

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE



SELECCIÓN DE EQUIPOS Y/O DISPOSITIVOS
PARA PREVENIR FALLAS CATASTRÓFICAS EN
MOTOR DIÉSEL DE UNA CENTRAL TÉRMICA.

ANA KARINA ZAPATA HENRIQUEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: PH.D RODRIGO BARRAZA VICENCIO.

PROFESOR CORREFERENTE: ING. LUIS GUZMÁN BONET.

MAYO 2021

A mi familia, amigas y amigos.

Resumen

En este trabajo de título se seleccionan dispositivos capaces de prevenir fallas catastróficas en motores diésel de la central térmica Ujina. Primeramente, se hace un breve repaso sobre el motor diésel, su principio de funcionamiento y su relación con las centrales termoeléctricas. Luego, se realiza una revisión de la Central térmica Ujina, donde se contemplan su disposición, diseño, contexto operacional y la recopilación de datos sobre las fallas y sus tiempos de reparación.

Estos antecedentes fueron utilizados para la identificación de fallas repetitivas y con largos tiempos de reparación, las cuales son denominadas fallas crónicas agudas. Para identificar los sistemas que tienen ese tipo de fallas se elaboró un diagrama de Jack Knife, donde se reconoce al sistema de agua de enfriamiento, sistema de lubricación y el conjunto cilindro-pistón como sistemas con tendencia a percibir este tipo de fallas y a ser considerados como sistemas críticos.

Para estos tres sistemas, se hizo un levantamiento sobre sus principales funciones y estándares operacionales, con el objetivo de realizar un análisis de modos de falla, efectos y su criticidad (AMFEC). La criticidad se cuantificó según indicadores de severidad, ocurrencia y detección, y se consideraron fallas catastróficas aquellas con altos índices de severidad.

En el sistema cilindro-pistón se tiene que más de la mitad de los modos de falla tienen una alta severidad, en el sistema de agua de enfriamiento un tercio tiene altas severidades y bajas ocurrencia, y en el sistema de lubricación más de la mitad de los modos de fallas tienen una alta severidad.

Adicionalmente, se construyeron árboles de fallas para estas posibles fallas catastróficas, con el objetivo de detectar si sistemas distintos a los previamente analizados se encuentran involucrados. Las causas de las fallas catastróficas más relevantes obtenidas de este análisis fueron cigüeñal desalineado, mezcla del lubricante con el combustible, mala atomización del combustible y alta viscosidad del combustible.

Por último, se buscaron dispositivos y equipos en el mercado para prevenir fallas catastróficas en los motores diésel de la Central Térmica Ujina, recomendándose los dispositivos Accomos, que indica tempranamente vibraciones extrañas, y Tandelta OQSx-G2, que detecta presencia de componentes extraños en el lubricante. Estos dispositivos alcanzan un valor de 0,1% de lo que podría llegar a costar reparar una falla catastrófica, y la información que entregan puede ser monitoreada en conjunto con los parámetros que son controlados en la sala de mandos y del centro de monitoreo de procesos.

Abstract

In this work, devices capable of preventing catastrophic failures in diesel engines of the Ujina thermal power plant are selected. First, a brief review is made of the diesel engine, its operating principle and its relationship with thermoelectric power plants. Then, a review of the Ujina Thermal Power Plant is carried out, where its layout, design, operational context and the collection of data on the failures and their repair times are contemplated.

These antecedents were used to identify repetitive failures with long repair times, which are called acute chronic failures. To identify the systems that have these types of failures, a Jack Knife diagram was drawn up, where the cooling water system, lubrication system and the cylinder-piston assembly are recognized as systems with a tendency to perceive this type of failure and to be considered. as critical systems.

For these three systems, a survey was made of their main functions and operational standards, in order to carry out an analysis of failure modes, effects and their criticality (FMECA). Criticality was quantified according to indicators of severity, occurrence and detection, and catastrophic failures were those with high severity indices.

In the cylinder-piston system, more than half of the failure modes have a high severity, in the cooling water system a third have high severities and low occurrences, and in the lubrication system more than half of failure modes have a high severity.

Additionally, fault trees were built for these possible catastrophic failures, in order to detect whether systems other than those previously analyzed are involved. The causes of the most relevant catastrophic failures obtained from this analysis were misaligned crankshaft, mixing of the lubricant with the fuel, poor fuel atomization and high fuel viscosity.

Finally, devices and equipment were sought in the market to prevent catastrophic failures in the diesel engines of the Ujina Thermal Power Plant, recommending the Accomos devices, which early indicates strange vibrations, and Tandelta OQSx-G2, which detects the presence of foreign components in the lubricant. These devices reach a value of 0.1% of what it could cost to repair a catastrophic failure, and the information they deliver can be monitored in conjunction with the parameters that are controlled in the control room and the process monitoring center.

Glosario

CEN: Coordinador eléctrico nacional.

CDC: Centro de despacho y control.

CTU: Central térmica Ujina.

D: Tiempo total fuera de servicio.

FMECA: Failure mode effects and criticality analysis.

FTA: Fault tree analysis.

IFOR: Indisponibilidad forzada.

MTTR: Tiempo medio para reparar.

N: Número total de fallas.

TFS: Tiempo fuera de servicio.

Índice

1. Objetivos	1
1.1. Objetivo General.....	1
1.2. Objetivos Específicos	1
2. Introducción	2
2.1. Metodología	2
3. Marco teórico	3
3.1. Motor diésel	3
3.1.1. Principio de funcionamiento.....	3
3.2. Central termoelectrica diésel.....	4
3.3. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC)	5
3.4. Análisis de Árbol de Fallas (Fault Tree Analysis FTA)	10
4. Revisión Funcionamiento Central Térmica Ujina.....	12
4.1. Disposición Central Térmica Ujina	12
4.2. Diseño Central Térmica Ujina	12
4.2.1. Unidades Generadoras.....	12
4.2.2. Motores Diésel Central Térmica Ujina [7]	13
4.3. Contexto operacional central térmica Ujina	27
4.3.1. Localización.....	27
4.3.2. Proceso	28
4.3.3. Turnos de trabajo	29
4.3.4. Rutinas de mantenimiento	29
4.3.5. Dispositivos de seguridad.....	29
4.3.6. Participación de la Central Térmica Ujina en el mercado eléctrico	30
4.3.7. Potencia de suficiencia	31
4.3.8. Abastecimiento de materias primas.....	33
4.3.9. Estándares de calidad.....	34
4.4. Recopilación de datos de fallas y tiempo de reparación	36
5. Aplicación de análisis de fallas en Central Ujina.....	38
5.1. Diagrama Jack Knife	38
5.2. Aplicación FMECA (Failure Modo, Effects and Criticality Analysis)	40
5.3. Resultados FMECA	46
5.4. Aplicación árbol de fallas	52

6.	Resultados obtenidos.....	58
6.1.	Fallas catastróficas del motor	58
6.2.	Selección de equipos para prevenir fallas catastróficas	59
7.	Conclusiones	61
8.	Recomendaciones.....	63
9.	Referencias	64
10.	Anexos.....	65
10.1.	Hojas de información FMECA	65
10.2.	Alarmas e indicaciones de los sistemas auxiliares	79

Índice de figuras

FIGURA 3-1: DIAGRAMA DEL CICLO DIÉSEL REAL. FUENTE: (SANZ, 2007)	4
FIGURA 3-2: ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UNA CENTRAL TÉRMICA DIÉSEL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	5
FIGURA 4-1: BLOQUE DEL MOTOR CATERPILLAR 12CM43 Y 16CM43. FUENTE:[7]	14
FIGURA 4-2: CAMISA DEL CILINDRO. FUENTE:[7].....	15
FIGURA 4-3: PIEZAS DEL PISTÓN Y PASADOR DEL PISTÓN. FUENTE:[7].....	16
FIGURA 4-4: BIELA, COJINETE DE BIELA Y GUÍA DE LUBRICANTE. FUENTE: [7]	17
FIGURA 4-5: CIGÜEÑAL Y SUS COMPONENTES. FUENTE:[7].....	18
FIGURA 4-6: LOCALIZACIÓN DE CTU. FUENTE: GOOGLE EARTH.	27
FIGURA 4-7: DISPOSICIÓN DE LA FAENA. FUENTE: GOOGLE EARTH.	28
FIGURA 4-8: ENERGÍA MENSUAL INYECTADA Y FACTOR DE PLANTA DE CTU EN EL AÑO 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. DATOS PÚBLICOS CEN.	31
FIGURA 4-9: DIAGRAMA DEL CÁLCULO DE POTENCIA DE SUFICIENCIA. FUENTE: HTTPS://WWW.CNE.CL/WP- CONTENT/UPLOADS/2018/01/INFORME-FINAL-131217.PDF	32
FIGURA 4-10: GRÁFICO QUE INDICA LOS VALORES DE <i>TOFF</i> E <i>IFOR</i> PARA LAS UNIDADES DE CTU, EN EL PERIODO DE 2018. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	35
FIGURA 4-11: MUESTRA LA CANTIDAD DE FALLAS POR AÑO DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE CTU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	36
FIGURA 4-12: INDICA LA CANTIDAD DE FALLAS Y EL TIEMPO DE REPARACIÓN DE CADA UNIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	37
FIGURA 5-1: DIAGRAMA DE JACK KNIFE DE LOS SISTEMAS QUE HAN PRESENTADO FALLAS EN LAS UNIDADES DE CTU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	39
FIGURA 5-2: MATRIZ DE CRITICIDAD DEL CONJUNTO CILINDRO-PISTÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	47
FIGURA 5-3: MATRIZ DE CRITICIDAD DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO LT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	48
FIGURA 5-4: MATRIZ DE CRITICIDAD DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO HT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	49
FIGURA 5-5: MATRIZ DE CRITICIDAD DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
FIGURA 5-6: MATRIZ DE CRITICIDAD DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	51
FIGURA 5-7: MATRIZ DE RIESGO DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
FIGURA 5-8: ÁRBOL DE FALLAS DEL EVENTO NO DESEADO, GRIPADO ENTRE EL PISTÓN Y LA CAMISA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	53
FIGURA 5-9: ÁRBOL DE FALLAS DEL EVENTO, ANILLOS DE COMPRESIÓN DAÑADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	53
FIGURA 5-10: ÁRBOL DE FALLAS DEL EVENTO NO DESEADO, DISMINUCIÓN DE LA HOLGURA ENTRE EL CILINDRO Y EL PISTÓN.	54
FIGURA 5-11: ÁRBOL DE FALLA DEL EVENTO NO DESEADO, MALA SINCRONIZACIÓN DE RUEDAS DENTADAS. ..	55
FIGURA 5-12: ÁRBOL DE FALLAS SOBRE LA FRACTURA DEL CIGÜEÑAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
FIGURA 5-13: ÁRBOL DE FALLAS QUE ANALIZA SOBRE LA FALTA DE LUBRICANTE CAMISA-PISTÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	56
FIGURA 5-14: ÁRBOL DE FALLAS QUE ANALIZA LA FALTA DE SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	56
FIGURA 5-15: ÁRBOL DE FALLAS SOBRE ELEVADA CARGA MECÁNICA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN Y CÁMARA DE COMBUSTIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	57

Índice de tablas

TABLA 3-1: MODOS DE FALLA CON DIFERENTES NIVELES DE DETALLE. FUENTE: (MOUBRAY, 2004)	9
TABLA 3-2: NIVELES DE PROPIEDAD DE FALLA CUALITATIVA. FUENTE: (STAPELBERG, 2009).....	9
TABLA 3-3: OPERADORES LÓGICOS UTILIZADOS PARA CONFECCIONAR UN ÁRBOL DE FALLAS. FUENTE: (PISTARELLI, 2012)	11
TABLA 4-1: DATOS TÉCNICOS DE LOS MOTORES CATERPILLAR 12CM43 Y 16CM43, INSTALADOS EN CTU. ..	12
TABLA 4-2: DATOS TÉCNICOS SOBRE EL ALTERNADOR UTILIZADO EN LOS MOTORES CATERPILLAR 12CM43 EN CTU.	13
TABLA 4-3: DATOS TÉCNICOS SOBRE EL ALTERNADOR UTILIZADO EN LOS MOTORES CATERPILLAR 16CM43 EN CTU.	13
TABLA 4-4: TEMPERATURA Y PRESIÓN DE TRABAJO, ALARMA Y ALARMA DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLES DE LOS MOTORES DE CTU. FUENTE: [8]	20
TABLA 4-5: TEMPERATURA Y PRESIÓN DE TRABAJO, DE ALARMA Y ALARMA DE LUBRICANTE DE LOS MOTORES DE CTU. FUENTE: [8]	22
TABLA 4-6: MUESTRA LAS TEMPERATURAS Y PRESIÓN DE TRABAJO, ALARMA Y ALARMA DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO DE ALTA TEMPERATURA DE LOS MOTORES DE CTU. FUENTE: [8]	24
TABLA 4-7: MUESTRA LAS TEMPERATURAS Y PRESIÓN DE TRABAJO, ALARMA Y ALARMA DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO DE BAJA TEMPERATURA DE LOS MOTORES DE CTU. FUENTE: [8].....	25
TABLA 4-8: COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE CTU. FUENTE:	27
TABLA 4-9: POTENCIA DE SUFICIENCIA DEFINITIVA DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE CTU EN EL AÑO 2018. FUENTE: INFORME ESTUDIO DE POTENCIA DE SUFICIENCIA.....	33
TABLA 4-10: POTENCIA CONFIABLE DE LAS UNIDADES DE CTU EN EL AÑO 2018. FUENTE: INFORME ESTUDIO DE POTENCIA DE SUFICIENCIA.....	34
TABLA 4-11: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE HFO N°6 UTILIZADO EN CTU. FUENTE: WWW.COPEC.CL.....	34
TABLA 5-1: FUNCIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN.	40
TABLA 5-2: FUNCIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIOS DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO LT.....	40
TABLA 5-3: FUNCIONES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO HT.	41
TABLA 5-4: FUNCIONES PRIMARIAS DEL SISTEMA CILINDRO-PISTÓN.....	41
TABLA 5-5: DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN.	41
TABLA 5-6: DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO HT.....	41
TABLA 5-7: DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO LT.	42
TABLA 5-8: DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL SISTEMA CILINDRO-PISTÓN.	42
TABLA 5-9: MUESTRA LAS FALLAS FUNCIONALES PARA UNA FUNCIÓN DEL CONJUNTO CILINDRO-PISTÓN.....	42
TABLA 5-10: MUESTRA LOS MODOS DE FALLA PARA LA FALLA FUNCIONAL 1.A DEL CONJUNTO CILINDRO PISTÓN.	43
TABLA 5-11: INDICA LOS EFECTOS DE LA FALLA DE LOS MODOS DE FALLA DE LA FALLA FUNCIONAL 1.A DEL SISTEMA CILINDRO-PISTÓN.	43
TABLA 5-12: MUESTRA LOS INDICADORES PARA CATEGORIZAR LA SEVERIDAD, OCURRENCIA Y DETECCIÓN DE LOS MODOS DE FALLA.....	44
TABLA 5-13: MUESTRA LOS INDICADORES DE LOS EFECTOS DE FALLA DE LA FALLA FUNCIONAL 1.A DEL SISTEMA CILINDRO-PISTÓN.	45
TABLA 5-14: MUESTRA LOS VALORES NPR PARA LOS EFECTOS DE FALLA DE LA TABLA 5-13.	46

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Proponer equipos o dispositivos que permitan anteponerse a fallas catastróficas de motores Diésel de una central térmica.

1.2. Objetivos Específicos

- Estudiar en profundidad los motores Diésel junto a sus sistemas auxiliares y sus condiciones operacionales.
- Realizar un análisis de datos de las fallas, identificando los sistemas críticos de los motores.
- Desarrollar un análisis de modos de fallas, efectos y su criticidad (FMECA) a los sistemas más críticos, identificando las posibles fallas catastróficas.
- Identificar las posibles fallas catastróficas de sistemas considerados como no críticos.
- Seleccionar equipos o dispositivos del mercado para anteponerse a fallas catastróficas identificadas.

2. Introducción

2.1. Metodología

Para poder seleccionar equipos y/o dispositivos que prevengan fallas catastróficas en la central Diésel, se desarrollará principalmente un estudio cualitativo para detectar las posibles fallas. Este estudio se divide en tres etapas.

Primeramente, se realizará una revisión del funcionamiento de la Central Térmica Ujina (CTU), que consistirá en estudiar su disposición, diseño y contexto operacional, por medio de los módulos de descripción de la central, el manual de operación de los motores e información entregada por la empresa y el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). Además, se recolectarán datos de fallas y tiempos de reparación, a través, de la información del centro de monitoreo de procesos y centro de control de EnorChile, y de los reportes de movimientos de equipos publicados por el CEN.

En segundo lugar, se aplica un análisis de fallas a CTU. Para comenzar se realiza un diagrama Jack Knife con los datos recolectados sobre las fallas y tiempos de reparación. Este diagrama categoriza fallas en cuatro cuadrantes, un cuadrante donde se ubican las fallas con baja frecuencia y bajos tiempos de reparación, otro donde se ubican las fallas con baja frecuencia y altos tiempos de reparación, es decir, fallas agudas, otro donde se ubican fallas con alta ocurrencia y bajos tiempos de reparación, óseas fallas crónicas, y por último un cuadrante donde se encuentran las fallas con alto tiempo de reparación y alta frecuencia, llamado crónico agudo.

Los sistemas con fallas crónicas agudas serán seleccionados para realizarles un Análisis de Modos de Fallas, Efectos y Criticidad (AMFEC). En este análisis, primero se identificará las funciones y estándares de desempeño, luego se establece las fallas funcionales y modos de fallas, para finalmente categorizar los modos de fallas con indicadores de severidad, ocurrencia y detección, obteniéndose el Número Prioritario de Riesgo (NPR).

Las fallas que tengan un alto índice NPR serán estudiados, a través, de un análisis de árbol de fallas. En este análisis se tomará como evento no deseado el efecto de la falla y se hará un análisis deductivo, para averiguar si es posible que se ocasione la falla por averías en otros sistemas.

Finalmente, cuando se identifiquen las fallas catastróficas y sus posibles causas, se buscarán en el mercado dispositivos y equipos capaces de detectarlas de manera autónoma, o bien, en conjunto con el sistema de monitoreo de la central.

3. Marco teórico

3.1. Motor diésel

El motor diésel es una máquina térmica de combustión interna. Esta combustión se produce por la auto-ignición del combustible inyectado a la cámara y las altas temperaturas dentro de ella, producto del proceso de compresión del aire dentro del cilindro.

El combustible es inyectado a gran presión dentro de la cámara, produciendo su atomización y rápida mezcla con el aire. Esta mezcla ocasiona la combustión, por lo que los gases al interior de la cámara de combustión se expanden impulsando el pistón hacia abajo. Este movimiento se transmite al cigüeñal por medio de la biela, que es la encargada de transformar el movimiento lineal en rotacional.

3.1.1. Principio de funcionamiento

El motor diésel de cuatro tiempos es aquel que precisa cuatro carreras del pistón para completar un ciclo termodinámico. Los tiempos del ciclo son la admisión, compresión, combustión y expansión, y escape.

En la Figura 3-1, se representa el diagrama del ciclo Diésel real. El primer tiempo es la admisión, que abarca del punto 1 al 2. En este tiempo la válvula de admisión se encuentra abierta y el pistón desciende desde el Punto muerto superior (PMS) al Punto muerto inferior (PMI) a una presión menor que la presión atmosférica (p_a), por causa de las pérdidas de carga. Cuando el pistón comienza a subir, y supera el PMI, la válvula de admisión se cierra y comienza la compresión.

El segundo tiempo es la compresión, que va desde el punto 2 al 3. En este tiempo las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, y el pistón asciende comprimiendo el aire que se encuentra dentro de la cámara hasta la presión p_1 . La etapa de compresión no es adiabática, ya que existe un intercambio de calor a través de las paredes del cilindro.

El tercer tiempo está compuesto por la combustión y expansión, que van del punto 3 al 4 y del 4 al 5, respectivamente. La combustión abarca el proceso de inyección de combustible que comienza en el punto 3, en ese momento se inyecta combustible pulverizado que se inflamará inmediatamente. Primeramente, se produce una subida rápida de presión, que no se efectúa a volumen constante, ya que el pistón realiza un pequeño recorrido desde el punto 3 al PMS. En segundo lugar, el pistón comienza a descender y la combustión continua hasta el punto 4, a una presión que no se mantiene constante.

La expansión es la fase que entrega trabajo al ciclo. En esta etapa el pistón desciende en un proceso no adiabático, ya que parte del calor es evacuado al sistema de refrigeración. La expansión continua hasta cuando se abre la válvula de escape, antes que el pistón llegue al PMI.

El cuarto tiempo es el escape, que va desde el punto 5 al 6 y del 6 al 1. En el punto 5 el interior del cilindro tiene una presión p_3 , que para ser evacuada es necesario un avance en la apertura del escape (AAE). Mientras el pistón hace el recorrido de 5 a 6, la caída de presión

y la pérdida de calor no es a presión constante. Finalmente, el pistón comienza a subir desde el PMI, expulsando los gases a una presión ligeramente mayor a la p_a , hasta llegar al PMS.

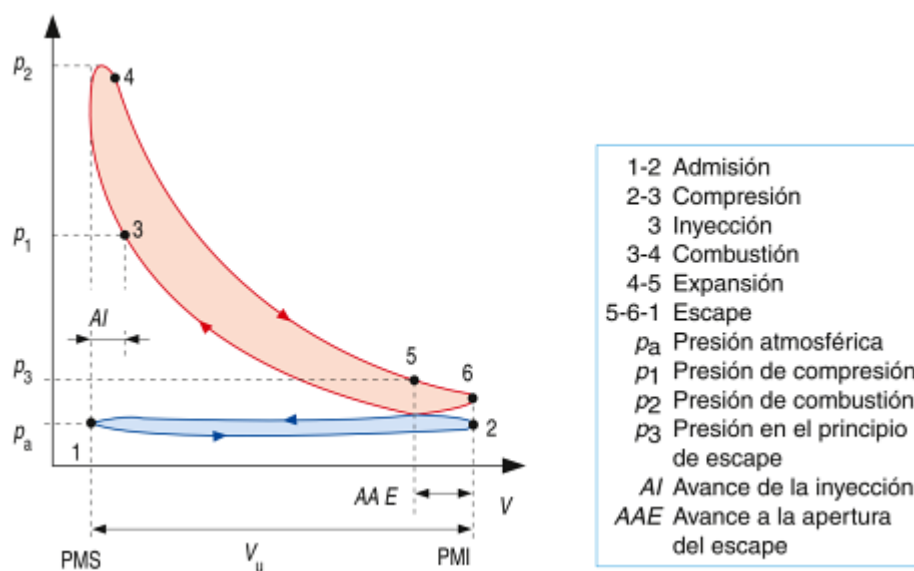


Figura 3-1: Diagrama del ciclo Diésel real. Fuente: (Sanz, 2007)

3.2. Central termoelectrónica diésel

Una central termoelectrónica Diésel es aquella que genera energía eléctrica, a través, de la energía liberada por la combustión. Principalmente, se compone de unidades generadoras, las que a su vez están compuestas por un motor de combustión interna y un alternador.

El alternador es el encargado de transformar la energía mecánica entregada por el motor a energía eléctrica, para esto se conecta al cigüeñal. Además, los motores tienen sistemas como, admisión de aire, salida de gases de escape, alimentación y retorno de combustible, sistema de lubricación y sistema de enfriamiento.

Cada central está compuesta por sistemas auxiliares, los que se encargan de proporcionar el componente necesario y en las condiciones requeridas a cada motor. Estos sistemas son vitales para el correcto funcionamiento de las unidades generadoras.

A continuación, en la Figura 3-2, se muestra un esquema simplificado de una unidad generadora. En ella se observa el generador, el motor diésel y los sistemas auxiliares, tales como el sistema de aire de arranque, el sistema de enfriamiento, el sistema de lubricación, el sistema de combustible y el sistema de gases de escape.

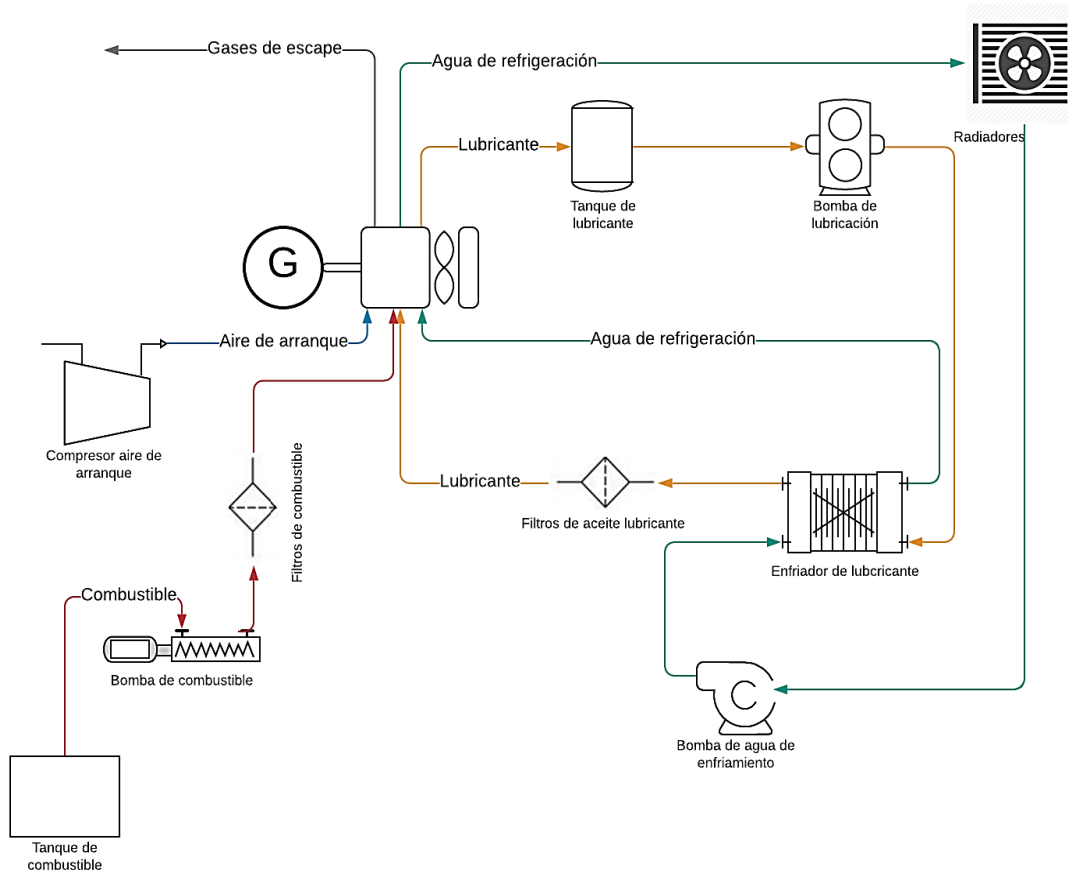


Figura 3-2: Esquema simplificado de una Central Térmica Diésel. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC)

El análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) o en inglés Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA), es una metodología que permite identificar los posibles modos de falla en un sistema y clasificarlos de acuerdo a sus valores de criticidad.

Para el desarrollo de la metodología FMECA se proponen las siguientes etapas:

1. Definición de un activo
2. Identificación de funciones
3. Fallas funcionales
4. Modos de fallas
5. Efectos de la falla
6. Evaluación de criticidad

Para las primeras 5 etapas se tomó como referencia la Guía para la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) de Society of Automotive Engineers (SAE).

3.3.1. Definición de un activo

Primeramente, para definir un activo se debe realizar la selección del equipo o sistema, luego se deben definir sus límites e identificar el nivel de detalle que se utilizará en el análisis. [1]

3.3.2. Identificación de funciones

Para realizar la identificación de funciones del activo se debe reconocer el contexto operacional, establecer las funciones primarias y secundarias, e incorporar los estándares de desempeño en las funciones. [1]

El contexto operacional hace alusión a las circunstancias en que operará el activo. Los aspectos que se deben incluir en una definición de contexto operacional abarcan el tipo de proceso, los estándares de calidad, ambientales y de seguridad, el lugar donde se realizan las operaciones, la intensidad de las operaciones, la redundancia, la demanda del mercado, si hay trabajos durante la operación y el manejo de repuestos.

Las funciones primarias son las funciones principales y/o propias que debe cumplir el activo. En cambio, las funciones secundarias son todas las funciones que se deben cumplir en paralelo a las funciones primarias, principalmente se atribuyen a aspectos de seguridad, estructurales, control, confort, apariencia, entre otros. Ambos tipos de funciones para ser descritas deben contener un verbo, un objeto y un estándar de desempeño, este último debe ser el deseado por el usuario en el contexto operacional.

3.3.3. Fallas funcionales

Una falla funcional se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario. [2]

Las fallas funcionales pueden ser categorizadas en falla total y falla parcial. Una falla total será aquella que producirá una detención en el activo. En cambio, una falla parcial es la que ocurre cuando aumenta o disminuye el estándar de desempeño del activo.

3.3.4. Modos de fallas

Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional [2]. Para averiguar que causa cada falla funcional hay cinco conceptos claves. [1]

El primero es identificar los modos de falla, los que deben contener al menos un sustantivo y adjetivo. La descripción del modo de falla debe tener un nivel de detalle que posibilite un manejo de fallas adecuado.

El segundo concepto es establecer que se entiende por probable, por lo que cada falla debe ser aceptada por el usuario del activo.

El tercero es el nivel de causalidad, que consiste en definir el nivel de detalle con el que será descrito. La medida en que los modos de falla pueden ser descritos a diferentes niveles se detalla en la Figura 3-5. Por ejemplo, en el nivel 1 se observa un nivel de detalle menor indicando que falla el grupo de bombas. En cambio, en el nivel 5 se habla de componentes sin ajustar, desgastados, o bien de cuerpos externos que han dañado al grupo de bombas.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla el grupo de bombas.	Falla la bomba.	Falla el impulsor.	Impulsor toma juego.	Tuerca de montaje ajustar. Tuerca de montaje gastada.	Tuerca ajustada incorrectamente. Tuerca corroída. Tuerca hecha de material incorrecto.	Error de montaje. Material especificado incorrectamente. Material suministrado incorrectamente.
				Tuerca del impulsor rajada.	Tuerca del impulsor sobre ajustada. Tuerca hecha de material incorrecto.	Error de montaje. Material especificado incorrectamente.
				Chaveta cortada.	Acero de la chaveta especificado incorrectamente. Acero de la chaveta suministrado incorrectamente.	Material suministrado incorrectamente. Error de diseño. Error de pedido. Error de almacén. Error de requerimiento
			Objeto daña el impulsor.	Objeto en el sistema luego del mantenimiento. Un cuerpo extraño entra al sistema.	Error de montaje. Filtro del succionador no instalado. Filtro perforado por corrosión.	

