Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela Ingeniería Civil Mecánica

APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM EN MOTORES DETROIT 16V-149TI EN CODELCO DIVISIÓN ANDINA

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Mecánico

Profesor Patrocinante:
Sr. Roberto Cárdenas Parra
Ingeniero Mecánico.
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.
Diplomado en Ingeniería Mecánica.

DAVID ESTEBAN VÁSQUEZ OYARZÚN
VALDIVIA - CHILE
2008

El Profesor Patrocinante y Profesores Informantes del Trabajo de Titulación comunican al Director de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería que el Trabajo de Titulación del Señor:

DAVID ESTEBAN VÁSQUEZ OYARZÚN

ha sido aprobado en el examen rendido este día como requisito para optar al Título de Ingeniero Mecánico. Y, para que así conste para todos los efectos firman:

Profesor Patrocinante:

Ing. Mecánico Sr. Roberto Cárdenas P. _____

Profesores Informantes:

Ing. Mecánico Sr. Luís Cárdenas G. _____

Dr. Sr. Héctor Noriega F. _____

VºBº Director de Escuela:

Ing. Civil Mecánico Sr. Milton Lemarie _____

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a mis padres: Juan y Verónica por el enorme esfuerzo y sacrificio que hicieron para que estudiara Ingeniería y por la confianza que me han tenido siempre. Doy gracias también a mi familia, que de una u otra manera contribuyeron y ayudaron en mi formación y en especial a mis tíos Allen y Roberto. Doy las gracias a mi tío Aurelio por la ayuda profesional, por sus consejos y ayudarme a realizar mis prácticas en Codelco.

Agradezco sinceramente a mi polola Romina y su familia, los que me han ayudado y acogido en los momentos difíciles como uno más de su familia.

Le agradezco a don Roberto Cárdenas por darme la oportunidad de realizar una tesis con él y su ayuda. También agradezco a los profesores don Luís Cárdenas y don Héctor Noriega.

Y finalmente este trabajo va dedicado a mi hija Catalina Ignacia y mi sobrina Amanda Lorena por llenar la casa de tanta felicidad.

INDICE TEMÁTICO

		Página
Resumen		10
Summary		11
Introducción		12
Objetivo General y Específicos		13
Metodología de Trabajo		14
Capítulo I		
CORPORACIÓN DEL COBRE CODELCO		
1.1	Historia	15
1.2	División Andina	16
1.3	Obtención del concentrado de cobre	16
1.3.1	Proceso de extracción del mineral	16
1.3.1.1	Mina Sur-Sur	16
1.3.1.2	Mina La Unión	17
1.3.1.3	Mina Río Blanco	17
1.3.2	Proceso de concentrado del mineral	18
1.3.2.1	Etapa de chancado	19
1.3.2.1.1	Chancado grueso	19
1.3.2.1.2	Chancado fino	19
1.3.2.2	Etapa de molienda	19
1.3.2.2.1	Planta convencional	19
1.3.2.2.2	Planta unitaria	20
1.3.2.2.3	Planta SAG	20
1.3.2.3	Etapa de flotación	20
1.3.2.4	Etapa de tratamiento de aguas	21
1.3.2.5	Etapa de obtención del molibdeno	21
1.3.2.6	Etapa de filtros	22
Capítulo II		
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y SUS SISTEMAS		
2.1	Motor Detroit Diesel 16V-149TI	23
2.1.1	Bloque de cilindros	23
2.2	Descripción de los sistemas del motor	25
2.2.1	Sistema de combustible	25
2.2.1.1	Funcionamiento	25
2.2.2	Sistema de lubricación	27
2.2.2.1	Funcionamiento	27
2.2.3	Sistema de admisión de aire	31
2.2.3.1	Funcionamiento	32
2.2.4	Sistema de enfriamiento	34
2.2.4.1	Funcionamiento	36
2.2.5	Sistema eléctrico	36

		Página
2.2.6	Sistema de escape	37
2.2.7	Sistema de protección	38
2.2.7.1	Baja presión de aceite (alarma y detención)	38
2.2.7.2	Alta temperatura de refrigerante (alarma y detención)	39
2.2.7.3	Velocidad excesiva del motor (alarma y detención)	39
2.2.7.4	Alta presión de cárter (alarma y detención)	39
2.2.7.5	Alta temperatura gases de escape (alarma)	39
2.2.7.6	Baja presión de combustible (alarma)	39
2.2.7.7	Parada de emergencia manual	39

Capítulo III
MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA COFIABILIDAD RCM

3.1	Funciones	41
3.1.1	Funciones primarias	41
3.1.2	Funciones secundarias	41
3.1.3	Parámetros de funcionamiento	42
3.1.4	El contexto operacional	43
3.2	Fallas funcionales	43
3.3	Modos de falla	43
3.3.1	Categorías de modos de falla	44
3.3.2	Cantidad de detalle	45
3.4	Efectos de falla	45
3.4.1	Fuentes de información sobre modos y efectos	46
3.5	Consecuencias de falla	46
3.5.1	Funciones ocultas y evidentes	47
3.5.2	Fallas ocultas y dispositivos de seguridad	47
3.5.3	Prevención de la falla oculta	48
3.6	Tareas proactivas	48
3.6.1	Factibilidad técnica y merecer la pena	48
3.6.2	Fallas potenciales	49
3.6.2.1	El intervalo P-F	49
3.6.2.2	El intervalo P-F neto	50
3.6.3	Tareas de reacondicionamiento cíclico	50
3.6.3.1	Frecuencia de tareas de reacondicionamiento cíclico	51
3.6.3.2	Factibilidad técnica del reacondicionamiento cíclico	51
3.6.3.3	Efectividad del reacondicionamiento cíclico	51
3.6.4	Tareas de sustitución cíclica	52
3.6.4.1	Frecuencia de la sustitución cíclica	52
3.6.4.2	Factibilidad técnica de tareas de sustitución cíclica	52
3.6.5	Tareas a condición	53
3.6.5.1	Factibilidad técnica de tareas a condición	53
3.6.5.2	Categorías de técnicas a condición	53
3.6.5.3	Realización de tareas a condición	54
3.6.6	Selección de tareas proactivas	54

		Página
3.6.6.1	Tareas a condición	54
3.6.6.2	Tareas de reacondicionamiento cíclico	55
3.6.6.3	Tareas de sustitución cíclica	55
3.6.6.4	Combinación de tareas	56
3.7	Acciones “a falta de”	56
3.7.1	Búsqueda de falla y fallas múltiples	56
3.7.2	Aspectos técnicos de la búsqueda de falla	57
3.7.2.1	Chequear el sistema de protección completo	57
3.7.2.2	No perturbarlo	57
3.7.3	Conceptos asociados al análisis de confiabilidad	57
3.7.3.1	Tiempo medio entre fallas (MTBF) o confiabilidad	58
3.7.3.2	Disponibilidad (DISP)	58
3.7.3.3	Intervalos de búsqueda de falla (FFI)	58
3.7.4	Factibilidad técnica de búsqueda de falla	58
3.7.5	Ningún mantenimiento programado	59
3.7.6	Rediseño	60
3.8	Diagrama de Flujo del RCM	60

Capítulo IV
APLICACIÓN DEL RCM

4.1	Selección del equipo	62
4.2	Contexto operacional	62
4.3	Situación motores Detroit serie 149	63
4.3.1	Costos asociados a mantención	63
4.3.2	Disponibilidad motores serie 149	64
4.3.3	Tiempo medio entre fallas de los dispositivos de seguridad	66
4.3.4	Cálculo de MTBF en Serie y en Paralelo	67
4.3.5	Intervalo de búsqueda de falla de los dispositivos de Seguridad	68
4.4	Grupos de análisis	69
4.4.1	Función facilitador	70
4.4.2	Función supervisor de mantención	71
4.4.3	Función mecánico Andina	71
4.4.4	Función técnico Detroit	71
4.5	Presentación de los resultados	72
4.5.1	Hoja de información de RCM	72
4.5.2	Hoja de decisión de RCM	72
4.5.3	Diagrama de decisión de RCM	73
4.5.4	Evaluación de las consecuencias de la falla	76
4.5.5	Factibilidad técnica de tareas proactivas	75
4.5.6	Las preguntas “a falta de”	78
4.6	Aplicación del RCM	79

Página

Capítulo V
ANÁLISIS RCM

5.1	Hoja de información RCM Nº 1 Sistema de combustible	80
5.2	Hoja de decisión RCM Nº 1 Sistema de combustible	82
5.3	Hoja de información RCM Nº 2 Sistema de lubricación	83
5.4	Hoja de decisión RCM Nº 2 Sistema de lubricación	85
5.5	Hoja de información RCM Nº 3 Sistema de admisión de aire	86
5.6	Hoja de decisión RCM Nº 3 Sistema de admisión de aire	88
5.7	Hoja de información RCM Nº 4 Sistema de enfriamiento	89
5.8	Hoja de decisión RCM Nº 4 Sistema de enfriamiento	91
5.9	Hoja de información RCM Nº 5 Sistema eléctrico	92
5.10	Hoja de decisión RCM Nº 5 Sistema eléctrico	93
5.11	Hoja de información RCM Nº 6 Sistema de escape	94
5.12	Hoja de decisión RCM Nº 6 Sistema de escape	95
5.13	Hoja de información RCM Nº 7 Sistema de protección	96
5.14	Hoja de decisión RCM Nº 7 Sistema de protección	98
5.15	Hoja de trabajo motor Detroit 16V-149TI	99

Conclusiones	100
Bibliografía	102

INDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Fig. 1.1	Mina a Rajo Abierto y Subterránea	17
Fig. 1.2	Proceso del concentrado de cobre y molibdeno	18

