 2004)

La hoja de decisión está dividida en 17 columnas, las columnas F, F.F, M.F y E.F identifican las funciones, fallas, modos y efectos de fallas que se analiza en esa línea, la cual obtendremos de la hoja de información vista anteriormente; las siguientes 10 columnas se refieren a las preguntas del diagrama de decisión del RCM de manera que:

- Las columnas tituladas H, S, E, O y N son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de los modos de falla, colocando S o N (Sí o No según aplique).
- Las tres columnas siguientes (tituladas H1, H2, H3, etc.) registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea.
- Si se hace necesario responder a cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas H4, H5 y S4 son las que permiten registrar esas respuestas, colocando S o N (Sí o No según aplique).

- Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia en la que debe hacerse, y quién ha sido seleccionado para realizarla. (MOUBRAY, 2004)

2.2.1.6. Los resultados de un análisis de RCM

Si es aplicado como se sugiere, el RCM producirá los siguientes resultados:

- Un plan de mantenimiento a ser aplicado por el personal encargado de mantenimiento.
- Un proceso de operación revisado por los operadores de los activos.
- Una lista de cambios por realizarse al activo o cambios en la manera de operar al mismo.

Adicional a estos resultados, se tiene que el personal obtendrá conocimientos sobre cómo trabaja el activo en análisis y como hacer un correcto trabajo en equipo. (TECSUP, 2016)

2.2.1.7. Auditoría e implementación

Una vez que se haya completado la revisión de cada recurso, los responsables del equipo deben comprobar que las decisiones tomadas por el grupo sean razonables y defendibles. Luego de que cada revisión es aprobada, las recomendaciones son implementadas a los planes de mantenimiento, incorporando cambios en los procedimientos operacionales estándar del activo y entregando recomendaciones de cambios sobre el diseño a los encargados de realizarlo. (MOUBRAY, 2004)

2.2.1.8. ¿Qué logra el RCM?

- Mayor seguridad e integridad ambiental: El RCM actúa para minimizar o eliminar todos los riesgos relacionados con la seguridad y el medio ambiente antes de considerar los riesgos producidos fallas operacionales.
- Mejor funcionamiento operacional: El RCM reconoce que todo tipo de mantenimiento tiene un valor y provee reglas para decidir cuál es el más

apropiado para su realización, así nos aseguramos que cada tarea realizada sea la más eficaz para cada activo. El RCM fue desarrollado en la industria aeronáutica para nuevos tipos de aeronaves que aún no entraban en servicio, especialmente equipos en los que no existía ningún tipo de información previa, Esto les ahorra mucho en la prueba de ensayo y error que frecuentemente suceden al momento de implementar algún plan de mantenimiento.

- Mayor rentabilidad del mantenimiento: El RCM se concentra en las actividades de mantenimiento con un mayor desempeño en la planta con el fin de que todo gasto que se genere en mantenimiento sea a beneficio del área que brinde los mejores resultados a la organización. Cuando aplicamos el RCM a un programa de mantenimiento existente, reducimos los trabajos de rutina y si se utiliza para implementar un programa nuevo, la carga de trabajo resulta mucho más baja que con los métodos tradicionales.
- Mayor vida útil de componentes costosos: Debido al enfoque de técnicas de mantenimiento basado en la condición.
- Una base de datos global: Un análisis de RCM finaliza cuando se tienen documentados los requisitos de mantenimiento de todos los equipos intervenidos en una organización, así como cuales son los repuestos que deben tenerse en stock. Esto trae ventajas como adaptarnos fácilmente cuando aparece un nuevo modelo y evitar el cambio de personal y la pérdida de experiencia en el proceso que esto provoca.
- Mayor motivación del personal: Esto es para las personas involucradas en el proceso de revisión, aumenta el rendimiento del activo en el contexto operacional y se crea un sentido de pertenencia por parte del personal para afrontar con mayor seguridad los problemas del mantenimiento.
- Mejor trabajo en equipo: El RCM creó un mismo idioma para todas las personas involucradas en el mantenimiento, brindando un mejor

entendimiento sobre el mantenimiento del equipo por parte del personal de operaciones y mantenimiento. (MOUBRAY, 2004)

2.2.2. Marco conceptual

a) Análisis de causa raíz

Es una técnica de identificación de causas fundamentales que conducen a fallos o fallos recurrentes. Las causas identificadas son causas lógicas y su efecto relacionado, es importante mencionar que es un análisis deductivo, el cuál identifica la relación causal que conduce al sistema, equipo o componente a un fallo. Se utiliza una gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problema, disponibilidad de la data y conocimiento de las técnicas: análisis causa-efecto, árbol de fallo, diagrama espina de pescado, análisis de cambio, análisis de barreras y eventos y análisis de factores causales. (AMENDOLA LEÓN, 2016)

b) Confiabilidad

Capacidad de un elemento para realizar una función requerida en las condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado. Este término también se utiliza como una medida del rendimiento de fiabilidad y además se puede definir como una probabilidad. (ISO 14224, 2006)

c) Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto se basa en un fenómeno conocido como el principio de Pareto. El principio establece que hay usualmente pocos contribuyentes (lo poco vital) que son responsables por la mayor porción del problema investigado. Los demás contribuyentes (los muchos triviales) son típicamente responsables por una parte relativamente pequeña del problema. Es muy frecuente establecer por la regla a dedo, la regla del 80/20, la cual dice que el 80% del problema investigado es causado por sólo el 20% de los contribuyentes. (COETZEE, 2004)

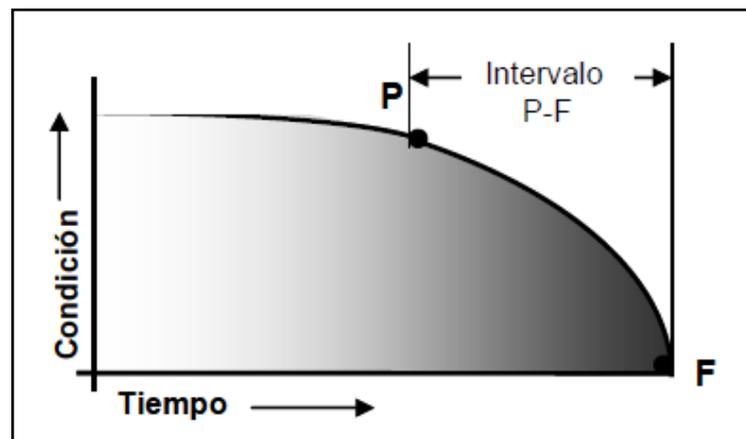
d) Disponibilidad

Capacidad de un elemento para estar en un estado para realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante de tiempo dado o en un intervalo de tiempo dado, suponiendo que se proporcionan los recursos externos requeridos. (ISO 14224, 2006)

e) El intervalo P-F

El intervalo P-F determina que tan frecuente se deben hacer las tareas basadas en condición. Para detectar la falla potencial antes que se convierta en una falla funcional, el intervalo entre revisiones debe ser menor que el intervalo P-F. (Véase la figura 2.9), También es esencial que la condición de la falla potencial sea lo suficientemente clara para tener la certeza de que la persona que está entrenada para realizar la revisión, detectará la falla potencial siempre y cuando ocurra (o al menos, que la probabilidad de que la falla potencial no sea detectada sea suficientemente baja para reducir la probabilidad de un modo de falla no anticipado a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo).

FIGURA N° 2.11: EL INTERVALO P-F



Fuente: (SAE JA 1012, 2002)

El intervalo P-F también se conoce como período de advertencia, el tiempo que conduce hacia una falla funcional o el período de desarrollo de la falla. Este se puede medir en cualesquiera unidades que provean una indicación de la exposición al esfuerzo (tiempo de operación, unidades de producción,

ciclos parada-arranque, etc.). Para diferentes modos de falla, estos varían de fracciones de segundo a varias décadas. (SAE JA 1012, 2002)

f) Mantenibilidad

Capacidad de un artículo en determinadas condiciones de uso, para retenerse o restablecerse en un estado en el que puede realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se realiza en las condiciones dadas y utilizando los procedimientos y recursos establecidos. (ISO 14224, 2006)

g) Plan de mantenimiento

Combinación de todas las acciones técnicas y administrativas, incluidas las acciones de supervisión, destinadas a retener un elemento en un estado en el que puede realizar una función requerida o restaurarlo. (ISO 14224, 2006)

h) Tiempo medio de reparación (MTTR)

El tiempo medio de reparación se define como el tiempo medio antes de que un artículo es reparado. (ISO 14224, 2006)

i) Tiempo medio entre fallas (MTBF)

El tiempo medio entre fallas se define como el tiempo promedio entre dos fallas consecutivas. (ISO 14224, 2006)

j) Tiempo medio hasta fallar (MTTF)

El tiempo medio hasta la falla se define como el tiempo medio antes de que el artículo falle. (ISO 14224, 2006)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

a) Bitácora del operador

Es el registro de control de un equipo en operación que lleva consigo el operador, donde anota las horas de operación, mantenimiento, reparaciones, incidencias, etc., así como también los parámetros de control, como presión, temperatura, vibración, etc.

b) Equipo crítico

Es un equipo que bajo parámetros de mantenimiento, reparación, costo, seguridad, contexto operacional, etc. La pérdida de sus funciones impacta directamente en la producción.

c) Grupo electrógeno

Un grupo electrógeno es una máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna. (WIKIPEDIA, 2018)

d) ISO 14001

La Norma ISO 14001 nace como respuesta a la preocupación mundial por el medio ambiente y la proliferación de normativas ambientales regionales. Es en este contexto, que surge la necesidad de un indicador universal para evaluar los esfuerzos de una organización por alcanzar una protección ambiental confiable y adecuada. (Normas ISO, 2018)

e) Mantenimiento correctivo

Se define como aquel en el que espera que suceda la falla para luego corregirla. Este tipo de mantenimiento causa traumatismos en la organización debido a los daños aledaños causados, sean estos en una máquina, riesgos para la salud de los trabajadores, calidad del producto o servicio, efectos sobre el medio ambiente o la vida útil del equipo, entre otros. (VALENCIA, y otros, 2017)

f) Mantenimiento preventivo

Es el que como su nombre lo dice, previene las fallas. Ha sido el más usado y su base de funcionamiento es la estadística, la observación, las

recomendaciones del fabricante y el conocimiento del equipo. El lapso que se le permite trabajar a un dispositivo o un elemento, depende de criterios tales como la recomendación del fabricante, la valoración del técnico y sobre todo la duración en el tiempo observado en piezas similares. (VALENCIA, y otros, 2017)

g) Motor de combustión interna

Es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de la cámara de combustión. (WIKIPEDIA, 2018)

h) Overhaul

Es un conjunto de actividades de mantenimiento de un equipo donde se sustituyen y reparan todos los elementos sometidos a desgaste, para dejar el equipo como si tuviera cero horas de funcionamiento.

i) Periodo de producción

Es el tiempo designado por una empresa para realizar las actividades de transformación de la materia prima en un producto final que tiene un cierto uso en la sociedad.

j) Refinería de petróleo

Es el lugar donde se refina el petróleo, el cual mediante un proceso productivo se generan los combustibles derivados como gasolinas, naftas, kerosene, residual, etc.

k) Sala de generación

Es el lugar donde se transforma la energía mecánica proveniente de los motores de combustión en energía eléctrica para el consumo de los equipos de proceso en las instalaciones de una empresa.

l) Suministro de energía

Es la cantidad de energía contratada (electricidad) que una vivienda, compañía o ciudad adquiere para encender u operar los equipos que requieran de energía eléctrica para su funcionamiento.

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPÓTESIS

3.1.1. Hipótesis general

Con el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, se podrá aumentar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos.

3.1.2. Hipótesis específicas

H1: Con el análisis de modos y efectos de falla, se podrá disminuir los tiempos de mantenimiento y reparación al saber cómo reaccionar y acudir ante cualquier fallo potencial que se presente.

H2: Con la selección de las tareas de mantenimiento adecuadas en el diagrama de decisión del RCM, se podrá aumentar el tiempo medio entre fallas al disminuir la tasa de fallas de los motores.

3.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES

3.2.1. Variable independiente:

Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Definición: Son las tareas y/o actividades de mantenimiento basadas en la metodología del RCM.

3.2.2. Variable dependiente:

Disponibilidad de los motores CAT 3516.

Definición: Probabilidad de tener los motores disponibles en el momento que se requiera su operación.

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Instrumentos de medición
Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad	Análisis de modos y efectos de fallas	Cantidad posibles de fallas	Hoja de Información del AMEF
	Selección de tareas en el diagrama de decisión	Determina el tipo de tarea y el periodo	Hoja de decisión
Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Instrumentos de medición
Disponibilidad de los motores CAT 3516	Tiempos de reparación y mantenimiento	MTTR (Tiempo medio en reparación)	Horómetro
	Tiempo entre fallas	MTBF (Tiempo medio entre fallas)	Horómetro

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Tomando los conceptos de (ESPINOZA MONTEZ, 2010), el tipo de investigación de la presente tesis es tecnológica porque: “Tiene como propósito aplicar el conocimiento científico para solucionar los diferentes problemas que benefician a la sociedad”. En este caso, el diseño de un plan de mantenimiento para asegurar una alta disponibilidad de los motores CAT 3516.

Tomando los conceptos de (HERNÁNDEZ SAMPIERI, y otros, 2014), el diseño de esta investigación es no experimental de tipo transversal, ya que considerando la variable independiente como el plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad no se modifica intencionalmente debido a que se basa sólo en el método del RCM para obtener un resultado único en el tiempo de la variable dependiente que es la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los GGEE.

4.1.1. Parámetros de diseño

Tiempo total de operación planificada (TTOP)

Es el tiempo total que el equipo debe estar disponible para realizar su función requerida, sin contar las horas que él no se encuentra en el programa de producción o que se planifico una parada de planta, véase la figura 4.1.

Tiempo total de operación (TTO)

Es el tiempo de operación planificada sin contar el tiempo que el equipo estuvo en stand by.

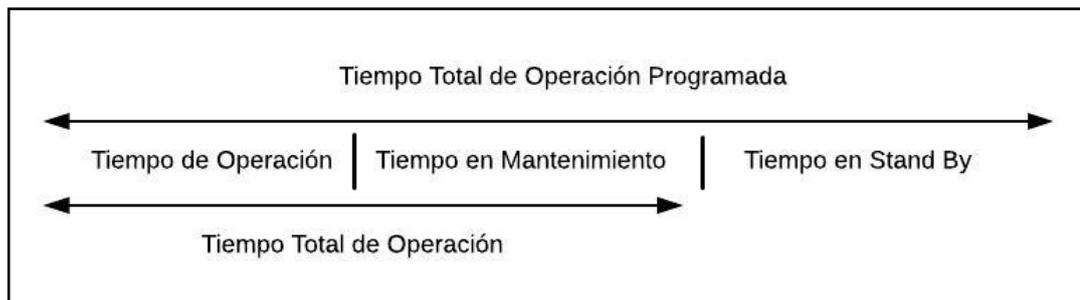
Tiempo de operación (TO)

Es el tiempo en el cual el equipo se encuentra operando, llevando a cabo la función por la cual fue adquirido.

Tiempo de mantenimiento o reparación (TR)

Es el tiempo durante el cual la máquina está fuera de servicio para fines de mantenimiento programado, inspecciones, monitoreos, preventivos y correctivos. A su vez, incluye las demoras por suministros de materiales o retraso en atención por personal tercero.

FIGURA N° 4.1: TIEMPOS DE DISEÑO



Fuente: Elaboración propia

Número de fallas

Es el número de veces que el equipo ha recibido la atención por mantenimiento no planificado durante el tiempo total de operación. Sin contar con las inspecciones, mantenimientos preventivos, monitoreos, etc.