Figura 3-3: Modos de falla con diferentes niveles de detalle. Fuente: [2]

El cuarto concepto son las fuentes de información, que hace mención a que se debe incluir los datos de personas que conocen el activo y registros de información de fallas del activo o de activos similares. Además, se debe incluir modos de falla que no han ocurrido, pero que se consideran probables en el contexto operacional. [1]

El último concepto es tipos de modos de fallas, el que indica que se debe incluir cualquier evento que probablemente cause una falla funcional en el activo. Se debe incluir deterioros, deficiencia de diseño y/o errores humanos. [1]

3.3.5. Efectos de la falla

Los efectos de la falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla. Esta descripción debe incluir la información necesaria para realizar la evaluación de las consecuencias de las fallas. Por tanto, en ella se debe contar con evidencia de que se ha producido una falla, se debe indicar las maneras en que la falla supone una amenaza para la seguridad y/o medio ambiente, las maneras en que se afecta la producción y operación, los daños físicos y como se debe reparar la falla.[1]

3.3.6. Evaluación de criticidad

El objetivo de la evaluación de criticidad es priorizar los modos de fallas, a través, de sus efectos, consecuencias y probabilidad de ocurrencia. Por lo tanto, para hacer la evaluación de criticidad del activo son utilizados los siguientes métodos: [3]

- Número de prioridad de riesgo.

Para jerarquizar los riesgos se emplea un indicador llamado Número de prioridad de riesgo (NPR).

a. Severidad (S)

La severidad de los efectos potenciales de falla se evalúa en una escala de 1 al 10 y representa la gravedad de la falla una vez que la falla ha ocurrido. La severidad sólo se refiere o aplica al efecto.

b. Ocurrencia (O)

La ocurrencia es estimar la frecuencia con la que se espera que ocurra la falla debido a cada uno de los modos de falla. La posibilidad de que ocurra cada modo de falla se estima de 1 a 10. Si hay registros estadísticos adecuados, éstos deben utilizarse para asignar un número a la frecuencia de ocurrencia de falla. Si no hay datos históricos puede hacerse una evaluación subjetiva.

c. Detección (D)

La detección es un valor del 1 al 10, para estimar la probabilidad de que se encuentre la falla.

El NPR se calcula multiplicando la severidad de la falla, por la probabilidad de ocurrencia y por la posibilidad de que se detecte previamente la causa de la falla y se expresa en la siguiente relación.

$$NPR = S \cdot O \cdot D \quad (1)$$

El NPR cae en un rango de 1 a 1000 y proporciona un indicador de los modos de falla. Gutiérrez (2008) indica que a los altos NPR se les debe dar prioridad para acciones correctivas, ya sean de prevención o detección. Además, señala que hay que atender a los modos de fallas con índice mayor a 80 y con altas severidades.

- Matriz de criticidad

Esta técnica se utiliza para priorizar los modos de falla del equipo. La técnica requiere la categorización de la gravedad del efecto del modo de falla. La Tabla 3-1 presenta las clasificaciones de la gravedad del efecto del modo de falla.

Tabla 3-1: Modos de falla con diferentes niveles de detalle. Fuente: [2]

Ítem	Clasificación	Descripción	No.
1	Catastrófico	La ocurrencia de una falla que puede provocar la muerte o la pérdida del equipo.	A
2	Crítico	La ocurrencia de una falla que puede provocar lesiones graves o daños importantes en el sistema.	B
3	Marginal	La ocurrencia de una falla que puede resultar en lesiones menores o daños menores en el sistema.	C
4	Menor	La falla no es lo suficientemente grave como para provocar lesiones o daños en el sistema, pero resultará en reparación o mantenimiento no programado.	D

Para evaluar la probabilidad de que ocurra un modo de falla, se puede realizar un método cualitativo, que se utiliza cuando no hay datos específicos de tasa de falla. Las probabilidades de ocurrencia se agrupan en niveles definidos lógicamente. La tabla 3-2 presenta los niveles de probabilidad de falla cualitativa.

Tabla 3-2: Niveles de propiedad de falla cualitativa. Fuente: [3]

Ítem	Nivel de probabilidad	Término	Descripción
1	I	Frecuente	Alta probabilidad de ocurrencia durante el período operativo del activo.
2	II	Razonablemente probable	Probabilidad moderada de ocurrencia durante el período operativo del activo.
3	III	Ocasional	Probabilidad ocasional de ocurrencia durante el período operativo del activo.
4	IV	Remoto	Improbable probabilidad de ocurrencia durante el período operativo del activo.
5	V	Extremadamente improbable	Cero oportunidades de ocurrencia durante el período operativo del activo.

Luego, de categorizar la gravedad y probabilidad del efecto de falla, se desarrolla una matriz de criticidad como se muestra en la Figura 3-4, para identificar y comparar cada modo de falla. La matriz de criticidad se desarrolla insertando valores que denotan la clasificación de gravedad y la probabilidad de ocurrencia.

La distribución de la criticidad de los modos de falla se representa en la matriz resultante y sirve para asignar prioridades.

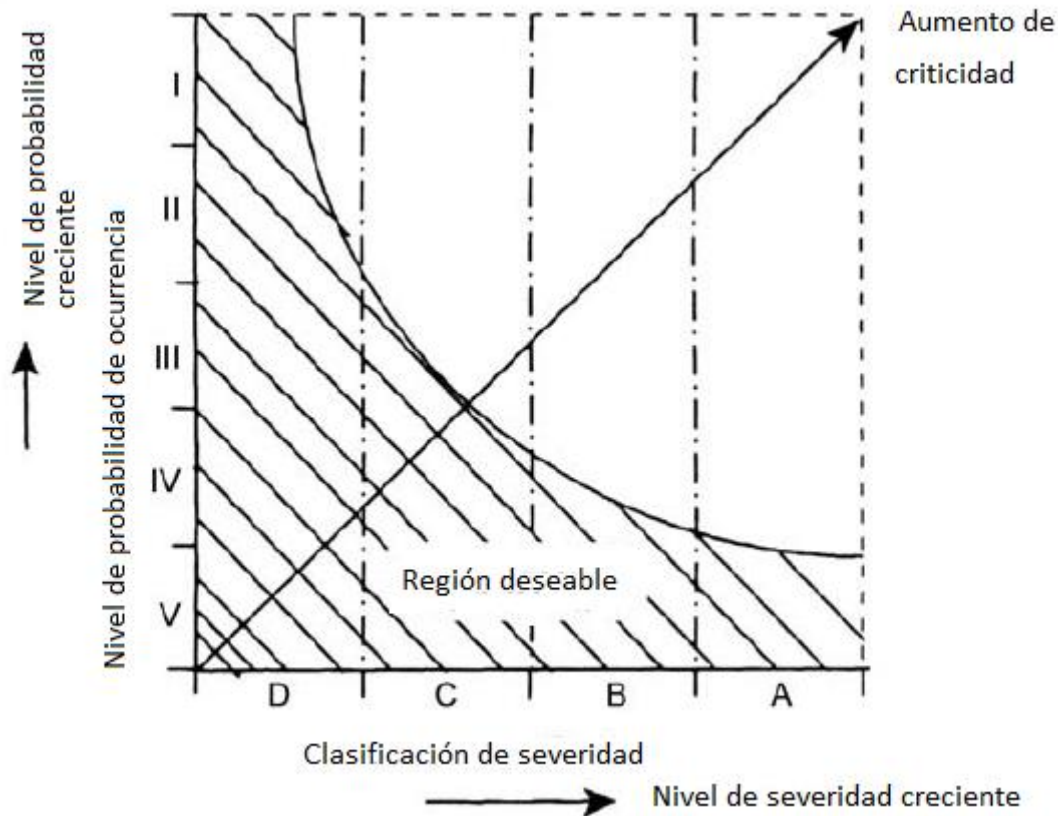


Figura 3-4: Matriz de criticidad. Fuente: [3]

La dirección de la flecha que se origina en el origen, indica la creciente criticidad de la falla, y la eclosión muestra la región deseable. Para las clasificaciones de gravedad A y B, se desea una baja probabilidad de ocurrencia. Por otra parte, para las clasificaciones de gravedad C y D, se puede tolerar mayores probabilidades de ocurrencia.

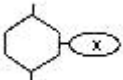
Es importante que los modos de falla pertenecientes a las clasificaciones A y B deben eliminarse por completo o al menos su probabilidad de fallas deben reducirse a un nivel aceptable.

Para los FMECA, se construye una matriz de criticidad que relaciona la frecuencia de pérdida con la severidad para cada modo de falla. Los números de identificación del modo de falla se ingresan en la celda apropiada de la matriz de acuerdo con su frecuencia y severidad de pérdida para identificar cada modo de falla de elemento crítico. [3]

3.4. Análisis de Árbol de Fallas (Fault Tree Analysis FTA)

El análisis mediante un Árbol de Fallas es un método analítico y deductivo que tiene como finalidad simular las situaciones de causa y efecto que podrían conducir a una falla funcional. El FTA se estructura mediante operadores lógicos [4], los que son mostrados en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Operadores lógicos utilizados para confeccionar un árbol de fallas. Fuente: [4]

Símbolo	Descripción
	Evento o suceso básico. Es el punto máximo de análisis o apertura, a partir del cual no se buscan las causas y se puede definir su confiabilidad.
	Evento fuera del análisis. Concepto de “Caja negra”. Sus causas no se analizan por falta de información o porque no merecen la pena.
	Evento intermedio. La combinación de eventos básicos resulta en el evento intermedio por medio de las puertas lógicas.
	Puerta “Y”. El suceso de salida ocurrirá sólo si ocurren todos los eventos de entrada.
	Puerta “O”. El suceso de salida ocurrirá si ocurre uno o más de los eventos de entrada.
	Puerta “Y” prioritaria. El suceso de salida solamente ocurrirá si los sucesos de entrada ocurren pero con una determinada secuencia.
	Puerta “O” exclusiva. El suceso de salida ocurrirá sólo si ocurre uno de los sucesos de entrada, pero no dos o más de ellos.
	Puerta de Inhibición. El evento de salida sólo ocurrirá si ocurre la entrada pero, además, si se satisface cierta condición “x”.

A partir del evento no deseado, se deben ir desencadenando sucesos intermedios hasta llegar a la causa raíz o suceso básico, por medio de los operadores lógicos anteriormente descritos. Los sucesos básicos son considerados independientes y con cierta probabilidad de ocurrencia. Por tanto, un evento no deseado es la combinación de los sucesos básicos conectados mediante operadores lógicos. [4]

Este capítulo se ha centrado describir el principio de funcionamiento de un motor diésel y su relación con centrales de generación eléctrica, y exponer dos análisis de modos de fallas. Primeramente, un FMECA, que es un método que reconoce las funciones de un activo, identifica sus modos de fallas y efectos, y asigna indicadores de severidad, ocurrencia y detección, con el objetivo de reconocer modos de fallas críticos para tomar acciones que puedan disminuirlos o eliminarlos. También se expuso el método FTA, que es un análisis causa raíz de fallas funcionales por medio de operadores lógicos.

Ambos métodos se pueden utilizar de manera complementaria, partiendo por un FMECA para reconocer los modos de fallas más críticos y posteriormente, considerar estos como un evento no deseado con el objetivo de identificar sus posibles causas por medio de un FTA.

4. Revisión Funcionamiento Central Térmica Ujina

La central térmica Ujina (CTU) está diseñada para la generación de energía eléctrica mediante seis unidades, dos motores Caterpillar 16CM43 y cuatro unidades 12CM43 de potencia nominal 8,9 [MW] y 6,7 [MW] respectivamente.

La central suministra 44,6 [MW] de potencia nominal al Sistema Eléctrico Nacional. Comenzó su operación el 30 de marzo del 2016, por parte de la empresa CMEDIC. En diciembre de 2016 la operación y mantenimiento paso a ser responsabilidad de EnorChile S.A.

4.1. Disposición Central Térmica Ujina

CTU se encuentra organizada espacialmente en tres áreas:

1. Powerhouse: Es un galpón cerrado donde se encuentran las seis unidades generadoras.
2. Granja de tanques: Sitio exterior que cuenta con estanques de almacenamiento como, dos tanques de HFO de 2000 [m^3] c/u, un tanque de petróleo diésel de 800 [m^3], un tanque de lubricante de 40 [m^3], entre otros.
3. Casa de tratamientos.

Cada una de estas áreas comparten sistemas funcionales que producen un funcionamiento sincronizado de toda la central, ya sea en régimen de generación o en estado de reposo.

4.2. Diseño Central Térmica Ujina

4.2.1. Unidades Generadoras

Como se mencionó anteriormente, la central cuenta con seis unidades generadoras que cuentan con un motor y alternador. Las unidades UG1 a UG4 están conformadas por el motor Caterpillar 12CM43 y el alternador Leroy Somer A60B125. Las unidades UG5 y UG6 están compuestas por el motor Caterpillar 16CM43 y el alternador Leroy Somer A62B90. A continuación se muestran las especificaciones técnicas de estos equipos en las *Tabla 4-1*, *Tabla 4-2* y *Tabla 4-3*.

Tabla 4-1: Datos técnicos de los motores Caterpillar 12CM43 y 16CM43, instalados en CTU.

Variables	12CM43 (UG1-UG4)	16CM43 (UG5-UG6)
Combustible	Heavy Fuel Oil N°6 (HFO) / Diésel	Heavy Fuel Oil N°6 (HFO) / Diésel
Proceso de combustión	Inyección directa HFO/LFO	Inyección directa HFO/LFO
N° de cilindros	12	16
RPM	500/514	500/514
Potencia Nominal	6900 [KW]	8900 [kW]

Tabla 4-2: Datos técnicos sobre el alternador utilizado en los motores Caterpillar 12CM43 en CTU.

Equipo	UG1-UG4	
Marca	Leroy	Somer
	A60B125	
Voltaje	11000 [V]	
Corriente Estator	439,1 [A]	
Fase	Trifásico	
Frecuencia	50 [Hz]	
Peso Total	39050 [kg]	

Tabla 4-3: Datos técnicos sobre el alternador utilizado en los motores Caterpillar 16CM43 en CTU.

Equipo	UG5 Y UG6	
Marca	Leroy Somer A62B90	
Voltaje	11000 [V]	
Corriente Estator	586,7 [A]	
Fase	Trifásico	
Frecuencia	50 [Hz]	

4.2.2. Motores Diésel Central Térmica Ujina [7]

Los motores Caterpillar 12CM43 y 16CM43 son similares en su composición mecánica. A continuación, se revisará la configuración de estos motores.

4.2.2.1. Bloque del motor

El bloque del motor está fabricado con fundición nodular en una sola pieza. En la Figura 4-1 se observa las áreas que se combinan en él, tales como conducto de aire (1), conducto central de aceite (2), cámara del árbol de levas (12), cámara del amortiguador de vibraciones (11), caja del cigüeñal (13), entre otras.

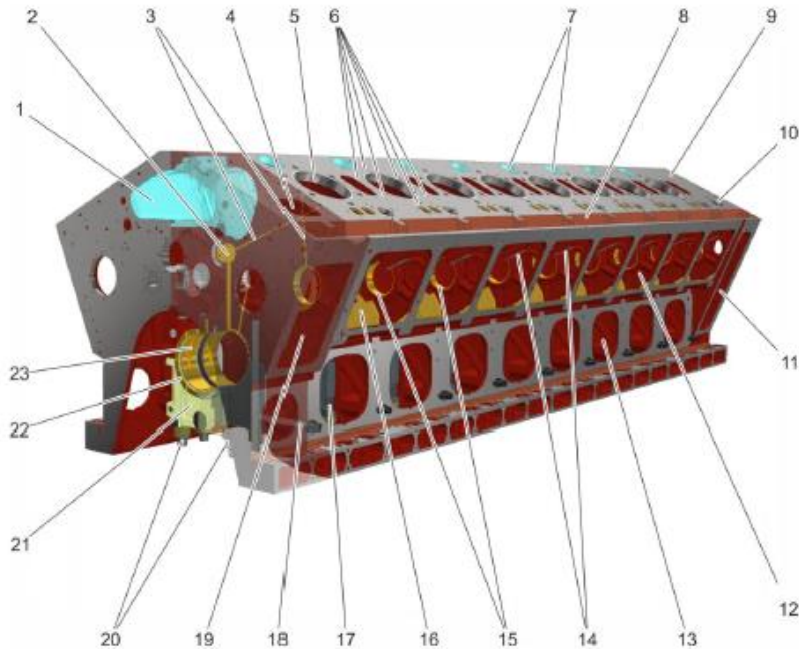


Figura 4-1: Bloque del motor Caterpillar 12CM43 y 16CM43. Fuente: [7]

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Conducto de aire de carga. | 13 | Caja del cigüeñal. |
| 2 | Conducto central de aceite. | 14 | Área de accionamiento de válvulas inferiores. |
| 3 | Agujeros de aceite. | 15 | Cojinete árbol de levas. |
| 4 | Punto de instalación actuador de control. | 16 | Carcasa árbol de levas. |
| 5 | Ajuste superior camisa cilindro, lado B. | 17 | Tapa del cojinete principal. |
| 6 | Agujeros roscados para pernos de la culata. | 18 | Perno lateral del cojinete principal. |
| 7 | Salida de aire admisión (aire de carga), lado B. | 19 | Caja de engranajes de distribución. |
| 8 | Ranura de fuga, lado B. | 20 | Pernos principales del cojinete de empuje. |
| 9 | Superficie de la cubierta. | 21 | Tornillos principales del cojinete de empuje. |
| 10 | Punto de instalación ventilación del cárter. | 22 | Arandela del cojinete de empuje. |
| 11 | Cámara de amortiguación de vibraciones. | 23 | Entrada de aceite lubricante a la carcasa superior del rodamiento de empuje. |
| 12 | Cámara de árbol de levas. | | |

4.2.2.2. Tren de rodaje principal

El tren de rodaje principal es el conjunto de elementos sincronizados donde se genera y se transmite la energía de la combustión. Lo componen el cilindro, el pistón, la biela, el cigüeñal y el árbol de levas.

La Figura 4-2 muestra el cilindro, que está compuesto principalmente por la camisa del cilindro (1), una cámara de refrigeración (7) que bordea la superficie, el anillo anti-pulido (2) y el anillo de sellado (3).

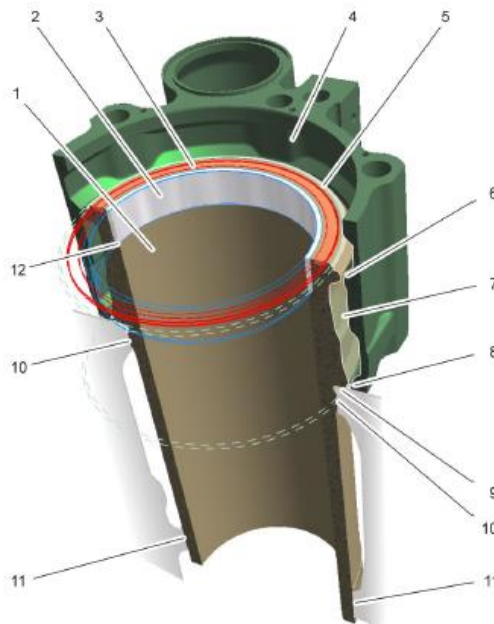


Figura 4-2: Camisa del cilindro. Fuente:[7]

- | | | | |
|---|---|----|--|
| 1 | Camisa del cilindro. | 7 | Cámara de agua de refrigeración. |
| 2 | Anillo anti-pulido. | 8 | O-ring en el collar de enfriamiento. |
| 3 | Anillo de sellado. | 9 | Superficie de contacto. |
| 4 | Collar de enfriamiento. | 10 | Ajuste superior del bloque del motor. |
| 5 | O-ring. | 11 | Ajuste inferior del bloque del motor. |
| 6 | Parte estrecha del collar de refrigeración. | 12 | Borde rascador en el anillo anti-pulido. |

En la Figura 4-3 se muestra el pistón, ahí se aprecia que la cabeza y la falda del pistón (3), en conjunto con la camisa del cilindro, forman la cámara de combustión. Esta cámara está sellada por los anillos de compresión (4).

La corona del pistón está expuesta a altas temperaturas y para enfriarse transita lubricante, desde la carcasa del rodamiento del cigüeñal (17) hasta el pasador del pistón (21), que suministra el lubricante a la cavidad circunferencial (12), por medio de perforaciones axiales.

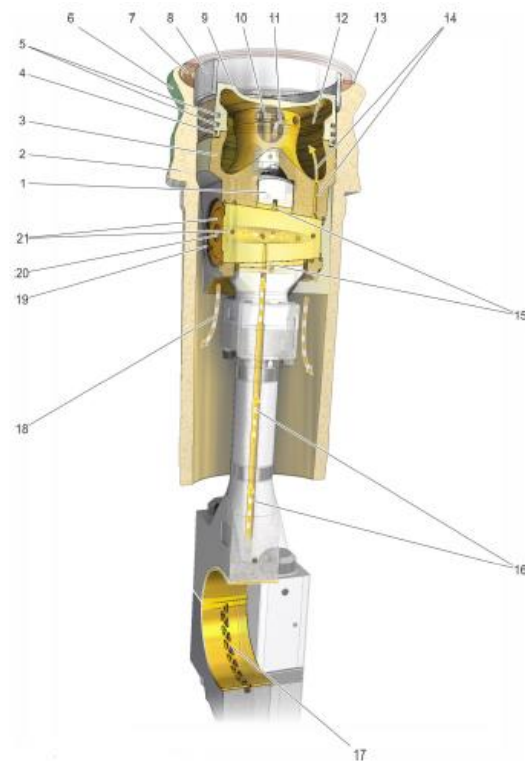


Figura 4-3: Piezas del pistón y pasador del pistón. Fuente:[7]

- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | Extremo pequeño. | 12 | Cámara abovedada en la corona del pistón. |
| 2 | Revestimiento cilindro. | 13 | O-ring culata. |
| 3 | Falda pistón. | 14 | Aceite ascendente para enfriar corona del pistón. |
| 4 | Ranuras de anillo para control de aceite. | 15 | Paso de aceite. |
| 5 | Ranuras de anillo de compresión. | 16 | Conducto de suministro de aceite fresco en el vástago de la biela. |
| 6 | Área de la camisa del cilindro con contacto de agua. | 17 | Paso de aceite a través de la carcasa del rodamiento inferior grande. |
| 7 | Anillo de sellado en la camisa del cilindro. | 18 | Devolución del aceite lubricante. |
| 8 | Anillo anti-pulido. | 19 | Anillo de seguridad. |
| 9 | Corona del pistón. | 20 | Ubicación del tapón. |
| 10 | Tornillo | 21 | Pasador del pistón con guía de aceite. |
| 11 | Devolución de lubricante. | | |

La biela es la encargada de transmitir el movimiento del pistón al cigüeñal. En la Figura 4-4 se muestra que está unida al pistón por medio del pasador (2). Además, está compuesta por el extremo pequeño (3), el vástago de biela (10) y la tapa del rodamiento inferior grande (16).

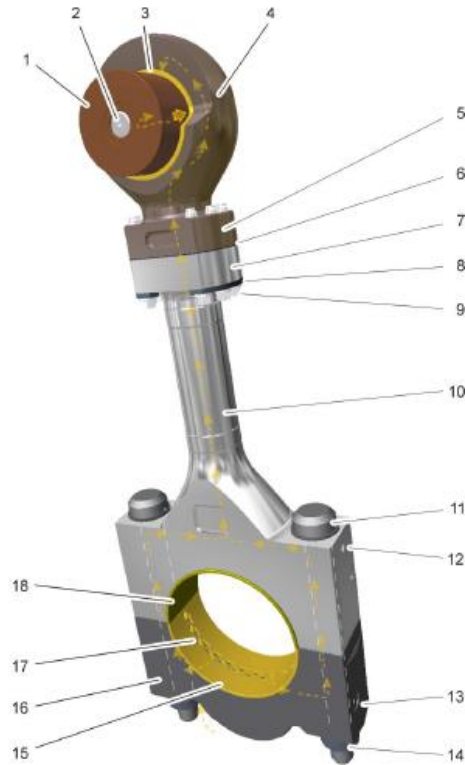


Figura 4-4: Biela, cojinete de biela y guía de lubricante. Fuente: [7]

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1 Pasador del pistón. | 10 Vástago de biela. |
| 2 Tapón | 11 Perno de biela con arandela. |
| 3 Casquillo de extremo pequeño. | 12 Agujero transversal a la guía de aceite. |
| 4 Extremo pequeño. | 13 Punto de instalación del rodamiento de extremo grande. |
| 5 Brida de extremo pequeño. | 14 Tuercas redondas para extremo grandes y pernos de cojinetes. |
| 6 Placa intermedia. | 15 Carcasa del rodamiento del extremo grande inferior. |
| 7 Brida del vástago de biela. | 16 Tapa de rodamiento inferior grande. |
| 8 Segmento. | 17 Paso de aceite en la tapa del cojinete de extremo grande. |
| 9 Pernos del vástago de biela. | 18 Carcasa de rodamiento de extremo superior. |

Otro componente del tren de rodaje principal es el cigüeñal. Como se aprecia en la Figura 4-5, a un extremo se encuentra la rueda dentada (27), que es la encargada de transmitir la energía al árbol de levas y al otro extremo se encuentran el amortiguador de vibración (16) y una rueda dentada para accionar la bomba de lubricante (16), que entrega energía para que el lubricante fluya por el cigüeñal, a través, de orificios para llegar a las tapas de rodamientos.

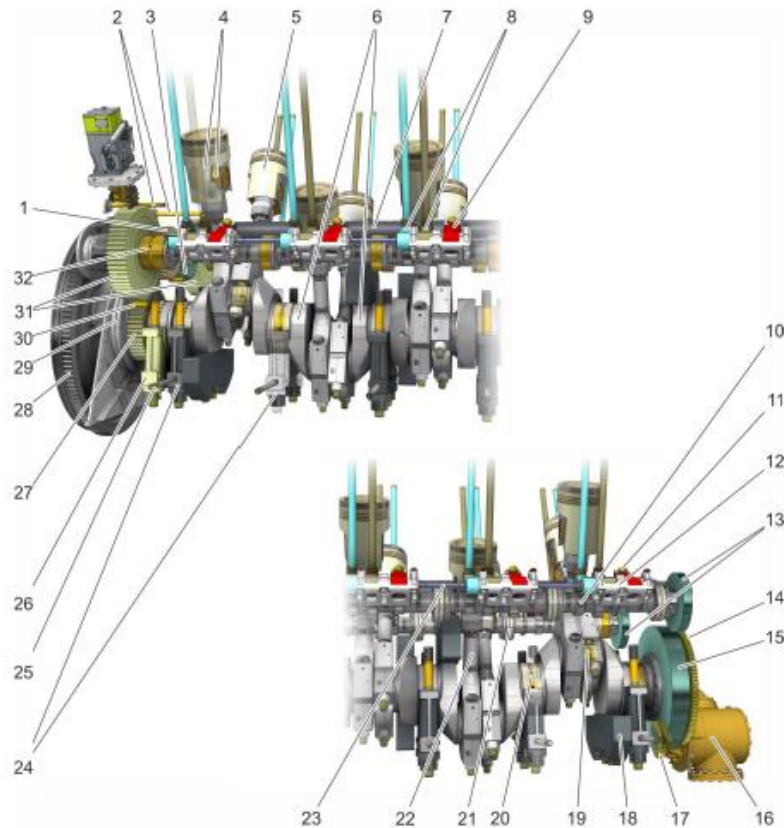


Figura 4-5: Cigüeñal y sus componentes. Fuente: [7]

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 1 | Ruedas de paso. | 17 | Rueda motriz bomba lubricante. |
| 2 | Boquillas de lubricante para engranes de circulación. | 18 | Peso equilibrio. |
| 3 | Rueda intermedia. | 19 | Entrada de aceite a la biela. |
| 4 | Extremo pequeño. | 20 | Transferencia de lubricación al cigüeñal. |
| 5 | Pistón. | 21 | Cojinete árbol de levas. |
| 6 | Brazo del cigüeñal. | 22 | Biela, lado B. |
| 7 | Tubo de aceite central. | 23 | Eje seguidor de leva. |
| 8 | Seguidores de leva. | 24 | Rodamiento normal. |
| 9 | Seguidor de accionamiento de la bomba de inyección. | 25 | Perno lateral. |
| 10 | Sección de árbol de levas. | 26 | Cojinete de empuje. |
| 11 | Enlace de tapón. | 27 | Rueda de transmisión del cigüeñal. |
| 12 | Soporte del seguidor de leva. | 28 | Volante con dentado. |
| 13 | Amortiguador de vibraciones de árbol de levas. | 29 | Cubo del volante. |
| 14 | Anillo de engrane para accionamiento de bomba. | 30 | Boquillas de lubricación. |
| 15 | Amortiguador de vibraciones del cigüeñal. | 31 | Engranes del árbol de levas. |
| 16 | Bomba de lubricante. | 32 | Entrada de lubricación al árbol de levas. |

El último componente del tren de rodaje principal es el árbol de levas, el que está compuesto por secciones individuales, que actúan sobre un cilindro. Cada sección está compuesta por 3 levas, una de entrada, una de escape y una de combustible. El árbol de levas es impulsado por la rueda de transmisión del cigüeñal, la que acciona los engranajes impulsores del eje, a través de una rueda escalonada y una rueda intermedia, en una relación 2:1.

4.2.2.3. Culata

Cada cilindro tiene su propia culata y sirve como cubierta superior de la cámara de combustión, así como para el suministro y descarga de los medios necesarios para el funcionamiento del motor. En la culata se ubican las válvulas de entrada y escape, el inyector de combustible, la válvula de aire de arranque y los accionamientos correspondientes.

4.2.2.4. Sistema de combustible

El sistema de combustible puede trabajar con HFO o MDO, y está compuesto por el sistema interno de combustible, la bomba de combustible y el inyector de combustible. En la Figura 4-6, se observan los componentes del sistema interno de combustible. El suministro llega a la entrada de combustible del motor (15), una presión de 4 a 5 [bar]. Luego de entrar al motor, el flujo de combustible se dirige hacia el filtro dúplex (13), y después a las bombas de inyección (8), por medio de la tubería de suministro de combustible.

La presión y temperatura del combustible antes de la bomba de inyección debe estar entre 3 y 5 [bar], y entre 40 y 50 [°C] para el MDO, y entre 4-5 [bar] para el HFO, y la temperatura no debe exceder los 155 [°C]. Cada culata tiene asignada una bomba de inyección, que es accionada por el árbol de levas, y suministra combustible al inyector. Los inyectores funcionan de tal manera que cuando se alcanza la presión necesaria en la cámara de la boquilla se abre la válvula de asiento produciendo la inyección y la atomización se produce, a través, de los orificios de la boquilla. Cuando la presión disminuye la válvula de asiento vuelve a su posición inicial y el combustible no utilizado regresa al sistema de combustible por medio de las líneas de retorno. El combustible que no es utilizado, se recoge y transporta a la salida de combustible del motor, para luego, dirigirse al módulo de combustible.