Capítulo II

Fig. 2.1	Configuración grupo generador	23
Fig. 2.2	Bloque de cilindros motor Detroit serie 149	24
Fig. 2.3	Diagrama esquemático del sistema de combustible	26
Fig. 2.4	Bomba de combustible	26
Fig. 2.5	Cuerpo del inyector de combustible	27
Fig. 2.6	Diagrama esquemático del sistema de lubricación	28
Fig. 2.7	Montaje de la bomba de aceite lubricante	30
Fig. 2.8	Montaje del enfriador de aceite	31
Fig. 2.9	Diagrama esquemático del flujo de aire	32
Fig. 2.10	Corte transversal del conjunto turboalimentador	33
Fig. 2.11	Flujo de aire a través del soplador y el motor	33
Fig. 2.12	Diagrama esquemático del sistema de enfriamiento	34
Fig. 2.13	Montaje del múltiple de agua	35
Fig. 2.14	Montaje del motor de arranque	37
Fig. 2.15	Ubicación de las válvulas de escape	38

		Página
Capítulo III		
Fig. 3.1	Las 7 preguntas del RCM	40
Fig. 3.2	Parámetros de funcionamiento	42
Fig. 3.3	Categorías de modos de falla	44
Fig. 3.4	Curva e intervalo P-F	49
Fig. 3.5	Intervalo P-F Neto	50
Fig. 3.6	Diagrama de Flujo del RCM	60
Capítulo IV		
Fig. 4.1	Costos asociados a mantención	63
Fig. 4.2	Gráfico de tiempo fuera de servicio motor año 2003	64
Fig. 4.3	Gráfico de tiempo fuera de servicio motor año 2004	64
Fig. 4.4	Gráfico de tiempo fuera de servicio motor año 2005	65
Fig. 4.5	Resumen tiempo fuera de servicio motores 149	65
Fig. 4.6	Disponibilidad de cada motor 149	66
Fig. 4.7	Tiempo medio entre fallas dispositivos de seguridad	67
Fig. 4.8	MTBF en serie y en paralelo de las distintas configuraciones de los GG	67
Fig. 4.9	Intervalo de búsqueda de falla	68
Fig. 4.10	Grupo de análisis RCM típico	69
Fig. 4.11	Grupo de análisis RCM Motor Detroit 149	70
Fig. 4.12	Estructura de la Hoja de Información RCM	72
Fig. 4.13	Estructura de la Hoja de Decisión RCM	73
Fig. 4.14	Diagrama de Decisión	74
Fig. 4.15	Como se registran las consecuencias de la falla en la hoja de decisión	75
Fig. 4.16	Resumen de las consecuencias de falla	76
Fig. 4.17	Criterios de factibilidad técnica	77
Fig. 4.18	Las preguntas “a falta de “	78

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1.1	Circuito chancado primario-secundario	105
Anexo 1.2	Circuito chancado primario Don Luís y sistema de transporte del mineral a planta SAG	106
Anexo 1.3	Circuito chancado terciario-cuaternario	107
Anexo 1.4	Circuito de molienda convencional	108
Anexo 1.5	Circuito de molienda unitaria	109
Anexo 1.6	Circuito de molienda SAG	110
Anexo 1.7	Circuito de flotación colectiva	111
Anexo 1.8	Circuito de remolienda	112
Anexo 1.9	Circuito de flotación de limpieza	113
Anexo 1.10	Circuito de flotación de barrido	114

		Página
Anexo 1.11	Circuito de espesaje de relaves	115
Anexo 2.1	Motor Detroit Diesel 16V-149TI frontal	116
Anexo 2.2	Motor Detroit Diesel 16V-149TI posterior	117
Anexo 2.3	Datos técnicos motor Detroit Diesel 16V-149TI	118
Anexo 3.1	Diagrama Gerencia de Servicios y Suministros Codelco División Andina	119
Anexo 3.2	Diagrama Unidad Servicio de Mantenimiento Industrial Codelco División Andina	120

Resumen

Ésta tesis aplica un plan de mantenimiento denominado “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” en los motores de los grupos generadores de la planta de procesos en Codelco División Andina.

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad es un método desarrollado a comienzos de los años 60 en la industria aeronáutica para mejorar las técnicas de mantenimiento, ya sea preventivo, predictivo o correctivo.

Éste método es bastante sencillo y se enfoca en aplicar una táctica de mantenimiento a un modo de falla específico.

Para el desarrollo de ésta tésis se trabajó desde el 1 de Marzo hasta el 31 de Septiembre del año 2005 en División Andina de Codelco. Allí se realizaron las reuniones y las visitas a terreno para finalmente llegar al análisis RCM.

Antes de realizar el análisis se describe el proceso RCM paso a paso con toda la teoría necesaria para una correcta aplicación.

Este trabajo describe el motor Detroit Diesel 16V-149TI y lo divide en subsistemas para así poder describir individualmente la falla de cada uno de ellos y cómo afecta al motor.

Finalmente se entrega el análisis RCM, el cuál al terminar la práctica-tesis en la división será incluido en el Software RCM Toolkit, el cuál administra todos los análisis RCM que se han desarrollado en Codelco División Andina.

Summary

This thesis applies a plan of maintenance so called “Reliability Centered Maintenance on engines of the generating groups of the process plant on Division Codelco Andina”.

The reliability centered maintenance RCM is a skill developed in the 60s in the aeronautics industry to improve the skills of maintenance, be already preventive, predictive or corrective.

It is technical is quite simple and it focuses in applying a skill of maintenance to a specific way of flow.

For the development of this thesis was worked from March1 until September 31, 2005 at División Codelco Andina. Where the visits and meetings were realized to area finally to come to the analysis RCM.

Before realizing the analysis, the process RCM it’s described step by step with the whole theory necessary for a correct aplication.

This work describes the engine Detroit Diesel 16V-149TI and it divides in subsystems to show individually the flaw of each of them and how fond engine.

Finally there is delivered the analysis RCM, wich, on finished the practice in the divition, will be included in the software RCM Toolkit, it administers all the analysis RCM that have developed in the divition Codelco Andina.

Introducción

En un ambiente tan competitivo como en el que se desenvuelven hoy las empresas, el conocimiento de las últimas técnicas de gestión del mantenimiento siempre constituyen un camino adecuado para alcanzar una mejora en la eficiencia y en la productividad.

Las transformaciones tecnológicas de los procesos productivos han cambiando radicalmente, las estructuras de costos operativos de las empresas industriales, observándose una mayor incidencia económica en la función mantención por la mayor cantidad y calidad del personal empleado, y por el tipo de organización y técnicas utilizadas.

La aplicación del modelo de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM, por sus siglas en Inglés, (RCM: Reliability Centered maintenance) es una técnica que tiene sus orígenes a fines de los años 60’ y ha dado muy buenos resultados en el manejo de activos.

Los beneficios de esta aplicación se verán reflejados en la gestión del mantenimiento de la Gerencia de Plantas, como de la Gerencia de Servicios y Suministros, al realizar una gestión en RCM en los Motores Detroit 16V-149TI para que posteriormente se puedan tomar decisiones con una mayor cantidad de información, lo que permitirá que las acciones esta sea aún más acertada.

La motivación central del desarrollo de esta tesis se basa en que son equipos de alta criticidad, y la pérdida de sus funciones durante una situación de emergencia eléctrica causaría serios problemas en los servicios básicos eléctricos en el sector industrial y una detención en los equipos críticos que intervienen en el proceso.

Objetivo General

Elaborar un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM para aumentar la disponibilidad de los motores Detroit Diesel 16V-149TI, de la sala de generación de emergencia en Codelco División Andina.

Objetivos específicos

- Comprender el proceso productivo de División Andina.

- Identificar el equipo y los sistemas que lo componen.

- Comprender y aplicar el método RCM en el Motor Detroit Diesel 16V-149TI, definiendo funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos de las fallas y asignándole a cada una su tarea proactiva adecuada, todo esto dentro del contexto operacional del equipo.

- Desarrollar un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en los Motores Detroit 16V-149TI, el que incluye: la Hoja de Información, Hoja de Decisión y Hoja de trabajo de RCM.

Metodología de trabajo

La metodología de trabajo empleada para el desarrollo de esta tesis, tuvo su base en el objetivo general y específicos, procediendo ordenadamente en cada etapa de este trabajo, lo cuál sucedió de la siguiente forma:

- Se comprendió el proceso productivo de División Andina; desde la etapa de extracción del mineral en las minas subterránea y a rajo abierto; el proceso de chancado; grueso y fino; los tipos de molienda: unitaria, convencional y SAG; la etapa de flotación colectiva; el tratamiento de aguas y la obtención del concentrado de cobre y molibdeno.

- Mediante el manual técnico del Motor Detroit Diesel 16V-149TI y visitas a terreno, se estudia el funcionamiento del motor, los sistemas que lo componen y sus componentes individuales principales. Se reconocen las funciones de cada sistema, junto a parámetros de funcionamiento, comparándolos y adecuándolos a las condiciones de operación de los motores en División Andina.

- Mediante bibliografía se estudia y comprende la teoría del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM.

- Junto al grupo de análisis, manuales técnicos, informes técnicos y literatura asociada, se establecen las funciones del equipo, sus fallas, modos de falla, sus efectos de las fallas y sus posibles tareas propuestas; y se elabora el plan de mantenimiento que incluye: las Hojas de Información, de Decisión y de Trabajo de RCM.

CAPÍTULO I

CORPORACIÓN DEL COBRE CODELCO

1.1 Historia

La historia de Codelco comienza con la promulgación de la reforma constitucional que nacionalizó el cobre el 11 de Julio de 1971. La creación de la Corporación Nacional del Cobre de Chile fue formalizada por decreto el 1 de Abril de 1976.

La “chilenización del cobre”, iniciada en 1966, partió con la aprobación por parte del Congreso de la Ley 16.425 que determinaba la creación de sociedades mixtas con las empresas extranjeras en las cuales el Estado tendría el 51% de la propiedad de los yacimientos.

La participación del 51% del Estado se concretó en los yacimientos más importantes: Chuquicamata, el Teniente y El Salvador. Entre los objetivos de la chilenización también se buscaba refinar todo el cobre dentro del país y aumentar la producción hasta un millón de toneladas.

El escenario de la industria cambió radicalmente en Julio de 1971 cuando el Congreso aprobó por unanimidad el proyecto sobre Nacionalización de la Gran Minería del Cobre, promulgado en la Ley 17.450.