Tiempo medio hasta fallar (MTTF)

El tiempo medio hasta la falla se define como el tiempo medio antes de que el artículo falle. (ISO 14224, 2006)

$$MTTF = \frac{\textit{Tiempo de operación}}{\textit{Número de fallas}}$$

Tiempo medio para reparar (MTTR)

El tiempo medio de reparación se define como el tiempo medio antes de que un artículo es reparado. (ISO 14224, 2006)

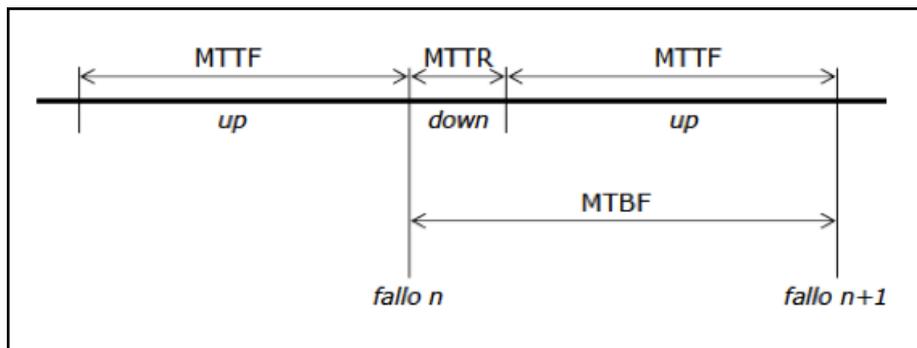
$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo de reparación}}{\textit{Número de fallas}}$$

Tiempo medio entre fallas (MTBF)

El tiempo medio entre fallas se define como el tiempo promedio entre dos fallas consecutivas (ISO 14224, 2006), véase la figura 4.2.

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo de operación}}{\text{Número de fallas}} = MTTF + MTTR$$

FIGURA N° 4.2: PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO



Fuente: (PARDO DIAZ, 2014)

Disponibilidad (A)

Capacidad de un elemento para estar en un estado para realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante de tiempo dado o en un intervalo de tiempo dado, suponiendo que se proporcionan los recursos externos requeridos. (ISO 14224, 2006)

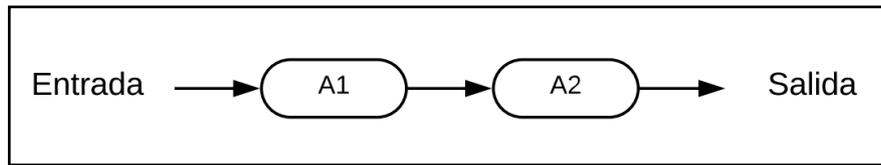
$$\text{Disponibilidad} = A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

Disponibilidad del sistema en serie

Dos componentes están en serie cuando el estado conjunto se encuentra en servicio si y solo si ambos están en servicio. (GONZALES MONTORO, y otros, 2016)

La figura 4.3 nos muestra la disposición de un sistema en serie, en los procesos industriales nos refiere a sistemas o equipos que operan uno después de otro para obtener algún producto.

FIGURA N° 4.3: SISTEMA EN SERIE



Fuente: Elaboración propia

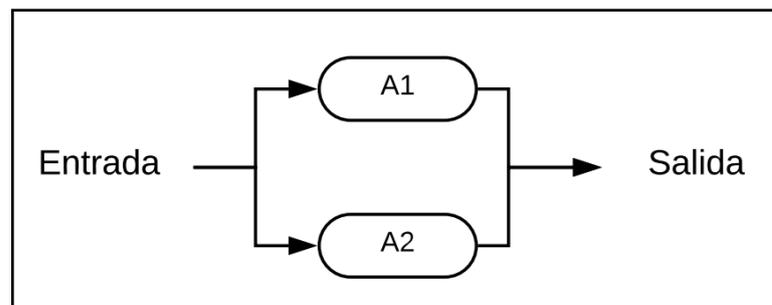
$$A_{serie} = \prod_{i=1}^N (A_i)$$

Disponibilidad del sistema en paralelo

Dos componentes están en paralelo cuando es suficiente que uno de los dos esté en servicio para que el conjunto este en servicio. (GONZALES MONTORO, y otros, 2016)

La figura 4.4 nos muestra la disposición de un sistema en paralelo, que nos indica que se cuenta con un equipo a la espera de operación para reemplazar al que viene operando sólo en el caso que se requiera.

FIGURA N° 4.4: SISTEMA EN PARALELO



Fuente: Elaboración propia

$$A_{paralelo} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - A_i)$$

4.1.2. Etapas de diseño

Las etapas para el desarrollo de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad son:

- Formación de los grupos de revisión.
- Determinación de los equipos o sistemas que se verán beneficiados con la aplicación del RCM.
- Definición del contexto operacional.
- Definición de las funciones.
- Determinación de las fallas funcionales.
- Identificación de los modos de fallas.
- Determinación de los efectos de fallas.
- Determinación de las consecuencias de falla.
- Diagrama de decisión.
- Selección de las tareas de mantenimiento.

4.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

Como la presente investigación es sobre dos motores del mismo modelo que se encuentran en la misma refinería de petróleo en la ciudad de Iquitos, por ello la población existente no amerita una toma de muestra.

4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN DOCUMENTAL

Las técnicas e instrumentos de recolección de la información documental en la presente investigación son los manuales de operación y mantenimiento de los motores CAT 3516, las bitácoras del operador de la sala de generación donde se detalla todas las incidencias del día a día de los grupos electrógenos.

4.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO

Las técnicas e instrumentos de recolección de la información de campo en la presente investigación son los informes de las reparaciones mayores (Overhaul) ejecutadas a los motores CAT 3516, parámetros de operación de los motores e imágenes de los sub sistemas componentes del motor.

4.5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

A continuación se detalla el proceso de análisis RCM para la elaboración del plan de mantenimiento, como primera instancia se determinó cual fue la situación inicial en la que se encontraron estos motores, para ello se recopilaron los datos de operación y falla desde el 2014 hasta el 2016.

4.5.1. Determinación de la disponibilidad inicial

En base a los históricos de falla de los motores (Mostrado en los anexos), se obtuvo los indicadores que se muestran en las tablas 4.2, 4.2 y 4.3.

TABLA N° 4.1: DISPONIBILIDAD ANUAL DEL MOTOR 322-K-1D

MOTOR CAT 3516 DEL GEE 322-K-1D						
Año	TO	TR	N°F	MTBF	MTTR	A
2014	3454	151	5	690.8	30.2	95.8%
2015	7706	2788	20	385.3	139.4	73.4%
2016	4008	339	5	801.6	67.8	92.2%
Promedio				625.9	79.1	87.1%

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.2: DISPONIBILIDAD ANUAL DEL MOTOR 322-K-1E

MOTOR CAT 3516 DEL GEE 322-K-1E						
Año	TO	TR	N°F	MTBF	MTTR	A
2014	5552	663	12	462.7	55.3	89.3%
2015	3547	397	15	236.5	26.5	89.9%
2016	3481	813	3	1160.3	271.0	81.1%
Promedio				619.8	117.6	86.8%

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.3: DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA

Año	322-K-1D	322-K-1E	A (Sistema)
2014	95.8%	89.3%	99.6%
2015	73.4%	89.9%	97.3%
2016	92.2%	81.1%	98.5%
Prom	87.1%	86.8%	98.5%

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que para el motor 322-K-1D disminuyó su disponibilidad en el año 2015 (año en el cual se le practicó el Overhaul por 42000 Hr), mientras

que para el motor 322-K-1E su menor disponibilidad fue en el 2016 (año en el cual se le practicó el Overhaul por 24000 Hr). Así mismo se ve que el 2014 fue el año que se obtuvo la mejor disponibilidad del sistema, pero que después de las reparaciones generales no se pudo volver a obtener este valor.

4.5.2. Determinación de la falla con mayor frecuencia

Utilizando el principio de Pareto, se determinó qué tipo de falla es la que tiene una mayor frecuencia para cada motor:

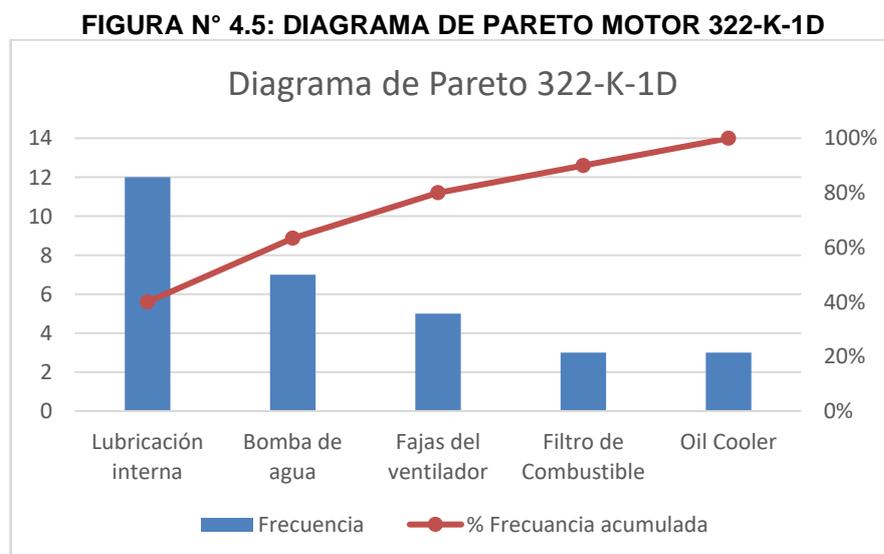
Analizando la frecuencia de fallas para el motor 322-K-1D:

TABLA N° 4.4: FRECUENCIA DE FALLAS EN EL MOTOR 322-K-1D
MOTOR CAT 3516 DEL GSEE 322-K-1D

Componente de Falla	Frecuencia	Frecuencia acumulada	% Frecuencia acumulada
Lubricación interna	12	12	40%
Bomba de agua	7	19	63%
Fajas del ventilador	5	24	80%
Filtro de Combustible	3	27	90%
Enfriador de aceite	3	30	100%

Fuente: Elaboración propia

Al pasar estos datos al diagrama de Pareto se tiene:



Fuente: Elaboración propia

Para el motor 322-K-1D los componentes con mayor incidencia de falla fueron los de la lubricación interna y la bomba de agua, pertenecientes a los sistemas de lubricación y refrigeración respectivamente.

Analizando la frecuencia de fallas para el motor 322-K-1E:

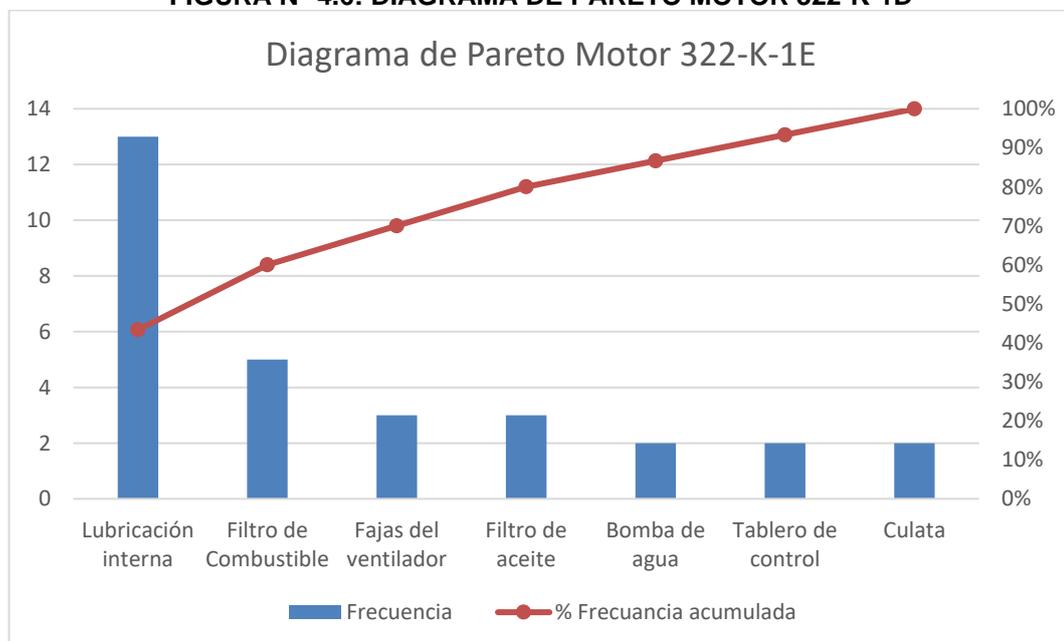
TABLA N° 4.5: FRECUENCIA DE FALLAS EN EL MOTOR 322-K-1E

MOTOR CAT 3516 DEL GGEE 322-K-1E			
Componente de Falla	Frecuencia	Frecuencia acumulada	% Frecuencia acumulada
Lubricación interna	13	13	43%
Filtro de Combustible	5	18	60%
Fajas del ventilador	3	21	70%
Filtro de aceite	3	24	80%
Bomba de agua	2	26	87%
Tablero de control	2	28	93%
Culata	2	30	100%

Fuente: Elaboración propia

Al pasar estos datos al diagrama de Pareto se tiene:

FIGURA N° 4.6: DIAGRAMA DE PARETO MOTOR 322-K-1D



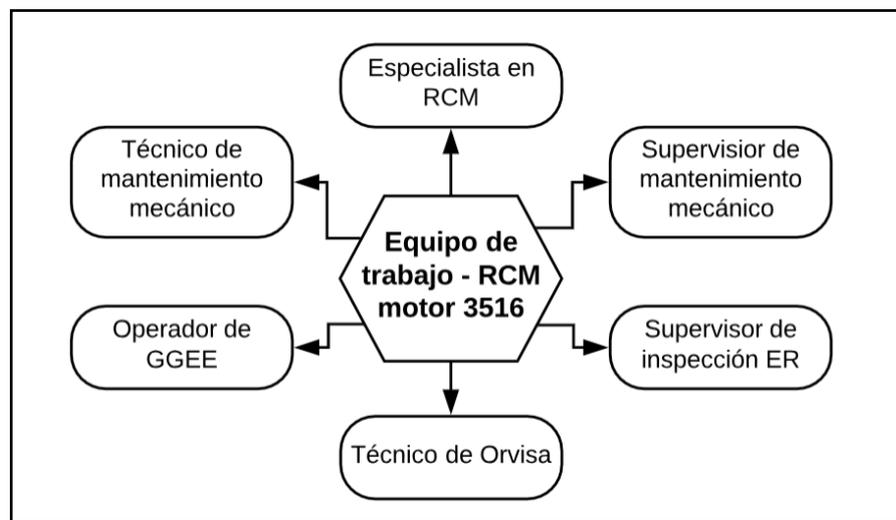
Fuente: Elaboración propia

Para el motor 322-K-1E, los componentes con mayor incidencia de falla fueron los de la lubricación interna y el filtro de combustible, pertenecientes a los sistemas de lubricación y combustible respectivamente.

4.5.3. Selección del equipo de trabajo

Para esta investigación se designó que el equipo de trabajo del RCM debe estar conformado por:

FIGURA N° 4.7: EQUIPO DE TRABAJO RCM



Fuente: Elaboración propia

Especialista en RCM

Es el facilitador, el encargado de indicar y hacer cumplir los protocolos de aplicación del RCM.

Supervisor de mantenimiento mecánico

El responsable del área de mantenimiento mecánico, conocedor del proceso y del plan de mantenimiento de los motores.

Técnico de mantenimiento mecánico

El responsable de realizar los mantenimientos del tipo técnico a los motores, quien lleva un control y monitoreo de los repuestos y reparaciones.

Supervisor de inspección ER

El responsable de la supervisión de los equipos rotativos (ER) de la planta, quien monitorea los parámetros de operación como vibración, temperatura, presión, etc.

Operador de GGEE

El responsable de la operación de los GGEE en la planta, quien lleva el control de las actividades realizadas durante el día, así como todas las ocurrencias en estos equipos.