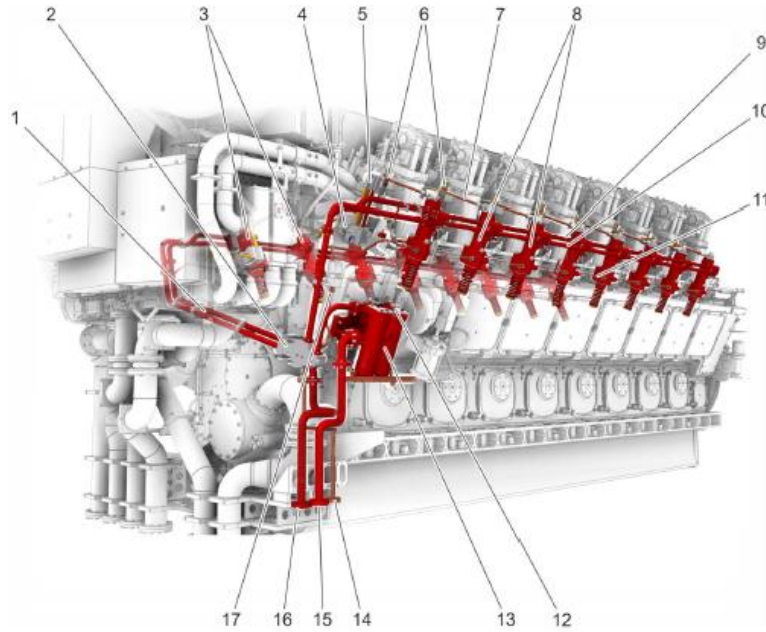


Figura 4-6: Sistema interno de combustible. Fuente:[7]

- | | | | |
|---|--|----|---|
| 1 | Conexión de la tubería de suministro de combustible y tubería de retorno de combustible al lado B. | 10 | Tubería de suministro de combustible a la bomba de inyección, lado A. |
| 2 | Bloque de medios, combustible. | 11 | Descarga de fuga de aceite de la bomba de inyección. |
| 3 | Bomba de inyección, lado B. | 12 | Indicador de diferencia de presión, filtro dúplex de combustible. |
| 4 | Bloque de medios/combustible en el bloque del motor. | 13 | Filtro dúplex de combustible. |
| 5 | Descarga de combustible desde la culata. | 14 | Salida de combustible de fuga. |
| 6 | Inyector de combustible, lado A. | 15 | Entrada de combustible. |
| 7 | Tubería de entrega de combustible al inyector. | 16 | Salida de combustible del motor C78. |
| 8 | Bomba de inyección, lado A. | 17 | Bomba de inyección de la tubería colectora de fuga de aceite. |
| 9 | Tubería de retorno de combustible desde la bomba de inyección, lado A. | | |

En la *Tabla 4-4*, se indican los valores de temperatura y presión de trabajo, alarma y alerta del sistema de combustible. La alerta indica que se necesita una acción para volver a los parámetros de trabajo.

Tabla 4-4: Temperatura y presión de trabajo, alarma y alarma del sistema de combustibles de los motores de CTU. Fuente: [8]

Zona de medición	Temperatura [°C]			Presión [bar]		
	De trabajo	Alarma	Alerta	De trabajo	Alarma	Alerta
Antes de la bomba de inyección (DFO)				5,5		2
Antes de la bomba de inyección (HFO)				4,0 – 5		2
Entrada de motor.	120					

Cuando el motor está funcionando sobre el 25% de la carga nominal, está permitido un servicio permanente con Fuel Oil (HFO). En cambio, con servicio de combustible destilado está permitido un servicio de carga parcial sin limitaciones.

4.2.2.5. Sistema interno de aceite lubricante

Durante el arranque del motor, una bomba de pre-lubricación es la encargada de suministrar el lubricante desde el cárter a los puntos de lubricación. Esta bomba es de engranes y está impulsada por un motor eléctrico. Cuando la bomba de lubricación alcanza su velocidad de operación y una presión de descarga constante, la bomba de pre-lubricación se detiene.

El flujo de lubricante al salir del cárter se dirige al enfriador de aceite lubricante. Este enfriador es un intercambiador de calor de placas, y el fluido encargado de absorber el calor del lubricante es el agua de enfriamiento LT. Se espera que, a la salida del enfriador, el aceite lubricante tenga una temperatura entre 60 [°C] y 65 [°C].

Luego de fluir por el intercambiador de calor, el lubricante se dirige a los filtros automáticos y filtros dúplex. Los filtros dúplex tienen una malla filtrante de 80 [microm] y están equipados con cartuchos de filtración dobles, los que pueden ser alternados manualmente por el operador sin interrumpir el flujo de lubricante. Los filtros automáticos tienen una malla de 34 [microm], y están equipados con seis cartuchos y un sistema de limpieza automática, que realiza la operación de retro lavado de uno de los cartuchos, mientras los otros se mantienen en servicio.

Cuando el lubricante sale de las unidades filtrantes ingresa al filtro de seguridad y luego al tubo central de aceite lubricante, ahí se distribuye y se transporta a través de orificios profundos en el bloque del motor hasta los puntos de lubricación de los cojinetes lisos y los consumidores fuera del bloque. El lubricante que se escapa en los puntos de lubricación se recoge y se devuelve, a través de aberturas y tuberías, al colector de aceite y al tanque de circulación de aceite lubricante.

Al llegar a los parámetros de operación del motor, la bomba de presión de aceite lubricante, toma el lubricante del cárter o del tanque de circulación de lubricante, y lo dirige, a través del punto de conexión C55, al enfriador de aceite lubricante y se repite el flujo descrito anteriormente.

La bomba de lubricación, es una bomba de desplazamiento positivo de tipo tornillo, y está impulsada directamente por el motor, mediante ruedas dentadas. Cuando el motor se apaga, la bomba de pre-lubricación vuelve a funcionar.

Además, de utilizar los filtros para remover partículas foráneas, el circuito posee un módulo de separación de aceite lubricante. El módulo está compuesto por una centrifuga separadora de aceite lubricante, bomba del separador de aceite, pre-calentadores de aceite lubricante, cedazo de aceite lubricante, válvulas de control y aislamiento y tanques de lodo. El flujo en el módulo de separación comienza con la succión del lubricante depositado en el tanque de circulación, por medio de la bomba de la unidad de separación. Este lubricante es llevado a los pre-calentadores, en donde el lubricante debe alcanzar una temperatura entre 90 [°C] y 95 [°C] para la óptima separación.

Luego de pasar por los pre-calentadores el fluido de lubricante se dirige a la separadora centrífuga, en donde se separará el lubricante de partículas foráneas y agua, por acción de fuerzas centrífugas. El lubricante limpio será regresado al tanque de circulación y los residuos de este serán enviados al tanque de lodo. A continuación, en la Figura 4-7, se presenta un diagrama del sistema de lubricante.

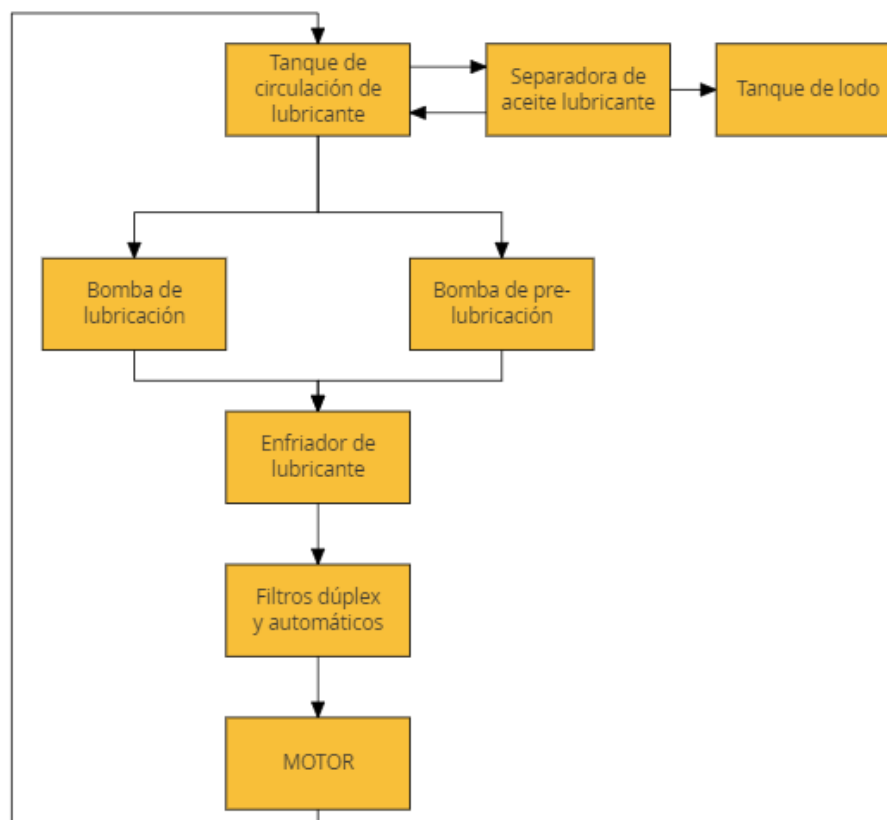


Figura 4-7: Diagrama del sistema de aceite lubricante. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4-5, se indican las presiones y temperatura de trabajo, alarma y alerta, para el lubricante, cuando se llegan a los valores de alerta se activa la parada de emergencia del motor.

Tabla 4-5: Temperatura y presión de trabajo, de alarma y alarma de lubricante de los motores de CTU. Fuente: [8]

Zona de medición	Temperatura [°C]			Presión [bar]		
	De trabajo	Alarma	Alerta	De trabajo	Alarma	Alerta
En el último cojinete del árbol de levas.				5	3	2,5
Entrada de motor.	60	70	75			

Se espera que mientras el motor funcione a potencia nominal la temperatura del lubricante aumente entre 10 y 14 [°C]. Además, del control de temperatura y presión del lubricante, se hacen controles diarios de la cantidad de lubricante en el tanque de circulación de cada motor

y se cuenta con un dispositivo de niebla de aceite, que monitorea la concentración de niebla en el cárter.

4.2.2.6. Sistema de enfriamiento

El sistema de agua de enfriamiento está compuesto por el enfriador de aire de carga, el circuito de agua de enfriamiento de baja temperatura (LT) y el circuito de enfriamiento de alta temperatura (HT). Los enfriadores de aire de carga se sitúan entre las salidas de los compresores, de los turbocompresores, y la entrada de los conductos de aire de carga, y su función es enfriar el aire de carga a temperaturas entre los 40 [°C] y los 48 [°C].

El circuito de agua de enfriamiento HT tiene la función de enfriar los cilindros y culatas cuando el motor está en funcionamiento. En cambio, cuando el motor está detenido, el circuito deberá mantenerlos calefaccionados. Este es un circuito cerrado, que comienza con la succión de agua de enfriamiento HT del tanque de compensación HT.

Cuando el motor está detenido, el agua de enfriamiento HT se dirige a los calefactores de agua de enfriamiento, donde la temperatura de salida es de 60 [°C]. Desde allí, el agua de enfriamiento se dirige a la entrada del motor, por donde ingresará a los tubos de alimentación de agua de enfriamiento HT y llegará a la cámara de refrigeración del cilindro y las cámaras de la culata. Posteriormente, el fluido regresa por las tuberías de retorno de agua de enfriamiento HT y sale del motor por el retorno de agua de enfriamiento HT.

El circuito posee una válvula de control de temperatura, que tiene como función, conducir al agua de enfriamiento HT a los radiadores cuando su temperatura esta sobre la indicada. Si la temperatura es menor, el agua de enfriamiento se dirigirá a rehacer el circuito.

Mientras el motor está en funcionamiento, el agua de enfriamiento HT se conduce directamente al motor. El fluido recorre el mismo circuito antes señalado, y en la válvula de control de temperatura se verifica que este a 80 [°C]. Cuando supera este valor, el flujo de agua de enfriamiento HT se dirige al bloque de radiadores, donde el agua de enfriamiento HT entrega su energía al aire ambiente. Los radiadores HT funcionan en dos modalidades, por medio de flujo natural cuando son cargas térmicas bajas, o por flujo forzado cuando son cargas térmicas altas.

En la Figura 4-8, se representa el circuito de agua de enfriamiento HT. En ella se observa el circuito cuando el motor está detenido, que incluye la bomba de pre-calentamiento y el pre-calentador, y cuando el motor está en funcionamiento, que incluye la bomba de agua de enfriamiento.

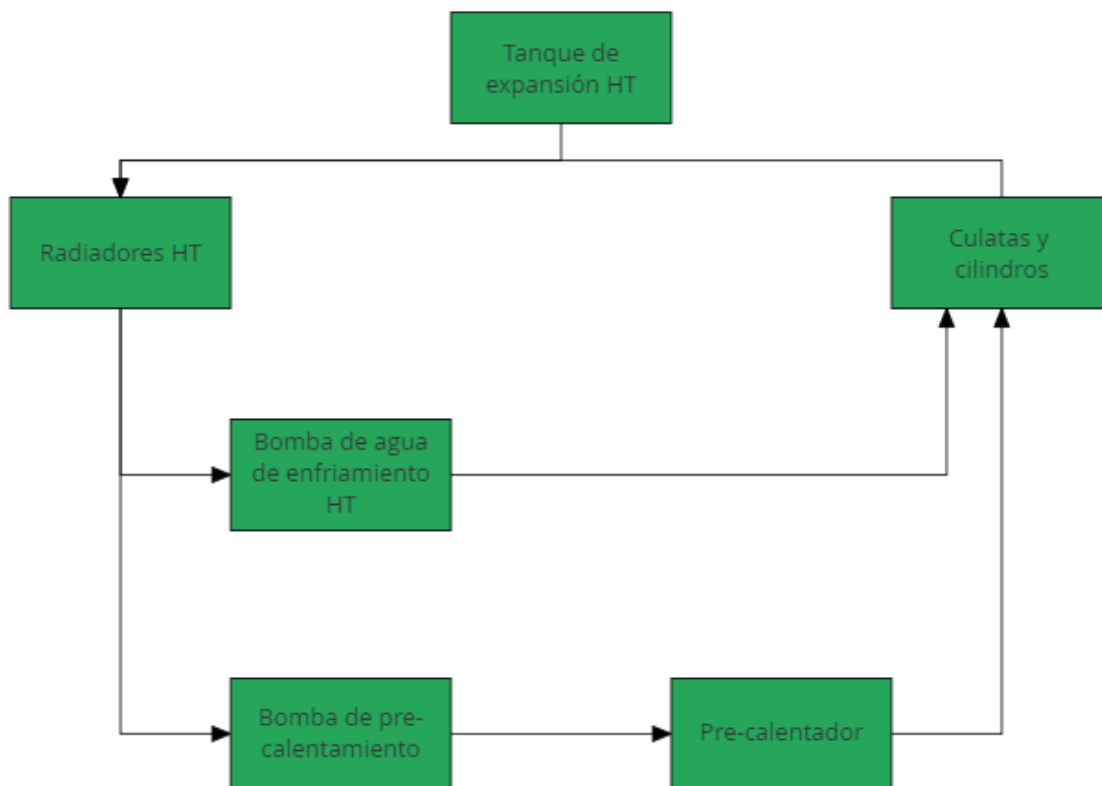


Figura 4-8: Diagrama del circuito de enfriamiento de alta temperatura (HT). Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-6 indica la temperatura y presión de trabajo, alarma y alarma del circuito de agua de enfriamiento HT. Cuando se llegan a los valores de alerta se acciona la parada de emergencia del motor.

Tabla 4-6: Muestra las temperaturas y presión de trabajo, alarma y alarma del sistema de agua de enfriamiento de alta temperatura de los motores de CTU. Fuente: [8]

Zona de medición	Temperatura [°C]			Presión [bar]		
	De trabajo	Alarma	Alerta	De trabajo	Alarma	Alerta
Salida de la bomba HT				4	2,5	2
Salida del motor	80	90	100			

El circuito de agua de enfriamiento LT es cerrado, y tiene como función el intercambio de calor con el DFO, el aire de carga, con el aceite lubricante y con el aceite térmico. El circuito comienza desde la bomba y se dirige al cabezal común de descarga para proporcionar agua de enfriamiento a los enfriadores de DFO y a los enfriadores de aire de carga. En este último proceso se espera que la temperatura del agua de enfriamiento, a la salida de los enfriadores, sea alrededor de 20 [°C].

Luego del paso por el motor, el agua de enfriamiento LT se dirige a los enfriadores de aceite lubricante, para absorber el calor del lubricante y posteriormente, al enfriador de vertido de

calor, donde debe absorber el calor del aceite térmico de la central, si este supera los 200 [°C]. Por último, el fluido pasa por la válvula de control de temperatura. Si se detecta que la temperatura es mayor a 20 [°C], el agua de enfriamiento LT se dirigirá al bloque de radiadores. A continuación, en la Figura 4-9, se muestra el circuito que recorre el agua de enfriamiento LT.

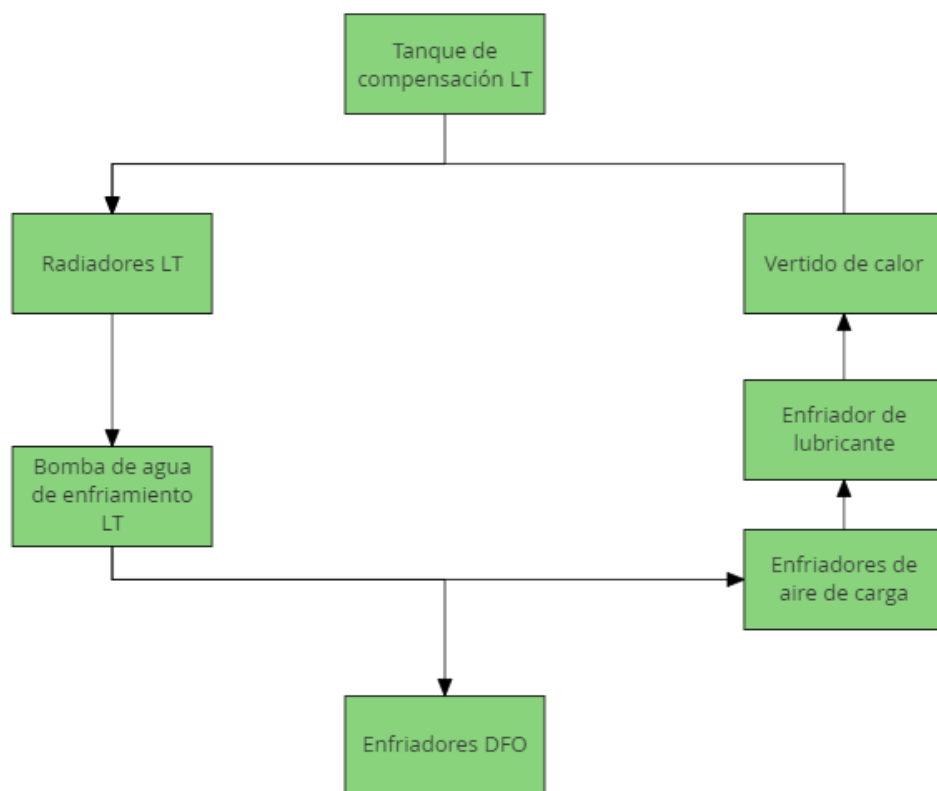


Figura 4-9: Diagrama del sistema de refrigeración de baja temperatura (LT). Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-7 indica la temperatura y presión de trabajo, alarma y alarma del circuito de agua de enfriamiento LT.

Tabla 4-7: Muestra las temperaturas y presión de trabajo, alarma y alarma del sistema de agua de enfriamiento de baja temperatura de los motores de CTU. Fuente: [8]

Zona de medición	Temperatura [°C]			Presión [bar]		
	De trabajo	Alarma	Alerta	De trabajo	Alarma	Alerta
Salida de la bomba LT				4	2,5	2
Salida del enfriador de aire de carga	20	40	50			

Además, del control de temperatura y presión del agua de enfriamiento LT y HT, se controla el nivel de los tanques de compensación.

4.2.2.7. Sistema aire de carga

El sistema de aire de carga toma aire del medio ambiente, a través de los módulos de filtración de aire de combustión. El aire filtrado se dirige a los silenciadores de entrada, para luego entrar a los turbocompresores de los motores. Ahí el aire de carga aumenta su presión y flujo volumétrico.

Después, el aire se dirige a los enfriadores de aire de carga, donde se elimina parte del calor generado por la compresión en una etapa, que consiste en el paso del aire por etapa LT. La temperatura del aire de carga a la entrada del motor debe estar entre 45 y 60 [°C]. Luego, de pasar por el enfriador, el aire ingresa al conducto de aire de carga del bloque del motor, donde se distribuye a los conductos de entrada de las culatas.

4.2.2.8. Sistema de aire comprimido

Este sistema comprime, almacena y distribuye aire limpio y comprimido para ser utilizado en el arranque de los motores. También se encarga de suministrar aire al sistema de servicio de la planta, para activar válvulas de control y otros equipos neumáticos.

Dos compresores de aire independientes suministran al cabezal de aire comprimido, el que dirige el flujo de aire comprimido a los módulos recibidores de aire que mantienen la presión entre 26 y 30 [bar]. Los módulos recibidores de aire almacenan y suministran suficiente aire a presión y volumen requeridos para mantener la capacidad de arranque de los motores.

4.2.2.9. Sistema de gases de escape

Los gases de escape, luego de salir de la cámara de combustión, se dirigen al grupo de turbocompresores, a través, del tubo colector de gases de escape. En el grupo de turbocompresores, los gases de escape tienen la función de hacer rotar la turbina, para que actúe el compresor, por medio del eje en común.

Las temperaturas de los gases de escape se miden en tres puntos del conducto de gases de escape, a la salida de cada culata, aguas arriba de la entrada del turbocompresor y a la salida del turbocompresor. Las mediciones son evaluadas por el sistema de alarma y protección.

4.3. Contexto operacional central térmica Ujina

4.3.1. Localización

CTU se encuentra en la Región de Tarapacá, en la Provincia de Tamarugal, Comuna de Pica, 185 kilómetros al sureste de la ciudad de Iquique y en la zona altiplánica a una altitud de 4400 [msnm]. Sus coordenadas se indican en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Coordenadas geográficas de CTU. Fuente:

Norte	Este
7.680.683,41	542.646,56
7.680.597,50	542.697,27
7.680.445,44	542.439,17
7.680.531,62	542.388,67



Figura 4-6: Localización de CTU. Fuente: Google Earth.



Figura 4-7: Disposición de la faena. Fuente: Google Earth.

4.3.2. Proceso

Una vez que el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) da la orden de despacho y la barra esta lista para la inyección, la partida de los motores demora 15 minutos. En estos minutos se verifica una lista de comprobación, la que contiene chequeo de temperatura de los motores, chequeo de presión y temperatura de lubricante, chequeo de presión y temperatura de agua refrigerante, presión de aire comprimido, entre otros parámetros.

Para sacar a los motores de la inercia se utiliza aire comprimido, hasta alcanzar 300 rpm. Desde ese instante, comienza la inyección de diésel y al alcanzar 500 rpm comienza la sincronización.

Luego de una hora aproximadamente, se llega al máximo de carga y comienza la inyección de HFO.

Cuando el Coordinador Eléctrico indica que la unidad o unidades en funcionamiento deben dejar de operar, los motores MAK 12CM43 se detienen en 10 minutos y los motores MAK 16CM43 en 15 minutos. Para esto se baja la carga paulatinamente y al llegar entre el 10% y 20% de carga se desconectan del generador.

En ese instante, comienza la inyección de diésel para realizar un flushing que dura entre 20 minutos y una hora. Al apretar el botón de stop del motor se detendrá y comenzará a ingresar aire comprimido.

Cuando los motores no están en operación se chequean los servicios auxiliares, se realizan pruebas operacionales y mantenimientos, con el fin de que cuando sean llamados a despachar operen de manera óptima.

4.3.3. Turnos de trabajo

Los turnos de trabajo son en modalidad 7x7 y de 12 horas. Los turnos de día cuentan con un Jefe de operación y mantenimiento, un encargado de turno y un operador mantenedor. En cambio, los turnos de noche sólo cuentan con un encargado de turno y un operador mantenedor.

4.3.4. Rutinas de mantenimiento

Las rutinas de mantenimiento realizadas en los motores Caterpillar 12CM43 y 16CM43 son las indicadas por el fabricante. Estas rutinas se clasifican en dos, mantenimientos diarios y mantenimientos por horas de servicio, las que son realizados por los operadores mantenedores de Enorchile.

Los mantenimientos diarios consisten en realizar un control visual de fugas, comprobar niveles de lubricantes, de refrigerante y de combustible, leer presión en los filtros de combustible y lubricante, limpiar el lado del compresor del turbocompresor y extraer el agua de las botellas de aire de arranque y del filtro de aire comprimido.

Los mantenimientos por hora de servicio son cada 150 horas de operación, donde las actividades que más frecuentes se realizan son el control visual de las culatas, limpieza de la turbina del turbocompresor, controlar el contenido de la emulsión anticorrosiva y anticongelante del sistema de enfriamiento e inspeccionar los rotadores de válvula. Los principales mantenimientos se realizan a las 1500, 3750, 7500, 12000, 15000, 24000, 30000, 36000, 45000, 60000 y 90000 horas de operación.

Además, el centro de monitoreo de procesos de Enorchile realiza seguimiento a las principales condiciones operacionales de las unidades de manera continua, como son la temperatura de los gases de escape a la entrada de la turbina del turbocompresor, las revoluciones del motor, la temperatura y presión de lubricante, la temperatura y presión del refrigerante y las temperaturas de los cilindros.

4.3.5. Dispositivos de seguridad

Los sistemas auxiliares de CTU están equipados con instrumentos que principalmente miden presiones, temperaturas y niveles, que emiten alarmas e indicaciones locales o en la sala de mandos. Las alarmas e indicaciones de cada sistema se encuentran en el *Anexo 9.2*.

Además, se cuenta con un sistema de paradas de emergencias, las que se activan por velocidad excesiva, falta de aceite lubricante, temperatura excesiva de lubricante, alta concentración de niebla de aceite, alta temperatura de refrigerante, falta de refrigerante y a altas temperaturas de los gases de escape. Es importante que luego de que se aplica una parada de emergencia el motor no debe volver a arrancar. Las paradas de emergencias se activan cuando la concentración de niebla de aceite supera el 2% y cuando la temperatura de gases es mayor a 400 [°C] en la turbina del turbocompresor. Los valores en que se activa la parada de emergencia para el sistema de lubricación y refrigeración fueron indicados anteriormente.

4.3.6. Participación de la Central Térmica Ujina en el mercado eléctrico

En Chile, el mercado de la energía es segmentado en tres negocios, generación, transmisión y distribución. En generación, las compañías pueden participar en un mercado abierto de energía y potencia. Este mercado es regulado y auditado por un organismo gubernamental llamado Comisión Nacional de Energía (CNE). Además, el sistema eléctrico y su mercado es operado por un organismo público técnico e independiente llamado Coordinador Eléctrico Nacional (CEN).

La operación económica del sistema eléctrico chileno es centralizada, donde la coordinación entre la regulación gubernamental y privada debe reflejar la operación más económica y segura del sistema.

El negocio de la generación de CTU consiste en proveer electricidad (energía y potencia), lo que está estructurado en un negocio de producción y comercialización. Los ingresos operacionales de generación, se definen en la ecuación (2).

$$\text{Ingreso operacional} = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} E_{ij} CMg_{ik} + \sum_{j=1} \sum_{k=1} Psuf_j Pnudo_k - \left(\sum_{i=1} E_i CVg_i + Peajes \right) \quad (2)$$

E_{ij} representa la energía inyectada a la hora i por la unidad generadora j a un costo marginal CMg_{ik} , en la misma hora i en el punto de inyección k . $Psuf_j$ representa la Potencia de Suficiencia de la unidad generadora j y $Pnudo_k$ corresponde al precio nudo en el punto de inyección k . E_i es la energía generada a la hora i y CVg_i son los costos variables de operación asociados. Por último, se considera los peajes, los que corresponden a pagos por el uso del sistema de transmisión.

En el negocio de producción, CTU provee electricidad basado en un mercado obligatorio, con tarificación marginalista, donde los costos de producción son auditados por el gobierno. La tarificación marginalista consiste en que el precio de un bien es el costo asociado a agregar una unidad adicional.

En energía, el precio es calculado según una operación, donde se enciende desde la unidad más barata hasta la más costosa, con tal de suministrar la demanda del sistema. Este precio es calculado a cada hora, donde el precio final es el costo de la última unidad llamada a operar.

El total de energía inyectada al sistema por la central, es igual al total de la energía instruida por el CEN. La energía inyectada por CTU y su factor de planta el año 2018, son presentados en la *Figura 4-8*, donde se observa que la generación de energía promedio es menor al 1,3% de lo que se podría generar mensualmente si las unidades funcionaran de manera continua.

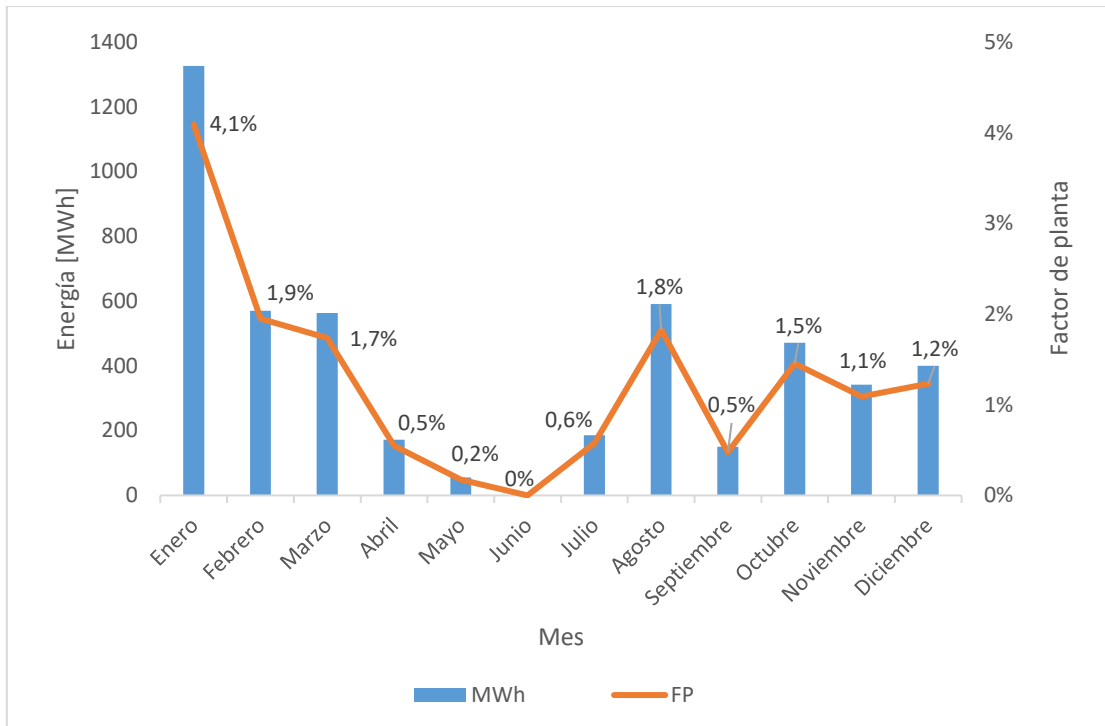


Figura 4-8: Energía mensual inyectada y factor de planta de CTU en el año 2018. Fuente: Elaboración propia. Datos públicos CEN.

Por otro lado, el precio de la potencia también es calculado por la teoría marginalista. Este precio es definido según la tecnología que provee un MW adicional a la suficiencia del sistema, con tal de abastecer la demanda máxima.

Para Enorchile, el negocio de la Central Térmica Ujina es mayoritariamente el ingreso por potencia de suficiencia.

4.3.7. Potencia de suficiencia

La potencia de suficiencia de una unidad generadora es la potencia que dicha unidad puede aportar a la suficiencia del sistema. A partir de dicha potencia, se determina la remuneración para cada generador.

El cálculo de la potencia de suficiencia se ajusta al siguiente método, ejemplificado en la Figura 4-9.