Los bienes y las instalaciones de estas empresas pasaron a ser propiedad del Estado de Chile, que creó sociedades colectivas para hacerse cargo de las operaciones, coordinadas por la Corporación del Cobre de aquel entonces.

Como resultado de estas atribuciones fueron dictados los decretos de Ley 1.349 y 1.350 publicados el 1 de Abril de 1976, que formalizaron la creación de una empresa minera: La Corporación Nacional del Cobre de Chile, Codelco.

Codelco Chile fue constituida como una empresa del Estado que agrupaba los yacimientos existentes en una sola Corporación, minera, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonio propio, domiciliada en el departamento de Santiago.

1.2 División Andina

El año 1955 la Compañía Cerro Corporación inició trabajos formales de reconocimiento y diseño, que culminaron en 1966 con la creación de la Compañía Minera Andina, donde el Estado poseía el 30% de la propiedad. A partir de entonces se desarrolló un proyecto de explotación subterránea con instalaciones de chancado y concentración, que se puso en marcha en 1970. En 1976 la Compañía Minera Andina se integra a Codelco con el nombre de División Andina.

Andina se ubica a 80km al noreste de Santiago de Chile, entre 3.700 y 4.200m.s.n.m., a pocos kilómetros de la ciudad de Los Andes.

Hoy en día Andina realiza la explotación de minerales en la mina Río Blanco y o Sur-Sur, produciendo unas 240.000Ton de concentrado de cobre y poco más de 2.900Ton de molibdeno al año.

1.3 Obtención del concentrado de cobre

La obtención del mineral de cobre se realiza en dos procesos: extracción y concentrado.

1.3.1 Proceso de extracción del mineral

El proceso de extracción del mineral, se realiza en tres minas: Sur-Sur, La Unión (a rajo abierto) y Río Blanco (subterránea), Fig. 1.1.

1.3.1.1 Mina Sur-Sur

Se sitúa en el naciente del valle Río Blanco, alrededor de los 4.200m.s.n.m y 2km al sur de la mina subterránea Río Blanco. Ésta mina es explotada a cielo abierto, mediante el método de extracción por bancos, que incluye los procesos de perforación, tronadura, carguío y transporte. Actualmente, esta mina aporta un 58% de la extracción de mineral en la División.

El transporte del mineral a cielo abierto se efectúa con cargadores frontales, palas hidráulicas y camiones. El mineral es así llevado hasta la mina subterránea por gravedad a través de piques de traspaso.

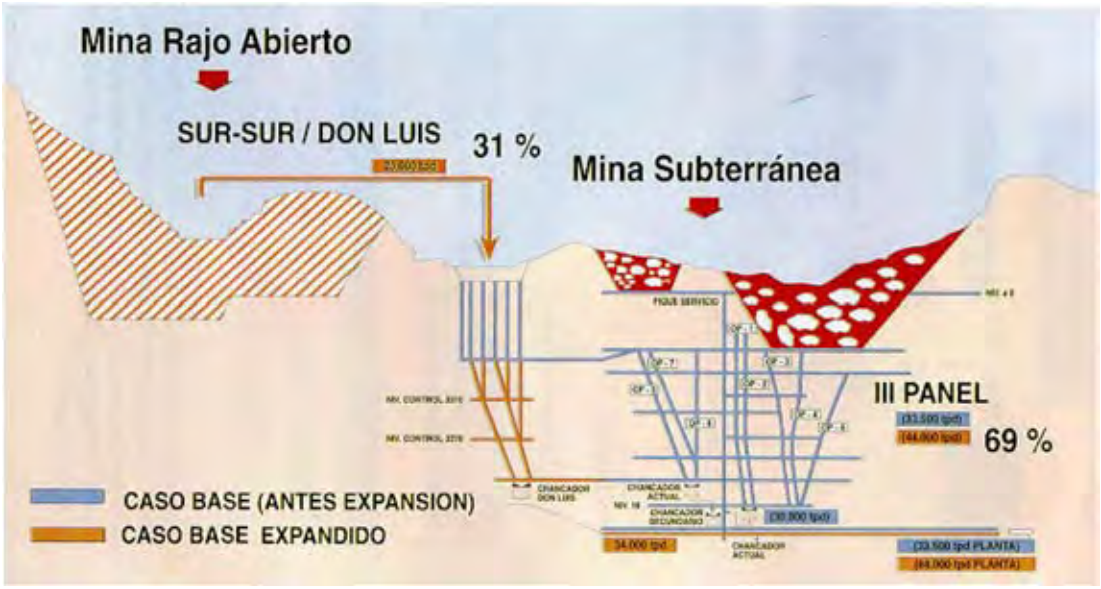


Fig. 1.1 Mina a Rajo Abierto y Subterránea.
Fuente: Gerencia de Planificación y Desarrollo, 2002

1.3.1.2 Mina La Unión

Este rajo incorporado a la producción en 1998 y ubicado a 3.200m.s.n.m. Es el sector más importantes dentro de un conjunto de pequeños cuerpos mineros que se encuentran entre la mina subterránea y el rajo Sur-Sur. Su explotación se diseñó inicialmente como un cuerpo de alta ley y, posteriormente, su atractivo se incrementó debido al reducido transporte de mineral que implicaba.

1.3.1.3 Mina Río Blanco

La explotación de la mina subterránea Río Blanco se efectúa mediante el método de hundimiento de bloques o block caving con las variantes de extracción por parrillas y extracción mecanizada. El transporte de mineral a piques de traspaso se realiza por medio de correas. En el proceso también se utilizan cargadores y camiones de bajo perfil.

1.3.2 Proceso de concentrado del mineral

El mineral que se encuentra en el yacimiento de Río Blanco está compuesto en su mayoría por Calcopirita (Cu Fe S_2) en aproximadamente un 80%. Este mineral se encuentra muy diseminado en la roca, lo que es característico de los yacimientos porfíricos y su ley de explotación es en la actualidad de entre un 1,10-1,20 % de Cu y de 0,018-0,024 % de Mo.

La fig. 1.2 muestra un diagrama esquemático del proceso del concentrado del mineral de cobre y molibdeno.

Los procesos de chancado, concentración y flotación del mineral se realizan en instalaciones subterráneas básicamente por las condiciones climáticas del lugar, y consta de las siguientes etapas:

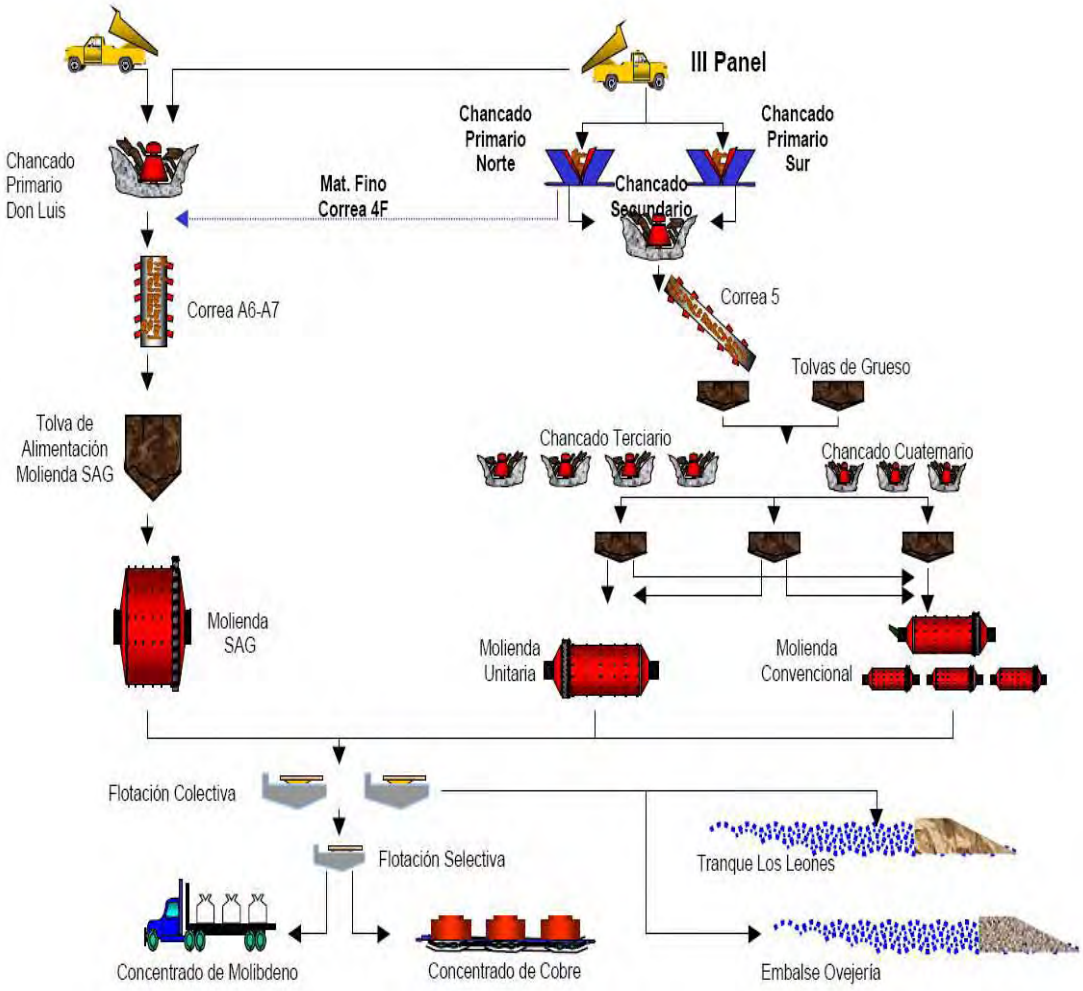


Fig. 1.2 Proceso del concentrado de cobre y molibdeno
Fuente: Gerencia de Planificación y Desarrollo, 2002.

1.3.2.1 Etapa de Chancado

1.3.2.1.1 Chancado Grueso

La etapa de chancado grueso se realiza en tres plantas conocidas como Chancado Primario Don Luís, Primario Sur y Primario Norte (Anexos 1.1 y 1.2), donde el mineral llega a este lugar proveniente tanto del área subterránea como del rajo abierto. En este punto se efectúan las dos primeras etapas de la reducción de tamaño del mineral, siendo reducido de tamaño entre ø6 ½" o ø7 ½" mediante el uso de chancadoras de mandíbula, en una fase primaria, y de cono en una fase secundaria, todas las líneas están conectadas por correas transportadoras con una capacidad de proceso alrededor de 35.000 toneladas por día.