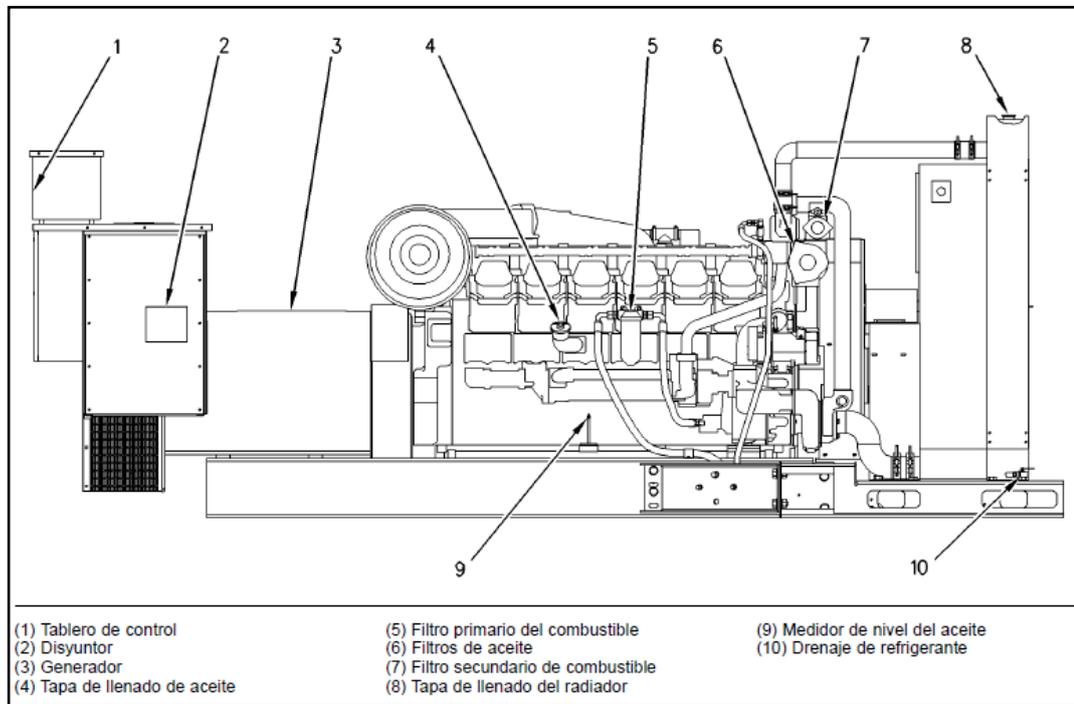
Técnico de Orvisa

El especialista en el mantenimiento de motores de combustión, conocedor por su experiencia de las fallas y modos de fallas en los motores de estos grupos.

4.5.4. Determinación del sistema de la investigación

Los motores Diesel CAT de la serie 3500 son motores de combustión interna de 4 tiempos de 16 cilindros en "V" y cilindrada total de 69.1 litros, con una relación de compresión de 13:1, de aspiración por turbocompresión y arranque neumático, cuyas características se muestran en la figura 4.8.

FIGURA N° 4.8: CARACTERÍSTICAS DE UN GGEE DE LA SERIE 3500



Fuente: (CATERPILLAR, 2009)

Estos motores están codificados como 322-K-1D y 322-K-1E los cuales fueron adquiridos en los años 2004 y 2014 respectivamente.

ILUSTRACIÓN N° 4.1: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1D (GRUPO 4)



Fuente: Propia

ILUSTRACIÓN N° 4.2: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1E (GRUPO 5)



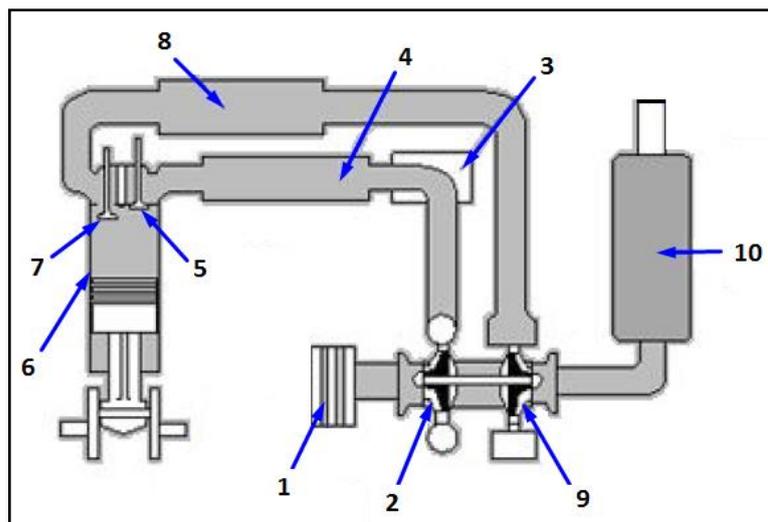
Fuente: Propia

4.5.5. Descripción de los sub-sistemas de la investigación

Sistema de Admisión de aire y escape

Este sistema controla la calidad y la cantidad de aire disponible para la combustión. Está compuesto por un turbocompresor y colectores de admisión y escape, ubicados en cada lado del motor; un post enfriador, ubicado entre las culatas del motor; y un sistema de válvulas de admisión y escape, controladas por un árbol de levas en cada lado del bloque.

FIGURA N° 4.9: SISTEMA DE ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE

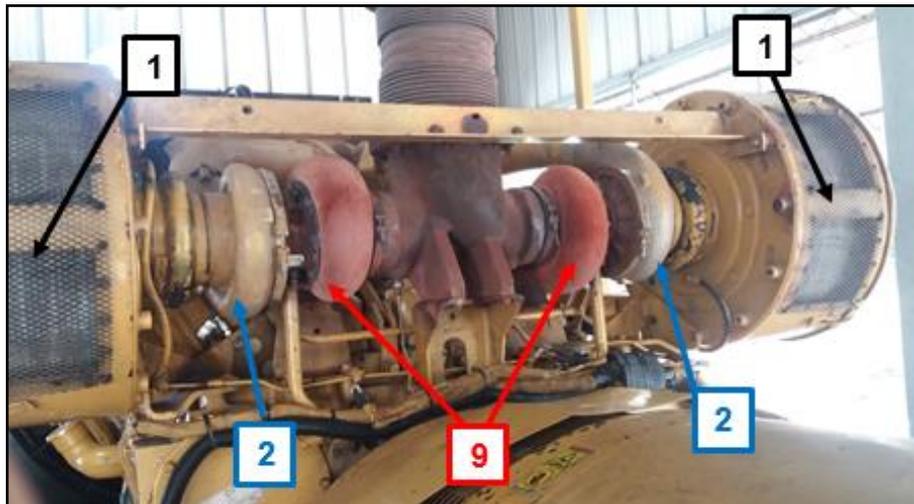


Fuente: (FERREYROS, 2006)

En la figura 4.9 se muestra el esquema del sistema de admisión de aire y escape, el cual consta de las siguientes partes.

- (1) Filtro de Aire
- (2) Rueda del compresor del turbocompresor
- (3) Post Enfriador
- (4) Colector de admisión
- (5) Válvula de admisión
- (6) Cilindro
- (7) Válvula de escape
- (8) Colector de escape
- (9) Rueda de la turbina del turbocompresor
- (10) Silenciador

ILUSTRACIÓN N°4.3: TURBOCOMPRESORES DEL MOTOR



Fuente: Propia

ILUSTRACIÓN N° 4.4: COLECTOR DE ESCAPE DEL MOTOR



Fuente: Propia

El aire ingresa al sistema atravesando unos filtros y luego es comprimido por la rueda compresora del turbocompresor (Véase la ilustración 4.3), el cual aumenta la temperatura del aire y hace que pierda densidad. La rueda compresora impulsa al aire a través del post enfriador (Véase la ilustración 4.5) donde intercambia calor con el agua de refrigeración y disminuye su temperatura y aumenta su densidad para una mejor combustión.

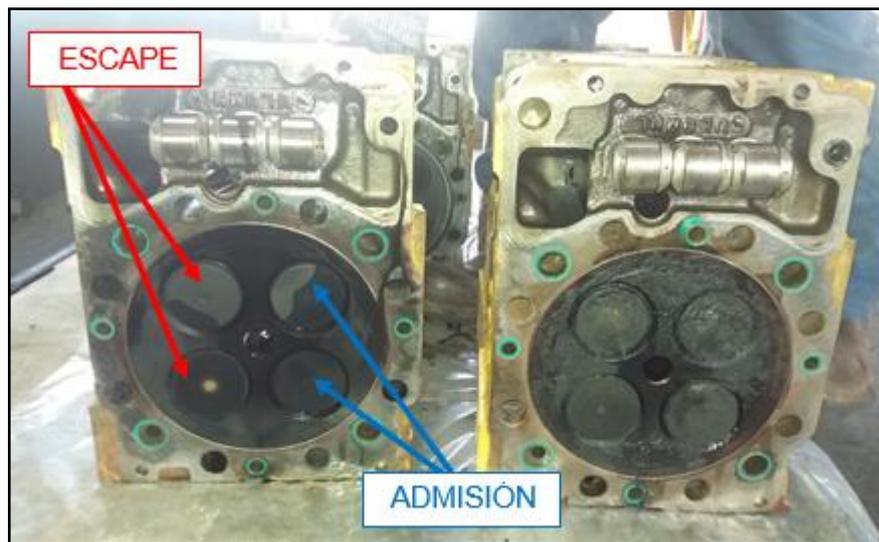
ILUSTRACIÓN N° 4.5: POST ENFRIADOR DEL MOTOR CAT 3516



Fuente: Propia

El flujo de aire es controlado por las válvulas de admisión en la cámara de combustión donde existen dos válvulas de entrada de aire y dos de salida de los gases de escape (Véase la ilustración 4.6) que actúan con movimiento del pistón al PMS (Punto Muerto Superior) y al PMI (Punto Muerto Inferior).

ILUSTRACIÓN N° 4.6: CULATA DE CADA CILINDRO DEL MOTOR



Fuente: Propia

Las válvulas de admisión se abren cuando el pistón se encuentra en el PMS (cuando el pistón se encuentra en el punto más alto dentro del cilindro) y empieza su carrera hacia el PMI (cuando el pistón está en el punto más bajo dentro del cilindro), es cuando el aire ingresa al cilindro ocupando todo el volumen; las válvulas de admisión se cierran y el pistón empieza el recorrido hacia el PMS, iniciando la carrera de compresión. Cuando el pistón está por llegar al PMS, se inyecta el combustible pulverizado en la cámara, el cual se mezcla con el aire comprimido a alta temperatura y se produce la combustión; la explosión impulsa el pistón hacia el PMI, empezando la carrera de Expansión. Una vez abajo, el pistón retorna hacia el PMS en la carrera de escape, es cuando las válvulas de escape se abren dejando pasar todos los gases producidos por la combustión hacia el

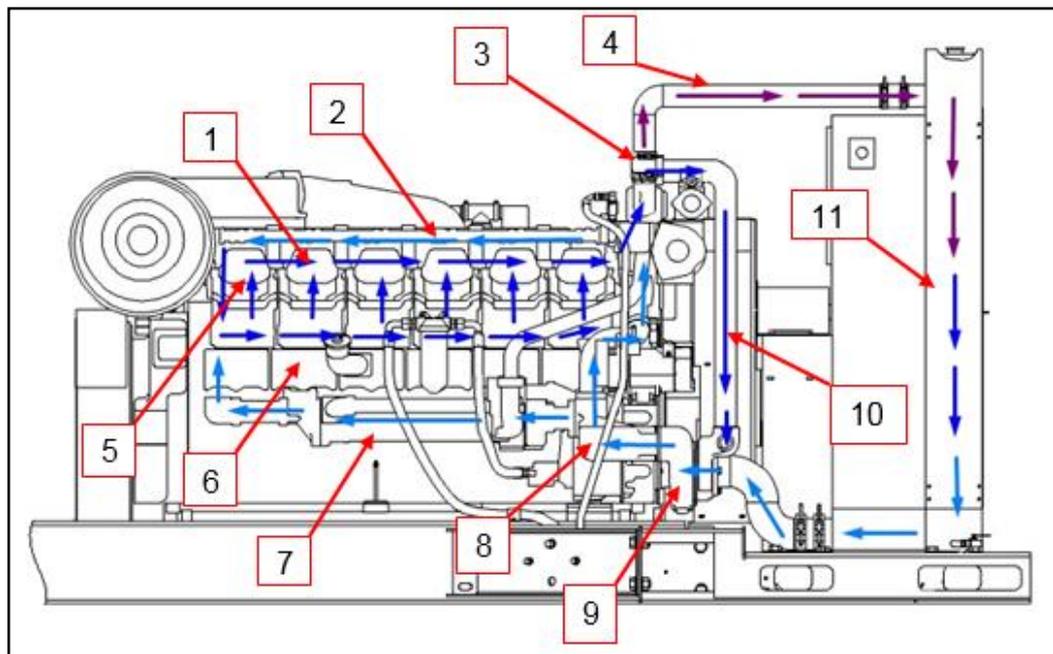
colector de escape (Véase la ilustración 4.4). Cuando el pistón llega al PMS, las válvulas de escape se cierran y el ciclo vuelve a comenzar.

Los gases producto de la combustión, escapan por el colector de escape con alta temperatura y velocidad; estos gases hacen girar a la rueda de la turbina del turbocompresor, la cual está unida al mismo eje de la rueda compresora.

Sistema de refrigeración

Este sistema se encarga de mantener las temperaturas de trabajo del motor a un nivel adecuado, eliminando el exceso de calor de sus componentes internos.

FIGURA N° 4.10: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN



Fuente: (CATERPILLAR, 2009)

En la figura 4.10 se muestra el esquema del sistema de refrigeración, el cual consta de las siguientes partes.

- (1) Colector de agua
- (2) Post enfriador
- (3) Carcasa del regulador de temperatura del agua

- (4) Tubo de ingreso de agua al radiador
- (5) Culata
- (6) Bloque de cilindros
- (7) Enfriador de aceite del motor
- (8) Tubo de descarga de la bomba de agua
- (9) Bomba de agua
- (10) Tubo de derivación
- (11) Radiador

El refrigerante proveniente del motor o del radiador es enviado por la bomba hacia el post enfriador (Véase la ilustración 4.7) y hacia el enfriador de aceite (Véase la ilustración 4.8). El refrigerante que es enviado al post enfriador pasa por el núcleo de este, intercambiando calor con el aire que sale del turbocompresor, y luego es enviado al bloque de los cilindros.

ILUSTRACIÓN N° 4.7: BOMBA DE AGUA DEL MOTOR CAT 3516



Fuente: Propia

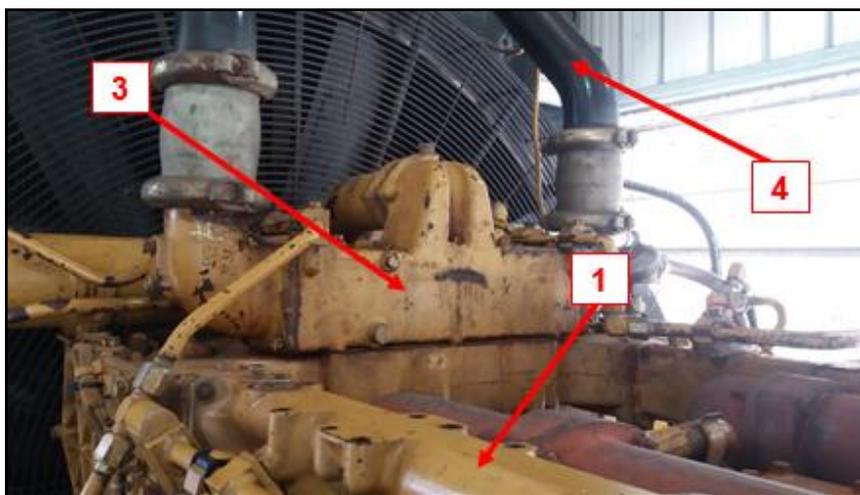
ILUSTRACIÓN N° 4.8: ENFRIADOR DE ACEITE DEL MOTOR



Fuente: Propia

El refrigerante que fluye a través del enfriador de aceite es enviado a las camisas del bloque de cilindros, mezclándose con el refrigerante proveniente del post enfriador y dirigiéndose al colector de distribución que conecta la parte superior de las camisas de todos los cilindros. Luego, el refrigerante fluye alrededor de las camisas de los cilindros y entra a las culatas, saliendo por un codo de cada culata que conecta a un colector de agua que lo envía a la carcasa del regulador de temperatura (Véase la ilustración 4.9).