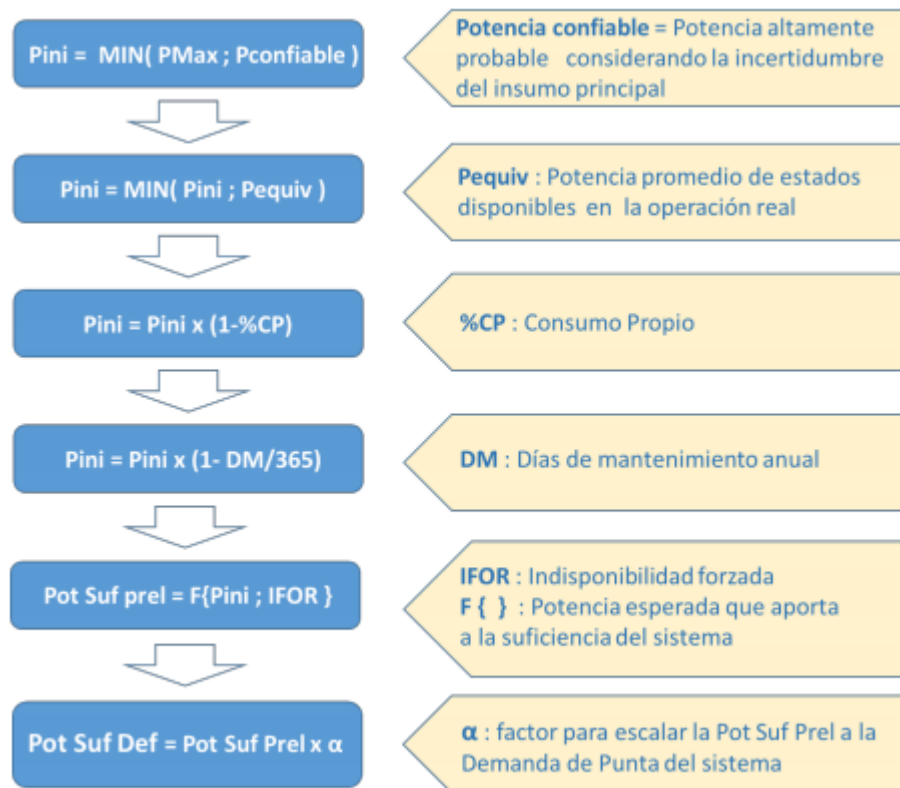


Figura 4-9: Diagrama del cálculo de potencia de suficiencia. Fuente: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2018/01/Informe-Final-131217.pdf>

Para cada unidad generadora se calcula la Potencia Confiable como la Potencia bruta que cada unidad puede aportar al sistema, en función de la incertidumbre asociada a la disponibilidad del insumo principal.

El valor resultante de Potencia Confiable se compara con la potencia máxima de cada unidad generadora, y se selecciona como potencia inicial al mínimo entre ellos.

La potencia inicial, anteriormente obtenida, se compara con la potencia equivalente de la unidad. La potencia equivalente se obtiene a partir del promedio ponderado de los estados deteriorados y estados disponibles de la unidad.

La potencia inicial anterior, debe ser reducida en un factor proporcional a los consumos propios, para luego, ser nuevamente reducida por un factor proporcional al periodo de mantenimiento mayor anual de la central.

Posteriormente, la potencia de suficiencia preliminar de cada unidad generadora se obtiene mediante un análisis probabilístico, evaluando el valor esperado de potencia que aportara a la suficiencia de potencia para el abastecimiento de la demanda de punta, considerando su potencia inicial y la Indisponibilidad Forzada (IFOR) de cada unidad.

Por último, la Potencia de Suficiencia Definitiva para cada unidad generadora corresponderá a la Potencia de Suficiencia Preliminar escalada por un factor único para todas las unidades

generadoras, de manera que la suma de la Potencia de Suficiencia Definitiva de las unidades generadoras sea igual a la Demanda de Punta del sistema.

La potencia de suficiencia definitiva de las unidades generadoras de CTU para el año 2018, se muestran en la *Tabla 4-9*.

Tabla 4-9: Potencia de Suficiencia Definitiva de las unidades generadoras de CTU en el año 2018. Fuente: Informe estudio de potencia de suficiencia.

Unidad Generadora	Potencia de Suficiencia Definitiva [MW]
Ujina 1	4.05
Ujina 2	3.99
Ujina 3	4.45
Ujina 4	4.28
Ujina 5	4.12
Ujina 6	5.56

4.3.8. Abastecimiento de materias primas

La Comisión Nacional de Energía mediante la “Norma técnica de transferencia de potencia entre empresas generadoras” establece las bases para la transferencia de potencia. En ellas, se definen los combustibles utilizados por las centrales térmicas como insumos principales o insumos alternativos.

El insumo principal es el combustible con el cual la unidad generadora puede operar en forma continua, a un menor costo variable promedio durante el año anterior al año de cálculo, para una determinada potencia máxima.

En cambio, el insumo alternativo es distinto al insumo principal, con el cual la unidad generadora puede operar en forma continua al menos 24 horas, para la potencia máxima correspondiente a ese combustible.

Bajo esta norma, CTU funciona con Fuel Oil N°6 (HFO) como insumo principal y Diésel B como insumo secundario.

La potencia confiable de las unidades generadoras de CTU en el año 2018, se muestran en la *Tabla 4-10*.

Tabla 4-10: Potencia Confiable de las unidades de CTU en el año 2018. Fuente: Informe estudio de potencia de suficiencia.

Unidad Generadora	Potencia Confiable [MW]
Ujina 1	6.7
Ujina 2	6.7
Ujina 3	6.7
Ujina 4	6.7
Ujina 5	8.9
Ujina 6	8.9

Cabe destacar, que la CTU al utilizar HFO N°6, tiene un costo de producción alto en comparación a la oferta del mercado chileno.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del insumo principal.

Tabla 4-11: Especificaciones técnicas del combustible HFO N°6 utilizado en CTU. Fuente: www.copec.cl

Requisitos	Unidad	Combustible N°6	
		Máximo	Mínimo
Densidad a 15 °C.	kg/m ³	999,4	
Punto de Inflamación.	°C		
Punto de Escurrimiento.	°C	32	
Agua por destilación y sedimento por extracción.	%V/V	2	
Sedimento por extracción.	%M/M	0,5	
Cenizas.	%M/M	DS 66	
Residuos Carbonoso.	%M/M		
Viscosidad cinemática a 100 °C.	cSt	50	15
Azufre.	%M/M	3	
Vanadio.	PPM	500	
Asfaltenos.	%M/M	NCh 61	

4.3.9. Estándares de calidad

La expectativa de servicio de una unidad es 100% disponibilidad cada vez que sea llamada a despachar. Además, se espera que cumpla su despacho sin presentar fallas.

El índice IFOR es la indisponibilidad forzada y, representa la cantidad de horas indisponibles de una unidad en un período de tiempo. Este índice se determina según la siguiente expresión:

$$IFOR = \frac{T_{OFF}}{T_{OFF} + T_{ON}} \quad (3)$$

Donde T_{OFF} es el tiempo medio acumulado en que la unidad generadora se encuentra indisponible y, T_{ON} es el tiempo medio acumulado en que la unidad generadora se encuentra en operación, independiente del nivel de despacho, para una ventana móvil de 5 años.

Los estados operativos que se consideran como T_{OFF} son la Desconexión Forzada (DF) y la Desconexión Programada (DP).

La Desconexión Forzada, incluye a unidades fuera de servicio por ocurrencia de fallas, por mantenimientos no programados o cuando no cumple con requerimientos de conexión del CDC.

Por otra parte, la Desconexión Programada, consiste en unidades fuera de servicio por realización de mantenimientos programados en la programación de corto plazo.

Este índice influye en los ingresos por potencia de la central, ya que al aumentar el IFOR impacta el valor de la potencia de suficiencia por 5 años.

Para el periodo de 2018, los índices de indisponibilidad forzada (IFOR) y T_{OFF} de las unidades de CTU se muestran en la *Figura 4-10*. Se observa que el índice IFOR varió entre 5% y 11%, lo indica que las unidades estuvieron fuera de servicio por imprevistos entre 438 y 964 horas al año.

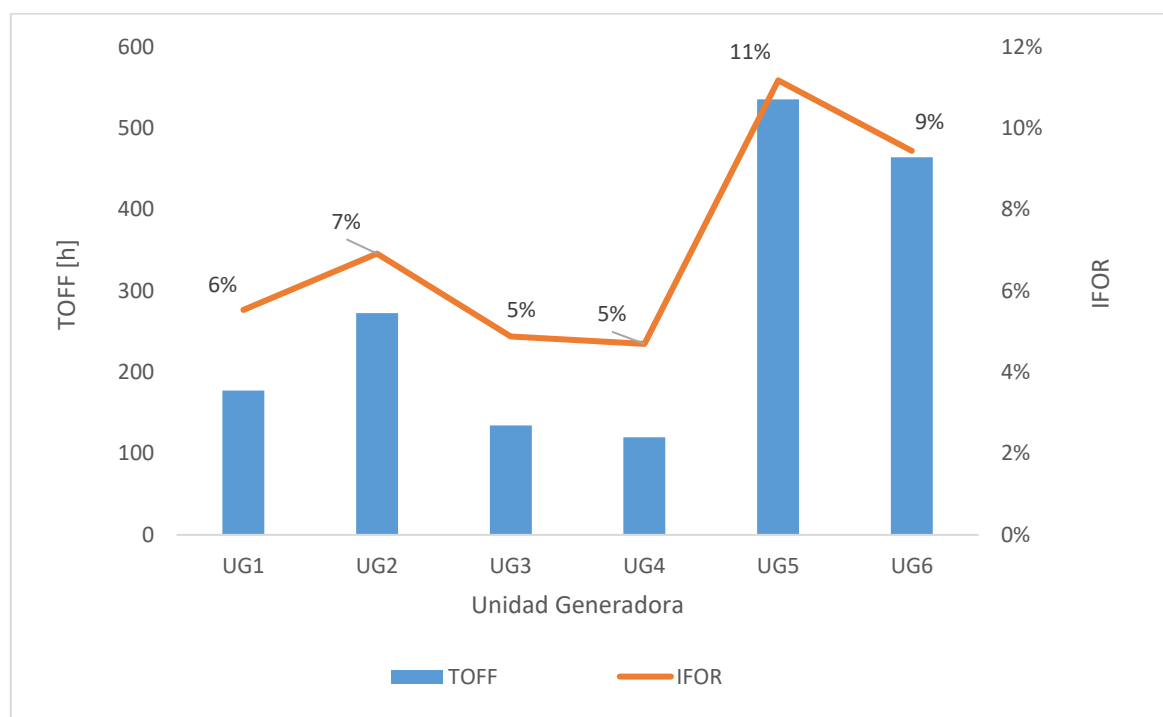


Figura 4-10: Gráfico que indica los valores de T_{OFF} e IFOR para las unidades de CTU, en el periodo de 2018. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Recopilación de datos de fallas y tiempo de reparación

Para tener un registro de fallas y tiempo de reparación de las unidades se utilizó el Reporte de Movimiento de Equipos que publica el CEN, las Solicitudes de Desconexiones e Informes de Fallas. En el Reporte de Movimientos de Equipos se seleccionaron los sucesos entre el 29 de marzo de 2016 hasta el 30 de abril de 2019 con estado operativo DF, obteniendo 1641 fallas entre las 6 unidades. En la *Figura 4-11* se muestran las fallas por año de cada unidad, observándose que la cantidad de fallas disminuye a través de los años. Esta disminución no necesariamente tiene relación con un mejor estado de las máquinas, dado que los últimos años estas unidades han reducido su generación.

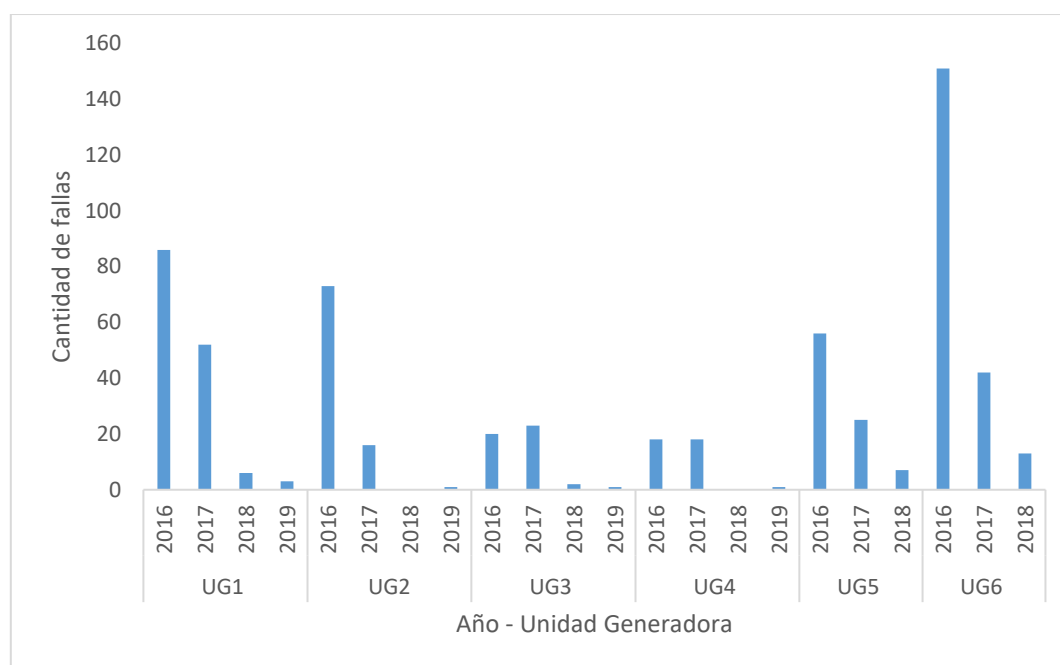


Figura 4-11: Muestra la cantidad de fallas por año de las unidades generadoras de CTU. Fuente: Elaboración propia.

Para identificar el tiempo de reparación de cada falla se utilizó la información de las solicitudes de desconexiones e informes de fallas, donde indican fecha y hora de desconexión y conexión. A continuación, en la *Figura 4-12* se muestra la cantidad de fallas y tiempo de reparación de cada unidad, observándose que las unidades UG2, UG3 Y UG4 tienen la menor cantidad de fallas, pero un tiempo similar de reparación a la unidad UG6, que tiene la mayor cantidad de fallas. De esto se puede deducir que las fallas de las unidades UG2, UG3 Y UG4 tienen un mayor tiempo de reparación.

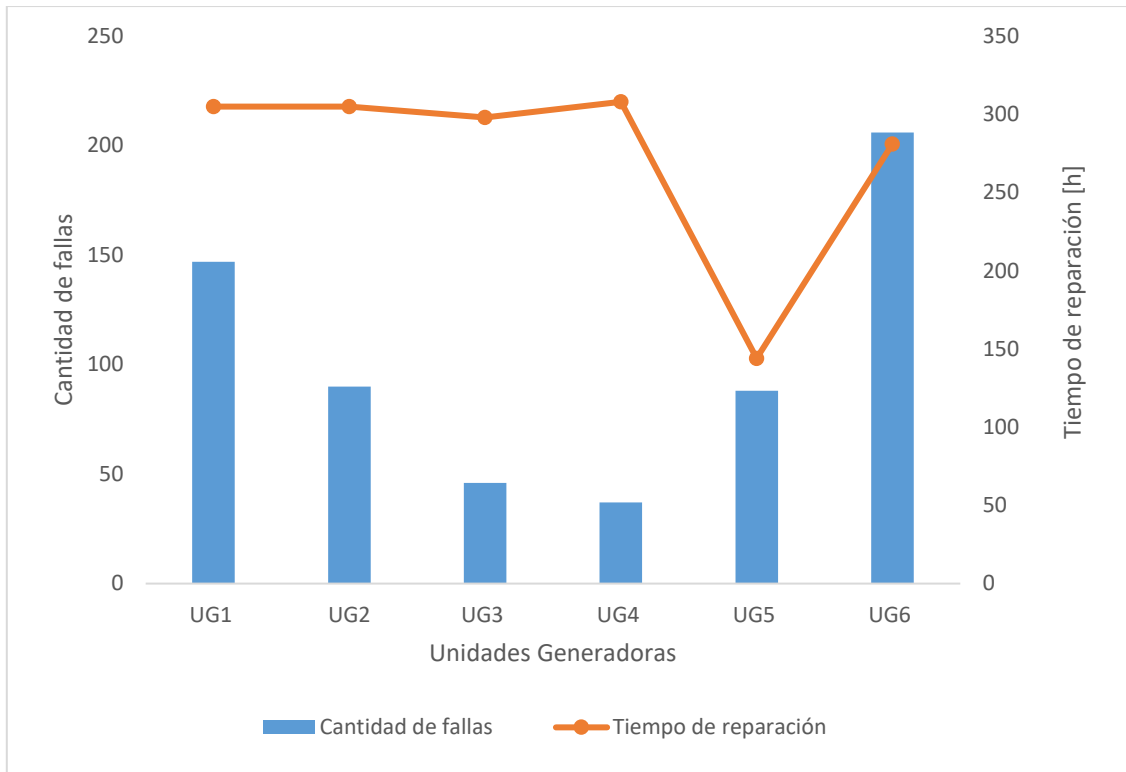


Figura 4-12: Indica la cantidad de fallas y el tiempo de reparación de cada unidad. Fuente: Elaboración propia.

En este capítulo se estudió la central térmica Ujina, que está compuesta por seis unidades generadoras conformadas cada una por un motor diésel y alternador. Principalmente, se indagó en el funcionamiento de los motores diésel y sus sistemas auxiliares, reconociendo las funciones de cada sistema y sus rangos de operación. Igualmente, se examina el contexto operacional de CTU, reconociendo que es una central con bajos valores de factores de planta y enfocada en el negocio de potencia de suficiencia del mercado eléctrico. Por último, se hace una recopilación de datos de fallas y tiempos de reparación de las unidades, observándose que la cantidad de fallas ha disminuido desde el año 2016, lo que no tiene una estricta relación con un mejor estado de ellas. Respecto a los tiempos de reparación, las unidades UG3 y UG4 tienen un tiempo similar a otras unidades que tienen por lo menos el doble de fallas.

5. Aplicación de análisis de fallas en Central Ujina

5.1. Diagrama Jack Knife

El diagrama de Jack Knife es un diagrama de dispersión logarítmica que permite identificar fallas crónicas y agudas, y da la oportunidad de priorizar y focalizar esfuerzos.

Para realizarlo se necesita tener datos sobre el tiempo que esta Fuera De Servicio (TFS) el activo por cada falla y la cantidad de veces que ocurrió esta falla.

En esta ocasión, se sumaron los TFS por cada sistema del motor, incluyendo sistemas auxiliares, problemas de programación, operacionales y externos. Para cada una de las categorías se contabilizo la cantidad de ocasiones que se presentó una falla (n) y con ambos datos se determinó el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR).

Para realizar el diagrama se necesita determinar Tiempo Total Fuera De Servicio (D), el Número Total De Fallas (N) y los Ítem De Fallas (Q), considerado como las categorías anteriormente mencionadas. En el eje de las abscisas se ubica la cantidad de fallas y en el eje de los ordenas el MTTR. Para determinar los cuadrantes se utilizan dos límites, el límite de la abscisa o Limite N,

$$\text{Limite } N = N/Q \quad (4)$$

Y el límite de la ordena o Limite MTTR.

$$\text{Limite } MTTR = D/N \quad (5)$$

A todos los valores mencionados anteriormente se les aplica logaritmo y se gráfica, resultando el *Grafico 5-1*.

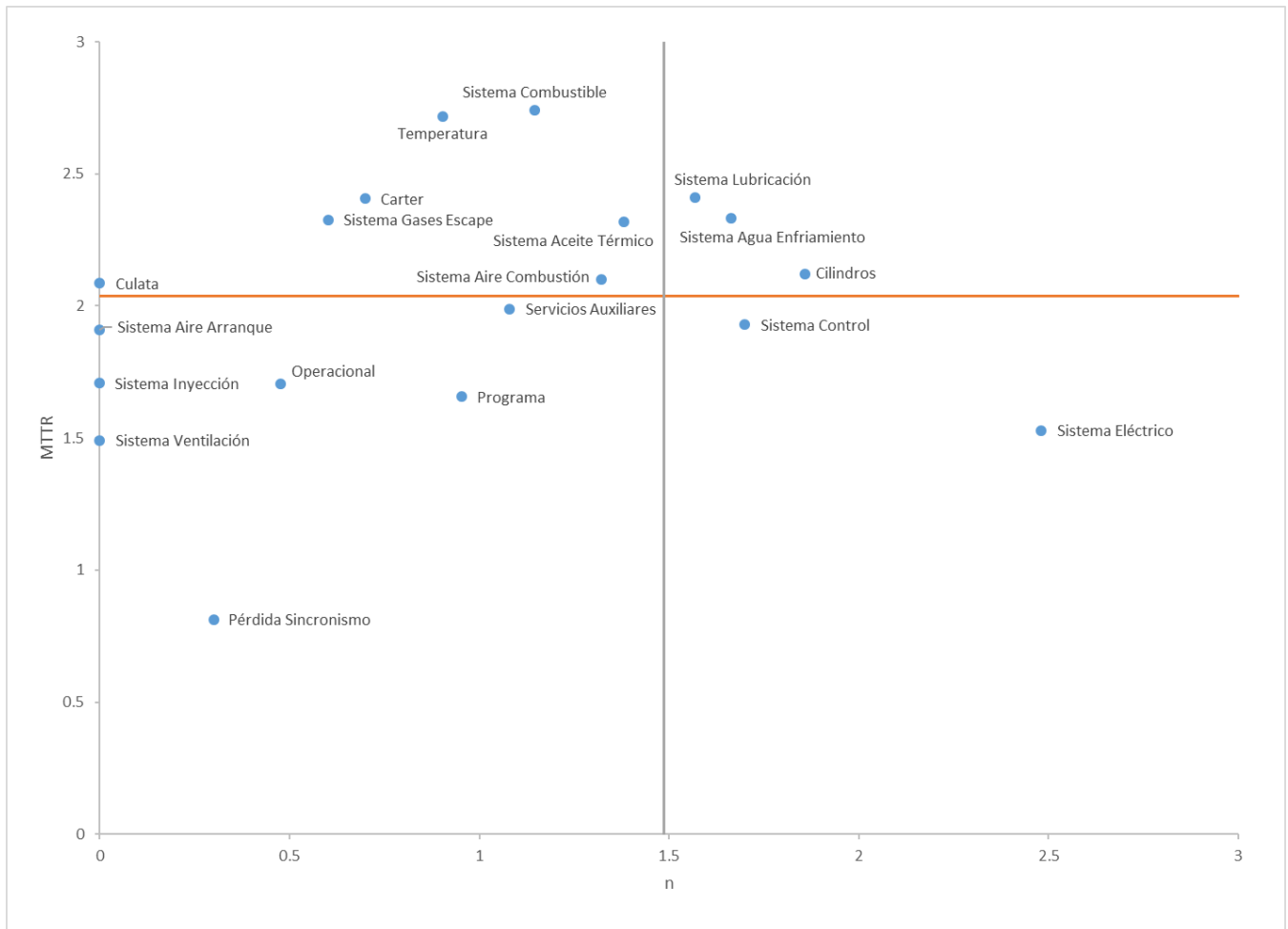


Figura 5-1: Diagrama de Jack Knife de los sistemas que han presentado fallas en las unidades de CTU. Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama de Jack Knife se observan cuatro cuadrantes. El primer cuadrante es el lado derecho superior, ahí se encuentran los sistemas que presentan fallas crónicas-agudas. El segundo cuadrante es el lado izquierdo superior, donde se localizan los sistemas que presentan fallas agudas. El tercer cuadrante es el lado izquierdo inferior que no presenta categorización y el cuarto cuadrante es el lado derecho inferior, en el cual se ubican los sistemas con fallas crónicas.

En el primer cuadrante se encuentran el sistema de lubricación, el sistema de agua de enfriamiento, el sistema de aceite lubricante y los cilindros. Esto indica que las fallas de estos sistemas ocurren más a menudo y demoran más tiempo en ser reparadas.

En el segundo cuadrante se ubican el sistema de combustible, el sistema de aire de carga, el sistema de aceite térmico, fallas en el cárter y culata, además de problemas de temperatura. Los sistemas que se encuentran en este cuadrante presentan fallas agudas, lo que quiere decir que demoran más de 109 horas en ser reparadas.

En el tercer cuadrante se encuentran el sistema de aire de arranque, sistema de inyección, sistema de ventilación, fallas por pérdidas de sincronismo, fallas externas, fallas

operacionales, fallas por programación y fallas de servicios auxiliares sin especificar. Las fallas en este cuadrante no están categorizadas.

En el cuarto cuadrante se localizan el sistema de control y el sistema eléctrico, por lo que sus fallas son crónicas, lo que indica que han ocurrido más de 31 veces.

Luego de identificar las fallas de CTU, se priorizará el análisis FMECA a los sistemas categorizados como crónicos-agudos.

5.2. Aplicación FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)

La primera etapa de un FMECA es la definición del activo que se analizará. En este caso se analizarán los sistemas crónicos-agudos que se identificaron en el diagrama de Jack Knife de la Figura 5-1. Estos son el sistema de lubricación, sistema de agua de enfriamiento y los cilindros.

Según la sección 3.4.1., además de identificar el activo o sistema, se deben definir límites. Para el sistema de lubricación se analizará el almacenamiento, purificación y suministro de lubricante. Para el sistema de agua de enfriamiento se analizarán el circuito de alta temperatura (HT) y el de baja temperatura (LT). Por último, se analizará el sistema cilindro-pistón, lo que incluye camisa del cilindro, pistón y pasador del pistón.

Luego de establecer los límites del análisis, la segunda etapa es identificar las funciones del sistema, según la sección 3.4.2., donde se comienza con identificar el contexto operacional, descrito en la sección 4.2.4.

El segundo paso es realizar la lista de funciones de los sistemas, identificando funciones primarias y secundarias, las que se muestran en la *Tabla 5-1, Tabla 5-2, Tabla 5-3 y Tabla 5-4*.

Tabla 5-1: Funciones primarias y secundarias del sistema de lubricación.

Funciones primarias	Funciones Secundarias
1 Entregar lubricante a piezas que sometidas a fricción.	1 Recibir lubricante desde unidades externas y el motor.
2 Disipar el calor del lubricante transferido por el motor.	2 Almacenar lubricante para el motor.
3 Dispersar partículas de desgaste o residuos de la combustión que se encuentren en el lubricante.	

Tabla 5-2: Funciones primarias y secundarios del sistema de agua de enfriamiento LT.

Funciones primarias	Funciones secundarias
1 Disminuir la temperatura del aire de carga.	1 Almacenar agua de enfriamiento.
2 Disminuir la temperatura del aceite lubricante.	2 Conducir el agua de enfriamiento por el circuito HT.
	3 Transferir el calor absorbido del aire de carga y lubricante al medio ambiente.

Tabla 5-3: Funciones primarias y secundarias del sistema de agua de enfriamiento HT.

Funciones primarias	Funciones secundarias
1 Refrigerar el cilindro.	1 Almacenar el agua de enfriamiento HT.
2 Refrigerar la culata.	2 Conducir el agua de enfriamiento por el circuito HT.
	3 Transferir el calor absorbido del aire de carga, cilindro y culatas al medio ambiente.
	4 Precalentar el motor.

Tabla 5-4: Funciones primarias del sistema cilindro-pistón.

Funciones primarias
1 Soportar presiones y temperaturas de la combustión.
2 Transmitir la energía de los gases de combustión al cigüeñal.

El tercer paso es la descripción de funciones, para lo que se debe utilizar un verbo, un objeto y un estándar de desempeño. A continuación, se indican las funciones de cada uno de los sistemas.

Tabla 5-5: Descripción de las funciones del sistema de lubricación.

	Funciones
1	Almacenar 17/20 [m^3] de aceite lubricante para el motor en el tanque de circulación.
2	Suministrar lubricante en el arranque a 30 [m^3/h] y 5 [bar] por medio de la bomba de pre-lubricación.
3	Suministrar al motor durante la operación lubricante a 276 [m^3/h] y 5 [bar], por medio de la bomba de lubricación.
4	Disminuir la temperatura del lubricante a 60-65 [$^{\circ}C$] para el ingreso al motor.
5	Filtrar sólidos y partículas extrañas del lubricante mayores a 34 [μm].
6	Remover suciedad y partículas foráneas del lubricante mayores a 80 [μm].

Tabla 5-6: Descripción de las funciones del sistema de agua de enfriamiento HT.

	Funciones
1	Proveer 1400 [L] en los tanques de compensación de circuitos de HT para cambios de volumen del sistema de agua de enfriamiento.
2	Dirigir el agua de enfriamiento HT hacia las culatas y pistones, si la temperatura del agua HT es menor a 90 [$^{\circ}C$].
3	Dirigir el agua de enfriamiento HT hacia los radiadores si la temperatura del agua aumenta sobre los 90 [$^{\circ}C$].
4	Disminuir la temperatura del agua de enfriamiento HT a 70 [$^{\circ}C$] si es necesario.

5	Mantener la temperatura de agua de enfriamiento HT a 70 [°C] si el motor está fuera de funcionamiento.
---	--

Tabla 5-7: Descripción de las funciones del sistema de enfriamiento LT.

	Funciones
1	Contener 1400 [L] en los tanques de compensación de circuitos de LT para cambios de volumen del sistema de agua de enfriamiento.
2	Dirigirse a la zona de enfriadores de aire de carga si la temperatura de agua de enfriamiento LT es menor a 45 [°C].
3	Disminuir a 65 [°C] la temperatura del lubricante a la salida del enfriador de aceite lubricante.
4	Disminuir la temperatura del aceite térmico cuando sobrepase los 200 [°C].
5	Mantener la temperatura del agua de enfriamiento LT entre 20 [°C] y 45 [°C] a la entrada de la válvula de control de flujo.

Tabla 5-8: Descripción de las funciones del sistema cilindro-pistón.

	Funciones
1	Moverse a 10 [m/s] nominal para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.
2	Trabajar a presiones entre 110 [bar] y 160 [bar] dentro de la cámara de combustión.
3	Trabajar a temperaturas entre 200 [°C] y 500 [°C] en la cámara de combustión.

Los estándares de desempeño fueron los descritos por el fabricante en cada uno de sus manuales y por los operadores.

Para ejemplificar el análisis FMECA, se hará seguimiento de la primera función del sistema cilindro-pistón descrito en la *Tabla 5-8*.

La tercera etapa del análisis FMECA es identificar las fallas funcionales de cada uno de los sistemas. Por lo que para cada función se determinaron fallas totales y fallas parciales. Las fallas totales fueron descritas como la incapacidad de realizar la función y las fallas parciales como la incapacidad de cumplir los estándares de desempeño.

En la *Tabla 5-9* se indican las fallas funcionales del conjunto cilindro-pistón para la función de moverse a 10 [m/s] nominal para transmitir el movimiento al conjunto biela-manivela.

Tabla 5-9: Muestra las fallas funcionales para una función del conjunto cilindro-pistón.

Función	Falla Funcional
1 Moverse a 10 [m/s] nominal para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	a No moverse y no transmitir movimiento al conjunto biela manivela.

	b Moverse a menos de 10 [m/s] para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.
	c Moverse a más de 10 [m/s] para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.

La cuarta etapa es determinar los modos de fallas, por lo que se describieron todos los posibles, para que luego fuesen revisados por el Jefe de operación y mantenimiento, y el Encargado de turno. Posteriormente se seleccionarán los probables modos de falla. El nivel de causalidad seleccionado fue el nivel 4 y las principales fuentes de información fueron los registros de fallas y el Encargado de turno.