1.3.2.1.2 Chancado Fino

La etapa de chancado fino se realiza en una planta llamada terciario (Anexo 1.3), en donde el mineral grueso es almacenado en dos tolvas, las cuáles alimentan cuatro secciones similares de chancado terciario. Luego el material pasa por unos chancadores de cono que realizan el chancado cuaternario y se clasifica mediante harnero, donde el fino es depositado en las tolvas que alimentan la molienda húmeda, el sobretamaño es chancado y clasificado nuevamente. En esta etapa se logra una granulometría del material menor de ø½" a ø1".

1.3.2.2 Etapa de Molienda

La etapa de molienda se realiza en tres plantas:

1.3.2.2.1 Planta convencional

En esta planta (Anexo 1.4), el mineral es almacenado en las tolvas de fino las cuales alimentan a tres Molinos de Barra y cada uno de éstos

deposita su pulpa con un 81% de sólido a tres Molinos de Bolas. El objetivo de este proceso es lograr una granulometría que permita la liberación de las partículas mineralizadas. La molienda que se desarrolla en los molinos de ésta planta es húmeda. Luego la pulpa es clasificada para ser enviada a flotación colectiva y el sobre tamaño es devuelto a los Molinos de Bolas.

1.3.2.2.2 Planta unitaria

La planta unitaria (Anexo 1.5), es equivalente a un Molino de Barras con sus tres Molinos de Bolas, que significa alrededor de 8.000 toneladas diarias. Esta planta está compuesta por un Molino de Bolas, el cuál tiene su propia cubeta para descargar la pulpa, posteriormente el material es clasificado para ser enviado a flotación colectiva, el sobretamaño es devuelto al Molino Unitario.

1.3.2.2.3 Planta SAG

La planta SAG (Anexo 1.6), recibe el mineral del Chancado Primario Don Luís, por medio de tolvas de acopio y correas transportadoras. Esta planta está compuesta principalmente por un Molino SAG y dos Molinos de Bolas. En la descarga del molino SAG existe un harnero que clasifica el mineral destinándolo según su tamaño a una etapa de chancado o a los Molinos de Bolas, o directamente a flotación. La producción de ésta planta es de alrededor de 64.000Ton diarias.

1.3.2.3 Etapa de flotación

En esta etapa la pulpa de mineral llega a una planta llamada de flotación colectiva (Anexo 1.7), la cuál está compuesta por 8 celdas de flotación de 3.800ft^3 y por un proceso de remolienda. La idea es realizar flotaciones sucesivas, limpiezas, remolienda y barridos (Anexos 1.8, 1.9 y 1.10), a fin de

separar el cobre y el molibdeno del resto del material, el mineral que tenía inicialmente una ley de 1% a 1,2% de Cu y de 0,026% a 0,028 % de Mo, queda en una ley promedio de un 28% de Cu y 0,48% de Mo. Para conseguir la separación del mineral es necesario agregar elementos que reaccionen con el mineral como cal, espumante y aceite de pino. El proceso es simple, ya que se procede a flotar las partículas de Cu junto con otras, mediante sopladores de aire que producen las burbujas que captan las partículas, éstas son enviadas a un espesador de concentrado y trasladado por medio de cañerías a la planta de filtro, el residuo de éste proceso es enviado a la planta de tratamiento de aguas.

1.3.2.4 Etapa de Tratamiento de aguas

El residuo, que constituye un 96,5% del mineral tratado, es enviado a embalses de relaves (Leones, Ovejería) para realizar su decantación, luego del proceso de recuperación de agua en los espesadores de mineral (Anexo 1.11). Estos depósitos tienen como finalidad, eliminar al máximo el material existente en el agua para así cumplir con su compromiso con el medio ambiente.

1.3.2.5 Etapa de Obtención de molibdeno

En esta etapa se obtiene el principal subproducto de la División Andina, para esto el cobre es separado del molibdeno, con la incorporación de Sulfhidrato de Sodio (Na Hs), donde a través de sucesivas flotaciones, limpiezas y remoliendas se obtiene un producto con 50% de Mo y de 2% a 3% de Cu.

1.3.2.6 Etapa de Filtros

El concentrado final de cobre proveniente de la Planta de Molibdenita, el cuál es procesado en filtros de aire, y posteriormente secado en un Horno Giratorio, de tal forma que la humedad no supere el 9% en el caso del concentrado de Cu, el que tiene una concentración que alcanza al 28% de Cu y 0.55 de Mo como producto final.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y SUS SISTEMAS

2.1 Motor Detroit Diesel 16V-149TI

El motor Detroit de la serie 149, es un motor de 2 tiempos de 16 cilindros en V, separados en dos bloques de 8 cilindros cada uno. Su función es producir la potencia necesaria para accionar un generador que abastecerá de energía eléctrica a los equipos críticos en la planta de procesos en situaciones de emergencia eléctrica y cogenerará en los períodos de horas de punta durante los meses de invierno (Gerencia de Planificación y Desarrollo, 2003). La fig. 2.1 muestra la configuración del equipo.

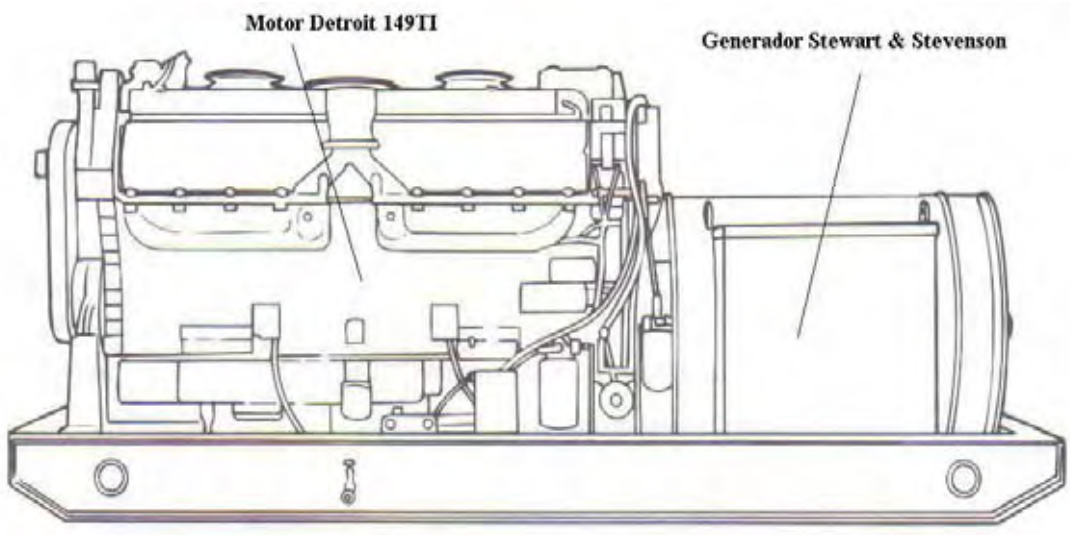


Fig. 2.1 Configuración Grupo Generador.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.1.1 Bloque de Cilindros

El bloque de cilindros sirve como estructura principal del motor. En el están insertos los diferentes sistemas y sus piezas. La fig. 2.2 muestra un boque de cilindros con sus galerías y perforaciones principales.

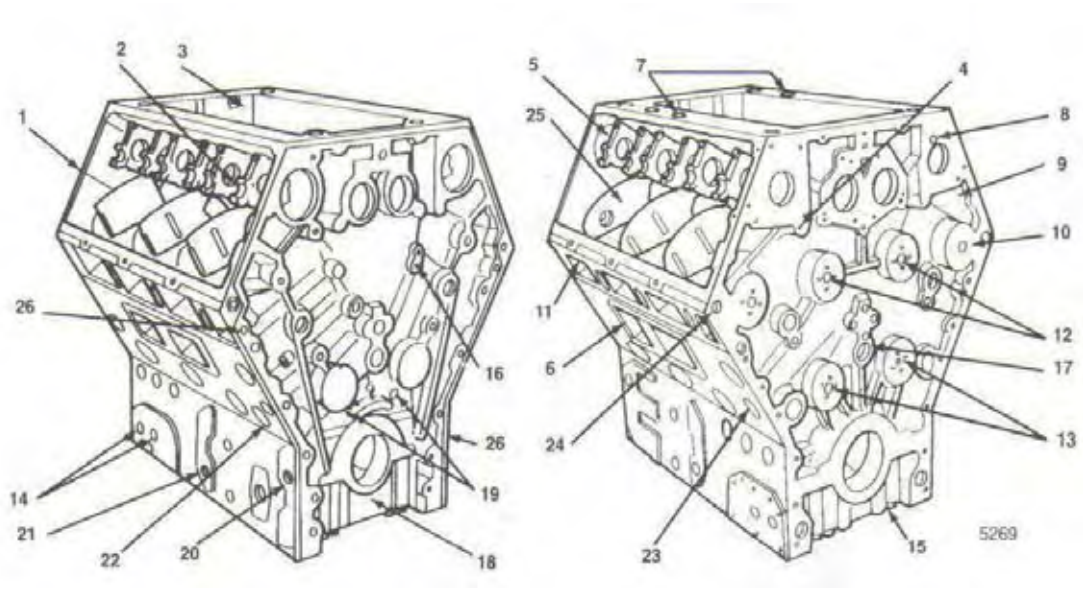


Fig. 2.2 Bloque de cilindros Motor Detroit Serie 149TI
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

1. Bloque de cilindros.
2. Orificio de abastecimiento del aceite del árbol de levas.
3. Cámara de aire.
4. Perforaciones del tubo respirador del cárter del cigüeñal.
5. Galerías superiores de aceite.
6. Tapa de cojinetes de árbol de levas.
7. Orificios de inspección de la cámara de aire.
8. Orificios superiores de paso del agua.
9. Abastecimiento de aceite del engranaje del árbol de levas.
10. Orificio de drenaje del aceite.
11. Abastecimiento de aceite del engranaje intermedio superior.
12. Lumbreras de escape.
13. Abastecimiento de aceite del engranaje intermedio superior.
14. Abastecimiento de aceite del engranaje intermedio inferior.
15. Orificios de abastecimiento del filtro de aceite.
16. Tapa de cojinetes de bancada posterior.