ILUSTRACIÓN N° 4.9: CARCASA DEL REGULADOR DE TEMPERATURA



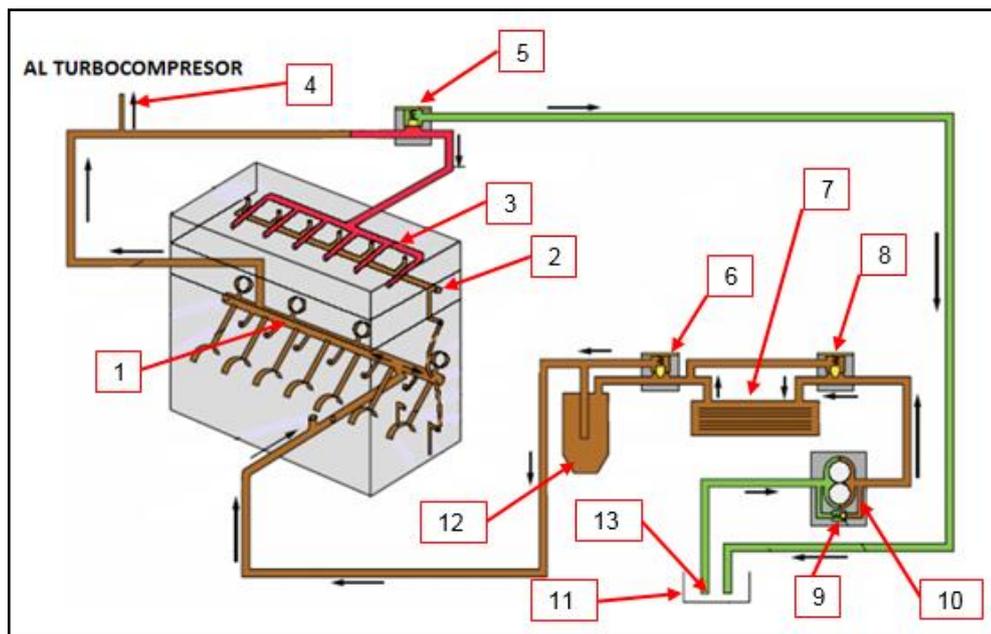
Fuente: Propia

La carcasa del regulador de temperatura posee cuatro reguladores de temperatura. Antes de que los reguladores se abran, el refrigerante frío es enviado por la tubería de derivación hacia la bomba de agua, a medida que la temperatura del refrigerante aumenta. Los reguladores comienzan a abrirse quedando el flujo de refrigerante en el tubo de derivación restringido y todo el refrigerante es enviado por unas tuberías hacia el radiador, donde pierde temperatura y es enviado hacia la bomba para empezar el circuito.

Sistema de Lubricación

Este sistema se encarga de mantener separadas las superficies en movimiento por una película de aceite lubricante que minimiza la fricción entre ellas; a su vez, funciona como refrigerante y como agente limpiador.

FIGURA N° 4.11: SISTEMA DE LUBRICACIÓN



Fuente: (FINNING, 2016)

En la figura 4.11 se muestra el esquema del sistema de lubricación el cual consta de las siguientes partes.

- (1) Galería principal de aceite
- (2) Galería de aceite del árbol de levas
- (3) Galería de aceite del jet de enfriamiento del pistón

- (4) Líneas de suministro de aceite al turbocompresor
- (5) Válvula de secuencia
- (6) Válvula de derivación del filtro de aceite del motor
- (7) Enfriador de aceite del motor
- (8) Válvula de derivación del enfriador de aceite del motor
- (9) Válvula de alivio de la bomba de aceite
- (10) Bomba de aceite del motor
- (11) Carter
- (12) Filtro de aceite del motor
- (13) Filtro campana del Carter

El aceite es extraído del Carter por medio de la bomba de aceite (Véase la ilustración 4.10), pasando antes por un filtro de tipo campana localizado en el interior del Carter. La bomba de aceite posee una válvula de alivio que controla la presión de salida de la bomba; el aceite es enviado al enfriador de aceite para disminuir la temperatura de ingreso a los filtros, una válvula de derivación permite el paso directo del aceite hacia los filtros de aceite si es que el enfriador de aceite posee obstrucciones o si el diferencial de presión se encuentra elevado (26 ± 3 Psi).

ILUSTRACIÓN N° 4.10: BOMBA DE ACEITE DEL MOTOR CAT 3516



Fuente: Propia

El aceite limpio que sale de los filtros de aceite se dirige hacia la galería principal y hacia las galerías de aceite del árbol de levas; una válvula de derivación se encuentra en la carcasa de los filtros de aceite (Véase la ilustración 4.11) que permite el paso del aceite sin filtrar a las galerías cuando el diferencial de presión en el filtro aumenta. El aceite en la galería principal conecta al cigüeñal y a los muñones de biela; el aceite en la galería del árbol de levas se dirige hacia la culata y hacia los balancines; por medio de un pasaje conectado a las galerías del árbol de levas el aceite es enviado a los grupos de engranajes delantero y trasero del motor (Véase la ilustración 4.12).

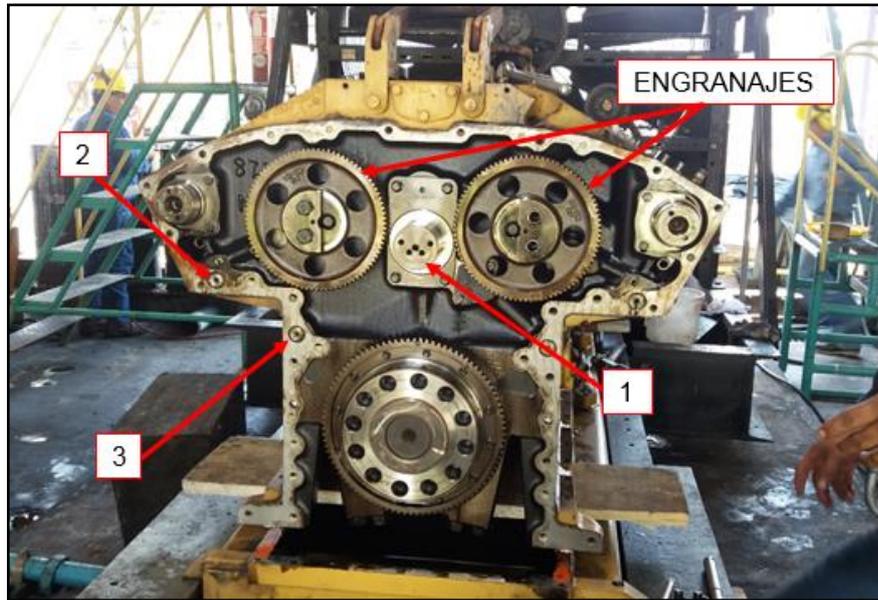
ILUSTRACIÓN N° 4.11: FILTRO DE ACEITE DEL MOTOR CAT 3516



Fuente: Propia

La válvula de secuencia se encarga de enviar el aceite a las galerías de aceite del jet de enfriamiento de los pistones. Estas válvulas se abren aproximadamente a 19 Psi cuando la galería principal se encuentra presurizada; esto disminuye el tiempo de acumulación de aceite en el arranque. El jet de enfriamiento de los pistones brinda un chorro con dos aberturas, una se dirige a la parte inferior del pistón para lubricar los pasadores y la otra a la parte céntrica del pistón para refrigerarlo.

ILUSTRACIÓN N° 4.12: ENGRANAJES TRASEROS DEL MOTOR CAT 3516



Fuente: Propia

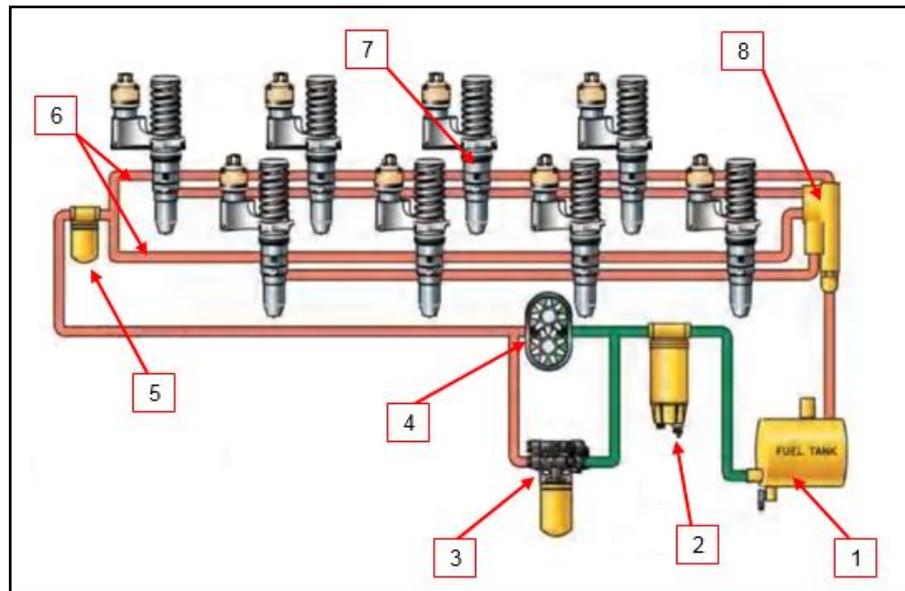
Por medio de las cañerías de suministro, el aceite es enviado a los turbocompresores, para luego ser drenado a las carcasas de la volante a cada lado del motor.

Luego que el aceite pasa por todo el sistema es enviado hacia el colector o Carter para iniciar el proceso.

Sistema de combustible

El sistema de combustible se encarga de abastecer e inyectar el combustible en la cámara un instante antes de que el pistón llegue al PMS, con la cantidad precisa de acuerdo a la demanda de potencia del motor para generar un adecuado proceso de combustión en un determinado tiempo.

FIGURA N° 4.12: SISTEMA DE COMBUSTIBLE



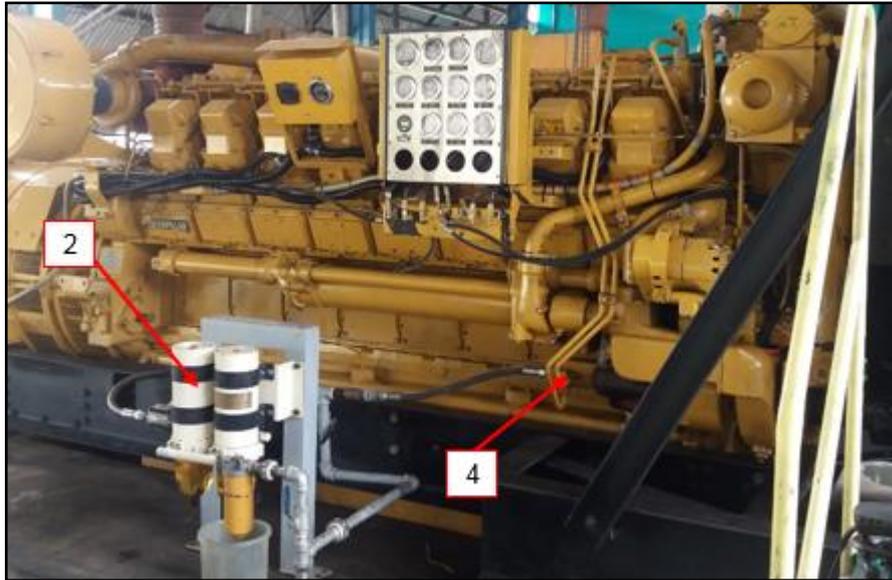
Fuente: (Tecsup, 2016)

En la figura 4.12 se muestra el esquema del sistema de combustible, el cual consta de las siguientes partes.

- (1) Tanque de combustible
- (2) Filtro separador de agua
- (3) Bomba de cebado de combustible
- (4) Bomba de transferencia de combustible
- (5) Filtro de combustible
- (6) Colectores de combustible
- (7) Inyectores de combustible
- (8) Válvula reguladora de presión

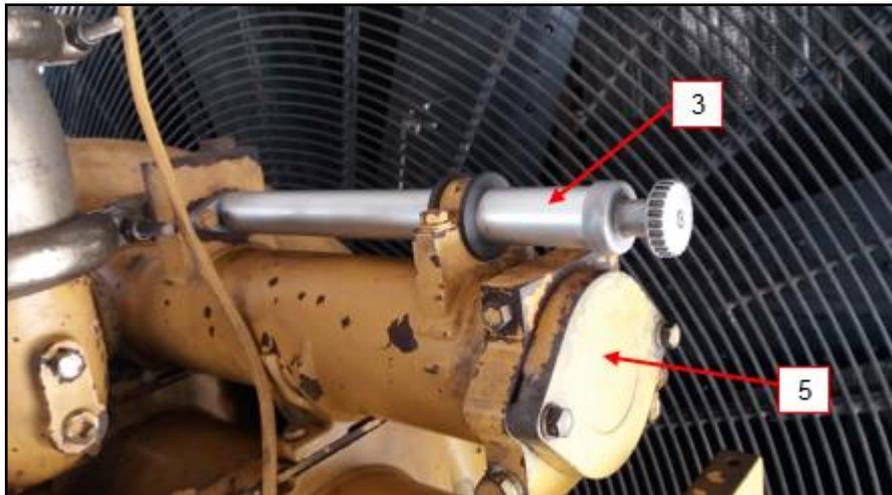
La bomba de transferencia succiona el combustible a través del filtro separador de agua (o filtro primario) por medio de la bomba de transferencia (Véase la ilustración 4.13) y lo impulsa a los colectores de combustible (Véase la ilustración 4.15) pasando antes por los filtros de combustible; al ingreso de cada colector de combustible existe una válvula reguladora de presión que mantiene la presión del combustible entre 60 y 65 PSI.

ILUSTRACIÓN N° 4.13: FILTROS SEPARADORES DE AGUA DEL MOTOR



Fuente: Propia

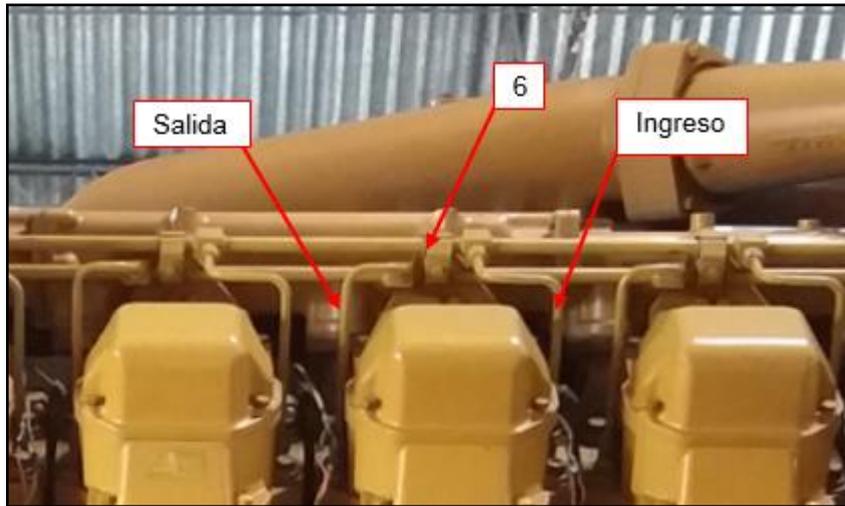
ILUSTRACIÓN N° 4.14: BOMBA DE CEBADA Y FILTRO DE COMBUSTIBLE



Fuente: Propia

El combustible es enviado a los inyectores (Véase la ilustración 4.16) a través de una cañería de ingreso, para ser pulverizado y generar la combustión en la cámara. El combustible que no es usado retorna por una cañería a la línea de retorno colectores, pasa por un enfriador de combustible y es enviado de retorno al tanque de almacenamiento.