A modo de ejemplo, para la falla funcional 1.a de la *Tabla 5-9*, se muestra a continuación los modos de falla en la *Tabla 5-10*.

Tabla 5-10: Muestra los modos de falla para la falla funcional 1.a del conjunto cilindro pistón.

Función	Falla Funcional	Modos de Falla
1 Moverse a 10 [m/s] nominal para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	a No moverse y no transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	1 Fundición entre el pistón y la camisa del motor.
		2 No se encuentra el bulón del pistón.
		3 La biela se ha roto.
		4 No se ha producido la combustión.

La quinta etapa fue definir los efectos de las fallas, donde se consideró los daños físicos, la manera en que afecta a la producción y como amenaza la seguridad y medio ambiente. A continuación, se muestran en la *Tabla 5-11* los efectos de falla de los modos de falla de la *Tabla 5-10*.

Tabla 5-11: Indica los efectos de la falla de los modos de falla de la falla funcional 1.a del sistema cilindro-pistón.

Modos de Falla	Efectos de la falla
1 Fundición entre el pistón y la camisa del motor.	A Si el motor está en funcionamiento se producirá un aumento en los esfuerzos radiales del cigüeñal por no moverse el pistón en esa zona.
2 No se encuentra el bulón del pistón.	B No habrá transmisión de movimiento desde el pistón hacia la biela. La biela quedará sin conexión hacia el pistón por lo que puede llegar a girar libremente alrededor del cigüeñal produciendo

	ruido. Esto producirá daños severos en el bloque del motor.
3 La biela se ha roto.	C Habrá una disminución de potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal. Una señal de la falla será el aumento de ruido en el motor.
4 No se ha producido la combustión.	D Al no producirse la combustión habrá una disminución de la potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal, por el no movimiento de un pistón.

Por último, la sexta etapa fue categorizar los efectos de la falla con los indicadores cualitativos de severidad, ocurrencia y detección. Esta categorización fue realizada por el Jefe de operación y mantenimiento, y un encargado de turno. Para la categorización se utilizaron los indicadores descritos en la *Tabla 5-12*.

Tabla 5-12: Muestra los indicadores para categorizar la severidad, ocurrencia y detección de los modos de falla.

Indicador	Severidad	Ocurrencia	Detección
1	Sin lesiones del personal. Menos de un día de disponibilidad. Contingencia ambiental controlable dentro de la central.	Suceso improbable. Suceso <1 en 9000 horas en operación.	Controles actuales detectan casi seguros al modo de falla o causa de falla.
2			Los controles actuales tienen una probabilidad muy alta de detectar modo o causa de falla.
3	Atención médica, lesiones menores sin incapacidad, efectos de la salud reversible. De 1 a 7 días de	Suceso concebible. De 1 en 6000 horas de operación a 1 en 9000 horas en operación.	Los controles actuales tienen una probabilidad alta de detectar modo o causa de falla.
4	indisponibilidad. Contingencia ambiental fuera de la central pero controlable.		Los controles actuales tienen una probabilidad moderadamente alta para detectar el modo o causa de falla.
5	Múltiples lesionados, incapacidad parcial o total personal, efectos moderados a la salud. De 7	Puede ocurrir al menos una vez entre 3000 y 6000 horas de operación.	Los controles actuales tienen una probabilidad moderada para detectar modo de falla o causa.

6	días a un mes de indisponibilidad. Incumplimiento de condiciones ambientales para operar. Daños ambientales fuera de la central.		Los controles actuales tienen una probabilidad baja de detectar el modo o causa de falla.
7		Puede ocurrir al menos una vez entre 1500 y 3000 horas de operación	Los controles actuales tienen una probabilidad muy baja de detectar modo o causa de falla.
8	Fatalidades, lesiones graves con daños irreversibles. Incapacidad parcial o total permanente. Más de un mes de indisponibilidad. Daño mayor a cuerpos de agua. Efecto sobre la flora y fauna del alrededor,		Los controles actuales tienen una probabilidad alejada de detectar modo o causa de falla.
9	contaminación permanente al agua, suelo o aire.	El evento se ha presentado o puede presentarse en menos de 1500 horas de operación	Los controles actuales tienen una probabilidad muy alejada de detectar causa o modo de falla.
10			Ninguno de los controles disponibles detectaría el modo o causa de falla.

A continuación, se muestran los indicadores para los efectos de falla descritos en la *Tabla 5-13*.

Tabla 5-13: Muestra los indicadores de los efectos de falla de la falla funcional 1.a del sistema cilindro-pistón.

Efectos de la falla	Ocurrencia	Severidad	Detección
B No habrá transmisión de movimiento desde el pistón hacia la biela. La biela quedará sin conexión hacia el pistón por lo que puede llegar a girar libremente alrededor del cigüeñal produciendo ruido. Esto producirá daños severo en el bloque del motor.	1	10	1
A Si el motor está en funcionamiento se producirá un aumento en los esfuerzos radiales del cigüeñal por no moverse el pistón en esa zona.	2	10	1
C Habrá una disminución de potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal. Una señal de la falla será el aumento de ruido en el motor.	2	10	1
D Al no producirse la combustión habrá una disminución de la potencia en el motor y sobre	6	6	4

esfuerzos en el cigüeñal, por el no movimiento de un pistón.	
--	--

Luego de asignar un índice a la severidad, ocurrencia y detección de los efectos de la falla, se calculó el índice prioritario de riesgo (NPR), siendo los valores más altos los con mayor riesgo y priorización.

Tabla 5-14: Muestra los valores NPR para los efectos de falla de la Tabla 5-13.

Efectos de la falla	Ocurrencia	Severidad	Detección	NPR
B No habrá transmisión de movimiento desde el pistón hacia la biela. La biela quedará sin conexión hacia el pistón por lo que puede llegar a girar libremente alrededor del cigüeñal produciendo ruido. Esto producirá daños severo en el bloque del motor.	1	10	1	10
A Si el motor está en funcionamiento se producirá un aumento en los esfuerzos radiales del cigüeñal por no moverse el pistón en esa zona.	2	10	1	20
C Habrá una disminución de potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal. Una señal de la falla será el aumento de ruido en el motor.	2	10	1	20
D Al no producirse la combustión habrá una disminución de la potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal, por el no movimiento de un pistón.	6	6	4	144

Las hojas de información realizadas para cada sistema estudiado se encuentran en el apartado 9.1 de los Anexos.

5.3. Resultados FMECA

A partir del análisis FMECA, se obtuvieron 183 modos de fallas, de los cuáles 100 corresponden al sistema de lubricación, 31 al sistema de agua de enfriamiento HT, 33 al sistema de agua de enfriamiento LT y 19 al sistema cilindro-pistón.

Para representar los resultados se optó por matrices de criticidad, por lo cual se escalan los índices de severidad y ocurrencia a una escala de 1 a 5.

A continuación, se presenta la matriz de criticidad del conjunto cilindro-pistón, en la Figura 5-2.

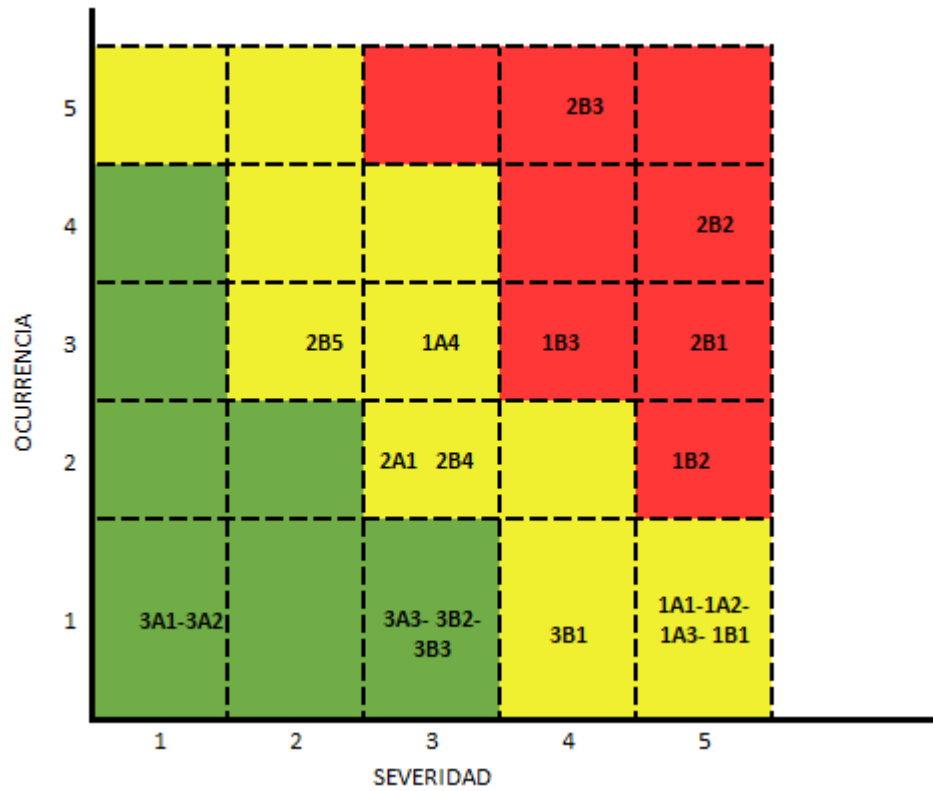


Figura 5-2: Matriz de criticidad del conjunto cilindro-pistón. Fuente: Elaboración propia.

Los modos de fallas del conjunto cilindro-pistón tienen una ocurrencia y severidad distribuida, pero se aprecia que más de la mitad de éstos tiene una alta severidad, encontrándose en los rangos 4 y 5.

La matriz de criticidad del sistema de agua de enfriamiento LT es mostrada en la *Figura 5-3*.

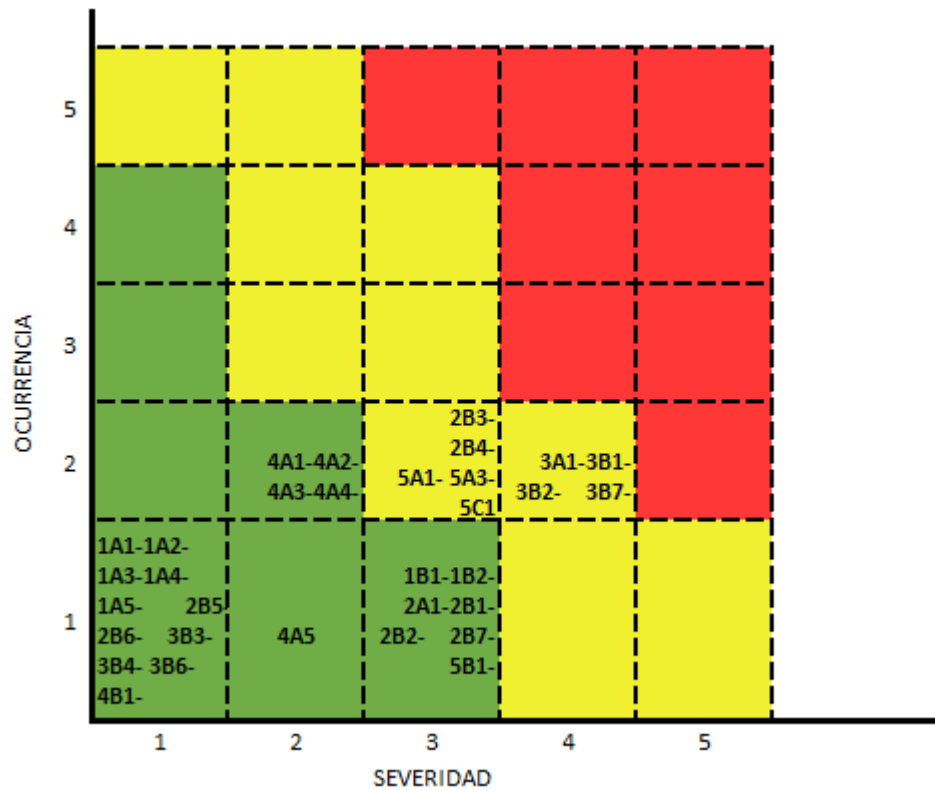


Figura 5-3: Matriz de criticidad del sistema de agua de enfriamiento LT. Fuente: Elaboración propia.

Los modos de fallas del sistema de agua de enfriamiento LT están categorizados con baja ocurrencia y severidades variadas.

La matriz de criticidad del sistema de agua de enfriamiento HT es representada en la *Figura 5-4*.

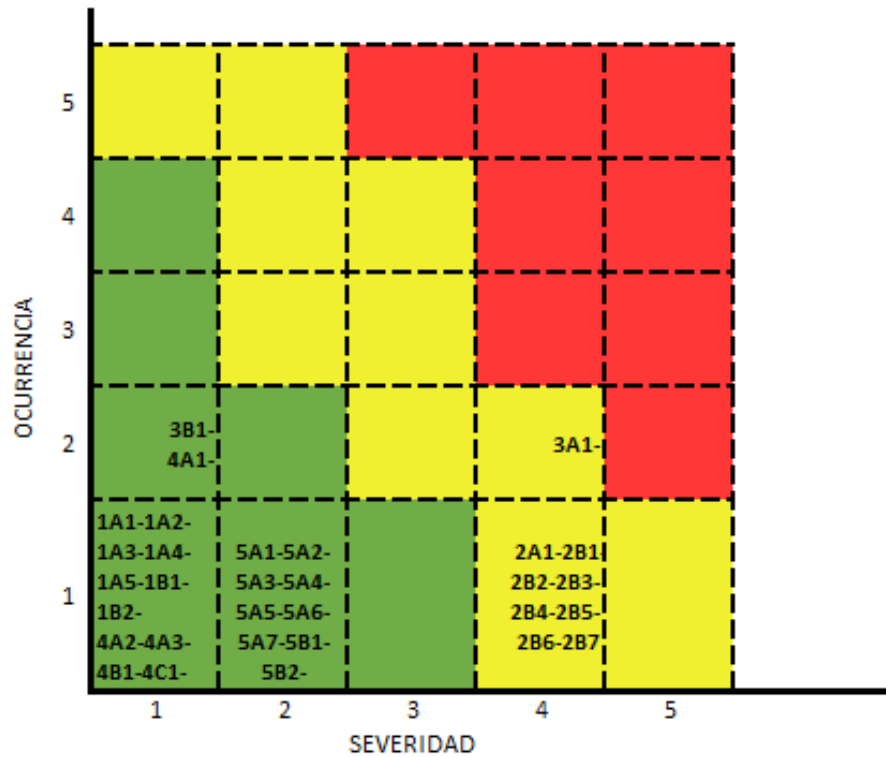


Figura 5-4: Matriz de criticidad del sistema de agua de enfriamiento HT. Fuente: Elaboración propia.

Los modos de fallas de del sistema de agua de enfriamiento HT tienen una baja ocurrencia y 9 de ellos tienen una alta severidad.

Las matrices de criticidad del sistema de aceite lubricante son presentadas en la *Figura 5-5*, *Figura 5-6* y *Figura 5-7*.

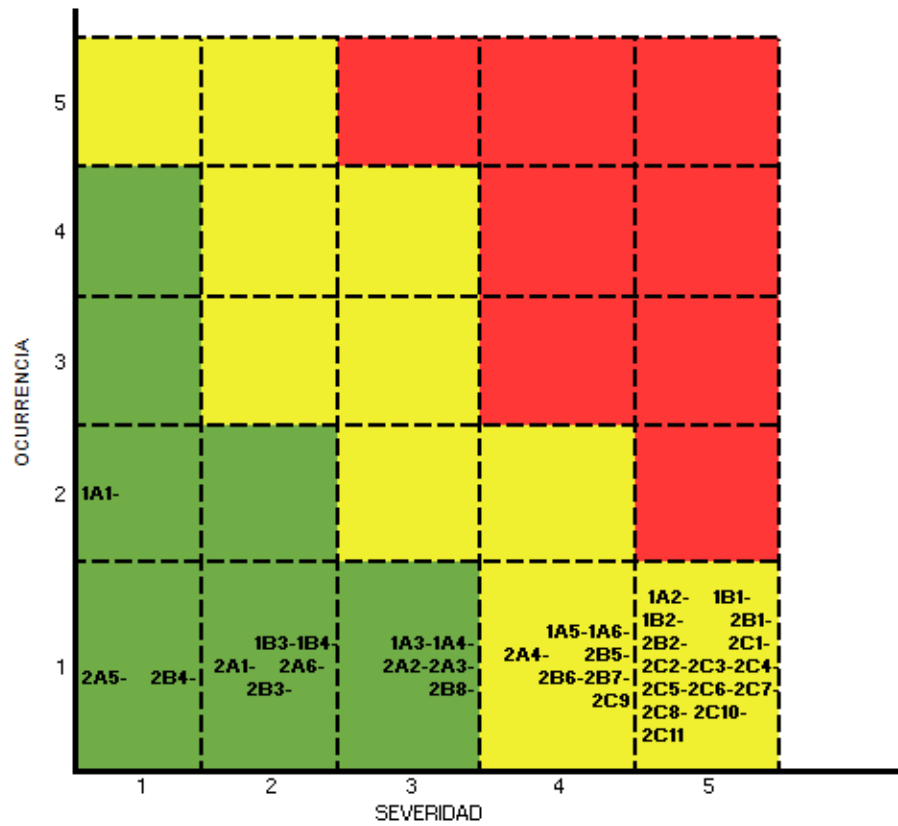


Figura 5-5: Matriz de criticidad del sistema de lubricación. Fuente: Elaboración propia.

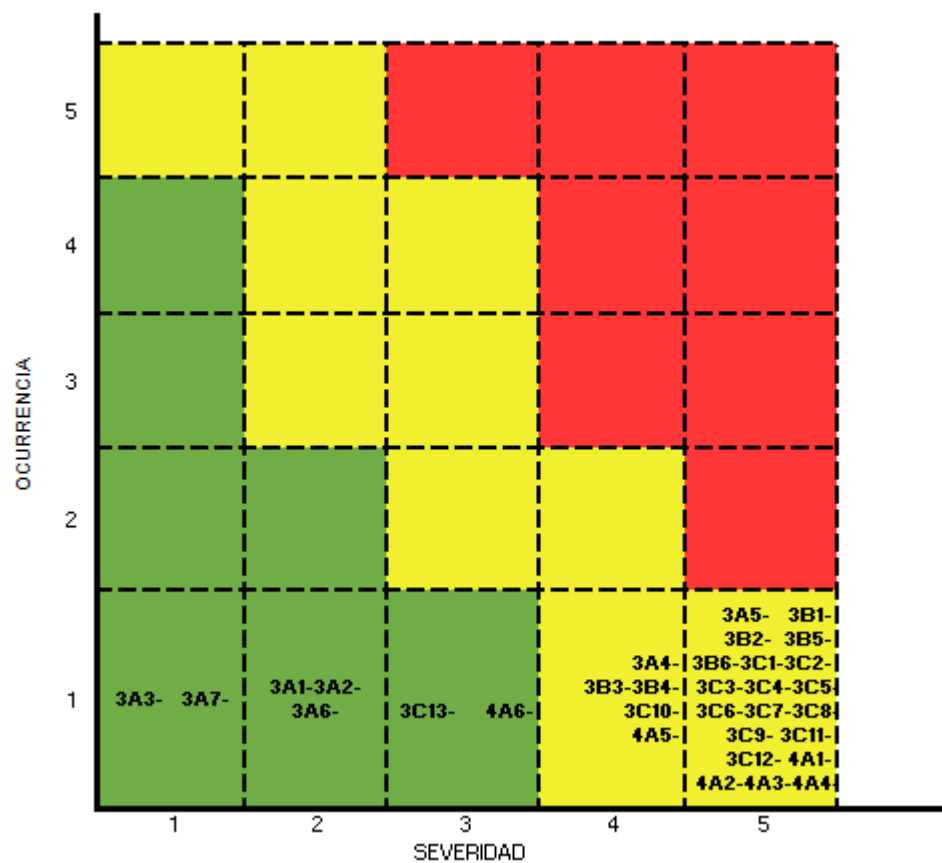


Figura 5-6: Matriz de criticidad del sistema de lubricación. Fuente: Elaboración propia.

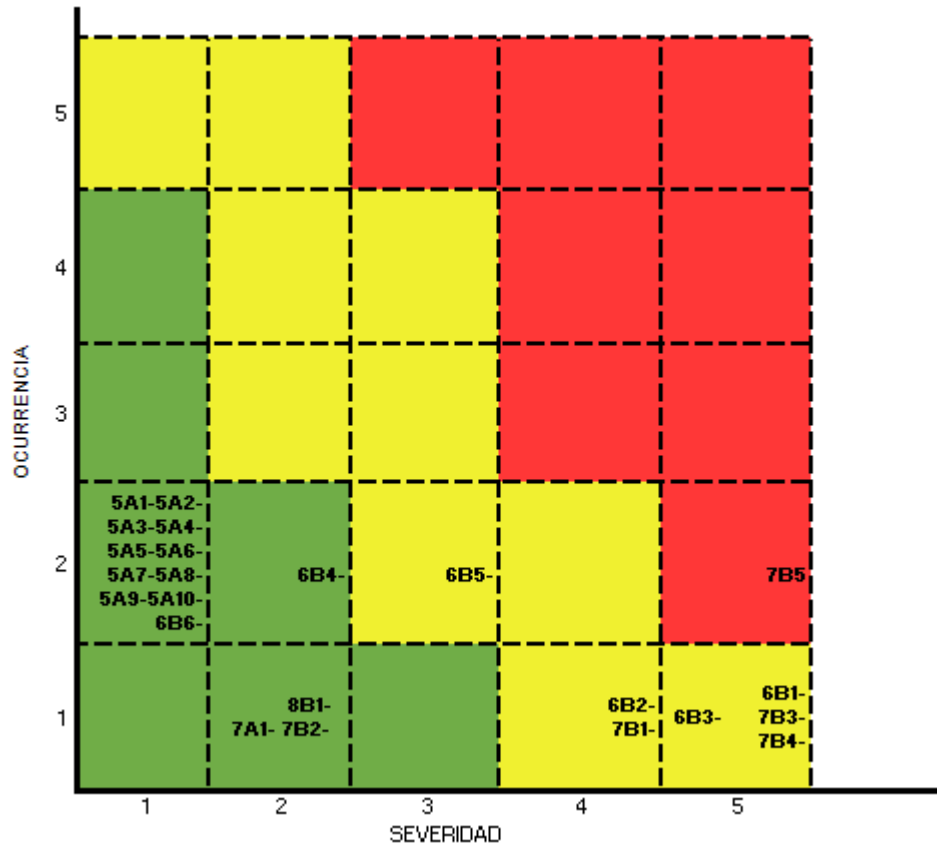


Figura 5-7: Matriz de riesgo del sistema de lubricación. Fuente: Elaboración propia.

Los modos de falla del sistema de lubricación tienen una baja ocurrencia, pero más de la mitad de éstos tiene una severidad entre 4 y 5.

5.4. Aplicación árbol de fallas

Anteriormente, en el apartado 3.4., se estudió el análisis de árbol de fallas. Para comenzar a realizarlos, se escogieron como eventos no deseados los modos de falla con alta severidad del análisis FMECA.

Cabe destacar que, este análisis se realiza de manera cualitativa y con el fin de identificar fallas no contempladas o fallas en sistemas que no fueron analizados en el FMECA.

El primer evento no deseado a analizar es el gripado entre el pistón y la camisa. Este evento puede suceder por fallas en la refrigeración o lubricación, por desequilibrio de la biela o ruptura en la capa lubricante.

Las fallas de presión y caudal inadecuado en el sistema de refrigeración y lubricación no fueron analizadas, ya que se encuentran en el FMECA.

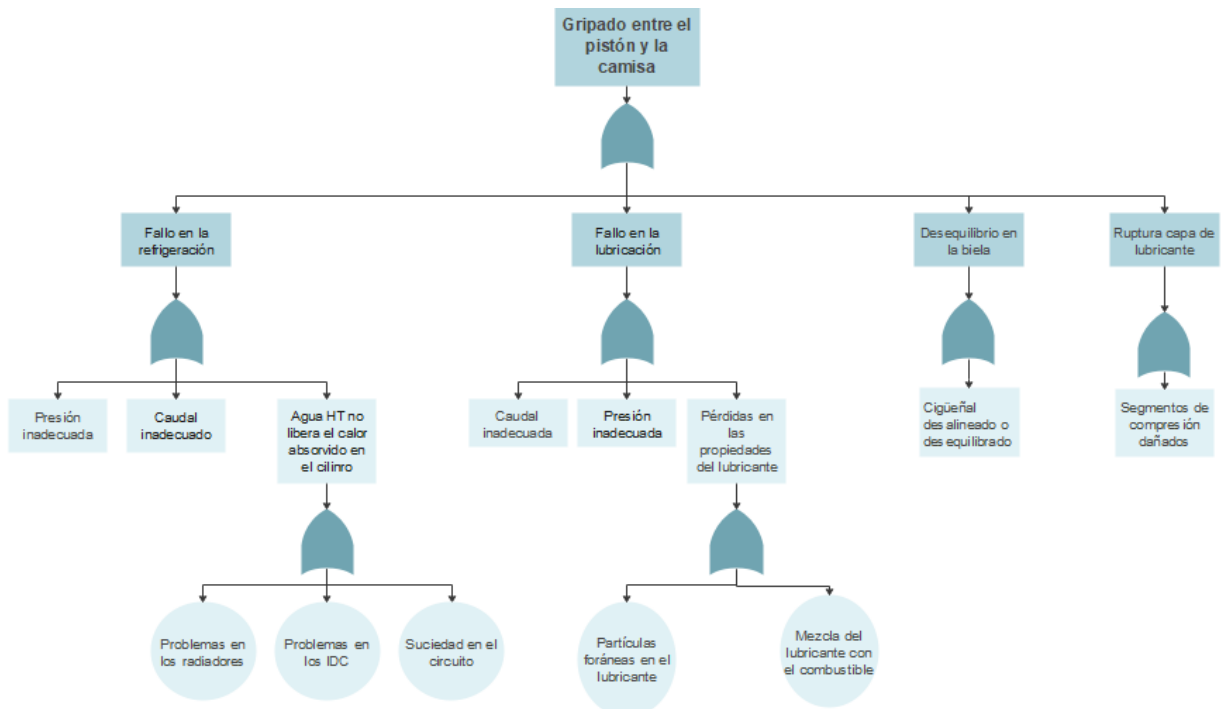


Figura 5-8: Árbol de fallas del evento no deseado, gripado entre el pistón y la camisa. Fuente: Elaboración propia.

Los anillos de compresión dañados es otro evento no deseado, éste se puede producir por sobrecalentamiento del cilindro-pistón, problemas en la combustión, mal mantenimiento y problemas estructurales.

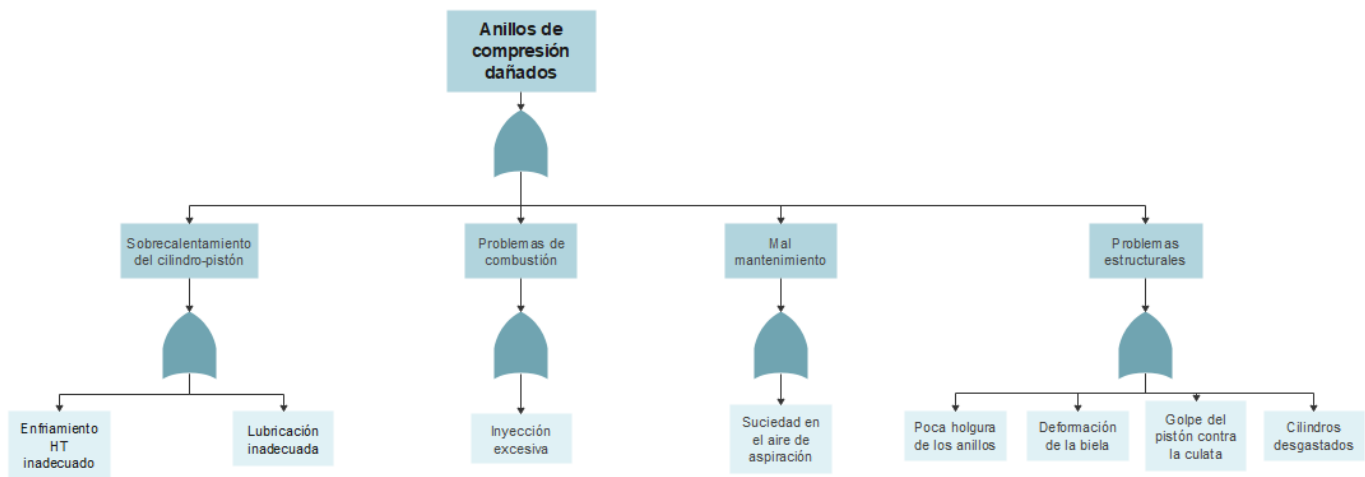


Figura 5-9: Árbol de fallas del evento, anillos de compresión dañados. Fuente: Elaboración propia.

La disminución de la holgura entre el cilindro y el pistón es una falla a analizar. Esta puede ser producida por dimensiones erróneas, deformaciones del cilindro y sobrecargas térmicas inadmisibles.

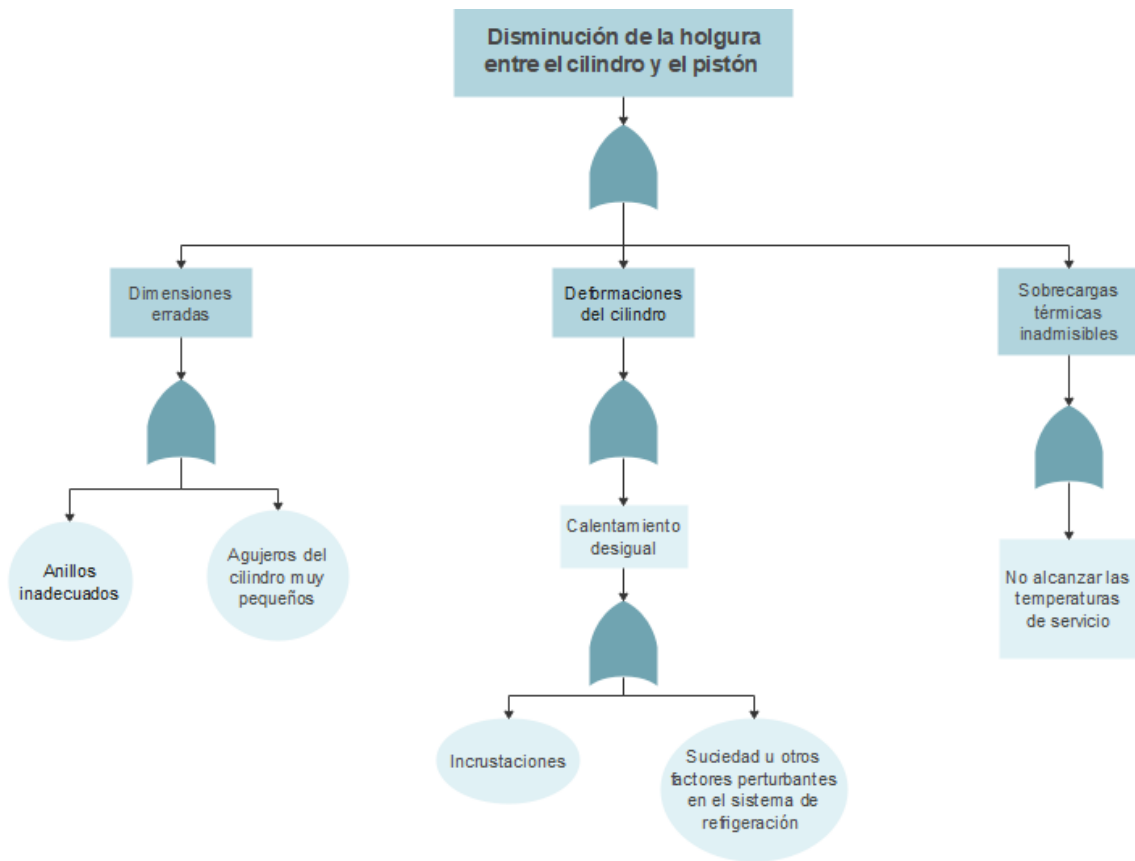


Figura 5-10: Árbol de fallas del evento no deseado, disminución de la holgura entre el cilindro y el pistón.