17. Orificio transversal del orificio de abastecimiento del aceite del soplador.
18. Drenaje del aceite del soplador.
19. Galería principal de aceite.
20. Tapa del cojinete de bancada delantero.
21. Orificios de respiración del cárter del cigüeñal.
22. Retorno del aceite del enfriador.
23. Abastecimiento del aceite enfriador.
24. Abastecimiento del aceite del turboalimentador.
25. Drenaje de la cámara de aire.
26. Orificio del agua de enfriamiento de la lumbrera de escape.
27. Cavidad del cilindro.
28. Ranura para el sello de aceite (posterior solamente).

2.2 Descripción de los sistemas del motor

2.2.1 Sistema de Combustible

El conjunto del sistema de combustible, fig. 2.3, es el encargado de suministrar la cantidad adecuada de combustible en la cámara de combustión desde el depósito del mismo. Los elementos principales son: los inyectores, múltiples, bomba, filtros, caja de derivación y tubería necesaria.

En el sistema de combustible se usa un filtro separador de combustible/agua, o filtro racor y un filtro para remover impurezas del combustible.

2.2.1.1 Funcionamiento

El combustible es aspirado del tanque de combustible a través de un filtro y entra a la bomba de combustible, fig. 2.4, por el lado de succión. Al salir de la bomba bajo presión, el combustible es forzado a través de los filtros. De los filtros, el combustible es dirigido a una caja de empalme, de donde es redirigido entonces a los múltiples de combustible de admisión de los inyectores de cada lado del motor. De los múltiples de combustible, éste llega

al inyector, fig. 2.5, por medio de un tubo de entrada del combustible. El combustible excedente regresa por el lado de salida de los inyectores a través de los tubos de salida al múltiple de retorno del combustible. El combustible de retorno pasa entonces por la caja de empalme y regresa al tanque de combustible, fig. 2.3.

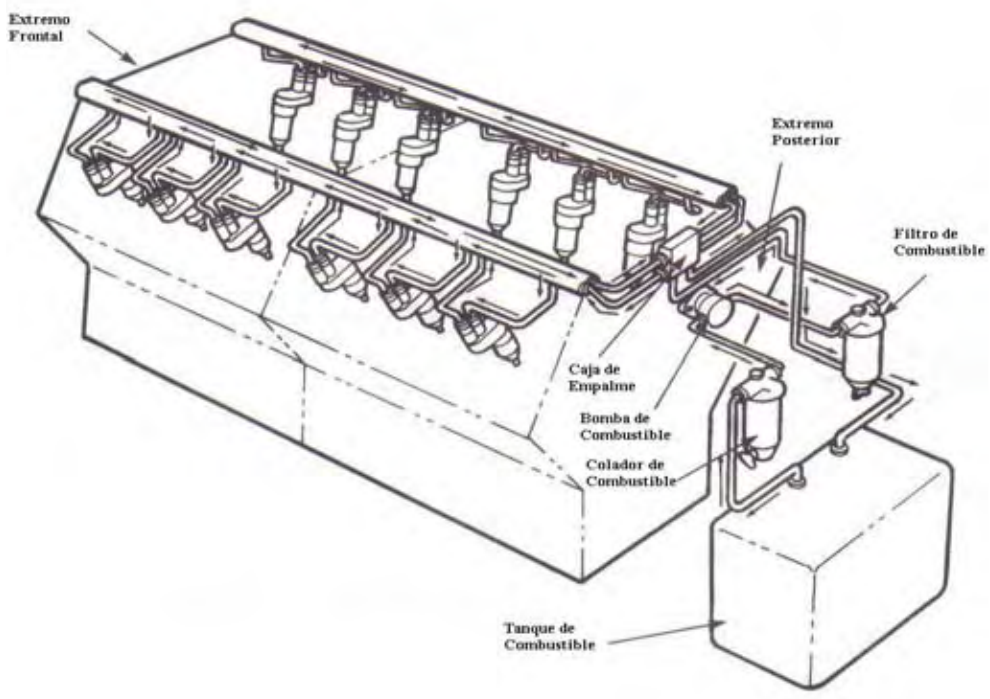


Fig. 2.3 Diagrama Esquemático del Sistema de Combustible.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

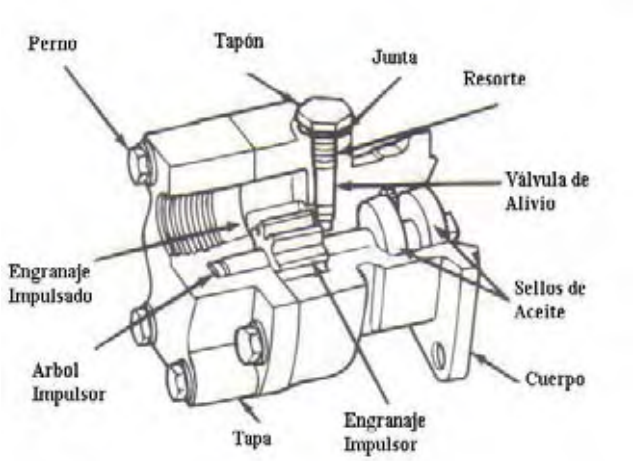


Fig. 2.4 Bomba de Combustible.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

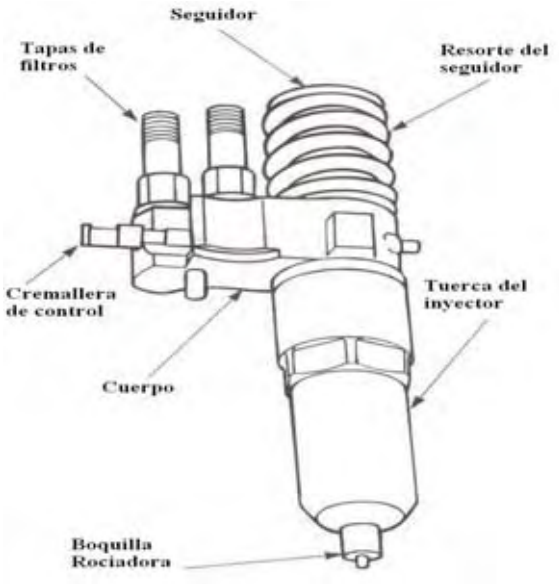


Fig. 2.5 Cuerpo del inyector de combustible.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.2.2 Sistema de Lubricación

El sistema de lubricación de un motor, fig. 2.6, lubrica y al mismo tiempo sirve de refrigerante de los elementos de un motor. El sistema de lubricación consiste de la bomba de aceite, el enfriador de aceite, filtros de aceite, válvulas de derivación en el enfriador de aceite y válvulas reguladoras de la presión en la bomba del aceite lubricante y en las canalizaciones principales del aceite del bloque de cilindros.

2.2.2.1 Funcionamiento

En el funcionamiento de éste sistema el aceite es aspirado desde el cárter a través del tamiz de admisión y dirigido a la bomba del aceite donde es sometido a presión, fig. 2.7. El aceite luego pasa a una galería corta en el bloque de cilindros y después a los filtros de aceite. Al mismo tiempo el aceite se dirige de la bomba a una válvula resorte de alivio de la presión montada en la bomba de aceite. Esta válvula descarga el exceso de aceite cuando la presión de la bomba excede los 100 psi (Detroit Diesel Serie 149TI, 1993). Del filtro de aceite, éste regresa al bloque de cilindros donde un pasaje lo lleva al

enfriador de aceite, fig. 2.8. Luego este es redirigido a un pasaje perforado verticalmente en el bloque de cilindros a la galería principal de aceite.