ILUSTRACIÓN N° 4.15: COLECTOR DE COMBUSTIBLE



Fuente: Propia

ILUSTRACIÓN N° 4.16: INYECTOR DE COMBUSTIBLE



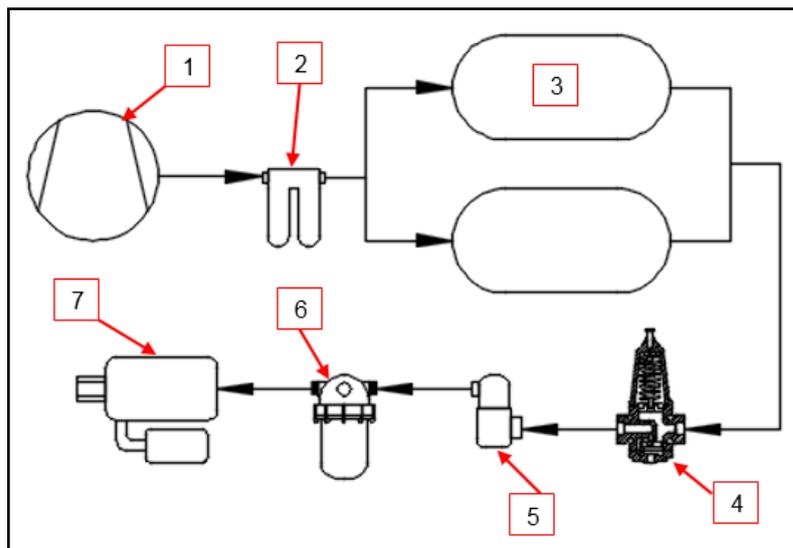
Fuente: Propia

La bomba de ceba (Véase la ilustración 4.14) es usada cuando se realiza un cambio de filtros de combustible por mantenimiento o alguna reparación que ocasione que el sistema quede despresurizado. Esta bomba está compuesta por un embolo y un pistón que succiona y envía el combustible por todo el sistema para su correcto funcionamiento.

Sistema de arranque

El sistema de arranque se encarga de dar el primer par de arranque a la volante del motor para dar inicio al movimiento; esto se da por medio del giro del piñón del arrancador que es accionado por el ingreso de aire a una presión de 150 PSI.

FIGURA N° 4.13: SISTEMA DE ARRANQUE NEUMÁTICO



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.13 se muestra el esquema del sistema de arranque, el cual consta de las siguientes partes principales.

- (1) Compresor
- (2) Filtro separador de agua
- (3) Tanque pulmón de aire
- (4) Válvula reguladora de presión
- (5) Válvula relé
- (6) Filtro lubricador
- (7) Arrancador

El compresor (Véase la ilustración 4.17) succiona el aire, lo comprime y lo envía a los tanques pulmones a través del filtro separador de agua y luego pasa por la válvula reguladora de presión la cual reduce la presión a 150

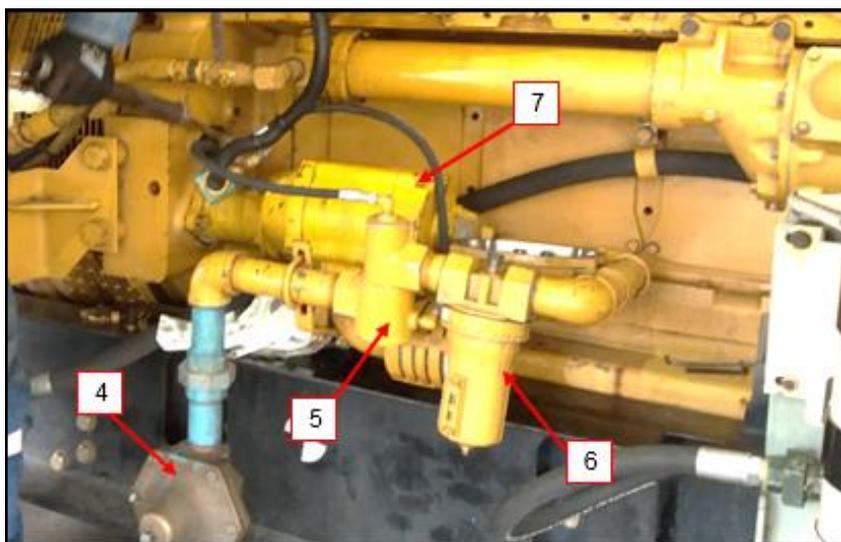
PSI, pasando por una válvula relé, que permite el paso del aire a través del lubricador, entrando al arrancador y haciendo girar las paletas del mismo, transmitiendo el giro hacia el bendix para dar el giro inicial a la volante del motor. En la ilustración 4.18 se muestra la disposición del sistema de arranque en el motor CAT 3516.

ILUSTRACIÓN N° 4.17: COMPRESOR Y TANQUES PULMÓN



Fuente: Propia

ILUSTRACIÓN N° 4.18: POSICIÓN DEL ARRANCADOR EN EL MOTOR



Fuente: Propia

4.5.6. Determinación del contexto operacional

Los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos 322-K-1D y 322-K-1E están ubicados en la sala de generación de la Refinería Iquitos, la cual tiene una potencia instalada de 1.1 MW pero cuando no opera a plena carga, consume una potencia de 0.95 MW). Estos equipos operan alternativamente las 24 horas del día y son los encargados de alimentar de energía eléctrica a toda la refinería.

4.5.7. Desarrollo del AMEF

A continuación se detalla el análisis de modos y efectos de fallas realizadas a los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos, considerando al Motor CAT 3516 como sistema general y como a los sub-sistema los mencionados en 4.5.4.

TABLA N° 4.6: HOJA DE INFORMACIÓN – ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)							
HOJA DE INFORMACIÓN RCM							
SISTEMA		MOTOR CATERPILLAR 3516		REALIZADO POR:			
				Raúl Alvarez Caycho			
SUB-SISTEMA		ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE		FECHA DE ANÁLISIS:			
				07/09/2016			
N°	FUNCIÓN	N°	FALLA FUNCIONAL	N°	MODOS DE FALLA (Posibles motivos)	N°	EFEECTO DE FALLA (Que ocurre)
1	Suministrar un flujo de aire a los cilindros del motor a una temperatura máxima de 115°C.	1	No suministra aire al motor.	1	Filtro de aire saturado por partículas extrañas.	1	El aire no ingresa a los cilindros produciendo un exceso de combustible en la cámara de combustión, parando inmediatamente el motor.
				2	Turbocompresor inmóvil por falta de lubricación o mala lubricación en cojinetes.	1	La falta de succión del turbocompresor impide el flujo de aire necesario en los cilindros para la combustión del motor .
		2	Flujo de aire insuficiente	1	Filtro de aire sucio.	1	Mala relación de aire combustible en la cámara de combustión y el motor pierde potencia.
				3	Temperatura de ingreso a los cilindros excede los 115°C	1	Aftercooler con exceso de partículas extrañas.
2	Permitir el escape de los gases de combustión a no más de 620°C y con una coloración casi transparente.	1	No permite el escape de los gases.	1	Turbocompresor inmóvil por falta de lubricación o mala lubricación en cojinetes.	1	Los gases de escape no se expulsan con normalidad por obstrucción de los alabes de la turbina con agentes externos o exceso de corrosión, ocasionando que el compresor no succione el aire y que el motor se detenga.
				2	Los gases de escape salen con una temperatura mayor a 620°C.	1	Cabeza de válvula de escape desgastadas (Soplado de válvula)
2		3	Gases de escape presentan un color negro.	1	Filtro de aire sucio.	1	Restricción en la admisión del aire ocasiona una mala relación de aire combustible en la cámara de combustión.
				2	Aftercooler con exceso de partículas extrañas.	1	Al no haber una buena transferencia de calor en el aftercooler, el aire muy caliente adelanta la combustión en la cámara.
		4	Gases de escape presentan un color azul.	1	Anillos del pistón desgastados.	1	Presencia de aceite en la cámara de combustión.
				2	Retenes de válvulas en mal estado.	1	El aceite entra a través del vástago de la válvula a la cámara de combustión.
5	Gases de escape presentan un color blanco.	1	Camisas de los cilindros fisuradas.	1	Fisura de camisa permite el pase de agua a la cámara de combustión.		
		2	Manifold de escape con presencia de agua externa.	1	El agua que ingresa por el manifold de escape descendiendo hasta la cámara de combustión.		
3	Contener al aire de admisión y a los gases de escape.	1	Incapaz de contener el aire de admisión y los gases de escape	1	Múltiple de admisión con fuga de aire por vibración del motor.	1	Pernos desajustados del múltiple de admisión ocasionan fugas de aire.
				2	El turbocompresor presenta fugas de aire.	1	Exceso de combustible en la cámara de combustión.

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.7: HOJA DE INFORMACIÓN - REFRIGERACIÓN

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)

HOJA DE INFORMACIÓN RCM

SISTEMA		MOTOR CATERPILLAR 3516		REALIZADO POR:		Raúl Alvarez Caycho		HOJA	1		
SUB-SISTEMA		REFRIGERACIÓN		FECHA DE ANÁLISIS:		07/09/2016		DE	1		
N°	FUNCIÓN	N°	FALLA FUNCIONAL	N°	MODOS DE FALLA (Posibles motivos)	N°	EFEECTO DE FALLA (Que ocurre)				
1	Mantener la temperatura del refrigerante del motor entre los 79 y 99°C.	1	Temperatura del refrigerante por debajo de 79°C.	1	Termostato atascado en su posición abierta.	1	El refrigerante es enviado solo a la radiador ocasionando que los componentes del motor no presenten una dilatación normal de trabajo al momento del arranque.				
				2	Temperatura del refrigerante por encima de los 99°C.	1	Termostato atascado en su posición cerrada.	1	El refrigerante no pasa por el radiador y ocasiona un sobrecalentamiento del motor.		
						2	Paneles del radiador sucios y obstruidos.	1	No se produce una buena transferencia de calor del refrigerante ocasionando un sobrecalentamiento del motor.		
						3	Fajas del ventilador destempladas.	1	El eje del ventilador patina y no se produce una buena transferencia de calor ocasionando un sobrecalentamiento del motor.		
						4	Falta de refrigerante en el sistema.	1	El refrigerante no enfría completamente todas las partes del sistema ocasionado un sobrecalentamiento del motor.		
5	Concentración equivocada del refrigerante.	1	Desproporción en la combinación del agua con el aditivo ocasionando un sobrecalentamiento del motor.								
2	Bombear el refrigerante a las partes del sistema de refrigeración.	1	Incapaz de bombear el refrigerante	1	Rotura del eje del impulsor.	1	El refrigerante no circula por el sistema ocasionando un sobrecalentamiento del motor.				
				2	Dientes del piñón de la bomba rotos.	1	No se produce la transferencia de movimiento a la bomba ocasionando que el refrigerante no circule por el sistema, aumentando la temperatura del motor.				
				3	Alabes del impulsor de la bomba rotos.	1	La bomba pierde presión y no envía el refrigerante.				
		2	Bombee el refrigerante de manera defectuosa.	1	Sello de la bomba desgastado.	1	Fuga del refrigerante por el sello de la bomba ocasiona que el sistema pierda presión.				
				2	Dientes del piñón de la bomba desgastados.	1	Se produce una transferencia de movimiento deficiente a la bomba ocasionando que el refrigerante no circule a la presión requerida por el sistema.				
				3	Alabes del impulsor de la bomba desgastados.	1	La bomba pierde presión y no envía el refrigerante correctamente.				
				4	Cavitación en el sistema.	1	El aire atrapado en el sistema ocasiona que la bomba no llegue a la presión requerida y que las burbujas implosionen causando erosión en las partes internas de la bomba y del motor.				
				5	Tapón del radiador defectuoso.	1	El tapón del radiador no mantiene sellado el sistema ocasionando que pierda presión y que no refrigere de manera adecuada.				
3	Contener el refrigerante.	1	Incapaz de contener al líquido refrigerante.	1	Mangueras de circulación con fugas.	1	Abrazaderas desajustadas en conexiones de mangueras ocasionan una pérdida del refrigerante.				
					2	Fisuras en tubos de circulación ocasionan pérdida del refrigerante.					
				2	Paneles del radiador con fugas.	1	Fisuras en los paneles del radiador ocasionan pérdida del refrigerante.				
				3	Sello del termostato roto.	1	Fuga por el sello del termostato ocasiona una pérdida del refrigerante.				
				4	Empaquetadura de culata rota	1	El refrigerante fuga hacia el exterior ocasionando una pérdida del refrigerante.				
						2	El refrigerante fuga hacia la cámara de combustión ocasionando una mala combustión y sobrecalentamiento del motor por pérdida de refrigerante.				
				5	Fisuras en los componentes interiores del sistema de refrigeración.	1	El refrigerante fuga hacia el exterior ocasionando una pérdida del refrigerante.				
2	El refrigerante fuga hacia el interior del motor ocasionando sobrecalentamiento del motor.										

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.8: HOJA DE INFORMACIÓN - LUBRICACIÓN

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)										
HOJA DE INFORMACIÓN RCM										
SISTEMA		MOTOR CATERPILLAR 3516		REALIZADO POR:		Raúl Alvarez Caycho	HOJA	1		
SUB-SISTEMA		LUBRICACIÓN		FECHA DE ANÁLISIS:		14/09/2016		DE	1	
N°	FUNCIÓN	N°	FALLA FUNCIONAL	N°	MODOS DE FALLA (Posibles motivos)	N°	EFECTO DE FALLA (Que ocurre)			
1	Reducir el rozamiento entre los elementos del motor que están en contacto y en movimiento.	1	Incapaz de reducir el rozamiento.	1	Filtros de aceite saturados.	1	Partículas extrañas en el sistema ocasionan aumento en el rozamiento de los componentes del motor.			
				2	Aceite inadecuado.	1	Las propiedades del aceite no son las adecuadas para lubricar al motor generando sobrecalentamientos por rozamiento y mala lubricación.			
				3	Aceite contaminado.	1	Fugas de agua que llegan al Carter contaminan el aceite y reduce sus propiedades de lubricación.			
						2	Fugas de combustible que llegan al Carter contaminan el aceite y reduce sus propiedades de lubricación.			
2	Bombear el aceite lubricante a una presión de 40 a 80 PSI desde el Carter hasta todos los componentes del sistema de lubricación.	1	Incapaz de bombear el aceite lubricante.	1	Piñones de la bomba de aceite rotos.	1	El aceite no es enviado a las galerías del motor por deficiencia de los piñones de la bomba de aceite.			
				2	Bombea aceite a una presión menor de 40 PSI.	1	Exceso de juego entre el muñón y el metal de bancada ocasiona una perdida de presión en el sistema.			
						2	Filtros de aceite sucios.	1	Suciedad en los filtros impide que el aceite salga a la presión recomendada.	
						3	Nivel bajo de aceite en el Carter.	1	Desgaste prematuro de las piezas del motor.	
						4	Piñones de la bomba de aceite desgastados.	1	Holgura entre los piñones de la bomba ocasionan una baja presión de aceite.	
						5	Válvula de alivio permanece abierta.	1	Resorte de la válvula de alivio fatigado ocasiona una perdida de presión por recircular el lubricante.	
						6	Campana de succión de aceite obstruida.	1	La bomba aspira el aceite lubricante con dificultad mandando menor presión al sistema.	
				3	Bombea el lubricante a una presión mayor a los 80 PSI.	1	Nivel alto de aceite en el Carter.	1	Puede dañar empaques y sellos produciendo fugas de aceite.	
						2	Válvula de alivio atascada en posición cerrada.	1	El aceite no libera la presión a la salida de la bomba y aumenta la presión del sistema.	
						3	Ductos y cañerías del sistema obstruidos.	1	La obstrucción de los ductos genera que disminuya el espacio para que fluya el lubricante y aumente la presión.	
3	Contener el aceite lubricante.	1	Incapaz de contener el aceite.	1	Fugas de aceite por los sellos de la bomba, enfriador de aceite, turbocompresor, guías de las válvulas o anillos del pistón.	1	Constante perdida de aceite por fugas en los componentes del sistema ocasionan un aumento en el consumo de aceite.			
				2	Carter fisurado o roto	1	Constante perdida de aceite .			