Otro evento no deseado, es la mala sincronización de ruedas dentadas. Esto se puede producir por el desgaste de ellas, fatiga superficial, flujo plástico y rotura de los dientes.

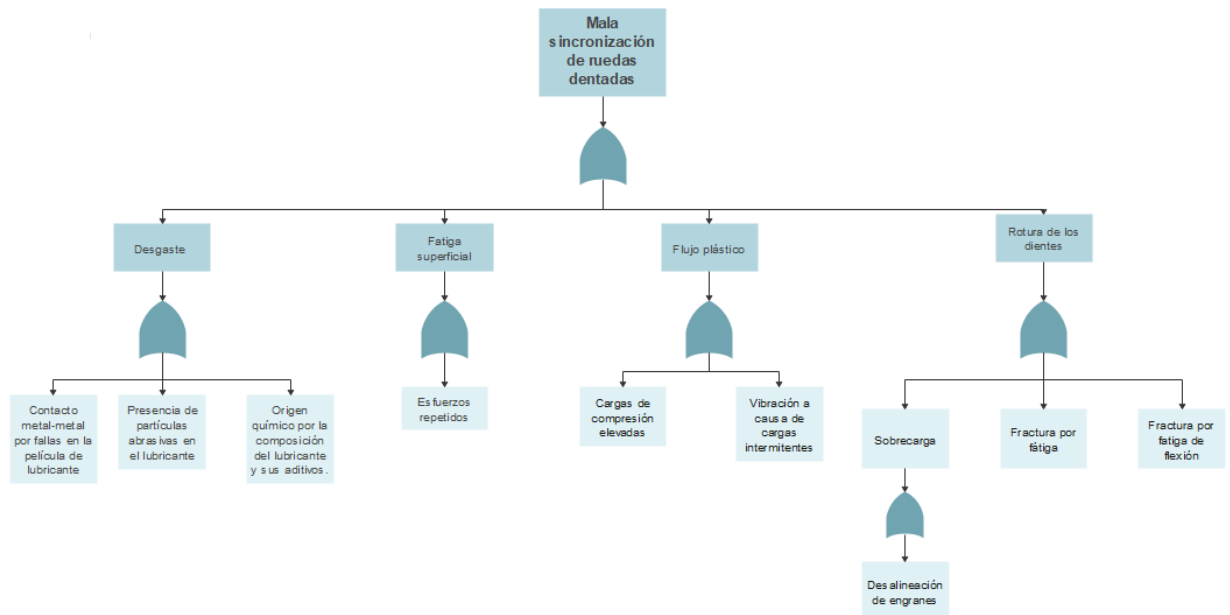


Figura 5-11: Árbol de falla del evento no deseado, mala sincronización de ruedas dentadas.

La fractura del cigüeñal también es un evento no deseado, la que se puede producir a causa de la fatiga por flexión y la fatiga por torsión.

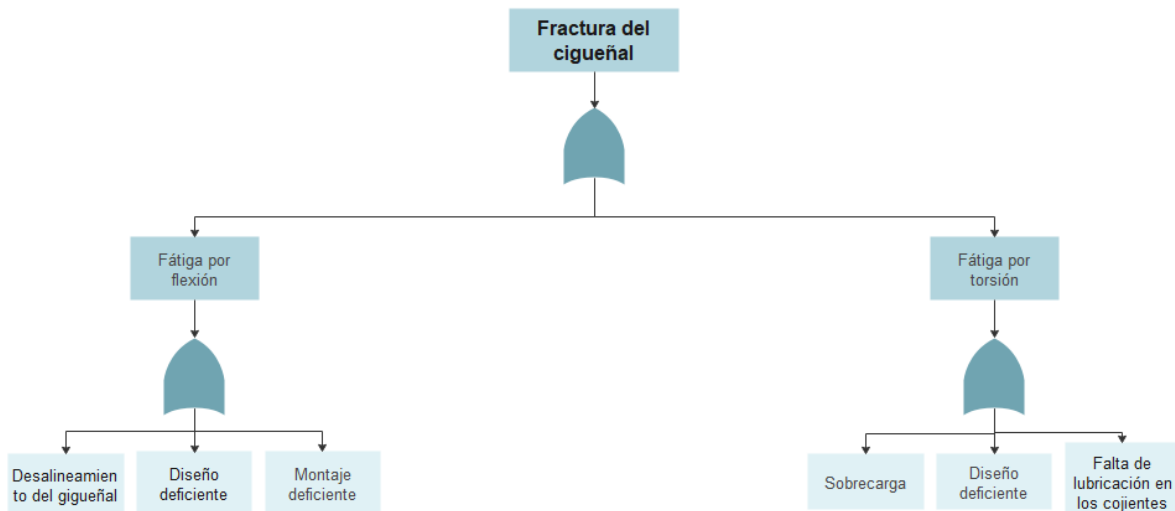


Figura 5-12: Árbol de fallas sobre la fractura del cigüeñal. Fuente: Elaboración propia.

La falta de lubricante camisa-pistón puede ser causado por combustible no quemado que, diluye la película de lubricante, presión de lubricante insuficiente, caudal de lubricante insuficiente o problemas con la distribución interna de lubricante.

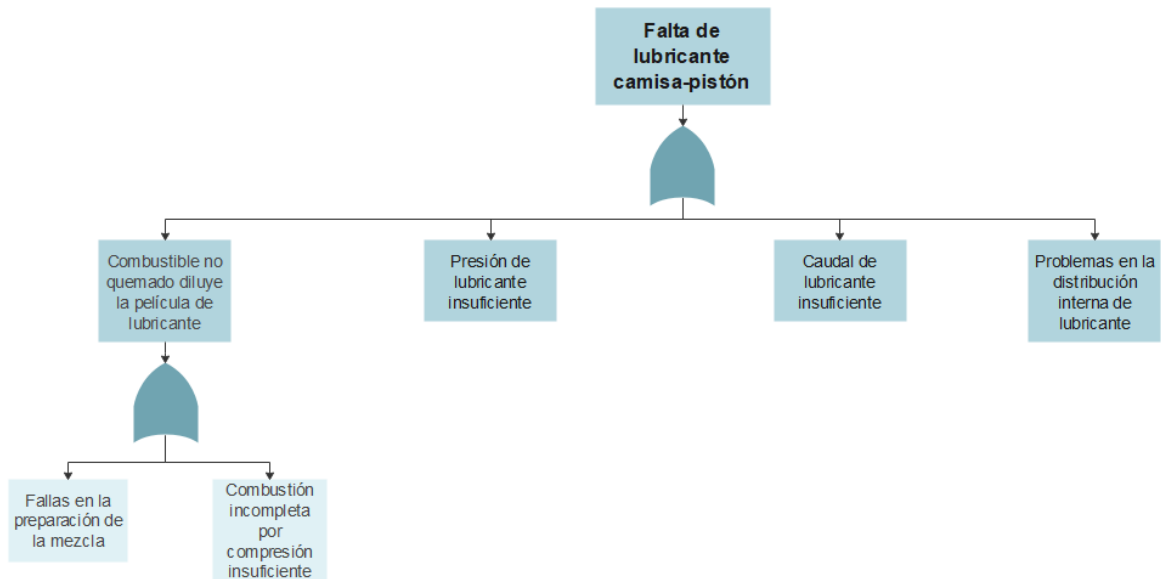


Figura 5-13: Árbol de fallas que analiza sobre la falta de lubricante camisa-pistón. Fuente: Elaboración propia.

La falta de suministro de aire comprimido es otro evento a analizar, esto puede ser causado por falla en los compresores o falla en la distribución de aire comprimido.

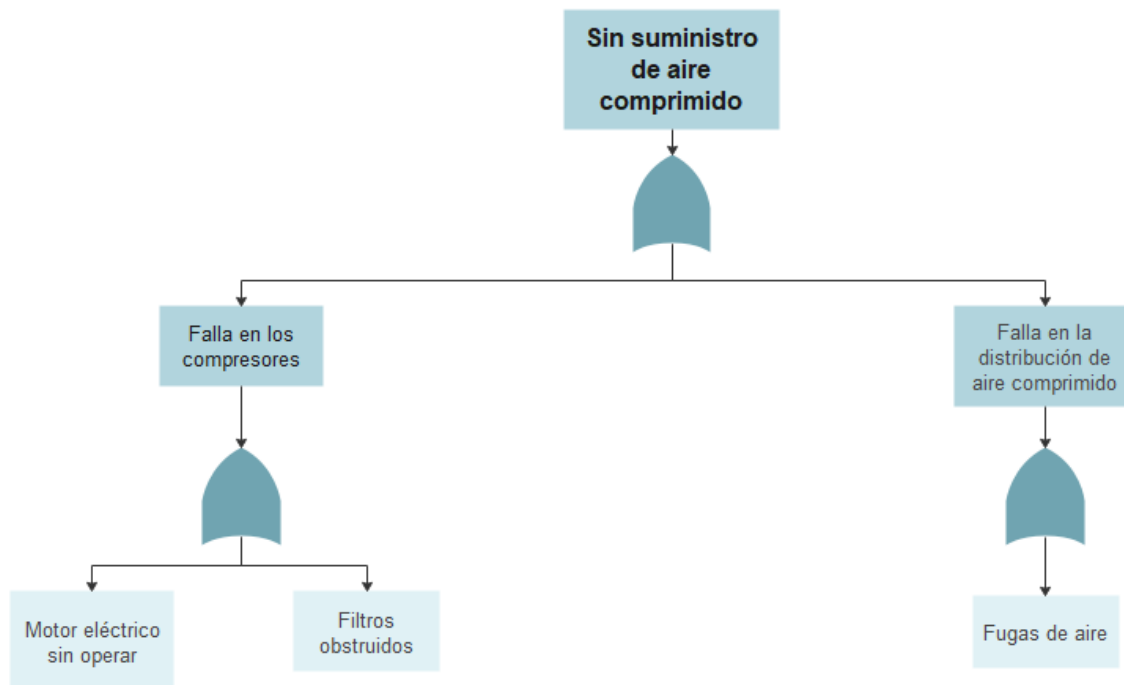


Figura 5-14: Árbol de fallas que analiza la falta de suministro de aire comprimido. Fuente: Elaboración propia.

La elevada carga mecánica del sistema de inyección y cámara de combustión es otro evento no deseado a analizar, sus causas son altas viscosidades del combustible o su mala atomización.

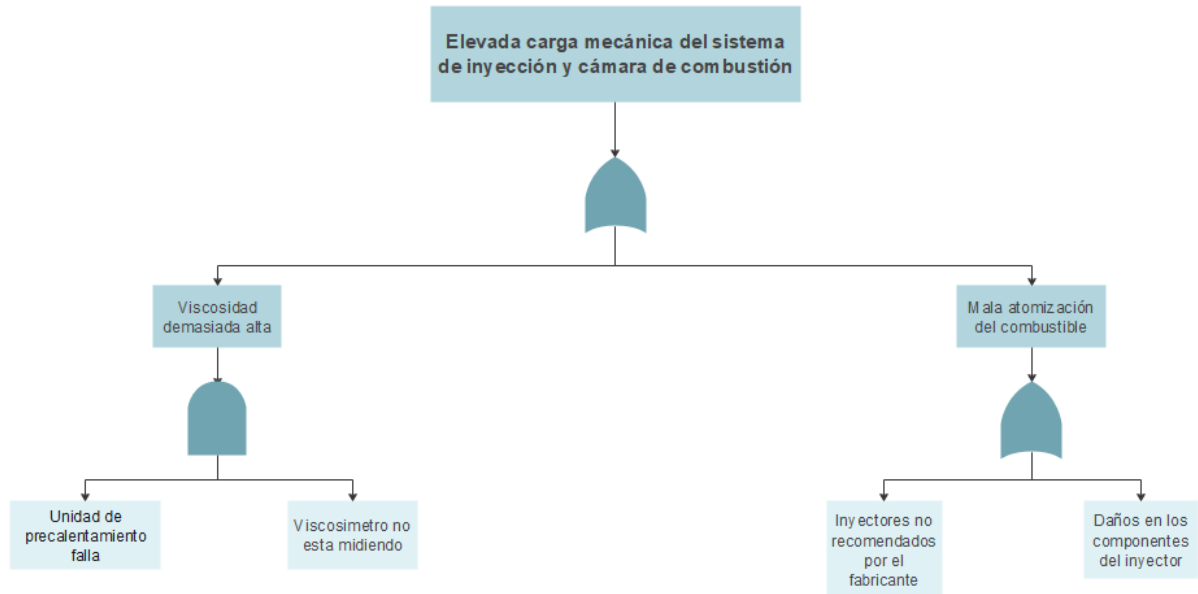


Figura 5-15: Árbol de fallas sobre elevada carga mecánica del sistema de inyección y cámara de combustión. Fuente: Elaboración propia.

El sistema cilindro pistón, sistema de lubricación y sistema de enfriamiento son los sistemas con mayor cantidad de fallas y con mayor tiempo de reparación, por sobre las 31 veces y las 109 horas respectivamente. Por tanto, en este estudio son considerados sistemas críticos.

Al realizar el FMECA en estos sistemas se observa que, más de 10 modos de fallas del sistema cilindro pistón tienen alta severidad, que casi el 30% de los modos de fallas del sistema de enfriamiento HT tienen alta severidad y la mayoría tiene baja ocurrencia, que el sistema de enfriamiento LT tiene bajas ocurrencias y severidad y que, por último, el sistema de lubricación tiene más del 50% de los modos de fallas considerados severos, pero con bajas ocurrencias.

Para realizar el FTA se consideran como eventos no deseados algunos de los modos de fallas con mayor índice de severidad como, gripado entre el cilindro y pistón, falta de lubricante entre la camisa y el pistón, fractura del cigüeñal, anillos de compresión dañados, entre otros más. Las causas que se repiten son partículas foráneas en el lubricante, mezcla del lubricante con combustible y cigüeñal desalineado.

6. Resultados obtenidos

6.1. Fallas catastróficas del motor

Las fallas catastróficas fueron definidas como aquellas que pueden provocar la pérdida del equipo, incapacidad permanente total o parcial, indisponibilidad de más de un mes, fatalidades, lesiones graves con daños irreversibles, efectos negativos sobre la flora y fauna del alrededor y contaminación permanente del suelo, aire o agua.

Las fallas identificadas como catastróficas en la matriz de criticidad, fueron aquellas con alta severidad, índices 4 y 5, independiente de su ocurrencia. Además, de las fallas con media severidad, índice 3, y con altas ocurrencia, índice 5.

Los modos de fallas que tienen efectos catastróficos en el conjunto cilindro-pistón son los siguientes:

- Falta de lubricante en la camisa del pistón.
- Anillos de compresión dañados.
- Roturas en el cilindro.
- Mala sincronización o problemas en los piñones.
- Fundición entre el pistón y la camisa.
- Holgura menor a 0,003 [mm] entre el pistón y la camisa.

Los modos de fallas, considerados como catastróficos, en el sistema de agua de enfriamiento LT fueron aquellos que influyen en la temperatura del lubricante como, la válvula de 3 vías no está dirigiendo el flujo antes al enfriador de carga, no fluye o disminuye el flujo de agua de enfriamiento en el IDC de lubricante y caída de presión en la bomba de agua de enfriamiento LT.

Los modos de fallas catastróficos del sistema de enfriamiento HT son que no se dirija el flujo de agua de enfriamiento HT hacia los radiadores cuando la temperatura es mayor a 90 [°C], aquellos que afectan a la bomba de enfriamiento HT y al flujo de refrigerante hacia la culata y pistones como, caídas de presión en la descarga de la bomba, fugas en las líneas de distribución o impulsor de la bomba detenido.

Los modos de falla, considerados como catastróficos en el sistema de lubricación, pueden ser divididos en fallas en el tanque de almacenamiento (cárter), fallas en el suministro de lubricante en el arranque o mientras el motor está detenido, fallas en el suministro de lubricante mientras el motor está en funcionamiento, fallas en el enfriador de aceite lubricante y fallas en las unidades de filtros automáticos, filtros dúplex y separadora.

En el tanque de almacenamiento las fallas catastróficas son fugas y errores en la indicación de nivel. Las fallas en el suministro del lubricante durante el arranque, o mientras el motor está detenido, son averías en la bomba de pre-lubricación, problemas de temperatura en el lubricante, combustible en el lubricante y fugas en la línea de lubricación.

Las fallas en el suministro del lubricante mientras el motor está en funcionamiento son fugas u obstrucción en las líneas de lubricante, problemas en la transmisión del motor a la bomba

de lubricante, combustible en el lubricante y averías en la bomba de lubricación. Las fallas en el enfriador de aceite lubricante son temperatura, flujo o presión errónea en el agua de enfriamiento LT. Además, de obstrucción de las líneas.

Por último, los modos de fallas en las unidades de filtros automáticos, filtros dúplex y separadora son filtros tapados o sucios, falta de aire presurizado, no reemplazar el filtro, no detectar el diferencial de presión en los filtros y mallas filtrantes dañadas.

Respecto a las fallas catastróficas analizadas en el árbol de fallas, alguna de las causas son cigüeñal desalineado o desequilibrado y sobrecargas. Por parte del sistema de lubricación tenemos la pérdida de las propiedades del lubricante, partículas foráneas en el lubricante o mezcla de éste con el combustible. Por último, en el sistema de combustible se observan causas como inyección excesiva, mala atomización del combustible y alta viscosidad del combustible.

6.2. Selección de equipos para prevenir fallas catastróficas

Los modos de fallas identificados en el sistema de agua de enfriamiento como cuando la válvula de tres vías no está dirigiendo el flujo hacia los enfriadores de aire de carga, y hay caída de presión en la bomba de enfriamiento pueden ser detectada a través de alarmas en la sala de mandos e indicadores de presión.

Los modos de fallas catastróficos en el sistema de agua de enfriamiento HT son alarmados y, además se tiene indicación de temperatura y presión local.

Los modos de falla en el sistema de aceite lubricante como, fugas en el cárter, averías en la bomba de pre lubricación y lubricación, filtros tapados o sucios y fallas en la temperatura del enfriador pueden ser detectados por alarmas, indicadores de presión e indicadores de temperatura.

Para los modos de fallas causados por la presencia de partículas foráneas y/o combustible en el lubricante se recomienda un sensor de monitoreo de condición de aceite, el TANDELTA OQSx-G2. Este sensor utiliza la tecnología FSH, asegurando que cualquier desgaste o contaminación sea detectado, medido e informado instantáneamente. Sus principales características son que detecta presencia de agua, ácido, combustible, entre otras partículas. Permite tener una detección al cambio de calidad de 10 [ppm], analiza continuamente el estado del aceite del equipo en funcionamiento y lo informa cada dos segundos. [9] El sistema del TANDELTA OQXs-G2 es compatible con el sistema SCADA utilizado en Enor Chile.

Para los modos de falla que involucran desalineación y sobrecargas se recomienda ACCOMOS, que es un sistema de monitoreo de condición. ACCOMOS brinda una indicación temprana de vibración mecánica anormal en los tres ejes y puede proporcionar una indicación temprana de daños incipientes y errores de alineación. Este sistema puede venir de fábrica con configuraciones ajustadas a la ISO 10816-6, o puede aprender por sí mismo el perfil normal de vibración de los motores usando la función TEACH-IN y ajustar los umbrales límites para una señal de advertencia. [10] [11].

El costo por unidad del TAN DELTA OQSx-G2 es de USD 1.318, y el costo por unidad del sistema ACCOMOS es de USD 1.410. En cambio, el costo de reparación de una falla

catastrófica es de aproximadamente USD 2,5 MM y lo que se deja de ganar por estar indisponible es 37.640 [USD/mes].

Gran parte de las fallas catastróficas identificadas en el FMECA pueden ser detectadas por medio de las alarmas de las salas de mandos e indicaciones locales. Cabe destacar que la mayoría de los modos de fallas reconocidos en este análisis tienen índices bajos de detección, por tanto, se pueden localizar con los instrumentos ya instalados. Respecto a las fallas analizadas en el FTA, las causas que destacan son partículas foráneas en el lubricante, mezcla de lubricante con combustible, cigüeñal desalineado, atomización deficiente del combustible, inyección excesiva y alta viscosidad del combustible.

Respecto a los equipos, el dispositivo TANDELTA OQSx-G2 fue seleccionado para monitorear el aceite lubricante de manera continua e intentar anticiparse a las fallas catastróficas de gripado del pistón, que tienen como causa partículas foráneas y presencia de combustible en el lubricante. El dispositivo ACCOMOS, fue seleccionado para identificar fallas de gripado del cilindro y fracturas en el cigüeñal, ya que indica vibraciones anormales y errores de alineación. El valor de estos dispositivos es aproximadamente el 0,1% de lo que puede costar la reparación de una falla catastrófica.

7. Conclusiones

En cuanto al trabajo realizado, primero se estudió sobre los motores diésel de la central térmica Ujina, junto a sus sistemas auxiliares y condiciones operacionales. Los sistemas auxiliares de estos motores son los genéricos de cualquier otro motor diésel y su operación se encuentra en observación continua por parte de la sala de mandos de la central y por el centro de monitoreo de la empresa.

El negocio de la Central Térmica Ujina no es inyectar continuamente energía al sistema eléctrico, sino que estar disponible en periodos de alta demanda, con tal de maximizar sus ingresos por el concepto de potencia de suficiencia. Es por esto, la importancia de minimizar las fallas en estas unidades.

De acuerdo al análisis de datos de fallas realizado, utilizando como herramienta el diagrama de “Jack Knife”, se contempla que los sistemas que tienen mayor frecuencia de falla y que demoran más tiempo en ser reparados son el sistema de lubricación, el sistema de enfriamiento y los cilindros. Por tanto, estos sistemas son considerados críticos y se prioriza el próximo análisis a ellos.

Al desarrollar el “Análisis de modos de fallas, efectos y criticidad” a los sistemas críticos, se aprecia que las fallas con mayor severidad corresponden a los sistemas cilindro-pistón y sistema de lubricación. Se destacan modos de falla como, falta de lubricante en la camisa del pistón, anillos de compresión dañados, fundición entre el pistón y la camisa, fallas en el suministro de lubricante y fallas en la condición del lubricante. También se aprecia que la mayoría de los modos de fallas fueron categorizados con un índice bajo de detección, por tanto, la condición que producirá la falla puede ser identificada anticipadamente a través de los parámetros monitoreados. Cabe destacar que esta metodología se centró en tres sistemas considerados críticos, por lo que hasta este paso sólo se han identificados fallas catastróficas provenientes del sistema cilindro-pistón, sistema de lubricación y sistema de enfriamiento.

Para poder identificar posibles fallas catastróficas provenientes de sistemas considerados no críticos, se utilizó como herramienta el análisis “Árbol de fallas”. Con esta herramienta se detectan fallas catastróficas en dos sistemas adicionales, el sistema de combustible y el cigüeñal, y corresponden a cigüeñal desalineado, inyección excesiva, mala atomización y alta viscosidad. Es importante señalar que el análisis de árbol de fallas reafirma como causa de fallas catastróficas la pérdida de las propiedades del lubricante y la presencia de partículas foráneas en él. Al igual que el análisis anterior, es probable que hayan quedado sin identificar posibles fallas catastróficas, puesto que la selección de eventos no deseados fue extraída desde el FMECA.

Respecto a la selección de dispositivos del mercado para anteponerse a fallas catastróficas, se concluye que al seleccionar el dispositivo TANDELTA OQXs-G2 será posible detectar partículas foráneas en el lubricante, como agua y combustible, lo que podría ayudar a fallas como gripado del pistón. El dispositivo ACCOMOS detectará vibraciones anormales en los tres ejes. Esto ayudará a hallar desalineaciones del motor respecto al generador y puede ser tomada como una indicación de una condición irregular. Invertir en estos dispositivos tiene un costo de un 0,1% de lo que podría llegar a costar una falla catastrófica, sin contar lo que se deja de ganar por estar indisponible. Por tanto, se recomienda invertir en estos dispositivos.

Una parte considerable de las fallas catastróficas identificadas en los análisis anteriores, pueden ser detectadas por los instrumentos de monitoreo e indicación, instalados en la central térmica Ujina. Además, los equipos seleccionados tienen un sistema de transmisión de información que es compatible con el centro de monitoreo de procesos y la sala de mandos. Por tanto, se tendrá mayor información y de manera continua, para apoyar al monitoreo de las unidades. Es importante señalar, que es fundamental una buena lectura de los datos y seguir las recomendaciones del fabricante en caso de que se tengan potenciales fallas catastróficas.

8. Recomendaciones

La metodología utilizada en este trabajo está basada en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad y en la SAE JA1011, por lo que el análisis se centró en cómo se pueden ver afectadas las funciones y estándares de desempeño de los motores de CTU.

Un análisis que se recomienda realizar para complementar este trabajo es uno basado en Mantenimiento Centrado en Riesgo, el que consiste en identificar todos los posibles modos de fallas que afecten a los motores y estimar el riesgo según valores de probabilidad y consecuencia. En este análisis se pueden considerar modos de fallas de sistemas externos a los motores diésel que podrían llegar a causar una falla catastrófica, tal como el sistema contra incendio, y sistemas que no fueron incluidos en el FMECA por su baja frecuencia de fallas y/o bajos tiempos de reparación. Para realizar este análisis se recomienda estudiar la ISO-14224 y la API580.

Otro análisis que se recomienda realizar es uno enfocado en la confiabilidad humana, el que consiste en identificar errores, cuantificarlos y tomar medidas para reducirlos. El método que se recomienda utilizar es la técnica de evaluación y reducción de errores humanos (HEART), que consiste en identificar todos los factores que puede afectar negativamente la realización de una tarea y cuantificar sus probabilidades. También, se podría utilizar la técnica para la predicción de la tasa de errores humanos (THERP) que consiste en definir las fallas del sistema de interés, enumerar y analizar las operaciones humanas relacionadas, identificar los errores humanos que se puedan presentar, a través de un árbol de eventos, estimar las probabilidades de los errores más relevantes, estimar los efectos de los errores humanos y finalmente recomendar cambios.

Al considerar la contaminación del lubricante como falla catastrófica se recomienda poner en práctica el código de limpieza de la ISO 4406 con el fin de cuantificar los niveles de contaminación de partículas por mililitro de fluidos. Esto se podría realizar adicionalmente a la implementación del dispositivo TANDELTA OQSx-G2.

La indicación de valores de severidad, ocurrencia y detección fue por medio de la experiencia del Jefe de operación y mantenimiento en conjunto con el Encargado de turno. Por tanto, es importante cuantificar las probabilidades de estos indicadores de manera cuantitativa. Para poder lograr esto es importante comenzar a generar una base de datos sobre la información de las fallas ocurridas.

Por último, se recomienda instaurar el indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness), que mide la eficiencia de la máquina, a través, de los valores porcentuales de disponibilidad, rendimiento y calidad. Al utilizar este indicador es posible identificar las causas de los desperdicios del proceso y realizar las mejoras correspondientes.