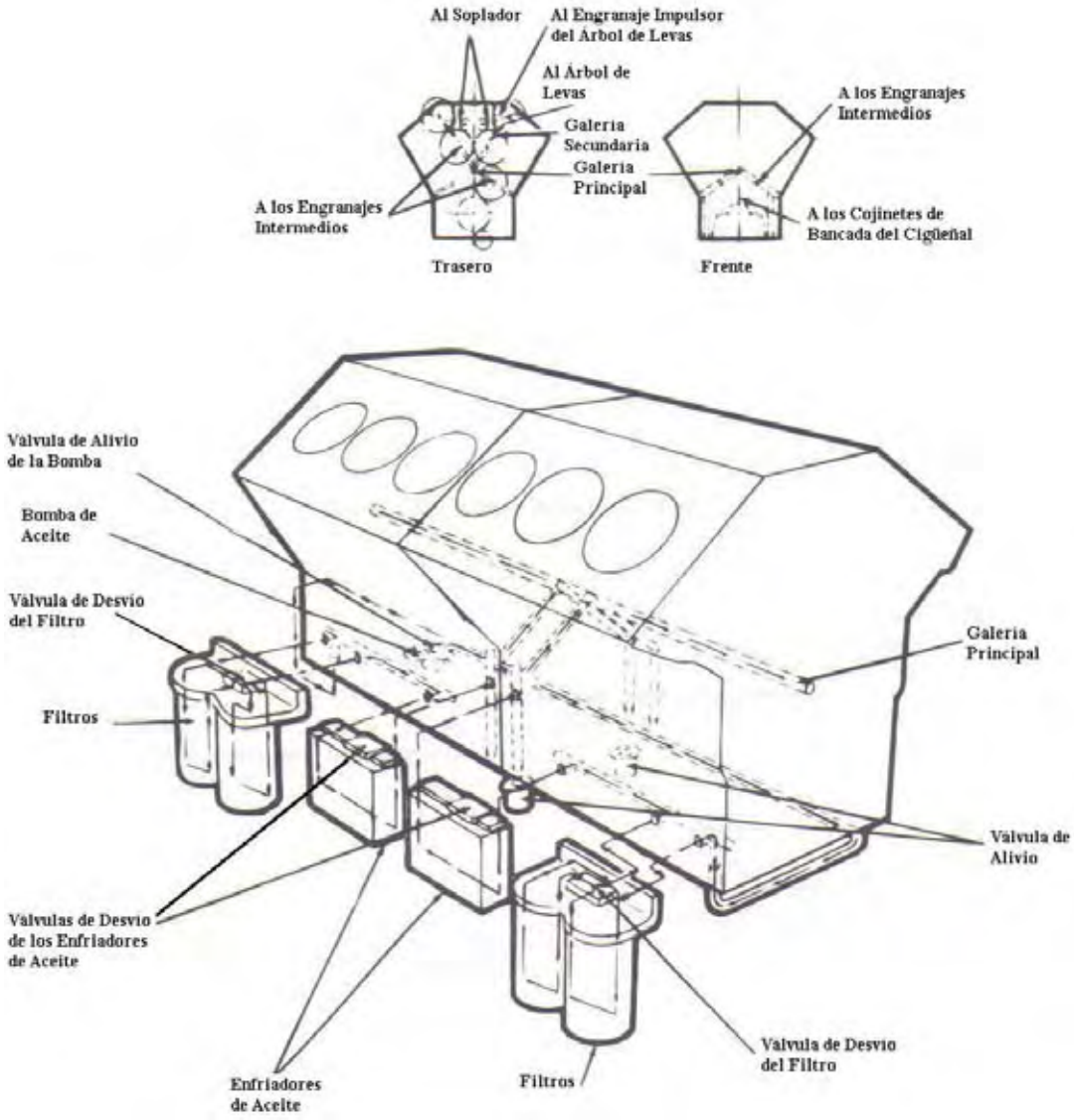


Fig. 2.6 Diagrama esquemático del sistema de lubricación.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

La presión del aceite lubricante se mantiene estabilizada dentro del motor a todas las velocidades, no importa cuál sea la temperatura del aceite, por dos válvulas de regulación de presión situadas a los extremos de las galerías verticales del aceite conectadas a la galería principal. Cuando la

presión del aceite en la válvula excede 50 psi, la válvula de regulación se abre, descargando el exceso de aceite en el cárter.

De la galería principal el aceite fluye bajo presión por un pasaje perforado en cada cojinete de bancada y a través de un pasaje perforado en el cigüeñal pasa a los cojinetes de las bielas, el aceite se dirige a los pasajes perforados con estrías en las bielas al pasador del pistón y a través del pasador del pistón y del portador, rociando por debajo de la cúpula del pistón. El aceite drenado de la cúpula del pistón es salpicado de un lado a otro entre la falda del pistón y la pared del portador, pero una porción de aceite regresa al cárter del cigüeñal a través de dos orificios cerca del fondo del portador.

La lubricación es suministrada bajo presión desde la galería principal del aceite a cada cojinete del árbol de levas por pasajes perforados en el bloque de cilindros. De ahí el aceite pasa por orificios diagonales del árbol de levas y se dirige por el pasaje longitudinal del árbol de levas perforado con estrías para lubricar los acoplamientos y los ejes impulsores a los extremos traseros de cada árbol de levas.

El mecanismo de funcionamiento de las válvulas de escape e inyectores recibe su lubricación de las tapas de los cojinetes del árbol de levas. El aceite lubricante entra al eje del balancín a través de pasajes perforados en las tapas de los cojinetes. De allí el aceite sigue por el eje perforado a cada balancín donde entra en un pasaje perforado que va al tornillo de ajuste de la válvula. El aceite lubricante luego es dirigido a través de otro pasaje perforado en el tornillo de ajuste de la válvula, donde lubrica las superficies de fricción entre la base del tornillo de ajuste y el botón de la válvula.

La superficie de contacto entre los lóbulos del árbol de levas y los rodillos de los balancines es lubricada por surtidores labrados en las tapas de los cojinetes los cuáles rocían el aceite en los rodillos.

El exceso de aceite de los balancines lubrica los vástagos de la válvula de escape.

El tren de engranajes es lubricado por el aceite que viene de los pasajes perforados longitudinalmente en los cubos del árbol de levas, los

pernos de retención central del engranaje intermedio y por salpicadura de aceite al cárter. Cierta cantidad de aceite proveniente del cojinete impulsor del soplador y de los cojinetes del engranaje intermedio también se derrama en el compartimiento del tren de engranajes. Los cojinetes del engranaje intermedio son lubricados por aceite proveniente directamente de la galería de aceite del bloque de cilindros.

Los engranajes del árbol de levas y los engranajes intermedios (tren de engranajes delantero y trasero) están lubricados bajo presión por aceite que viene de la galería de aceite del bloque de cilindros. El aceite que entra a un pasaje perforado longitudinalmente en el perno de retención central del cubo de ambos engranajes intermedios del tren trasero y delantero. Hay un orificio perforado en el costado del perno central que permite que el aceite fluya a través de un pasaje perforado transversalmente en los cubos intermedios donde es circulado alrededor de los cojinetes de rodillos del tren de engranajes trasero y bujes del tren de engranajes delantero.

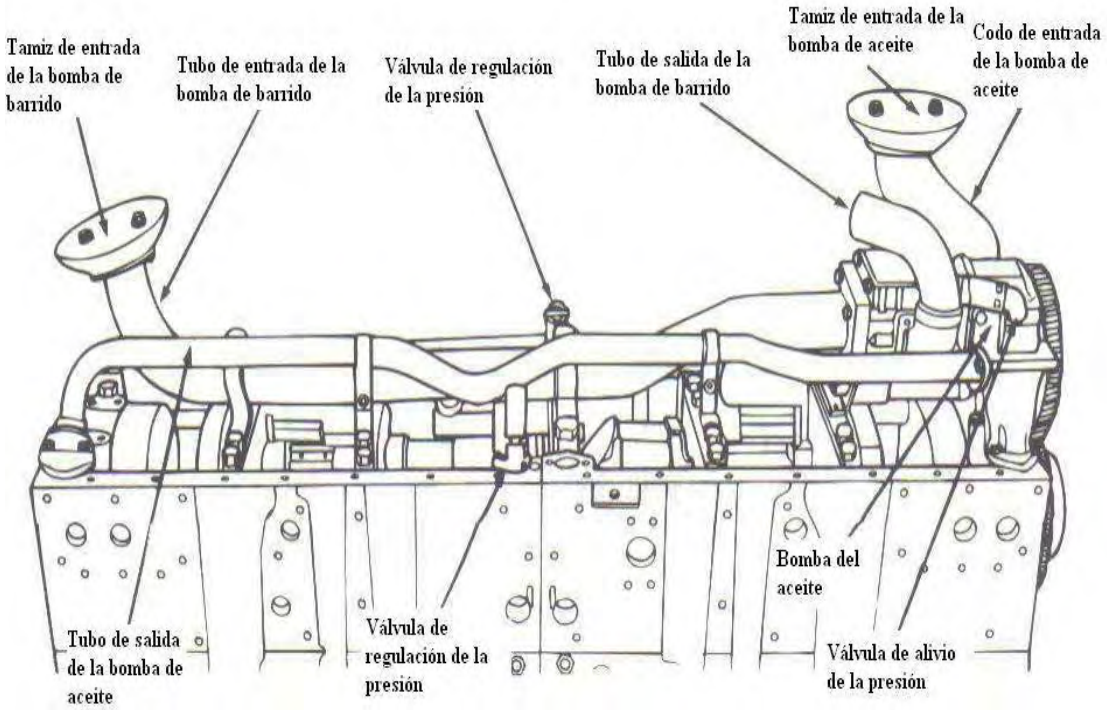


Fig. 2.7 Montaje de la bomba de aceite lubricante.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