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.9: HOJA DE INFORMACIÓN - COMBUSTIBLE

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)								
HOJA DE INFORMACIÓN RCM								
SISTEMA		MOTOR CATERPILLAR 3516		REALIZADO POR:		Raúl Alvarez Caycho		
SUB-SISTEMA		COMBUSTIBLE		FECHA DE ANÁLISIS:		21/09/2016		
N°	FUNCIÓN	N°	FALLA FUNCIONAL	N°	MODOS DE FALLA (Posibles motivos)	N°	EFEECTO DE FALLA (Que ocurre)	
1	Abastecer e inyectar el combustible a las cámaras en el momento preciso para generar una correcta combustión.	1	Incapaz de inyectar el combustible a la cámara.	1	Cañería hacia los filtros de combustible obstruida.	1	El combustible impulsado por la bomba de transferencia no llega a los filtros.	
				2	Filtros de combustible saturados	1	Los filtros no permiten el paso del combustible hacia las válvulas de regulación.	
				3	Válvula de regulación atascada	1	La válvula de regulación atascada en su posición cerrada no permite el paso del combustible hacia los inyectores.	
		2	Inyecta el combustible de una manera deficiente.		1	Filtros de combustible sucios	1	La suciedad en los filtros no permite el buen paso del combustible hacia los inyectores.
					2	Boquillas de los Inyectores obstruidas	1	La obstrucción de algunos inyectores impide que el combustible llegue a las cámaras y que el motor trabaje a la potencia indicada.
					3	Boquillas de los inyectores desgastadas	1	Exceso de combustible en la cámara de combustión
					4	Mala sincronización del motor	1	La inyección del combustible de manera adelantada o retardada produce pérdida de potencia en el motor así como una mala combustión y pérdidas de combustible.
2	Bombear el combustible a una presión normal de 50 a 75 PSI, con una presión máxima de trabajo de 125 PSI desde el tanque hasta las cámaras de combustión.	1	Incapaz de bombear el combustible	1	Engranajes de la bomba de transferencia rotos	1	La bomba de transferencia no envía el combustible hacia las cámaras.	
				2	Bombea el combustible a una presión menor a 50 PSI	1	Engranajes de la bomba de transferencia desgastados	1
		2	Cuerpo de la bomba desgastado			1	La bomba no mantiene la presión necesaria.	
		3	Válvula Bypass de la bomba de transferencia atascada en posición abierta.			1	Parte del combustible recircula por la bomba de transferencia impidiendo llegar a la presión requerida.	
		4	Falta de combustible			1	La bomba no capta el combustible suficiente y succiona aire parcialmente.	
		3	Bombea el combustible a una presión mayor a 125 PSI	1	Válvula Bypass de la bomba de transferencia atascada en posición cerrada.	1	La sobre presión en el sistema genera que el combustible empiece a fugar por la conexiones o inyectores.	
		3	Contener el combustible	1	Incapaz de contener al combustible	1	Líneas de combustible rotas o desajustadas	1
2	Sellos en los filtros en mal estado					1	La presión del sistema genera que el combustible fugue por los sellos en mal estado.	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.10: HOJA DE INFORMACIÓN - ARRANQUE

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)									
HOJA DE INFORMACIÓN RCM									
SISTEMA		MOTOR CATERPILLAR 3516		REALIZADO POR:		Raúl Alvarez Caycho	HOJA	1	
SUB-SISTEMA		ARRANQUE		FECHA DE ANÁLISIS:		28/09/2016		DE	1
N°	FUNCIÓN	N°	FALLA FUNCIONAL	N°	MODOS DE FALLA (Posibles motivos)	N°	EFECTO DE FALLA (Que ocurre)		
1	Conseguir que el motor tenga la inercia de giro necesaria por medio de un arrancador neumático accionado por una presión de 150 PSI.	1	La presión de aire de ingreso al arrancador es menor a 150 PSI	1	Fugas de aire del sistema	1	La presión de aire que llega al arrancador no es la suficiente para poner en movimiento a la volante del motor.		
				2	Fallas con la válvula de regulación de presión	1	La válvula reguladora de presión permite el pase de presiones erróneas detectadas por el sensor de presión el cual no acciona al arrancador.		
				3	Fallas internas en el compresor	1	Las fallas internas en el compresor ocasionan una deficiente presión que llega al arrancador no generando el movimiento de la volante.		
		2	La presión de aire de ingreso al arrancador es nula	1	Válvulas de ingreso de aire cerradas	1	No llega presión al arrancador, el sistema del compresor se sobre presiona y se activa la válvula de seguridad.		
				2	Compresor apagado	1	El compresor no genera presión al sistema.		
		3	La presión de aire de ingreso al arrancador es mayor a 150 PSI	1	Fallas con la válvula de regulación de presión	1	El exceso de presión en el arrancador genera daños en los sellos.		
				2	Válvula Reguladora de presión mal calibrada	1	La válvula reguladora de presión envía demasiada presión al arrancador ocasionando daños internos en este.		
		4	El arrancador no da la inercia suficiente al motor.	1	Dientes del piñón de ataque rotos	1	Los dientes rotos del piñón de ataque no generan el suficiente agarre en la volante.		
				2	Paletas del rotor rotas	1	Las paletas rotas del rotor no generan la velocidad de giro suficiente del piñón de ataque.		
				3	Rodamientos del arrancador en mal estado	1	La fricción causada por el desgaste en los rodamientos genera pérdidas de la energía en la		
		5	El sistema no activa al arrancador	1	Fallas en el sensor de presión	1	El sensor de presión no envía la señal de apertura de la válvula de ingreso del arrancador.		
				2	Válvula Relay del arrancador dañada	1	La válvula realy dañada no permite el paso de la presión de accionamiento del arrancador.		
				3	Fallas en el panel de control	1	El panel de control no acciona ningún contactor del sistema.		
				4	Cables de alimentación de los sensores dañados	1	El panel de control no recibe la señal de los sensores para iniciar el arranque.		

Fuente: Elaboración propia

4.5.8. El diagrama de decisión

A continuación se detalla la aplicación del diagrama de decisión del RCM determinado para cada modo de falla descrito en el AMEF realizado.

**TABLA N° 4.11: HOJA DE DECISIÓN – ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE
AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)**

HOJA DE DECISIÓN RCM																	
SISTEMA:		MOTOR CATERPILLAR 3516						REALIZADO POR:				Raúl Alvarez Caycho		HOJA	1		
SUB-SISTEMA		ADMISIÓN DE AIRE Y ESCAPE						FECHA DE ANÁLISIS:				07/09/2016		DE	1		
REFERENCIA DE INFORMACIÓN				EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	TAREAS "A FALTA DE"				MODO DE CONTROL (Tarea propuesta)	PERIODICIDAD G5 / G4 (Horas)	REALIZADA POR
F.	F. F.	M. F.	E. F.	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	1	1	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Limpieza / Cambio de filtros de aire	1000/500	Personal de Mantenimiento	
1	1	2	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Cambio de aceite y filtro de aceite	1000/500	Personal de Mantenimiento	
1	1	2	2	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Cambio de aceite y filtro de aceite	1000/500	Personal de Mantenimiento	
1	2	1	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Limpieza / Cambio de filtros de aire	1000/500	Personal de Mantenimiento	
1	3	1	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la temperatura del aire en el manifold	4	Operador del GGEE	
1	3	2	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la temperatura del aire en el manifold	4	Operador del GGEE	
2	1	1	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Cambio de aceite y filtro de aceite	1000/500	Personal de Mantenimiento	
2	2	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Test de Compresión	A condición	Técnico Caterpillar	
2	3	1	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Limpieza / Cambio de filtros de aire	1000/500	Personal de Mantenimiento	
2	3	2	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la temperatura del aire en el manifold	4	Operador del GGEE	
2	4	1	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la presión de aceite del motor	4	Operador del GGEE	
2	4	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación del nivel de aceite en el Carter	8	Operador del GGEE	
2	5	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación del nivel del agua en el radiador	8	Operador del GGEE	
2	5	2	1	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado			
3	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de fugas de aire al inicio de cada turno	8	Operador del GGEE	
3	1	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de fugas de aire al inicio de cada turno	8	Operador del GGEE	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.12: HOJA DE DECISIÓN - REFRIGERACIÓN

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)

HOJA DE DECISIÓN RCM

SISTEMA:		MOTOR CATERPILLAR 3516											REALIZADO POR:		Raúl Alvarez Caycho	HOJA	1
SUB-SISTEMA		REFRIGERACIÓN											FECHA DE ANÁLISIS:		07/09/2016	DE	1
REFERENCIA DE INFORMACIÓN				EVALUACIÓN DE LAS				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	TAREAS "A FALTA DE"				MODO DE CONTROL (Tarea propuesta)	PERIODICIDAD G5/G4 (Horas)	REALIZADA POR
F.	F. F.	M. F.	E. F.	H	S	E	O	H4	H5	S4							
1	1	1	1	N	-	-	-	N	N	S	-	-	-	Cambio del termostato	6000	Personal de mantenimiento	
1	2	1	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la temperatura del agua en el sistema	4	Operador del GGEE	
1	2	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Limpeza externa del radiador	1000/500	Personal de mantenimiento	
1	2	3	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Templado de fajas y ajuste de pernos de chumaceras	1000/500	Personal de mantenimiento	
1	2	4	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar el nivel del refrigerante	8	Operador del GGEE	
1	2	5	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio del refrigerante	3000	Personal de mantenimiento	
2	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	Técnico de Caterpillar	
2	1	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	Técnico de Caterpillar	
2	1	3	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	Técnico de Caterpillar	
2	2	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	Técnico de Caterpillar	
2	2	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	Técnico de Caterpillar	
2	2	3	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	Técnico de Caterpillar	
2	2	4	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio del refrigerante	3000	Personal de mantenimiento	
2	2	5	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación de la hermeticidad del tapón	1000/500	Personal de mantenimiento	
3	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar / Ajustar las mangueras	1000/500	Operador del GGEE	
3	1	1	2	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar / Ajustar las mangueras	1000/500	Operador del GGEE	
3	1	2	1	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento Programado			
3	1	3	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Cambio del termostato	6000	Personal de mantenimiento	
3	1	4	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación de las fugas en los componentes del sistema.	8	Operador del GGEE	
3	1	4	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la temperatura del agua en el sistema	4	Operador del GGEE	
3	1	5	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación de las fugas en los componentes del sistema.	8	Operador del GGEE	
3	1	5	2	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la temperatura del agua en el sistema	4	Operador del GGEE	

Fuente: Elaboración propia

**TABLA N° 4.13: HOJA DE DECISIÓN - LUBRICACIÓN
AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)**

HOJA DE DECISIÓN RCM																	
SISTEMA:				MOTOR CATERPILLAR 3516							REALIZADO POR:			Raúl Alvarez Caycho		HOJA	1
SUB-SISTEMA				LUBRICACIÓN							FECHA DE ANÁLISIS:			14/09/2016		DE	1
REFERENCIA DE INFORMACIÓN				EVALUACIÓN DE LAS				H1	H2	H3	TAREAS "A FALTA DE"				MODO DE CONTROL (Tarea propuesta)	PERIODICIDAD G5/G4 (Horas)	REALIZADA POR
F.	F. F.	M. F.	E. F.	H	S	E	O	O1 N1	O2 N2	O3 N3	H4	H5	S4				
1	1	1	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio de filtros	1000/500	Personal de mantenimiento	
1	1	2	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado			
1	1	3	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Análisis de aceite.	2000	Personal de Inspección	
1	1	3	2	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Análisis de aceite.	2000	Personal de Inspección	
2	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Revisar los componentes de la bomba	6000	Técnicos de Caterpillar	
2	2	1	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Análisis de aceite.	1000/500	Personal de Inspección	
2	2	2	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la presión del diferencial de aceite.	4	Operador del GGEE	
2	2	3	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Revisar el nivel del aceite en el Carter	8	Operador del GGEE	
2	2	4	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Revisar los componentes de la bomba	6000	Técnicos de Caterpillar	
2	2	5	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Revisar los componentes de la bomba	6000	Técnicos de Caterpillar	
2	2	6	1	N	-	-	-	N	N	N	N	N	-	Ningún mantenimiento programado			
2	3	1	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Revisar el nivel del aceite en el Carter	8	Operador del Grupo	
2	3	2	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Revisar los componentes de la bomba	6000	Técnicos de Caterpillar	
2	3	3	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación de la presión de aceite.	4	Operador del GGEE	
3	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección visual al comienzo de cada turno	8	Operador del GGEE	
3	1	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección visual al comienzo de cada turno	8	Operador del GGEE	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.14: HOJA DE DECISIÓN - COMBUSTIBLE

AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)																		
HOJA DE DECISIÓN RCM																		
SISTEMA:				MOTOR CATERPILLAR 3516								REALIZADO POR:			Raúl Alvarez Caycho		HOJA	1
SUB-SISTEMA				COMBUSTIBLE								FECHA DE ANÁLISIS:			21/09/2016		DE	1
REFERENCIA DE INFORMACIÓN				EVALUACIÓN DE LAS				H1 S1	H2 S2	H3 S3	TAREAS "A FALTA DE"			MODO DE CONTROL (Tarea propuesta)		PERIODICIDAD (Horas)	REALIZADA POR	
F.	F. F.	M.	E. F.	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4					
1	1	1	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio de filtros		1000	Personal de mantenimiento	
1	1	2	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio de filtros		1000	Personal de mantenimiento	
1	1	3	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio de filtros		1000	Personal de mantenimiento	
1	2	1	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Verificación del diferencial de presión de combustible		4	Operador del GGEE	
1	2	2	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar / Ajustar los inyectores		2000	Personal de mantenimiento	
1	2	3	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar / Ajustar los inyectores		2000	Personal de mantenimiento	
1	2	4	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Calibración de válvulas e inyectores		2000	Personal de mantenimiento	
2	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Revisión de la bomba de transferencia		6000	Personal de mantenimiento	
2	2	1	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Revisión de la bomba de transferencia		6000	Personal de mantenimiento	
2	2	2	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Revisión de la bomba de transferencia		6000	Personal de mantenimiento	
2	2	3	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Revisión de la bomba de transferencia		6000	Personal de mantenimiento	
2	2	4	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificar el nivel en el tanque de combustible		8	Operador del GGEE	
2	3	1	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Revisión de la bomba de transferencia		6000	Personal de mantenimiento	
3	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspeccionar las mangueras y abrazaderas		8	Operador del GGEE	
3	1	2	1	S	N	N	S	N	N	N	-	-	-	Verificación de la presión de combustible		4	Operador del GGEE	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.15: HOJA DE DECISIÓN - ARRANQUE
AMFE (Análisis del Modos y Efectos de Falla)

HOJA DE DECISIÓN RCM																			
SISTEMA:				MOTOR CATERPILLAR 3516								REALIZADO POR:				Raúl Alvarez Caycho		HOJA	1
SUB-SISTEMA				ARRANQUE								FECHA DE ANÁLISIS:				28/09/2016		DE	1
REFERENCIA DE INFORMACIÓN				EVALUACIÓN DE LAS				H1	H2	H3	TAREAS "A FALTA DE"				MODO DE CONTROL (Tarea propuesta)		PERIODICIDAD (Horas)	REALIZADA POR	
F.	F. F.	M. F.	E. F.	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4						
1	1	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación de fugas en el sistema	8	Operador del GGEE			
1	1	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación de la presión de la Válvula reguladora	6000	Personal de mantenimiento			
1	1	3	1	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Mantenimiento preventivo del compresor	6000	Personal de mantenimiento			
1	2	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación de apertura y cierre de válvulas	En cada arranque	Operador del GGEE			
1	2	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Verificación del encendido del compresor	En cada arranque	Operador del GGEE			
1	3	1	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Verificación de la presión de la Válvula reguladora	6000	Personal de mantenimiento			
1	3	2	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Verificación de la presión de la Válvula reguladora	6000	Personal de mantenimiento			
1	4	1	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección del Arrancador	6000	Personal de mantenimiento			
1	4	2	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección del Arrancador	6000	Personal de mantenimiento			
1	4	3	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección del Arrancador	6000	Personal de mantenimiento			
1	5	1	1	N	-	-	-	N	N	N	S	-	-	Comprobación de dispositivos de protección	1000/500	Personal de mantenimiento			
1	5	2	1	N	-	-	-	S	-	-	-	-	-	Inspección del Arrancador	6000	Personal de mantenimiento			
1	5	3	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección del tablero de control	8	Operador del GGEE			
1	5	4	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Revisión de los cables de alimentación de energía	8	Operador del GGEE			

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V RESULTADOS

Se recopiló la información obtenida en la hoja de información y la hoja de decisión del AMEF para determinar el plan de mantenimiento a los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos.