9. Referencias

- [1] Sanz, Santiago. 2007. *Motores*.
- [2] SAE. 2002. “Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)”.
- [3] Moubray, Jhon. 2004. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.
- [4] Stapelberg, Rudolph Frederick. 2009. *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engeneering Design*.
- [5] Humberto Gutiérrez, Román de la Vara. 2008. *Control estadístico de calidad y seis sigma*.
- [6] Pistarelli, Alejandro J. 2012. *Manual de Mantenimiento*. Buenos Aires.
- [7] Caterpillar. 2018. *Original Operation Instructions 16CM43C*.
- [8] Caterpillar. 2008. *Instrucciones de servicio del motor Typ VM43*.
- [9] Tandelta. Sensor de calidad del aceite OQSx-G2. <https://www.tandeltasystems.com/products/oqsx-g2-gen-ii/>
- [10] Schaller Automation. 2018. ACCOMOS. https://schaller-automation.com/wp-content/uploads/2018/10/Leaflet_Accomos_EN-V1.01-08_2018-HD.pdf
- [11] Schaller Automation. 2018. Operating Instruction ACCOMOS. https://schaller-automation.com/wp-content/uploads/2018/10/Manual-Accomos_Ver.1.0-August-2018_En.pdf

10. Anexos

10.1. Hojas de información FMECA

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, SUS EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)											
RCM II - HOJA DE INFORMACIÓN		SISTEMA		Motor MAK 12M43 Central Térmica Ujina							
		SUBSISTEMA		Sistema de agua de enfriamiento HT							
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODOS DE FALLA		EFECTOS DE LA FALLA		OCURRENCIA	SEVERIDAD	DETECCIÓN	NPR
Proveer 1400 L en los tanques de compensación de circuitos de HT para cambios de volumen del sistema de agua de enfriamiento.	A	No mantener el nivel en el circuito HT.	1 No llega la señal de bajo nivel. Transmisor de nivel del tanque no envía alerta. 2 No hay agua de enfriamiento suficiente en el módulo de mantenimiento y/o en la unidad hydrofor. 3 La bomba del módulo de mantenimiento no esta funcionando luego de una mantención. 4 Válvula de drenaje activa. 5 No llega agua de enfriamiento desde la unidad hydrofor	No se realizara llenado del estanque, pueden quedar los motores sin agua de enfriamiento. Será afectada la eficiencia de los enfriadores de aire de carga, la temperatura de los cilindros y la culata aumentarán cuando los motores estén en funcionamiento. Disminuirá el volumen de agua de enfriamiento, afectando cuando este en funcionamiento la temperatura de aire de carga, del cilindro y la culata. El agua no llegara a los tanques de compensación, los motores no tendrán agua. Habrá un aumento de temperatura en la culata y los cilindros, además disminuirá la cantidad de aire de carga. El agua de enfriamiento se dirigirá al tanque de mantenimiento. No se realizara el llenado periódico.	2 2 2 2	1 1 1	7 3 2	14 6 6 4			
	B	El nivel del tanque es menor a 1400 [L]	1 Fugas en el tanque de compensación. 2 Transmisor de nivel no provee indicación de bajo nivel en los tanques de compensación	El transmisor de nivel indicara al operador el bajo nivel. Puede quedar sin abastecimiento desde la unidad hydrofor, al entrar en funcionamiento los motores, disminuirá la cantidad de aire de carga y aumentará la temperatura de los cilindros y culatas.	2 2	2 2	3 7	12 28			
2 Dirigir el agua de enfriamiento HT hacia las culatas y pistones, si la temperatura del agua HT es menor a 90 [°C].	A	Dirigirse a la zona de las culatas y pistones, si la temperatura del agua HT es mayor a 90 [°C].	1 La válvula de control de flujo no esta dirigiendo el flujo de agua HT como corresponde.	Al tener una temperatura mayor a 90 [°C], no se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste.	2	8	3	48			
	B	No dirigirse hacia las culatas y pistones, si la temperatura es 90 [°C]	1 La línea de distribución esta obstruida. 2 El impulsor de la bomba esta detenido. 3 El motor de la bomba esta detenido. 4 Fugas en la bomba. 5 Fugas en las líneas de distribución. 6 La línea de succión de la bomba esta obstruida. 7 Caída de presión en la descarga de la bomba.	Si la bomba esta funcionando de manera normal se podría producir un golpe de ariete, esto podría producir deterioro en las líneas y la bomba de enfriamiento HT. No se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste. No se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste. Los sellos de la bomba están desgastados. Puede ocurrir una pérdida de agua de enfriamiento. Además, no se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste. Derrame de agua de enfriamiento en la planta. Además, no se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste. Disminución del caudal de agua de enfriamiento. Además, no se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste. Al haber una caída de presión, se dificultará la circulación del agua refrigerante. No se logrará enfriar lo esperado las camisas de los cilindros y la boquilla del inyector, produciendo en el cilindro y pistón desgastes, aumento de la temperatura del lubricante y en la boquilla un mayor desgaste.	1 1 1 1 1	8 8 8 8	3 3 3 3	24 24 24 24 24			

3	Dirigir el agua de	A	No dirigir el agua de enfriamiento HT	1	La válvula de 3 vías no esta dirigiendo el agua de	Habrà un aumento de temperatura en el circuito de agua de enfriamiento HT,	2	7	2	28
		B	Dirigir el agua de enfriamiento HT	1	La válvula de 3 vías no esta dirigiendo el agua de	Gasto de energía innecesario por parte de los radiadores.	2	3	2	12
4	Disminuir la temperatura del	A	Disminuir la temperatura a una	1	No se esta enviando la señal de temperatura para	La temperatura de enfriamiento será mayor a la necesaria para que la válvula	3	2	3	18
				2	Hay un aumento de presión que no es liberada por	Habrà un aumento de temperatura por sobrepresión, produciendo un	1	1	3	3
				3	Se envía la señal hacia el motor pero no enciende.	La temperatura de enfriamiento será mayor a la necesaria para que la válvula FR101 de paso hacia el circuito de agua de enfriamiento HT. Produciendo un aumento de la estadia del agua de enfriamiento HT en los radiadores. Esto puede afectar a la eficiencia de los motores, ya que no se enfriaran el aire de carga, los motores y el agua caliente.	1	1	3	3
		B	Disminuir la temperatura a una temperatura inferior a 70 [°C].	1	No se esta enviando la señal de temperatura para que deje de funcionar los ventiladores.	La temperatura será menor a lo requerida, no se visualizan efectos negativos.	2	2	3	12
		C	No disminuye la temperatura del agua de enfriamiento HT.	1	Hay una obstrucción en los tubos del radiador.	Se puede alarmar una alta presión en los radiadores y se producirá la detención de estos, efectuando una baja en la eficiencia de los motores. Alta temperatura del aire de carga, del motor y del agua caliente.	2	2	3	12
				1	La línea de distribución esta obstruida.	Si la bomba esta funcionando de manera normal se podría producir un golpe de ariete, esto podría producir deterioro en las líneas y la bomba de enfriamiento HT.	1	4	3	12
				2	El impulsor de la bomba esta detenido.	No será posible mantener la temperatura del agua de enfriamiento.	1	4	3	12
5	Mantener la temperatura de agua de enfriamiento HT a 70 [°C] si el motor esta fuera de funcionamiento.	A	No se dirige el agua de enfriamiento HT hacia el módulo de pre-calentamiento cuando el motor no esta funcionando.	3	El motor de la bomba esta detenido.	No será posible mantener la temperatura del agua de enfriamiento.	1	4	3	12
				4	Fugas en la bomba.	Los sellos de la bomba están desgastados. Puede ocurrir una pérdida de agua de enfriamiento.	2	4	3	24
				5	Fugas en la líneas de distribución.	Derrame de agua de enfriamiento en la planta.	1	4	3	12
				6	La línea de succión de la bomba esta obstruida.	Disminución del caudal de agua de enfriamiento.	1	4	3	12
				7	Caída de presión en la descarga de la bomba.	No será posible mantener la temperatura del agua de enfriamiento.	1	4	3	12
		B	El módulo de pre-calentamiento no es capaz de mantener la temperatura a 70 [°C].	1	No se enciende la resistencia térmica cuando la bomba pre-calentadora esta en funcionamiento.	El agua de enfriamiento disminuirá su temperatura.	1	4	3	12
				2	La resistencia y la bomba se apagan antes de que la temperatura de agua de enfriamiento HT alcance los 70 [°C].	El agua de enfriamiento disminuirá su temperatura.	1	4	3	12

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, SUS EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)

RCM II - HOJA DE INFORMACIÓN		SISTEMA		Motor MAK 12M43 Central Térmica Ujina								
		SUBSISTEMA		Sistema de agua de enfriamiento LT								
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODOS DE FALLA			EFECTOS DE LA FALLA		OCURRENCIA	SEVERIDAD	DETECCIÓN	NPR
1	Contener 1400 L en los tanques de compensación de circuitos de LT para cambios de volumen del sistema de 1 agua de enfriamiento.	A	No mantener el nivel en los circuitos LT.				No se realizará el llenado del estanque, pueden quedar los motores sin agua de enfriamiento. Esto afectará a las temperaturas de aire de carga, enfriamiento del aceite lubricante y enfriamiento de aceite térmico.	2	1	7	14	
				1	No llega la señal de bajo nivel.							
				2	No hay agua de enfriamiento suficiente en el módulo de mantenimiento y/o en la unidad hydrofor.			No se realizara llenado del estanque, pueden quedar los motores sin agua de enfriamiento. Esto afectará a las temperaturas de aire de carga, enfriamiento del aceite lubricante y enfriamiento de aceite térmico.	2	1	3	6
				3	La bomba del módulo de mantenimiento no esta funcionando luego de una mantención.			No se realizara llenado del estanque, pueden quedar los motores sin agua de enfriamiento. Esto afectara a la temperatura de aire de carga, enfriamiento del aceite lubricante y enfriamiento de aceite térmico.	2	1	3	6
				4	Válvula de drenaje activa.			El agua de enfriamiento se dirigirá al tanque de mantenimiento, por lo que disminuirá el volumen de agua en el circuito de temperatura HT. Aumentarán las temperaturas del aire de carga y no se podrá enfriar al aceite lubricante y térmico.	2	1	2	4
				5	No llega agua de enfriamiento desde la unidad hydrofor.			No se realizara el llenado periódico, por lo que el sistema se verá afectado por cambios de volumen de agua.	2	1	3	6
	B	El nivel del tanque es menor a 1400 [L].	1	Fugas en el tanque de compensación.			El transmisor de nivel indicará al operador el bajo nivel. Se debe solucionar la fuga para volver a suministrar agua de enfriamiento a tanque de compensación.	2	5	3	30	
			2	Transmisor de nivel no provee indicación de bajo nivel en los tanques de compensación.			Puede quedar sin abastecimiento desde la unidad hydrofor, al entrar en funcionamiento los motores disminuirá la eficiencia de los enfriadores de aire de carga, de los enfriadores de aceite lubricante y aceite térmico.	2	5	7	70	
	2	Dirigirse a la zona de enfriadores de aire de carga si la temperatura de agua de enfriamiento LT es menor a 2 45 [°C].	A	Dirigirse a la zona de enfriadores de aire de carga si la temperatura de agua de enfriamiento LT es mayor a 45 [°C].				Al no dirigirse el agua de enfriamiento a la temperatura necesaria hacia los enfriadores de aire de carga habra una disminución de la eficiencia en el turbocompresor y por ende una caída en la presión al final de la carrera de compresión. Esto puede traer dificultades en la autoignición del combustible. Además, habrá una caída en la relación aire combustible y se formará mas carbonilla.	2	5	2	20
					1	La válvula de 3 vías no esta dirigiendo el flujo al circuito que corresponde.			Si la bomba esta funcionando de manera normal se podria producir un golpe de ariete, esto podría producir deterioro en las líneas y la bomba de enfriamiento LT.	1	5	2
B			No dirigirse a la zona de enfriadores de aire de carga cuando la temperatura es menor a 45 [°C].				No será posible enfriar el aire de carga de los motores, por lo que habrá una mezcla rica en combustible, lo que producira mayor carbonilla. También podrá disminuir la presión en la cámara de combustión, dificultando la autoignición en un comienzo, y luego produciendo un golpeteo en la cabeza del pistón.	1	5	3	15	
				2	El impulsor de la bomba esta detenido.			No será posible enfriar el aire de carga de los motores, por lo que habrá una mezcla rica en combustible, lo que producira mayor carbonilla. También podrá disminuir la presión en la cámara de combustión, dificultando la autoignición en un comienzo, y luego produciendo un golpeteo en la cabeza del pistón.	1	5	3	15
				3	El motor de la bomba esta detenido.			Los sellos de la bomba estan desgastados. Puede ocurrir una pérdida de agua de enfriamiento. No será posible enfriar el aire de carga de los motores, por lo que habrá una mezcla rica en combustible, lo que producira mayor carbonilla. También podrá disminuir la presión en la cámara de combustión, dificultando la autoignición en un comienzo, y luego produciendo un golpeteo en la cabeza del pistón.	4	5	1	20
				4	Fugas en la bomba.			Derrame de agua de enfriamiento en la planta. No será posible enfriar el aire de carga de los motores, por lo que habrá una mezcla rica en combustible, lo que producira mayor carbonilla. También podrá disminuir la presión en la cámara de combustión, dificultando la autoignición en un comienzo, y luego produciendo un golpeteo en la cabeza del pistón.	4	5	1	20
				5	Fugas en la líneas de distribución.							
				6	La línea de succión de la bomba esta obstruida.			Disminución del caudal de agua de enfriamiento. No será posible enfriar el aire de carga de los motores, por lo que habrá una mezcla rica en combustible, lo que producira mayor carbonilla. También podrá disminuir la presión en la cámara de combustión, dificultando la autoignición en un comienzo, y luego produciendo un golpeteo en la cabeza del pistón.	1	1	4	

				7 Caída de presión en la descarga de la bomba.	No será posible enfriar el aire de carga de los motores, por lo que habrá una mezcla rica en combustible, lo que producirá mayor carbonilla. También podrá disminuir la presión en la cámara de combustión, dificultando la autoignición en un comienzo, y luego produciendo un golpeteo en la cabeza del pistón.	1	1	4	4
				8 La válvula de 3 vías no esta dirigiendo el flujo al circuito que corresponde.	Al no dirigirse el agua de enfriamiento a la temperatura necesaria hacia los enfriadores de aire de carga habra una disminución de la eficiencia en el turbocompresor y por ende una caída en la presión al final de la carrera de compresión. Esto puede traer dificultades en la autoignición del combustible. Además, habrá una caída en la relación aire combustible y se formará mas carbonilla.	2	5	2	20
	Disminuir a 65 [°C] la temperatura del lubricante a la salida del enfriador de 3 aceite lubricante.	A	Mantener una temperatura del lubricante menor a 65 [°C].	1 La válvula de 3 vías no esta dirigiendo el flujo antes al enfriador de aire de carga.	El aceite lubricante trabaja desde 40 [°C]. Si la temperatura es menor a eso se dificultara la lubricación del cigüeñal, bielas, levas, engranes y pistón.	4	7	2	56
		B	Mantener una temperatura mayor de 65 [°C] en el aceite lubricante.	1 No esta fluyendo el agua de enfriamiento LT por las placas del IDC.	Al no fluir agua de enfriamiento LT será imposible disminuir la temperatura del lubricante. La viscosidad del lubricante disminuirá por lo que se verá afectadas las piezas, aumentando su desgaste. Además, habra un aumento de temperatura en los motores.	4	8	2	64
				2 El flujo de agua de enfriamiento LT es menor a 180 [m3/h].	No será posible enfriar el aceite lubricante de los motores a los niveles deseados, produciendo un aumento de temperatura en ellos. La viscosidad del lubricante disminuirá afectando el desgaste de piezas por fricción.	4	8	2	64
				3 El motor de la bomba esta detenido.	No será posible enfriar el aceite lubricante de los motores, produciendo un aumento de temperatura en ellos. La viscosidad del lubricante disminuirá afectando el desgaste de piezas por fricción.	1	1	1	1
				4 Fugas en la bomba.	Los sellos de la bomba estan desgastados. Puede ocurrir una pérdida de agua de enfriamiento.	1	1	3	3
				5 Fugas en la líneas de distribución.	Derrame de agua de enfriamiento en la planta.			3	0
				6 La línea de succión de la bomba esta obstruida.	Disminución del caudal de agua de enfriamiento. No será posible enfriar el aceite lubricante de los motores, produciendo un aumento de temperatura en ellos y la posible detención de ellos.	1	1	3	3
				7 Caída de presión en la descarga de la bomba.	No será posible enfriar el aceite lubricante de los motores, produciendo un aumento de temperatura en ellos. La viscosidad del lubricante disminuirá afectando el desgaste de piezas por fricción.	4	8	3	96
	Disminuir la temperatura del aceite térmico cuando sobrepase los 200 [°C].	A	No disminuir la temperatura del aceite térmico cuando aumenta a más de 200 [°C].	1 No esta fluyendo el agua de enfriamiento LT por los tubos del IDC.	No habrá una disminución de temperatura en el aceite térmico, por lo que los gases de escape no disminuirán su temperatura en la caldera de gases de escape.	4	4	3	48
				2 Esta fluyendo menos de 180 [m3/h] de agua de enfriamiento LT.	La disminución de energía en el aceite térmico será menor a lo necesario, por lo que los gases de escape saldrán a una mayor temperatura de la caldera de gases de escape.	4	4	4	64
				3 Esta fluyendo más de 118,5 [m3/h] de aceite térmico.	La disminución de energía en el aceite térmico será menor a lo necesario, por lo que los gases de escape saldrán a una mayor temperatura de la caldera de gases de escape.	4	4	4	64
				4 La temperatura de entrada del agua de enfriamiento es mayor a 55 [°C].	La disminución de energía en el aceite térmico será menor a lo necesario, por lo que los gases de escape saldrán a una mayor temperatura de la caldera de gases de escape.	4	4	3	48
				5 Filtraciones de agua de enfriamiento LT de los tubos del IDC de calor.	Habrà una mezcla entre el agua de enfriamiento y el aceite térmico. Esto cambiara las propiedades de ambos líquidos, por lo que se tendran que cambiar.	1	4	1	4
		B	Disminuir la temperatura del aceite térmico cuando está a menos de 200 [°C].	1 La válvula de 3 vías esta dirigiendo el aceite térmico al vertido de calor a una temperatura menor de 200 [°C].	Puede producirse una variación de temperatura del aceite térmico a la salida de la caldera de gases de escape. Esto puede provocar que la temperatura de del aceite térmico hacia el final del circuito sea menor a la requerida.	2	1	3	6

5	Mantener la temperatura del agua de enfriamiento LT entre 20 [°C] y 45 [°C] a la entrada de la válvula de control de flujo.	A	No disminuir la temperatura cuando supera los 45 [°C].		No se esta enviando la señal de temperatura para que se activen los ventiladores de los radiadores.	La temperatura de enfriamiento será mayor a la necesaria para que la válvula FR102 de paso hacia el circuito de agua de enfriamiento LT. Produciendo un aumento de la estadia del agua de enfriamiento LT en los radiadores. Esto puede afectar a la eficiencia de los motores, ya que no se enfriaran el aire de carga, el aceite lubricante y aceite térmico, si se requiere.				
				1	Solo hay convección natural.		3	5	2	30
					Hay un aumento de presión que no es liberada por la válvula de venteo.	Habrán un aumento de temperatura por sobrepresión, produciendo un aumento de la estadia del agua de enfriamiento LT en los radiadores. Esto puede afectar a la eficiencia de los motores, ya que no se enfriaran el aire de carga, el aceite lubricante y aceite térmico, si se requiere. Además si la presión aumenta demasiado se puede ver afectado el radiador.	4	4	4	64
					Se envia la señal hacia el motor de los ventiladores pero no enciende.	La temperatura de enfriamiento será mayor a la necesaria para que la válvula FR102 de paso hacia el circuito de agua de enfriamiento LT. Produciendo un aumento de la estadia del agua de enfriamiento LT en los radiadores. Esto puede afectar a la eficiencia de los motores, ya que no se enfriaran el aire de carga, el aceite lubricante y aceite térmico, si se requiere.	3	5	2	30
		B	Disminuir la temperatura a una inferior a 20 [°C].	1	No se esta enviando la señal de temperatura para que deje de funcionar los ventiladores.	La temperatura será menor a lo requerida, se enfriará el lubricante de formas más rápida, aumentará su viscosidad.	2	5	2	20
		C	No disminuir la temperatura del agua de enfriamiento LT.	1	Hay una obstrucción en los tubos del radiador.	Se puede alarman una alta presión en los radiadores y se producirá la detención de estos, efectuando una baja en la eficiencia de los motores. Baja concentración de aire, alta temperatura del aire de carga, del aceite lubricante y el aceite térmico.	4	5	4	80

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, SUS EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)

RCM II - HOJA DE INFORMACIÓN		SISTEMA	Motor MAK 12M43 Central Térmica Ujina						
		SUBSISTEMA	Conjunto cilindro-pistón						
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODOS DE FALLA			EFECTOS DE LA FALLA	OCURRENCIA	SEVERIDAD	DETECCIÓN	NPR
Moverse a 10 [m/s] para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	A	No moverse y no transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	1	Fundición entre el pistón y la camisa del motor.	Si el motor esta en funcionamiento se producira un aumento en los esfuerzos del cigüeñal por no moverse el pistón en esa zona.	2	10	1	20
			2	No se encuentra el bulón del pistón.	No habrá transmisión de movimiento desde el pistón hacia la biela. La biela quedará sin conexión hacia el pistón por lo que puede llegar a girar libremente alrededor del cigüeñal produciendose ruido. Esto producirá daños severo en el bloque del motor.	1	10	1	10
			3	La biela se ha roto.	Habrà una disminución de potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal. Una señal de la falla será el aumento de ruido en el motor.	2	10	1	20
			4	No se ha producido la combustión.	Al no producirse la combustión habrá una disminución de la potencia en el motor y sobre esfuerzos en el cigüeñal, por el no movimiento de un pistón.	6	6	4	144
	B	Moverse a menos de 10 [m/s] para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	1	Hay una holgura menor a 0,003 [mm] entre el pistón y la camisa.	Aumento de la temperatura en el cilindro. Habrá un mayor desgaste en el pistón y camisa. Además, habrá pérdida de la rugosidad en la camisa, produciendo una menor lubricación.	1	10	1	10
			2	Falta de lubricante en la camisa del pistón.	Si es leve, el pistón y camisa quedaran rayados. Si la falta de lubricación es excesiva, se perderá la rugosidad en las paredes de las camisas lo que produciría un agarrotamiento entre el pistón con la camisa, ocasionando que los metales de biela se fracturen.	4	10	2	80
			3	Anillos de compresión dañados.	Disminuirá la hermeticidad entre el cilindro y el pistón, por lo que caerá la presión al interior del cilindro. Esto producirá una caída en la potencia del motor y a su vez aumentará la presión en el cárter de la unidad, corriendo el riesgo que dicha presión salga por la válvulas de alivio instaladas. El detector de niebla de aceite podría detectarlo, pero si la presión es mucha saldrá por las válvulas antes de ser detectado.	6	8	3	144
	C	Moverse a más de 10 [m/s] para transmitir movimiento al conjunto biela-manivela.	1	Habrà una detección del motor por aumento de las rpm del motor.	Detección inmediata				
Trabajar a presiones entre 110 [bar] y 160 [bar] dentro de la cámara de combustión.	A	No soportar presiones dentro de la cámara de combustión.	1	Válvula de escape esta abierta en todo momento.	Habrà una fuga de aire constante, por lo que si se genera la combustión será rica en combustible.	4	5	2	40
	B	No trabajar a presiones entre 110 [bar] y 160 [bar] dentro de la cámara de combustión.	1	Anillos de compresión desgastados o rotos.	Pérdida de potencia del motor por la pérdida de presión en la cámara de combustión. Aumento de consumo de combustible. Fugas de humo azulado, ya que por la rotura de anillos se arrastrara aceite a la cámara de combustión.	5	10	1	50
			2	Roturas en el cilindro.	Pérdida de potencia del motor por la pérdida de presión al interior del cilindro. Humo blanco en el escape, por la presencia de agua de refrigeración en la cámara de combustión.	8	10	1	80
			3	Mala sincronización o problemas con los piñones.	La admisión o escape no serán del tiempo requerido o la carrera del pistón será diferente a la requerida por lo que se producirá golpeteo.	9	7	1	63
			4	Válvula de admisión no da paso al aire.	Si mas de un 30% de las válvulas de admisión del motor presentan este problema, no habrá movimiento del los pistones. Puesto que no se producirá la combustión adecuada dentro de la cámara de combustión.	4	5	4	80
			5	Ajuste incorrecto del juego de válvula. (Entre válvula y balancín)	Si el juego de válvulas es menor, el tiempo que permanecen abiertas será mayor. Existe la posibilidad de que las válvulas no cierren, por lo que los gases de combustión quemarán la cabeza y asiento de válvulas. El rendimiento del motor disminuirá por pérdidas de compresión y pueden propagarse explosiones por el conducto de admisión.	5	3	2	30

3	Emitir gases de escape a temperaturas entre 300 [°C] y 450 [°C] .	A	Gases de escape a temperaturas menores a 300 [°C].		Retardo en la inyección. (En el adelanto de inyección)	El combustible pulverizado no tendrán el tiempo suficiente para evaporarse, por tanto, el encendido se retrasara para cuando el pistón comienza a bajar. En ese instante, la presión y temperatura no son las adecuadas para la auto ignición, por lo que solo una parte del combustible se quemará. Disminuirá la potencia del motor.	2	2	4	16
				1		Demorará el encendido y mayor cantidad de combustible quedará sin ser quemado. Cuando se logre la presión adecuada, se prenderá todo el combustible a la vez, produciendo un aumento de la temperatura y presión en la cámara de combustión. Además, se producirá golpeteo.	2	2	2	8
				2	Baja presión del aire de carga.	Si el combustible no esta bien pulverizado, tomarán mas tiempo en evaporarse y ser quemado. Esto producirá una demora en el encendido y posteriormente, golpeteo.	2	5	2	20
				3	Mala atomización del combustible.	Si la temperatura es menor a lo adecuada, habrá un retraso en la auto ignición del combustible. Esto podría provocar golpeteo.				
				4	Baja temperatura del aire de admisión.	Disminuirá la presión del combustible y se producirá una mezcla pobre. Disminuirá la potencia, si la alza de temperaturas es excesiva se detiene el motor. Pérdida operacional. Pérdida de producción	1	1	2	2
		B	Gases de escape sobre 450 [°C].	1	Baja presión de combustible en la bomba de alimentación.	Temperaturas de escape aumentan, presión de combustible baja paulatinamente. 2 filtros tienen cada unidad. A la larga afecta a las toberas, se deforman. Pérdida de producción.	1	6	2	12
				2	Filtros saturados de combustible.	La bomba indicará presión correcta, pero el combustible no llegara al manifold por la rotura.	1	6	2	12
				3	Cañería de paso del combustible rota de la bomba al manifold del motor.					

ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, SUS EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)

RCM II - HOJA DE INFORMACIÓN		SISTEMA		Motor MAK 12M43/16CM43 Central Térmica Ujina							
		SUBSISTEMA		Sistema de lubricación							
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODOS DE FALLA		EFECTOS DE LA FALLA		SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECCIÓN	NPR
1	Almacenar 17/20 [m3] de aceite lubricante para el motor en el tanque de circulación.	A	No almacenar lubricante en el tanque de circulación.	1	Tanque de circulación saturado.	El indicador de nivel dará la indicación remota del alto nivel de lubricante en el estanque. Si se esta llevando lubricante desde el el módulo de transferencia se producirá una sobrepresión en el tanque, por lo que se deberá abrir la válvula LV104 para enviar el exceso de lubricante hacia el REST OIL CONTENT.	2	4	1	8	
				2	Nivel del tanque de circulación erróneo .	Si los indicadores de nivel indican un valor superior al que hay en el tanque, puede producirse un déficit en la lubricación de los motores. Esto afectara al árbol de levas, cigüeñal, pistones, bielas y engranes.	10	2	5	100	
				3	Válvulas de aislamiento de la entrada al tanque de circulación cerradas.	Si esta funcionando la bomba de transferencia se producirá una sobrepresión en la cañería, pudiendo afectar la estructura de ellas.	5	2	1	10	
				4	Cañerías entre el módulo de transferencia y el tanque de circulación están obstruidas.	Se puede producir un aumento de presión en las líneas.	6	2	1	12	
				5	Cañerías entre el módulo de transferencia y el tanque de circulación están rotas.	Si esta en funcionamiento la bomba de transferencia puede producirse un derrame de lubricante en la planta. CONTAMINACIÓN.	8	2	1	16	
				6	Bomba de transferencia no hace circular lubricante.	Si la bomba de transferencia no envía lubricante al tanque de circulación cuando el nivel sea menor a un 40%, las bombas de lubricación y pre-lubricación no funcionaran. Por lo que no será posible que funcione el motor.	8	2	1	16	
		B	Almacenar menos de 20/17 [m3] de aceite lubricante en el tanque de circulación.	1	Medidor de nivel indica un nivel distinto al que tiene el tanque de almacenamiento.	Si el medidor indica un nivel mayor de lubricante en el tanque de almacenamiento podría verse afectada la lubricación del motor. Esto afectará al árbol de levas, cigüeñal, pistones, bielas y engranes.	10	2	5	100	
				2	Fugas en el tanque de circulación.	El indicador de nivel puede mostrar la disminución de lubricante en el tanque de circulación, aún así puede producirse derrames de lubricante si el nivel de fuga es muy alto.	10	2	1	20	
				3	Agua, aire o lodo acumulado en el estanque de circulación.	Para evitar esta situación se debe abrir periódicamente la válvula de drenaje del tanque de almacenamiento. Si esto no se realiza podría dificultarse el drenaje y el nivel del tanque de almacenamiento se verá disminuido permanentemente.	3	2	6	36	
				4	El lubricante trae partículas no debidas.	Si logran permanecer partículas en el aceite lubricante se producirá ralladuras y desgaste (abrasión) en los componentes del motor, aumentando las correcciones que se le deben realizar, disminuyendo su disponibilidad.	4	2	6	48	

2	Suministrar lubricante en el arranque a 30 [m3/h] y 5 [bar] por medio de la bomba de pre-lubricación.	A	No suministrar 30 [m3/h] de lubricante al motor durante su arranque.		Los sellos de la bomba están sueltos o deteriorados. Esto producirá un déficit en la lubricación al arranque del motor, pudiendo ocasionar deterioro en él. Además habrá una pérdida de combustible.	3	2	1	6
				1 Fugas en la bomba de pre-lubricación.					
				2 Obstrucción en la cañería de aspiración de la bomba de pre-lubricación.	Aumento de presión en las cañerías de aspiración.	6	2	1	12
				3 Desgaste en la bomba de pre-lubricación.	No se generará la película de aceite lubricante necesario para remover la fricción entre las piezas del motor, lo que aumentará el desgaste y complicará el arranque del motor.	5	1	1	5
				4 Filtraciones de aire en la aspiración de la bomba de pre lubricación.		7	1	1	7
				5 Bomba de pre-lubricación no aspira lo suficiente.	No se generará el vacío necesario para la succión desde el tanque de circulación. Será más lento el proceso de lubricación antes de la partida, dificultando la lubricación continua que deben tener ciertas piezas del motor, las que al entrar en funcionamiento pueden dañarse.	1	2	1	2
				6 Presión de salida de la bomba de pre-lubricación es mayor a 5 [bar].	Se producirá un aumento de presión en la línea de succión del tanque de almacenamiento y en el mismo tanque. Una alta presión en el lubricante puede ser producto de una alta viscosidad, ya sea por una baja temperatura o aumento de partículas contaminantes, provocando posibles fallas en el motor. Indicador de presión local a la salida de la bomba.	3	2	1	6
		B	No suministrar lubricante a 5 [bar] durante el arranque del motor.	1 Los engranes de la bomba de pre-lubricación están dañados.	La disminución de presión se indicará a través del equipo PI-LK02. Esto provocará una disminución del flujo de lubricante, aumentando el desgaste entre componentes del motor.	10	2	1	20
				2 Filtraciones de aire en la aspiración.	La disminución de presión se indicará a través del equipo PI-LK02. El aumento de aire en el lubricante dificultará...	10	2	6	120
				3 Fallas operacionales en una bomba de desplazamiento positivo	Esto provocará una disminución del flujo de lubricante, aumentando el desgaste entre componentes del motor.	5	2	1	10
				4 Fugas en la bomba de pre-lubricación.	Caída de presión se puede observar en el indicador de presión. Además se visualizará un derrame de lubricante alrededor de la bomba producto del desgaste de sellos.	2	2	1	4
				5 Aumento de temperatura en el lubricante.	Disminuirá la viscosidad del aceite lubricante, por lo que la película de aceite será débil, aumentando el desgaste entre las piezas del motor y la temperatura de este.	7	2	1	14
				6 Combustible en el lubricante.	Formación de lodos, disminución de la vida útil del aceite lubricante y suciedad en los motores.	8	2	1	16
				7 Disminución de la temperatura del lubricante.	Aumentará la viscosidad del lubricante, dificultando la llegada del lubricante a las piezas del motor. La falta de lubricación puede causar daños estructurales al motor.	7	2	1	14
				8 Aumento de partículas de hollín en el lubricante.	Aumentará la viscosidad del lubricante, dificultando la llegada del lubricante a las piezas del motor. La falta de lubricación puede causar daños estructurales al motor.	6	2	1	12
				9 Indicador local de presión a la salida de la bomba marca presión errónea.	Si disminuye la presión del lubricante puede ser por una bajo nivel en el tanque de circulación o viscosidad muy baja. Si aumenta la presión del lubricante puede ser un aumento de viscosidad. Ambos provocarán que la lubricación no sea la adecuada, afectando piezas móviles del motor.	7	2	2	28
		C	No suministrar lubricante mientras el motor arranca o está detenido.	1 Motor eléctrico de las bomba de pre-lubricación no esta funcionando.	La lubricación al inicio del arranque se verá afectada, por lo que las piezas del motor que necesitan lubricación pueden dañarse. Es posible que la película que se forma entre las piezas no sea la adecuada. Se deberán detener el funcionamiento de los motores.	10	1	6	60
				2 Bajo nivel de lubricante en el tanque de circulación.	El transmisor de nivel del tanque de lubricación enviara la señal para prevenir la operación de las bombas de lubricación, ya que no funcionan con menos de un 40% del tanque llenado. Las piezas del motor pueden verse afectadas por el déficit de lubricación, además habrá un aumento de temperatura en el motor.	10	1	6	60
				3 La temperatura del lubricante es baja y no puede fluir.	El lubricante no podrá fluir por las vías de las bombas de lubricación, por lo que no se lograra el suministro de aceite lubricante en los motores. Si continua operando el motor se producirá aumento de temperaturas en el motor.	10	1	6	60
				4 El motor gira pero la bomba de pre-lubricación no.	Puede haberse producido solidificación del lubricante en las bombas por lo que se tendrán que desarmar para limpiarlas. También puede ser que no estén bien acoplados los ejes, lo que se detectaría con el aumento de vibraciones y ruidos.	10	1	6	60
				5 Bombas desconectadas de la líneas.	El indicador de presión a la salida de la bomba dará el valor de la presión atmosférica, si no se detiene pronto la bomba se producirá un derrame de aceite lubricante. Si los motores están en funcionamiento se generarán daños estructurales por aumento de temperatura y exceso de fricción.	10	1	6	60