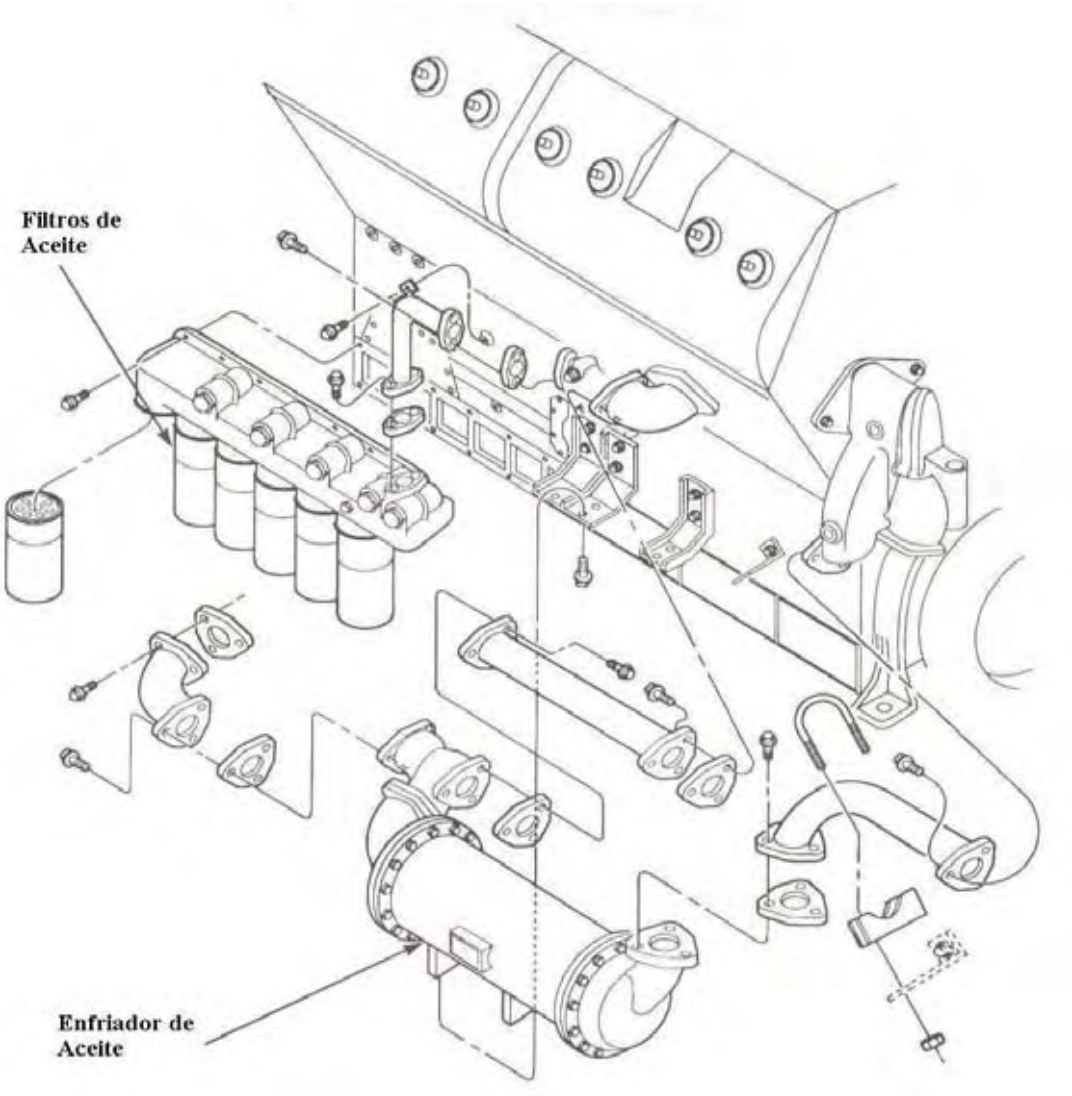


Fig. 2.8 Montaje del enfriador de aceite.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.2.3 Sistema de Admisión de Aire

El conjunto del sistema de admisión de aire es el encargado de suministrar el aire fresco necesario para una combustión eficiente, y barrer todos los gases quemados del interior de los cilindros.

El sistema de admisión de aire consta principalmente de dos elementos: el soplador o blower y el turboalimentador.

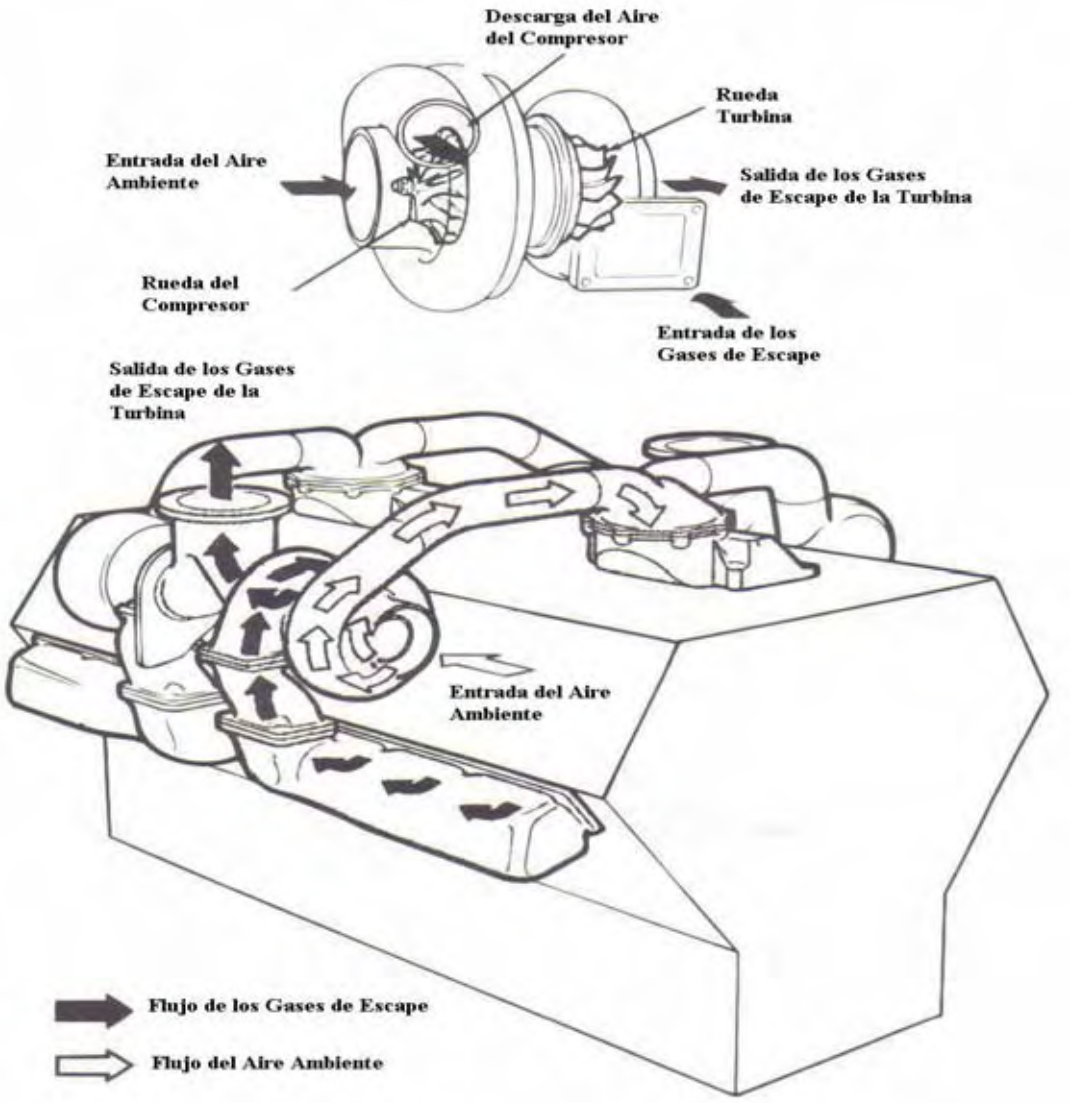


Fig. 2.9 Diagrama esquemático del flujo de aire.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.2.3.1 Funcionamiento

En el sistema de admisión de aire, fig. 2.9, se fuerza una carga de aire desde el exterior a través de un turboalimentador, fig. 2.10, que lo comprime y lo entrega a un depurador de aire, donde es tomado por los lóbulos del rotor del soplador o blower donde nuevamente es comprimido y llevado al lado de descarga de éste mismo según lo indica la fig. 2.11.

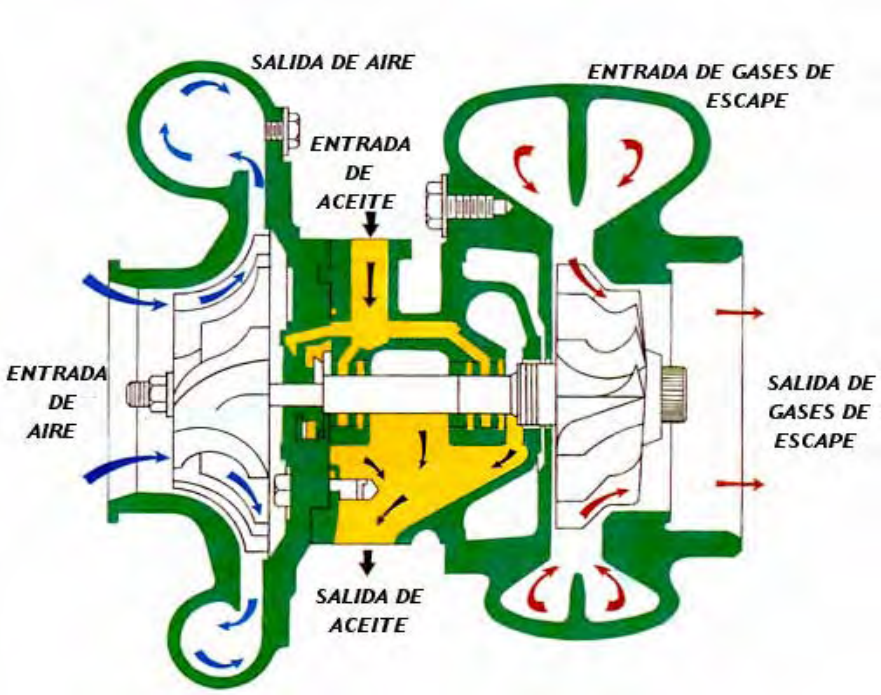


Fig. 2.10 Corte transversal del conjunto Turboalimentador.
Fuente: Detroit Diesel, 1993.

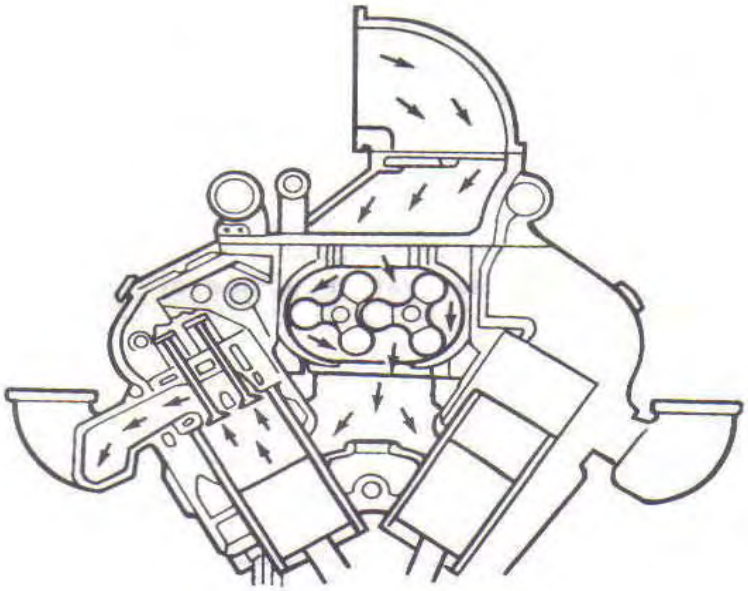


Fig. 2.11 Flujo del aire a través del soplador y del motor.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

El Turboalimentador está montado en la brida de salida de escape del múltiple de escape del motor. Después de haber arrancado el motor, los gases de escape que fluyen del motor y pasan por la caja de la turbina hacen girar la rueda y el eje de la turbina. La rueda del compresor, la cuál está montada en el extremo opuesto del eje de la rueda de la turbina, gira con la rueda de la turbina. La rueda del compresor aspira el aire ambiente a la caja del compresor, comprime el aire y lo entrega al soplador del motor

La carga continua de aire fresco del soplador entra a la cámara de aire del bloque de cilindros y barre pasando por los orificios de admisión de las camisas de los cilindros (lumbreras).