TABLA N° 5.1: PLAN DE MANTENIMIENTO DE LOS MOTORES CAT 3516

PLAN DE MANTENIMIENTO				
EQUIPO: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1D / 322-K-1E				
SISTEMA	DESCRIPCIÓN DE TAREA	PERIODICIDAD (Horas)		REALIZADA POR
		322-K-1D	322-K-1E	
Admisión de aire y escape	Limpieza / Cambio de filtros de aire	500	1000	Personal de mantenimiento
Refrigeración	Limpieza externa del radiador	500	1000	Personal de mantenimiento
Refrigeración	Inspeccionar y/o Ajustar las correas / Engrasar chumaceras	500	1000	Personal de mantenimiento
Refrigeración	Verificación de la hermeticidad del Tapón del radiador	500	1000	Personal de mantenimiento
Refrigeración	Inspeccionar / Ajustar las abrazaderas de las mangueras	500	1000	Personal de mantenimiento
Lubricación	Cambio de aceite y filtros de aceite	500	1000	Personal de Mantenimiento
Lubricación	Limpieza del respiradero del Carter	500	1000	Personal de Mantenimiento
Combustible	Cambio de filtros de combustible	1000	1000	Personal de mantenimiento
Arranque	Comprobación de dispositivos de protección	500	1000	Personal de mantenimiento
Admisión de aire y escape	Inspección del turbocompresor	2000	2000	Personal de mantenimiento
Lubricación	Análisis de aceite.	2000	2000	Personal de Inspección
Combustible	Inspeccionar / Ajustar los inyectores	2000	2000	Técnico de Caterpillar
Combustible	Calibración de válvulas e inyectores	2000	2000	Técnico de Caterpillar
Refrigeración	Cambio del refrigerante	3000	3000	Personal de mantenimiento
Admisión de aire y escape	Inspeccionar el aftercooler	6000	6000	Técnico de Caterpillar
Refrigeración	Cambio del termostato	6000	6000	Personal de Mantenimiento
Refrigeración	Inspeccionar la bomba de refrigerante	6000	6000	Técnico de Caterpillar
Lubricación	Revisar los componentes de la bomba de aceite	6000	6000	Técnico de Caterpillar
Combustible	Revisión de la bomba de transferencia	6000	6000	Personal de mantenimiento
Arranque	Verificación de la presión de la Válvula reguladora	6000	6000	Personal de mantenimiento
Arranque	Mantenimiento preventivo del compresor	6000	6000	Personal de mantenimiento
Arranque	Inspección del Arrancador	6000	6000	Personal de mantenimiento
Arranque	Verificación de apertura y cierre de válvulas	Arranque	Arranque	Operador del GGEE
Arranque	Verificación del encendido del compresor	Arranque	Arranque	Operador del GGEE
Admisión de aire y escape	Test de Compresión	Condición	Condición	Técnico de Caterpillar

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se elaboró un cuadro para el control de parámetros durante la operación del equipo y un check list de buenas prácticas, los cuales deben ser llenados por el operador de los grupos electrógenos de la sala de generación.

TABLA N° 5.2: CONTROL DE PARÁMETROS MOTOR 3516

CONTROL DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN									
EQUIPO: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1D / 322-K-1E									
ÍTEM	SISTEMA	PARÁMETROS DE OPERACIÓN	VALORES	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00
1	General	Velocidad del motor	1200 Rpm						
2	Admisión de aire y escape	Temperatura en el manifold de aire	115 °C Max						
3	Admisión de aire y escape	Temperatura de los gases de escape	620 °C Max						
4	Admisión de aire y escape	Presión del filtro de aire izquierdo	25 in H2O						
5	Admisión de aire y escape	Presión del filtro de aire derecho	26 in H2O						
6	Refrigeración	Temperatura de agua en las chaquetas	79-99°C						
7	Lubricación	Presión de aceite del motor	40 Psi Min						
8	Lubricación	Temperatura de aceite del motor	110 °C Max						
9	Lubricación	Presión diferencial del filtro de aceite	15 Psi Max						
10	Combustible	Presión de combustible	50-75 Psi						
11	Combustible	Presión diferencial de combustible	15 Psi Max						
OBSERVACIONES:									

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.3: CHECK LIST MOTOR CAT 3516

CHECK LIST DE BUENAS PRACTICAS					
EQUIPO: GRUPO ELECTRÓGENO 322-K-1D / 322-K-1E					
ÍTEM	SISTEMA	DESCRIPCIÓN DE TAREA	00:00	08:00	16:00
1	Admisión de aire y escape	Verificación de fugas de aire de admisión			
2	Admisión de aire y escape	Revisión del ajuste de los pernos del sistema de aire y escape			
3	Refrigeración	Verificación de fugas de refrigerante en el exterior del motor			
4	Refrigeración	Verificación del nivel de refrigerante			
5	Lubricación	Verificación del nivel de aceite en el Carter			
6	Lubricación	Verificación de fugas de aceite en cañerías, empaques, anillos, etc.			
7	Combustible	Verificación de nivel del tanque de combustible			
8	Combustible	Revisión del estado de las cañerías y abrazaderas de combustible			
9	Arranque	Verificación de fugas del sistema de arranque			
10	Arranque	Inspección del tablero de control			
11	Arranque	Inspección de los cables de energía de los sensores			
OBSERVACIONES:					

Fuente: Elaboración propia

Para la comprobación de la hipótesis de esta investigación, se obtuvo la bitácora del operador de la sala de grupos electrógenos correspondiente al año 2017 (Ver anexos), habiendo desarrollado las tareas acorde al plan de mantenimiento propuesto durante el año 2017. Se obtuvieron los siguientes datos de disponibilidad según muestran las tablas 5.4 al 5.6.

TABLA N° 5.4: DISPONIBILIDAD 2017 MOTOR 322-K-1D

MOTOR CAT 3516 DEL GEE 322-K-1D							
Año	TO	TR	N°F	MTTF	MTBF	MTTR	A
2017	5822	208	4	1403.5	1455.5	52.0	96.6%

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.5: DISPONIBILIDAD 2017 MOTOR 322-K-1E

MOTOR CAT 3516 DEL GEE 322-K-1E							
Año	TO	TR	N°F	MTTF	MTBF	MTTR	A
2017	3267	120	3	1049.0	1089.0	40.0	96.5%

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.6: DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA 2017

Año	322-K-1D	322-K-1E	A (Sistema)
2017	96.6%	96.5%	99.9%

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

En base a la hipótesis general de esta investigación: Con el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, se podrá aumentar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos, se realizó el análisis de los históricos de falla de los motores determinando los tiempos de reparación, tiempos entre falla y tiempos para fallar, realizando el cálculo de la disponibilidad determinando los % correspondientes a los años 2014 al 2016; para luego mediante la aplicación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad se pudo demostrar que la disponibilidad, tanto de cada motor así como del sistema, aumentó con respecto al promedio de los años de evaluación.

Asimismo se tienen los antecedentes mencionados en esta investigación, los cuales demuestran que con la aplicación de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad se logra aumentar la disponibilidad de los equipos en cuestión; a su vez, se logra una disminución en los tiempos de reparación y un aumento en los tiempos medios entre fallas.

6.2. CONTRASTACIÓN DE LOS RESULTADOS CON ESTUDIOS SIMILARES

En base a los resultados de la investigación, se elaboró un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad a los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos, analizando las fallas funcionales en base a las funciones de cada sistema seleccionado, determinando los posibles modos de falla y los efectos que estos producen; analizando cada uno de estos modos de falla en el diagrama de decisión; para luego, de ser necesario, obtener una tarea preventiva que suprima dicho modo de falla.

Con la implementación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, se logró aumentar la disponibilidad de los motores CAT de los grupos electrógenos en un 1.4% con respecto al promedio de la disponibilidad obtenida en los años de evaluación.

Según los antecedentes mencionados, con la aplicación de la metodología del RCM la disponibilidad en los equipos de operación en una planta industrial mejora de 1% a 7.5%.

6.3. RESPONSABILIDAD ÉTICA

En esta investigación se respetaron los derechos de los autores citados, referenciándolos en la bibliografía, basándonos en la norma ISO 690 sugerida por el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía; asimismo se respetó el esquema de desarrollo propuesto por el mismo Instituto de Investigación, desarrollando cada punto con la responsabilidad moral y la veracidad que amerita el presente informe de tesis.

A su vez, se realizó el plan de mantenimiento siguiendo los conceptos descritos en la norma SAE JA1011 y SAE JA1012, la cual detalla los procedimientos para la correcta aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

CONCLUSIONES

1. En base a los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que, con el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad a los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos, aumentó el índice de disponibilidad en un 1.4% para el sistema de generación con respecto al promedio de la disponibilidad de los años de evaluación, siendo un 9.4% de aumento para el grupo 322-K-1D y un 9.7% para el grupo 322-K-1E.
2. Asimismo se concluye que, con la aplicación del análisis de modos y efectos de falla, disminuyó el tiempo de reparación de 79 a 52 horas para el grupo 322-K-1D y de 117 a 40 horas para el grupo 322-K-1E, tomando las consideraciones preventivas que se obtuvieron del AMEF para poder actuar ante cualquier falla potencial.
3. De igual manera, se demostró que, con la selección de las tareas de mantenimiento adecuadas en el diagrama de decisión, se obtuvo un aumento del tiempo medio entre fallas de 626 a 1456 horas para el grupo 322-K-1D y de 620 a 1089 horas para el grupo 322-K-1E, reduciendo la tasa de fallas al aplicar las tareas preventivas de la hoja de decisión.

RECOMENDACIONES

1. A fin de mejorar el proceso para la obtención de la disponibilidad, se recomienda el compromiso del operador de los equipos en análisis para realizar la toma de los siguientes datos: horas de operación, tiempo de reparación del equipo, número de fallas en un periodo de tiempo, ocurrencias del día a día y soluciones que se dieron en el caso de una falla.
2. Con el fin de obtener el mejor resultado del análisis de modos y efectos de falla, se recomienda ser específico al determinar el modo de falla de una falla funcional de manera que sea posible tener un manejo de fallas para la toma de acción y no profundizar en mucho detalle que tome demasiado tiempo el análisis de cada modo de falla.
3. Se debe identificar de manera correcta que tipo de falla se está evaluando, ya sea una falla evidente o una falla oculta, para así poder evaluar el tipo de tarea que se debe implementar, sobretodo en las tareas que presentan fallas que el operador no las puede percibir.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMENDOLA LEÓN, Luis José. 2016. *Modelos mixtos de confiabilidad.* s.l. : PMM Institute for Learning, 2016. p. 265. ISBN-10: 8494389734.

CAJAS MALDONADO, Carlos Alberto and JANETA MELO, Alberto. 2009. *Planificación del mantenimiento basado en el método de confiabilidad RCM para motores estacionarios de la planta TERMOPICHINCHA S.A., Central Guangopolo.* Tesis (Ingeniero mecánico), Escuela politecnica nacional, Facultad de ingeniería mecánica. Quito, 2009. p. 275.

CASTILLO SANTILLÁN, Ángel Vinicio. 2017. *Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema Power Oil de la estación Atacapi del B57-LI de Petroamazonas.* Tesis (Magister en gestión del mantenimiento industrial), Escuela superior politécnica de Chimborazo, Instituto de posgrado y educación continua. Riobamba, 2017. p. 112.

CATERPILLAR. 2009. *Manual de operación y mantenimiento de grupos electrógenos 3500.* 2009.

COETZEE, Jasper. 2004. *Maintenance.* s.l. : Trafford Publishing, 2004. p. 475. ISBN: 1412023629.

DA COSTA BURGA, Martín. 2010. *Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a motores a gas de dos tiempos en pozos de alta producción.* Tesis (Ingeniero mecánico), Pontificia universidad católica del Perú, facultad de ingeniería mecánica. Lima, 2010. p. 120.

ESPINOZA MONTEZ, Ciro. 2010. *Metodología de la investigación tecnológica.* Huancayo : Espinoza Montes, Ciro, 2010. ISBN: 978-612-00-0222-3.

FERREYROS. 2006. *Introducción a los motores caterpillar. Sistemas de motores.* Lima, 2006.

—. 2006. Sistema de admisión y escape. *Sistemas de motores*. Lima : s.n., 2006.

FINNING. 2016. Localización de fallas en motores de maquinarias. *Maquinarias pesadas*. [Online] 2016. <https://es.scribd.com/document/271957905/Manual-Localizacion-Fallas-Averias-Componentes-Sistemas-Motores-Maquinaria-Caterpillar>.

GARCÍA GARRIDO, Santiago. 2009. Indicadores de mantenimiento. *RENOVETEC*. [Online] EME DESIGN, 2009. [Cited: Septiembre 13, 2018.] <http://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/300-indicadores-en-mantenimiento>.

GONZALES MONTORO, Juan Nehuen, CHERINI, Renato and FINOCHIETTO, Jorge Manuel. 2016. *Modelos para la estimación de disponibilidad en redes de fibra óptica*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba . Córdoba, 2016. p. 22.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos and BAPTISTA LUCIO, Maria del Pilar. 2014. *Metodología de la investigación*. 6ta edición. Mexico : Mc Graw Hill, 2014. p. 600. ISBN: 978-1-4562-2396-0.

HUAIRE, Edson Jorge. 2017. *Manual de metodología de la investigación*. Lima : Fondo editorial USIL, 2017.

ISO 14224. 2006. *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. 2nd Edition. Switzerland : ISO, 2006. p. 170.

MOUBRAY, John. 2004. *Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)*. [trans.] Sueiro ELLMANN. 2da Edición. Carolina del Norte : Edwars Brothers, 2004. p. 433. ISBN: 09539603-2-3.

Normas ISO. 2018. ISO 14001 gestión medioambiental. *Normas ISO*. [Online] 2018. <http://www.normas-iso.com/iso-14001/>.

PARDO DIAZ, Alfonso. 2014. Alto rendimiento y alta disponibilidad (Parte 1/3). *Cetatech*. [Online] Noviembre 24, 2014. [Cited: Septiembre 21, 2018.] https://cetatech.ceta-ciemat.es/2014/11/alto-rendimiento-y-alta-disponibilidad-parte-1_3/.

PARRA MÁRQUEZ, Carlos Alberto and CRESPO MÁRQUEZ, Adolfo. 2012. *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos*. 1era Edición. Sevilla : Ingeman, 2012. p. 260. ISBN: 978-84-95499-67-7.

PASCUAL, Rodrigo. 2008. *El arte de mantener*. Santiago, 2008.

PETROPERU. 2018. Precios de combustibles. *Petroperu*. [Online] 2018. https://www.petroperu.com.pe/Storage/tbl_listas_de_precio/fld_1177_Archivo_file/869-x9Kq2Jj5Cq3Di2O.pdf.

SAE JA 1011. 1999. *Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad*. SAE JA 1011, 1999.

SAE JA 1012. 2002. *Una Guía para la norma de mantenimiento centrado en confiabilidad*. SAE JA 1012, 2002.

TECSUP. 2016. *Gestión del mantenimiento basado en confiabilidad*. Lima : Tecsup, 2016. p. 172.

Tecsup. 2016. Manual sistema de inyeccion diesel. *Mecanica Automotriz*. [Online] Marzo 2016. <https://www.mecanicoautomotriz.org/1409-manual-sistema-inyeccion-diesel-eui-motores-partes-funcionamiento>.

VALENCIA, Andrés and MESA, Carlos. 2017. *la función del mantenimiento*. Quito : SENA, 2017.

VALENTIN VICENTE, Victor Frank. 2014. *Mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad mecánica de las excavadores CAT 336DL en el proyecto Toromocho.* Tesis (Ingeniero Mecánico), Universidad nacional del centro del Perú, Facultad de energía mecánica. Huancayo, 2014. p. 128.

VÁSQUES OYARZÚN, David Esteban. 2008. *Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM en motores DETROIT 16V-149TI en CODELCO división Andina.* Tesis (Ingeniero Mecánico), Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil Mecánica. Valdivia - Chile, 2008. p. 120.