					Los indicadores de presión y salida de la bomba señalaran la presión de las tuberías cuando están vacías, si los indicadores no están funcionando el nulo ruido de la bomba indicara la desconexión. No se podrá realizar la lubricación del motor produciendo daños en sus piezas, disminución de la película de lubricación y aumento de temperatura. Al conectar el motor a la bomba comenzará la lubricación normal.	10	1	6	60
				6 Bombas desconcertadas del motor.		10	1	6	60
				7 Baja presión a la entrada de la bomba.	Bombas de lubricación pueden cavitar.	10	1	6	60
				8 Solidificación del lubricante al interior de la bomba.	Estancamiento de las bombas de lubricación por la solidificación del lubricante. Es probable que se deba desarmar para limpiarla. Si los motores están en funcionamiento se generarán daños estructurales por aumento de temperatura y exceso de fricción.	10	1	6	60
				9 Línea que conecta el tanque de circulación y las bombas presentan fugas.	Se producirá una filtración de aceite lubricante hacia el medio ambiente. PROBLEMA AMBIENTAL CONSULTAR.	8	1	4	32
				10 El eje de la bomba esta roto.	Será imposible que se realice la lubricación de los motores, aumentando el roce entre las piezas del motor. Es necesaria la reparación o cambio de la bomba de lubricación.	10	1	4	40
				11 El impulsor de la bomba esta roto.	Será imposible que se realice la lubricación de los motores, aumentando el roce entre las piezas del motor. Es necesaria la reparación o cambio de la bomba de lubricación.	10	1	4	40
3	Suministrar al motor durante la operación lubricante a 276 [m3/h] y 5 [bar], por medio de la bomba de lubricación.	A	No suministrar lubricante a 5 [bar] durante el funcionamiento de los motores.	1 El tornillo de la bomba de lubricación esta dañado.	La disminución de presión se indicará a través del equipo PI-LK02.	4	2	1	8
				2 Filtraciones de aire en la aspiración.	La disminución de presión se indicará a través del equipo PI-LK02. El aumento de aire en el lubricante dificultara...	4	2	1	8
				3 Fugas en la bomba de lubricación.	Caída de presión se puede observar en el indicador de presión. Además se visualizará un derrame de lubricante alrededor de la bomba producto del desgaste de sellos.	2	2	1	4
				4 Aumento de temperatura en el lubricante.	Disminuirá la viscosidad del aceite lubricante, por lo que la película de aceite será débil, aumentando el desgaste entre las piezas del motor y la temperatura de este.	8	2	1	16
				5 Combustible en el lubricante.	Formación de lodos, disminución de la vida útil del aceite lubricante y suciedad en los motores.	10	2	1	20
				6 Disminución de la temperatura del lubricante.	Aumentará la viscosidad del lubricante, dificultando la llegada del lubricante a las piezas del motor. La falta de lubricación puede causar daños estructurales al motor.	3	2	1	6
				7 Aumento de partículas de hollín en el lubricante.	Aumentará la viscosidad del lubricante, dificultando la llegada del lubricante a las piezas del motor. La falta de lubricación puede causar daños estructurales al motor.	2	3	1	6
		B	Suministrar 276 [m3/h] de lubricante al motor durante su funcionamiento.	1 Fugas en la bomba de lubricación.	Los sellos de la bomba están sueltos o deteriorados. Esto producirá un déficit en la lubricación del motor, pudiendo ocasionar deterioro en él. Además habrá una pérdida de lubricante.	9	1	1	9
				2 Obstrucción en la cañería de aspiración de la bomba de lubricación.		9	1	1	9
				3 Desgaste en la bomba de lubricación.		8	1	4	32
				4 Filtraciones de aire en la aspiración de la bomba de lubricación.	El aumento de aire en el lubricante provocará.... Cavitación en bomba	7	1	4	28
				5 Bomba de lubricación no aspira lo suficiente.	No se generará el vacío necesario para la succión desde el tanque de circulación. Será más lento el proceso de lubricación al arranque, dificultando la lubricación continua que deben tener ciertas piezas del motor, las que al entrar en funcionamiento pueden dañarse.	10	1	4	40
				6 Presión de salida de la bomba de lubricación es mayor a 10 [bar].	Se producirá un aumento de presión en la línea de succión del tanque de almacenamiento y en el mismo tanque. Además, es probable que aumente la presión por la disminución de temperatura de aceite lubricante o bien, la presencia de combustible en él. Esto provocará una disminución de la viscosidad del aceite lubricante generando una película de aceite débil, aumentando el desgaste entre las piezas del motor y la temperatura de este.	9	1	2	18

C	No suministrar lubricante mientras el motor arranca o esta en funcionamiento.	1 Sistema de transmisión motor-bomba lubricación esta dañado.	Al no estar en buen estado la transmisión, la bomba de lubricación no entrara en funcionamiento. Esto imposibilitara el funcionamiento normal de los motores. Si los motores no se detienen se dañaran los motores.	10	1	6	60
		2 Bajo nivel de lubricante en el tanque de circulación.	El transmisor de nivel del tanque de lubricación enviara la señal para prevenir la operación de las bombas de lubricación, ya que no funcionan con menos de un 40% del tanque llenado. Las piezas del motor pueden verse afectadas por el déficit de lubricación, además habrá un aumento de temperatura en el motor.	10	1	6	60
		3 La temperatura del lubricante es baja y no puede fluir.	El lubricante no podrá fluir por las vías de las bombas de lubricación, por lo que no se lograra el suministro de aceite lubricante en los motores. Si continua operando el motor se producirá aumento de temperaturas en el motor.	10	1	6	60
		4 El motor gira pero la bomba de lubricación no.	Puede haberse producido solidificación del lubricante en las bombas por lo que se tendrán que desarmar para limpiarlas. También puede ser que no estén bien acoplados el sistema de transmisión, lo que se detectaría con el aumento de vibraciones y ruidos.	10	1	6	60
		5 Válvulas unidireccional de la bombas están mal instalados.	Se producirán aumentos de presión en las líneas, esta sobrepresión se puede presentar antes de salir del módulo de las bombas de lubricación, también en la zona de entrada y salida de los enfriadores de aceite lubricante.	10	1	6	60
		6 Bombas desconectadas de la líneas.	El indicador de presión a la salida de la bomba dará el valor de la presión atmosférica, si no se detiene pronto la bomba se producirá un derrame de aceite lubricante. Si los motores están en funcionamiento se generarán daños estructurales por aumento de temperatura y exceso de fricción.	10	1	6	60
		7 Bombas desconectadas del motor.	Los indicadores de presión y salida de la bomba señalaran la presión de las tuberías cuando están vacías, si los indicadores no están funcionando el nulo ruido de la bomba indicara la desconexión. No se podrá realizar la lubricación del motor produciendo daños en sus piezas, disminución de la película de lubricación y aumento de temperatura. Al conectar el motor a la bomba comenzará la lubricación normal.	10	1	6	60
		8 Baja presión a la entrada de la bomba.	Bombas de lubricación pueden cavitlar.	10	1	6	60
		9 Solidificación del lubricante al interior de la bomba.	Estancamiento de las bombas de lubricación por la solidificación del lubricante. Es probable que se deba desarmar para limpiarla. Si los motores están en funcionamiento se generarán daños estructurales por aumento de temperatura y exceso de fricción.	10	1	6	60
		10 Línea que conecta el tanque de circulación y las bombas presentan fugas.	Se producirá una filtración de aceite lubricante hacia el medio ambiente. PROBLEMA AMBIENTAL CONSULTAR.	8	1	4	32
		11 El eje de la bomba esta roto.	Será imposible que se realice la lubricación de los motores, aumentando el roce entre las piezas del motor. Es necesaria la reparación o cambio de la bomba de lubricación.	10	1	4	40
		12 El impulsor de la bomba esta roto.	Será imposible que se realice la lubricación de los motores, aumentando el roce entre las piezas del motor. Es necesaria la reparación o cambio de la bomba de lubricación.	10	1	4	40

Disminuir la temperatura del lubricante a 60-65 [°C] para el ingreso al motor.	A	Disminuir la temperatura del lubricante sobre 65 [°C].	1	El agua de enfriamiento del IDC no esta a la temperatura adecuada.	La válvula de 3 vías hará que recircule el combustible hasta que alcance la temperatura de 65 [°C]. Si pasa con una temperatura mayor hacia los motores no podan enfriarse, por lo que se activara la parada de emergencia por alta temperatura. Al aumentar la temperatura del lubricante disminuirá su viscosidad por lo que la película de aceite será débil, lo que producirá aumento de fricción entre piezas del motor.	10	1	3	30
			2	El flujo de agua de enfriamiento no es el suficiente.	Al tener un flujo menor de agua de enfriamiento se dificultara la disminución de la temperatura del lubricante. Por tanto, no se podrá disipar el calor de los motores, ni disminuir la fricción de las piezas móviles. Es posible que se active la parada de emergencia por aumento de temperatura en los motores.	10	1	3	30
			3	Presión del lubricante en las líneas es muy baja.	Bajo nivel de lubricante, disminución de la viscosidad o aumento de combustible en el lubricante. Esto provocará aumento de desgaste y temperatura en el motor, provocando fallas estructurales en sus piezas.	10	1	3	30
			4	Algunas de las líneas de las rendijas del intercambiador de placas están obstruidas.	Habrà un aumento de presión en las líneas del intercambiador de calor, aumentara la temperatura del agua de enfriamiento y el intercambio de calor será menor. El lubricante no disminuirá a 65 [°C] su temperatura y se dificultara la disminución de temperatura de motor. Esto provocara una parada de emergencia por alta temperatura de los motores.	10	1	3	30
			5	Válvula de 3 vías no esta dirigiendo el flujo de lubricante hacia el intercambiador de calor.	Es posible que el termostato no este funcionando. Al no disminuir la temperatura del lubricante no se podrá disipar el calor de los motores, provocando una parada de emergencia por el aumento de temperatura.	8	1	3	24
			6	La válvula termostática tiene mal configurada la temperatura.	Si la temperatura que requiere la válvula termostática para que el lubricante pase hacia los intercambiadores de calor no es la correcta se producirá un aumento de temperatura excesivo en el lubricante. Esto provocará que no se puede bajar la temperatura del motor. Es posible que se produzca una parada de emergencia por la alta temperatura del lubricante.	6	1	3	18
	B	No disminuir la temperatura del lubricante.	1	No esta circulando agua de enfriamiento por el intercambiador.	El motor aumentará su temperatura, ya que la manera de enfriarlo es a través del aceite lubricante. Al tener este una alta temperatura se producirá una parada de emergencia por la alta temperatura del lubricante.	10	2	6	120
			2	La temperatura de entrada del agua de enfriamiento es similar a la temperatura del lubricante.	Si el motor está en funcionamiento no llegará el lubricante necesario para disipar el calor. Se producirá una parada de emergencia por la caída de presión en la cañería del aceite lubricante.	6	2	6	72
Filtrar sólidos y partículas extrañas del lubricante mayores a 34 [micrón].	A	No filtrar partículas mayores a 34 [micrón].	1	Mallas filtrantes están dañadas.	Al estar más de una malla filtrante dañada, la filtración será deficiente. Esto puedo provocar que el lubricante tenga restos de desgaste y mayor proporción de combustible. Lo que puede afectar su capacidad de enfriamiento en pistones y lubricación en cojinetes del árbol de levas, cigüeñal, biela y engranes.	6	1	2	12
			1	Los 5 filtros en servicio están tapados.	No podrá pasar el aceite lubricante hacia el motor. No se producirá la disminución de temperatura y no se podrá prevenir el desgaste de las piezas. Es recomendable que no entre en operación el motor hasta que se repare el módulo.	10	1	1	10
	B	No filtrar sólidos y partículas extrañas del lubricante.	2	No han sido reemplazados los elementos filtrantes luego de los 100 ciclos de lavado por día.	Al no reemplazar los filtros se producirá un disminución del caudal hasta que no haya suministro. Esto provocara un aumento en el desgaste y temperatura del motor.	7	1	1	7
			3	Falta de suministro de aire presurizado.	No se podrán limpiar los filtros. Esto provocará la disminución del suministro de lubricante hacia el motor, afectando a piezas como cigüeñal, biela, árbol de levas, engranes. Es posible que aumente su desgaste y aumente la temperatura del motor.	9	1	1	9
			4	Motor no esta funcionando para alternar el filtro aislado y el tapado.	El flujo de aceite lubricante será menor al normal por lo que afectarán a la lubricación del motor. Se vera afectada la temperatura del motor, y aumentara el desgaste de las piezas.	3	3	3	27
			5	No se envía la señal de diferencial de presión.	No podrá entrar el filtro tapado al módulo de auto limpieza, produciendo una disminución del flujo de lubricante. Se vera afectada la temperatura del motor, y aumentara el desgaste de las piezas.	6	3	4	72
			6	La presión del aire es menor a lo necesario en el módulo de auto limpieza.	No se podrá limpiar el filtro que llega al módulo de auto limpieza. Por tanto, disminuirá el flujo de lubricante en las líneas, afectando a la temperatura del motor y su desgaste.	2	3	3	18

7	Remover suciedad y partículas foráneas del lubricante mayores a 80 [micrón].	A	No remover suciedad y partículas foráneas del lubricante mayores a 80 [micrón] de diámetro.	1	Hay partes del filtro que están rotas.	No se filtrarán todas las partículas necesarias, por lo que cambiarán las propiedades del lubricante. Si quedan partículas de combustible o producto de la combustión se puede producir corrosión, disminuir las propiedades de enfriamiento en los pistones (vanadio), debilitar la capa de lubricación.	4	2	2	16
			B	1	Ambos filtros dúplex están sucios.	Esto dejara indisponible al motor hasta que se limpie un filtro.	5	1	2	10
				2	Ambos filtros dúplex están rotos.	Esto dejara indisponible al motor hasta que se limpie un filtro.	3	1	2	6
				3	No se detecta el diferencial de presión para cambiar el filtro.	Si el detector de diferencial de presión no esta funcionando es probable que no se detecte cuando un filtro esta obstruido. Esto disminuirá el caudal de aceite de lubricante hacia el motor, produciendo aumento de temperatura y desgaste en él. Las piezas que se verán afectadas son el cigüeñal, árbol de levas, bielas, pistones, y engranes de distribución.	9	1	1	9
				4	No se detecta el diferencial de presión para cambiar el filtro.	Si el detector de diferencial de presión no esta funcionando es probable que no se detecte cuando un filtro esta obstruido. Esto disminuirá el caudal de aceite de lubricante hacia el motor, produciendo aumento de temperatura y desgaste en él. Las piezas que se verán afectadas son el cigüeñal, árbol de levas, bielas, pistones, y engranes de distribución.	9	1	2	18
				5	Hay partes del filtro que están tapadas.	Disminuirá el caudal de lubricante en las líneas luego del filtro dúplex. Esto puede causar un déficit de lubricante en el motor, aumentando el desgaste de piezas y la temperatura de este. También es posible que se produzca sobre presión en la alimentación del filtro, lo que puede provocar la rotura del filtro. Se recomienda cambiar el filtro por la unidad stand-by.	10	3	2	60
5	Separar el lubricante del agua y partículas foráneas mayores a 1.4 kg/dm3	A	No separar el lubricante del agua y partículas foráneas	1	Válvula de aislamiento de la unidad separadora está cerrada.	Será imposible el flujo de lubricante hacia la unidad separadora. Solo se contará con los filtros dúplex y automáticos, por lo que aumentarán las partículas foráneas y el contenido de agua en el lubricante. Partículas de resto de combustible pueden provocar corrosión y el agua en el lubricante en condiciones de alta presión y temperatura pueden romper la capa de lubricación y causar daños.	1	3	1	3
				2	El motor de la bomba esta detenido.	El lubricante no podrá dirigirse desde el tanque de circulación hacia la unidad separadora. Solo se contará con los filtros dúplex y automáticos, por lo que aumentarán las partículas foráneas del lubricante, produciendo un cambio en sus propiedades. Partículas de resto de combustible pueden provocar corrosión y el agua en el lubricante en condiciones de alta presión y temperatura pueden romper la capa de lubricación y causar daños.	1	3	1	3
				3	Desgaste de la bomba separadora.	Habrà una caída de suministro en la unidad separadora, por lo que la filtración del lubricante será mucho más lento. Gran parte del aceite que se dirija a los motores puede contener agua, ya que se separa en esta unidad.	1	3	1	3
				4	Pre-calentador de la centrifuga no lleva a la temperatura optima de separación.	El lubricante quedará con partículas que disminuirán sus propiedades para disipar el calor de los motores y para reemplazar la fricción entre las piezas. Partículas de resto de combustible pueden provocar corrosión y el agua en el lubricante en condiciones de alta presión y temperatura pueden romper la capa de lubricación y causar daños.	1	3	1	3
				5	Válvula manual desvia el flujo de la centrifuga.	No será posible disminuir las partículas del lubricante. Solo se contará con los filtros dúplex y automáticos, por lo que aumentarán las partículas foráneas del lubricante, produciendo un cambio en sus propiedades.	1	3	1	3
				6	El cedazo de la unidad separadora esta obstruido completamente.	Habrà un aumento de presión en las cañerías que dirigen el flujo desde el tanque de circulación hacia la unidad separadora. Es importante limpiar el cedazo para que se limpie el lubricante. El aumento de presión puede romper el cedazo, obstruyendo la alimentación de la unidad separadora.	1	3	1	3

					No será posible disminuir las partículas del lubricante. Solo se contará con los filtros dúplex y automáticos, por lo que aumentarán las partículas foráneas del lubricante, produciendo un cambio en sus propiedades. Partículas de resto de combustible pueden provocar corrosión y el agua en el lubricante en condiciones de alta presión y temperatura pueden romper la capa de lubricación y causar daños.	1	3	1	3
				7 Motor de la separadora esta detenido.					
				8 La alimentación de aceite en la separadora esta obstruido.	Si la bomba de la unidad separadora esta funcionando habrá un aumento de presión a la salida de la bomba, lo que puede provocar daños en la bomba y las cañerías.	1	3	1	3
				9 La descarga de la separadora para lubricante esta obstruida.	Habrà una pérdida de lubricante porque se dirigirá hacia el tanque de lodo de la unidad. Si no se soluciona pronto este problema puede haber una falta de suministro importante del lubricante, lo que puede provocar fallas por aumento de temperatura y desgaste en el motor.	1	3	1	3
				10 La descarga de la separadora para líquidos pesados esta obstruida.	El fluido saldrá de la unidad separadora por la descarga de lubricante, llegando al tanque de circulación con la misma composición que salió desde ahí.	1	3	1	3
		B	No separar el lubricante del agua y partículas foráneas mayores a 1.4 kg/dm3	1 Las rpm de la unidad separadora son muy bajas.	No se producirá el efecto centrifugo necesario, por lo que partículas mayores se irán por la misma descarga del lubricante. Estas partículas pueden cambiar las propiedades del lubricante. Partículas de resto de combustible pueden provocar corrosión y el agua en el lubricante en condiciones de alta presión y temperatura pueden romper la capa de lubricación y causar daños.	2	4	6	48
				2 La temperatura del lubricante es distinta a 90-95 [°C]	No se producirá el efecto centrifugo necesario, por lo que partículas mayores se irán por la misma descarga del lubricante. Estas partículas pueden cambiar las propiedades del lubricante. Partículas de resto de combustible pueden provocar corrosión y el agua en el lubricante en condiciones de alta presión y temperatura pueden romper la capa de lubricación y causar daños.	5	2	2	48

10.2. Alarmas e indicaciones de los sistemas auxiliares

Sistema de aire de arranque y aire comprimido

Alarmas e indicaciones locales				
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO	PUNTO DE AJUSTE
1	Presión de salida del compresor de aire de arranque		Compresores de aire de arranque	30 [bar]
2	Temperatura de salida del compresor de aire de arranque		Compresores de aire de arranque	
3	Presión de recibidor de aire de arranque		Recibidores de aire de arranque	30 [bar]
4	Presión de aire de arranque del motor	PI-AK101-601	Motor	30 [bar]
5	Baja presión de aire de arranque	PAIL-A102	Motor	22 [bar]
6	Presión de salida de válvulas de reducción de presión	PI-AK002/PI-AK003	Est. reducción aire de presión de aire	8 [bar]

Alarmas e indicaciones en sala de mandos			
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO
1	Requiere mantenimiento		Compresores de aire de arranque
2	Sobrecarga del motor		Compresores de aire de arranque
3	Baja presión de aceite		Lub. Compresores de aire de arranque
4	Alta temperatura de aire		Compresores de aire de arranque
5	Alta temperatura de agua de enfriamiento		Enfriamiento aire comprimido
6	Falta de agua de enfriamiento		Enfriamiento aire comprimido

Sistema de enfriamiento

Alarmas e indicaciones locales				
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO	PUNTO DE AJUSTE
1	Nivel del tanque de compensación LT	Vidrio de nivel	Tanque de compensación LT	1-1.5 [bar] 0-10 [bar] 1-9 [bar] 0-10 [bar]
2	Indicación de presión de succión LT	PI-FK02	Bombas de enfriamiento LT	
3	Indicación de presión de descarga LT	PI-FK03	Bombas de enfriamiento LT	
4	Indicación de presión de succión HT	PI-FK10	Bombas de enfriamiento HT	
5	Indicador de presión de descarga HT	PI-FK11	Bombas de enfriamiento HT	
6	Temperatura de salida de unidad de pre-calentamiento	TI-FK16	Unidad de pre-calentamiento	
7	Temperatura de entrada de unidad de pre-calentamiento	TI-FK13	Unidad de pre-calentamiento	
8	Presión de entrada de unidad de pre-calentamiento	PI-FK14	Unidad de pre-calentamiento	
9	Presión de salida de unidad de pre-calentamiento	PI-FK15	Unidad de pre-calentamiento	
10	Temperatura de entrada del enfriador del vertidor de calor	TI-FK01	Enfriador de vertido de calor	
11	Temperatura de salida del enfriador vertidor de calor	TI-FK02	Enfriador de vertido de calor	
12	Temperatura de entrada del enfriador de agua caliente	TI	Enfriador de agua caliente	
13	Temperatura de salida del enfriador de agua caliente	TI	Enfriador de agua caliente	
14	Temperatura de entrada de radiadores LT	FK-TI-124	Radiadores LT	
15	Temperatura de salida de radiadores LT	FK-TI-121	Radiadores LT	
16	Temperatura de entrada de radiadores HT	FK-TI-128	Radiadores HT	
17	Temperatura de salida de radiadores HT	FK-TI-125	Radiadores HT	
18	Presión de entrada de radiadores LT	FK-PI-123	Radiadores LT	
19	Presión de salida de radiadores LT	FK-PI-122	Radiadores LT	
20	Presión de entrada de radiadores HT	FK-PI-127	Radiadores HT	
21	Presión de salida de radiadores HT	FK-PI-126	Radiadores HT	
22	Nivel tanque de mtto del sistema agua de enfriamiento	LI-FM08	Tanque de mantenimiento	
23	Presión de salida de la bomba de mantenimiento	PI-FK06	Mtto sist de agua de enfriamiento	
24	Presión de entrada de la bomba de mantenimiento	PI-FK05	Mtto sist de agua de enfriamiento	

Alarmas e indicaciones en sala de mandos				
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO	PUNTO DE AJUSTE
1	Alarma de bajo nivel del tanque de compensación HT	LAL-FI101	Tanque de compensación HT	Bajo nivel
2	Nivel del tanque de compensación LT	LAL-FI102	Tanque de compensación LT	
3	Indicador de presión de succión LT	PI-FK02	Bomba de enfriamiento LT	
4	Alto nivel en el tanque de mtto del sist de agua de enfriamiento	LI-FI07	Tanque de mtto	

Sistema de combustible

Alarmas e indicaciones locales				
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO	PUNTO DE AJUSTE
1	Presión de entrada de la estación de descarga HP01	PI-HK01	Descarga de HFO	1-1.5 [bar]
2	Presión de salida de la estación de descarga HP01	PI-HK02	Descarga de HFO	0-10 [bar]
3	Presión de entrada de la estación de descarga HP02	PI-HK04	Descarga de HFO	1-1.5 [bar]
4	Presión de salida de la estación de descarga HP02	PI-HK05	Descarga de HFO	0-10 [bar]
5	Temperatura de combustible en la estación de descarga	TI-HK03	Descarga de HFO	0-100 [°C]
6	Temperatura en el modulo de conteo	TI-HK01	Conteo de HFO	0-100 [°C]
7	Flujo de descarga HFO	FQ1		
8	Nivel de tanque de almacenamiento HT001	LI-HI003	Tanques de almacenamiento	
9	Bajo nivel del tanque de almacenamiento HT001	LAL-HI002	Tanques de almacenamiento	
10	Alto nivel del tanque de almacenamiento HT001	LAH-HI001	Tanques de almacenamiento	
11	Temperatura del tanque de almacenamiento HT001	TI-HK001	Tanques de almacenamiento	
12	Nivel local del tanque de almacenamiento HT001	LI	Tanques de almacenamiento	
13	Nivel del tanque de almacenamiento HT002	LI-HI006	Tanques de almacenamiento	
14	Bajo nivel del tanque de almacenamiento HT002	LAL-HI005	Tanques de almacenamiento	
15	Alto nivel del tanque de almacenamiento HT002	LAH-HI004	Tanques de almacenamiento	
16	Temperatura del tanque de almacenamiento HT002	TI-HK002	Tanques de almacenamiento	
17	Nivel local del tanque de almacenamiento HT002	LI	Tanques de almacenamiento	
18	Alarma general del separador HU004	A-HI007	Separadores de HFO	
19	Alarma general del separador HU005	A-HI008	Tanque de servicios	
20	Nivel del tanque de servicio HT003	LI-HI015	Tanque de servicios	
21	Bajo nivel del tanque de servicio HT003	LAL-HI013	Tanque de servicios	
22	Alto nivel del tanque de servicio HT003	LAH-HI012	Tanque de servicios	
23	Temperatura del tanque de servicio HT003	TI-HK003	Tanque de servicios	

24	Nivel local del tanque de servicio HT003	LI	Tanque de servicios	
25	Señal de control de válvula de tres vías HV022	LSH-HI03/LSL-HI013	Control de viscosidad	*
26	Presión de entrada de bomba de pre-presión	PI-HK01	Pre-presión	
27	Presión de salida de bomba de pre-presión	PI-HK02	Pre-presión	
28	Disparo de bomba de pre-presión y alarma de bajo nivel	PAL-HI01	Pre-presión	
29	Señal de arranque de bomba de fugas AV03	LSH-HI03	Pre-presión	*
30	Señal de parada de bomba de fugas AV03	LSL-HI04	Pre-presión	*
31	Presión de descarga de bomba de fugas	PI-HK04	Pre-presión	*
32	Presión de entrada de bomba de fugas	PI-HK03	Pre-presión	*
33	Alarma de problema con filtros automáticos HF02	A-HK05	Pre-presión	*
34	Temperatura de HFO en el módulo de circulación	TI-HK01	Circulación	0-160 [°C]
35	Presión dentro del tanque de mezclado	PI-HK02	Circulación	1-9 [bar]
36	Presión de bomba de circulación	PI-HK03	Circulación	0-100 [bar]
37	Temperatura de entrada pre-calentador	TI-HK04	Circulación	0-200 [°C]
38	Temperatura de salida pre-calentador	TI-HK05	Circulación	0-200 [°C]
39	Temperatura del HFO en el detector de viscosidad	TI-HI06		
40	Indicación de viscosidad de HFO	VI-HI05		
41	Señal de control de viscosidad a la válvula de tres vías	VAH-HI03/VALHI04		
42	Arranque de Bomba de fugas	LSH-HI13	Circulación	
43	Detenida de bomba de fugas	LSL-HI14	Circulación	
44	Presión de descarga de bomba de fuga	PI-HK07	Circulación	
45	Presión de entrada Bomba de fugas	PI-HK06	Circulación	
46	Detección de fugas en el modulo de circulación	LSH-HI15	Circulación	
47	Indicación de D/P en el filtro dúplex dinal	PDAH-HI01	Filtro duplex final	

Sistema de lubricación

Alarmas e indicaciones de sala de mandos				
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO	PUNTO DE AJUSTE
1	Nivel de tanque de almacenamiento	LI-LI003	Tanque de almacenamiento	
2	Alarma de bajo nivel en el tanque de almacenamiento	LISL-LI002	Tanque de almacenamiento	
3	Disparo de bomba de transferencia	LSL-LI002	Módulo de transferencia	
4	Alarma de bajo nivel en el tanque de aceite lubricante	LAL-LI102	Tanque de aceite	
5	Alarma de alto nivel en el tanque de aceite lubricante	LAH-LI101	Tanque de aceite	
6	Nivel del tanque de aceite lubricante	LI-LI103	Tanque de aceite	
7	Disparo/Permisivo de la bomba de pre-lubricación	LAL-LI102	Bomba de pre-lubricación	
8	Enlace de seguridad de arranque de la bomba principal de aceite lubricante	PSL-LI05	Circulación de aceite	
9	Alto D/P en los filtros automáticos	PDAH-LI02	Filtros	

Alarmas e indicaciones locales				
Item	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO	MÓDULO	PUNTO DE AJUSTE
1	Presión de entrada de LO en la bomba de descarga	PI-LK01	Descarga de aceite lubricante	
2	Presión de salida de LO en la bomba de descarga	PI-LK02	Descarga de aceite lubricante	
3	Nivel de LO en el tanque de almacenamiento	LI-LI004	Tanque de almacenamiento	
4	Disparo de la bomba de transferencia de LO	LP01	Módulo de transferencia	
5	Presión de entrada de LO en la bomba de transferencia	PI-LK01	Módulo de transferencia	
6	Presión de salida de LO en la bomba de transferencia	PILK-02	Módulo de transferencia	
7	Temperatura de LO en el módulo de transferencia	TI-LK03	Módulo de transferencia	
8	Presión de entrada de LO en la bomba de pre-lubricación	PI-LK07	Bomba de pre-lubricación	
9	Presión de salida de LO en la bomba de pre-lubricación	PI-LK08	Bomba de pre-lubricación	
10	Temperatura de salida de la bomba principal de LO	TI-LK01	Circulación de aceite	
11	Presión de salida de la bomba principal de LO	PI-LK02	Circulación de aceite	
12	Temperatura de aceite a la entrada del enfriador de LO	TI-LK03	Enfriador de aceite lubricante	
13	Temperatura de aceite a la salida del enfriador de LO	TI-LK04	Enfriador de aceite lubricante	
14	Temperatura de agua de enfriamiento a la entrada del enfriador de LO	TI-FK06	Enfriador de aceite lubricante	
15	Temperatura de agua de enfriamiento a la salida del enfriador de LO	TI-FK07	Enfriador de aceite lubricante	
16	Detector de D/P en los filtros duplex		Filtros Dúplex	