WIKIPEDIA. 2018. Grupo electrógeno. *Wikipedia.* [Online] Febrero 19, 2018. [Cited: Septiembre 18, 2018.] https://es.wikipedia.org/wiki/Grupo_electr%C3%B3geno.

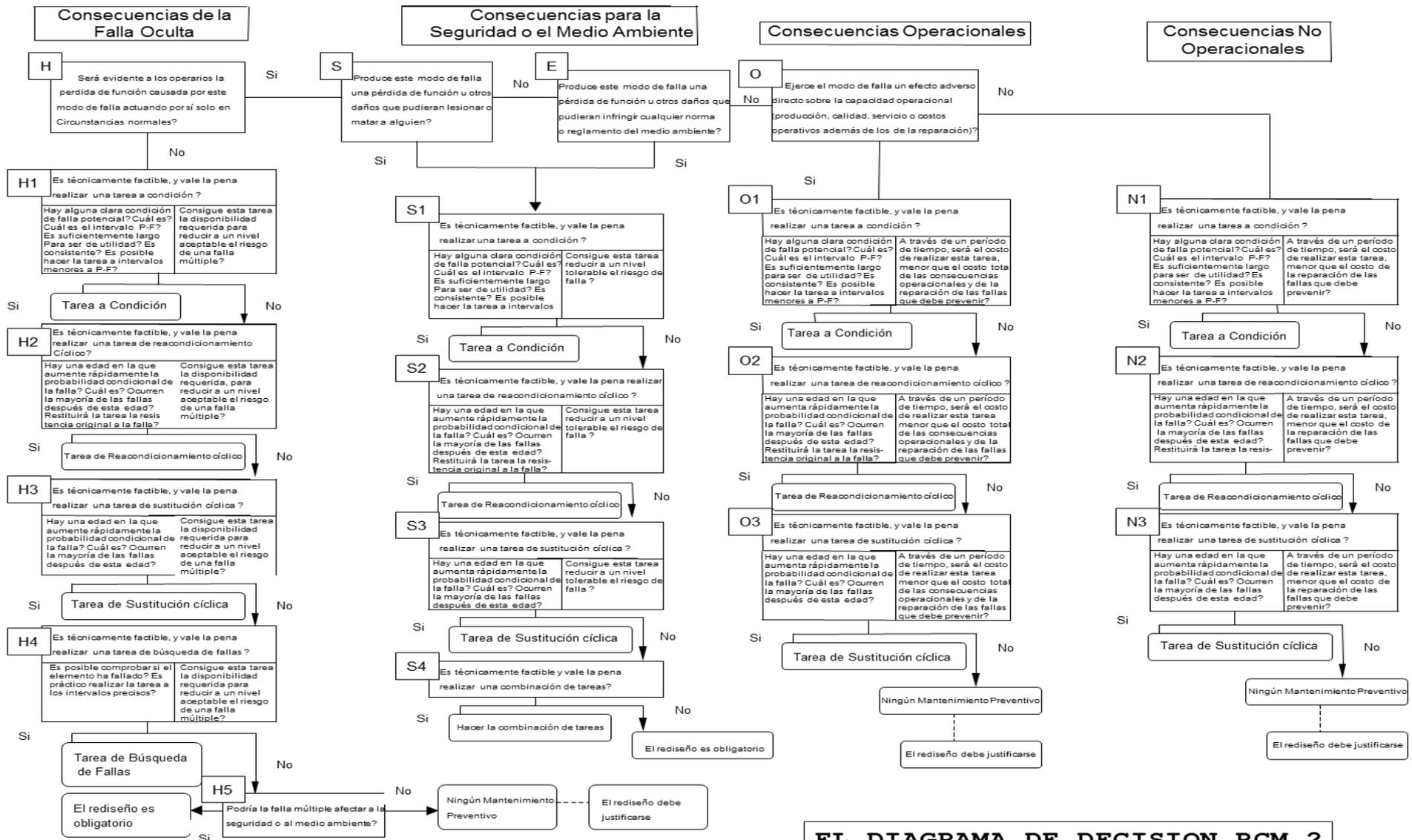
—. 2018. Motor de combustión interna. *Wikipedia.* [Online] Septiembre 13, 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: “PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS MOTORES CATERPILLAR 3516 DE LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS DE UNA REFINERÍA DE PETRÓLEO IQUITOS -PERÚ”						
Autor: Raúl Humberto Alvarez Caycho						
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA			VARIABLES E HIPÓTESIS		TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN	DISEÑO METODOLÓGICO
DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	FORMULACIÓN PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INFORMACIÓN DOCUMENTAL	DISEÑO METODOLÓGICO
<p>La Refinería Iquitos posee 02 Grupos Electrogenos (GGEE) principales quienes generan la energía para el proceso de refinación, estos motores cuentan con reparaciones mayores (Overhaul) y en los últimos tres años la disponibilidad de los motores de los GGEE no generaba la confiabilidad para tener una operación continua debido a las constantes paradas por mantenimiento y reparación. Estos GGEE al ser unos de los equipos críticos de la Refinería se debe de contar con la mayor disponibilidad en cada momento de la operación.</p>	PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL		INFORMACIÓN DOCUMENTAL	<p>Tipo de la investigación: Tecnológica.</p> <p>Diseño de la investigación: No experimental de tipo transversal.</p>
	¿De qué manera un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad mejora la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos?	Diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos.	Con el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se podrá aumentar la disponibilidad de los motores CAT 3516 de los grupos electrógenos de la Refinería Iquitos.	<p>VI: Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)</p> <p>VD: Disponibilidad de los motores CAT 3516 de grupos electrógenos</p>	<p>Manuales de operación y mantenimiento de los motores CAT 3516</p> <p>Bitácoras del operador de la sala de generación</p>	
	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS	DIMENSIONES	INFORMACIÓN DE CAMPO	PARÁMETROS DE DISEÑO
¿De que manera el análisis de modos y efectos de falla podrá reducir el tiempo de reparación de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos?	Disminuir el tiempo de mantenimiento y reparación de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos.	Con el análisis de modos y efectos de falla, se podrá disminuir los tiempos de mantenimiento y reparación al saber cómo reaccionar y acudir ante cualquier fallo potencial que se presente.	<p>DVI1: Análisis de modos y efectos de fallas.</p> <p>DVD1: Tiempos de reparación y mantenimiento.</p>	<p>informes de las reparaciones mayores (Overhaul) ejecutadas a los motores CAT 3516</p> <p>Parámetros de operación de los motores</p>	<p>Tiempo medio entre fallas: $MTBF = \frac{\text{Horas de Operación}}{\text{Número de Fallas}}$</p> <p>Tiempo medio para reparar: $MTTR = \frac{\text{Horas de Reparación}}{\text{Número de Fallas}}$</p>	
¿De que manera la selección de las tareas de mantenimiento según el diagrama de decisión del RCM podrá aumentar los tiempos entre falla de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos?	Obtener un aumento del tiempo medio entre fallas de los motores CAT 3516 de la Refinería Iquitos.	Con la selección de las tareas de mantenimiento adecuadas en el diagrama de decisión del RCM, se podrá aumentar el tiempo medio entre fallas al disminuir la tasa de fallas de los motores.	<p>DVI2: Selección de tareas en el diagrama de decisión.</p> <p>DVD2: Tiempo entre fallas.</p>	<p>Imágenes de los sub sistemas componentes del motor</p>	<p>Disponibilidad $DISP = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$</p>	

DIAGRAMA DE DECISIÓN



EL DIAGRAMA DE DECISION RCM 2

HISTÓRICO DE FALLAS DE LOS MOTORES CAT 3516

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1D AÑO 2014

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
08/01/2014	Fajas del Ventilador del radiador destempladas	184	178	6
20/01/2014	Mantenimiento de 500 Hr	113	109	4
28/02/2014	Fajas del Ventilador del radiador destempladas	79	77	2
18/03/2014	Mantenimiento de 500 Hr	445	439	6
08/07/2014	Mantenimiento de 500 Hr	480	474	6
17/07/2014	Pérdida de aceite en el Carter	147	132	15
19/07/2014	Bomba de agua con fugas	43	24	19
28/07/2014	Bomba de agua con fugas	276	207	69
07/08/2014	Mantenimiento de 500 Hr	167	161	6
26/10/2014	Mantenimiento de 500 Hr	499	493	6
22/11/2014	Mantenimiento de 500 Hr	471	465	6
21/12/2014	Mantenimiento de 500 Hr	550	544	6

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1E AÑO 2014

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
17/01/2014	Culata N°2 Presenta menos presión	249	181	68
08/02/2014	Filtros de combustible sucios	456	452	4
14/02/2014	Filtros de combustible sucios	152	148	4
17/02/2014	Filtros de combustible sucios	72	68	4
25/02/2014	Mantenimiento de 1000 Hr	192	185	7
23/03/2014	Fajas del ventilador destempladas	140	134	6
15/04/2014	Filtros de combustible, aire y separador sucios	495	472	23
06/05/2014	Mantenimiento de 1000 Hr	476	470	6
16/06/2014	Tablero de control des configurado	743	676	67
03/07/2014	Fugas en la bomba de agua	328	321	7
12/07/2014	Mantenimiento de 1000 Hr	117	111	6
15/09/2014	Fugas en la bomba de agua, Mantenimiento de 1000 Hr	1083	1012	71
03/10/2014	Pérdida de aceite en Carter	352	352	0
06/10/2014	Mantenimiento de 1000 Hr y corrección de presión del diferencial	95	64	31
03/11/2014	Presión de aceite de 17 PSI (Mínimo es 15)	602	243	359

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1D AÑO 2015

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
19/01/2015	Mantenimiento de 500 Hr	583	577	6
16/04/2015	Baja presión de combustible	461	455	6
20/04/2015	Mantenimiento de 500 Hr	96	91	5
03/06/2015	Filtros de combustible sucios	447	409	38
09/06/2015	Mantenimiento de 500 Hr	111	106	5
11/06/2015	Filtros de combustible sucios	48	42	6
12/06/2015	Pérdida de aceite en el Carter	32	26	6
13/07/2015	Mantenimiento de 500 Hr	368	363	5
22/07/2015	Fajas del Ventilador del radiador destempladas y perdida de aceite	223	209	14
27/07/2015	Pérdida de aceite (12 Gal)	105	105	0
01/08/2015	Pérdida de aceite (20 Gal)	120	120	0
04/08/2015	Mantenimiento de 500 Hr calibración	80	66	14
07/08/2015	Fajas del Ventilador del radiador destempladas	70	56	14
17/08/2015	Fajas del Ventilador del radiador destempladas	238	212	26
26/08/2015	Mantenimiento de 500 Hr	195	186	9
02/09/2015	Pérdida de aceite (10 Gal)	161	161	0
04/09/2015	Pérdida de aceite (10 Gal)	48	48	0
06/09/2015	Falla el enfriador de aceite	79	54	25
12/09/2015	Pérdida de aceite (15 Gal)	113	113	0
17/09/2015	Mantenimiento de 500 Hr	128	122	6
18/09/2015	Fugas de aceite por el enfriador	34	26	8
28/09/2015	Pérdida de aceite (25 Gal)	222	222	0
03/10/2015	Pérdida de aceite (20 Gal)	120	120	0
05/10/2015	Falla del enfriador de aceite y cambio	78	56	22
12/10/2015	Mantenimiento de 500 Hr	147	140	7
21/10/2015	Pérdida de aceite (20 Gal)	207	207	0
26/10/2015	Pérdida de aceite (20 Gal)	120	120	0
31/10/2015	Pérdida de aceite (15 Gal)	120	120	0
16/11/2015	Overhaul	2952	386	2566

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1E AÑO 2015

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
28/01/2015	Filtros de aceite sucios	465	459	6
12/02/2015	Pérdida de aceite en el Carter	352	352	0
14/02/2015	Filtros de combustible sucios	48	48	0
20/02/2015	Mantenimiento de 1000 Hr	152	147	5
09/03/2015	Fuga de diésel en cilindro 4 y 14	474	402	72
23/03/2015	Fajas del ventilador destempladas	270	264	6
28/03/2015	Pérdida de aceite en el Carter	112	112	0
30/03/2015	Pérdida de aceite en el Carter	48	48	0
31/03/2015	Mantenimiento de 1000 Hr	35	29	6
26/04/2015	Oscilación en frecuencia	171	123	48
04/05/2015	Pérdida de aceite en el Carter	142	142	0
12/05/2015	Filtros de aceite sucios	195	184	11
18/05/2015	Pérdida de aceite en el Carter	141	141	0
21/05/2015	Pérdida de aceite en el Carter	280	78	202
18/06/2015	Filtros de aceite sucios	153	151	2
22/06/2015	Pérdida de aceite en el Carter	114	95	19
29/06/2015	Mantenimiento de 1000 Hr	142	136	6
07/09/2015	Pérdida de aceite en el Carter	134	126	8
06/12/2015	Mantenimiento de 1000 Hr	119	113	6

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1D AÑO 2016

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
10/03/2016	Mantenimiento de 200 Hr	199	193	6
21/03/2016	Alta temperatura de agua de refrigeración	256	256	0
29/03/2016	Mantenimiento de 500 Hr	208	193	15
29/04/2016	Bomba de agua presenta fugas de líquido	427	357	70
24/05/2016	Mantenimiento de 500 Hr	200	151	49
30/05/2016	Bomba de agua con fugas de líquido	167	96	71
07/06/2016	Alta temperatura de agua de refrigeración	196	122	74
22/06/2016	Mantenimiento de 500 Hr	292	284	8
13/07/2016	Mantenimiento de 500 Hr	502	496	6
05/08/2016	Mantenimiento de 500 Hr	552	545	7
23/09/2016	Mantenimiento de 500 Hr	511	504	7
14/11/2016	Fugas de agua por tubo de succión de bomba	280	260	20
24/11/2016	Mantenimiento de 500 Hr	218	212	6

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1E AÑO 2016

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
06/01/2016	Pérdida de aceite en el Carter	83	83	0
15/02/2016	Pérdida de aceite en el Carter	289	283	6
08/08/2016	Overhaul de Grupo 5	954	172	782
16/09/2016	Mantenimiento de 200 Hr	218	211	7
31/10/2016	Fajas del ventilador destempladas	918	907	11
04/11/2016	Mantenimiento de 1200 Hr	97	90	7
31/12/2016	Fin del periodo	922	922	0

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1D AÑO 2017

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
10/03/2016	Mantenimiento de 200 Hr	199	193	6
21/03/2016	Alta temperatura de agua de refrigeración	256	256	0
29/03/2016	Mantenimiento de 500 Hr	208	193	15
29/04/2016	Bomba de agua presenta fugas de líquido	427	357	70
24/05/2016	Mantenimiento de 500 Hr	200	151	49
30/05/2016	Bomba de agua con fugas de líquido	167	96	71
07/06/2016	Alta temperatura de agua de refrigeración	196	122	74
22/06/2016	Mantenimiento de 500 Hr	292	284	8
13/07/2016	Mantenimiento de 500 Hr	502	496	6
05/08/2016	Mantenimiento de 500 Hr	552	545	7
23/09/2016	Mantenimiento de 500 Hr	511	504	7
14/11/2016	Fugas de agua por tubo de succión de bomba	280	260	20
24/11/2016	Mantenimiento de 500 Hr	218	212	6

HISTÓRICO DE FALLAS DEL MOTOR 322-K-1E AÑO 2017

Fecha	Descripción de la falla	Tiempo de operación	Tiempo hasta fallar	Tiempo de reparación
05/01/2017	Mantenimiento de 1000 Hr	111	105	6
21/02/2017	Diferencial de presión de combustible bajo	613	565	48
18/03/2017	Presión de inyección inadecuada	241	200	41
30/03/2017	Mantenimiento de 1000 Hr	246	240	6
01/07/2017	Baja presión de combustible	657	650	7
08/08/2017	Mantenimiento de 1000 Hr	294	288	6
06/11/2017	Mantenimiento de 1000 Hr	981	975	6
31/12/2017	Fin del periodo	124	124	0

Leyenda:

TOP: Tiempo de Operación

TTF: Tiempo para fallar

TTR: Tiempo para reparar