El ángulo de las lumbreras crea un movimiento uniforme de remolino en el aire de admisión a medida que entra en los cilindros. Este movimiento persiste durante la carrera de compresión y facilita el barrido y la combustión.

Durante la operación el turboalimentador obedece las demandas de carga del motor reaccionando al flujo de los gases de escape del motor. A medida que aumenta la potencia del motor, aumenta el flujo de gases de escape y la velocidad y el rendimiento del conjunto giratorio aumenta proporcionalmente, haciendo ingresar mas aire al motor.

2.2.4 Sistema de Enfriamiento

Para la refrigeración del motor se utiliza agua industrial desde una toma en un embalse, con una temperatura promedio de 10°C (TermoTrane Integral Solutions, 2004). El agua refrigerante que circula dentro del motor utiliza un anticongelante, es impulsada mediante una bomba centrífuga y transfiere su energía calórica al agua industrial dentro de un intercambiador de calor.

Los elementos principales de este sistema son: bomba de agua, termostatos, múltiples de agua e intercambiador de calor.

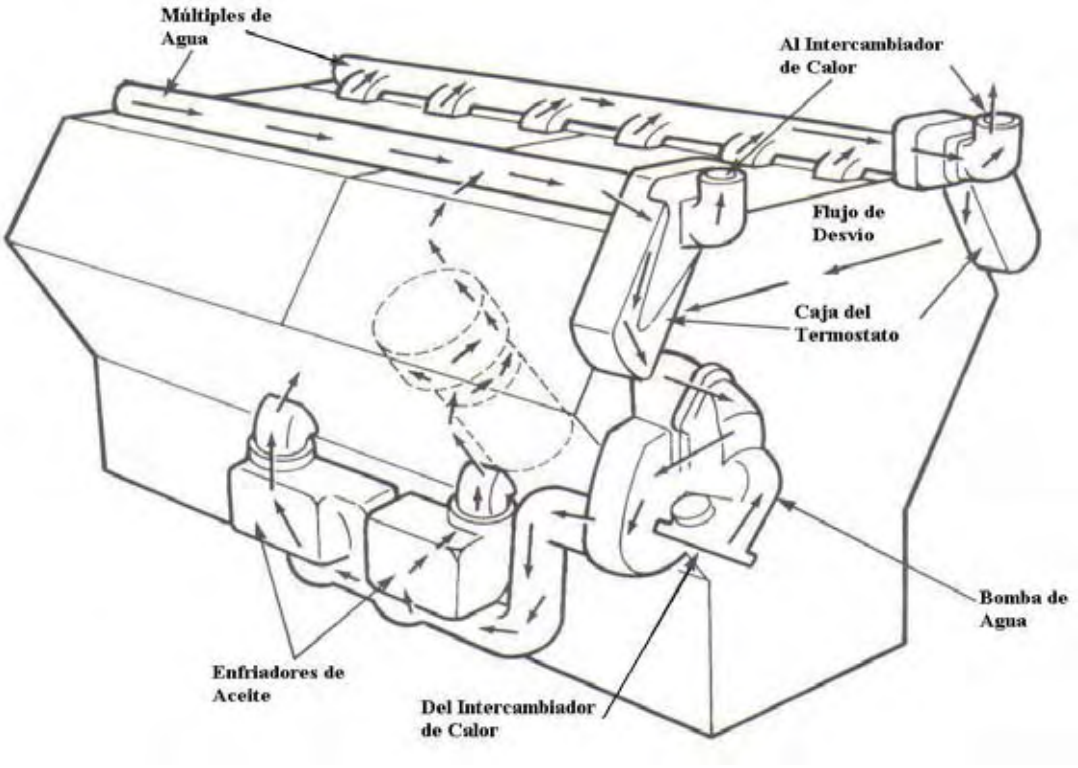


Fig. 2.12 Diagrama Esquemático del Sistema de Enfriamiento
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

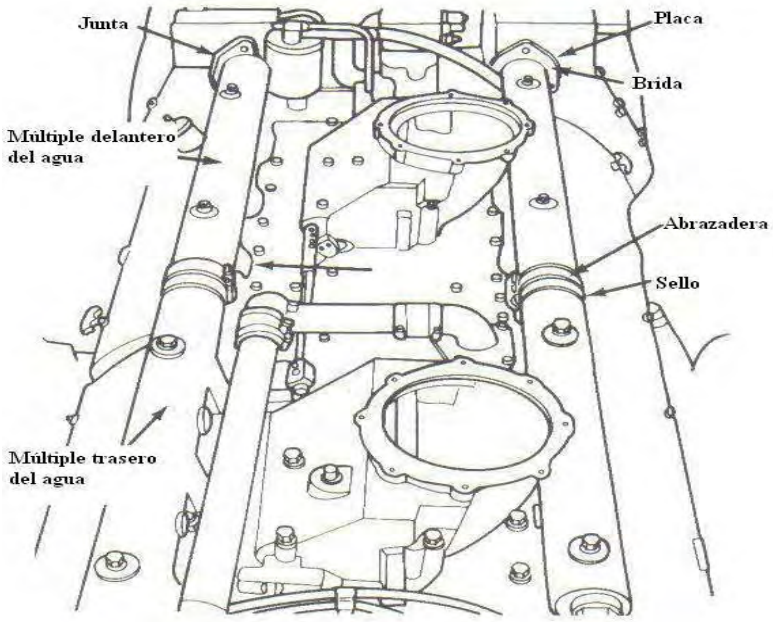


Fig. 2.13 Montaje del múltiple de agua.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.2.4.1 Funcionamiento

El refrigerante es sacado por medio de la bomba de agua fresca del intercambiador de calor y es forzado a través del enfriador del aceite del motor, el bloque de cilindros, las culatas, el múltiple de escape y los múltiples de agua a las cajas del termostato, fig. 2.13. Una conexión de desvío desde las cajas del termostato al lado de la entrada de la bomba de agua permite la circulación del refrigerante por el motor mientras que los termostatos están cerrados. Cuando se abren los termostatos, el refrigerante puede fluir por el intercambiador de calor y luego, después de haber sido refrigerado, a la bomba de agua fresca del motor para su recirculación, fig. 2.12.

A temperaturas del agua aproximadamente de menos de 77ºC, las válvulas del termostato permanecen cerradas, bloqueando el flujo del refrigerante por el intercambiador de calor. El refrigerante luego se desvía y no pasa por el intercambiador de calor y fluye regresando por la bomba del agua al enfriador de aceite, el bloque de cilindros, las culatas y otra vez por las cajas de los termostatos. A medida que la temperatura del refrigerante sube a más de 77ºC, las válvulas de los termostatos comienzan a abrirse, permitiendo que algo de refrigerante pase hacia abajo por el intercambiador de calor donde se enfría el refrigerante y luego es circulado por la bomba de agua al motor. A medida que a temperatura sigue subiendo, esto permite que más refrigerante pase por el termostato. Cuando la temperatura lega a aproximadamente a los 85ºC, las válvulas de los termostatos están completamente abiertas, dejando que la mayor parte del refrigerante circule por el intercambiador de calor, y de este modo regulen la temperatura del refrigerante.

Después de cumplir la función de disminuir la temperatura al agua refrigerante, el agua industrial es desechada.

2.2.5 Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico de un motor 16V-149TI consiste principalmente de un motor de arranque, un alternador de carga de baterías y baterías.

La batería de plomo y ácido es un dispositivo electroquímico para la conversión de energía química en eléctrica. Las funciones de la batería son: es la fuente de electricidad para arrancar el motor; sirve para estabilizar el voltaje del sistema eléctrico y puede por tiempo limitado, suplir corriente cuando los requerimientos eléctricos excedan la capacidad del generador.

Hay dos motores de arranque fig. 2.14, montados en el cárter del volante. Al cerrarse el circuito de partida, un piñón impulsor en el eje del inducido de cada motor de arranque engrana con los dientes de la corona del volante del motor para girar el cigüeñal. Cuando el motor arranca, es necesario desengranar los piñones impulsores; con ayuda de un embrague; y así evitar la velocidad excesiva del inducido y el daño a los motores de arranque.

El alternador está incluido en el sistema eléctrico como fuente de corriente eléctrica para mantener la carga de la batería y suplir corriente suficiente para los demás requerimientos eléctricos, que no excedan la capacidad determinada del generador.

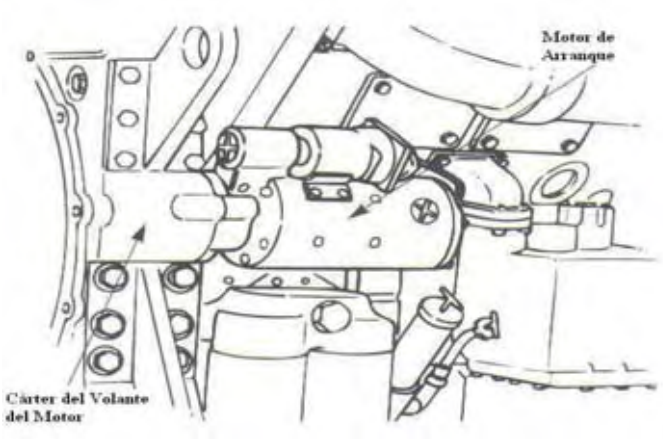


Fig. 2.14 Montaje del motor de arranque.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.2.6 Sistema de Escape

El sistema de escape de un motor es el encargado de conducir los gases quemados producto de la combustión desde el interior de los cilindros hasta el exterior. Los gases quemados son expulsados por el pistón

en su carrera ascendente y salen a través de las válvulas de escape y de ahí al múltiple de escape. Cada cilindro tiene cuatro válvulas de escape, fig. 2.15.

A cada lado del motor se usan dos múltiples de escape. Un solo adaptador en forma de “Y” conecta los múltiples a la tubería de escape para cada banda del motor.

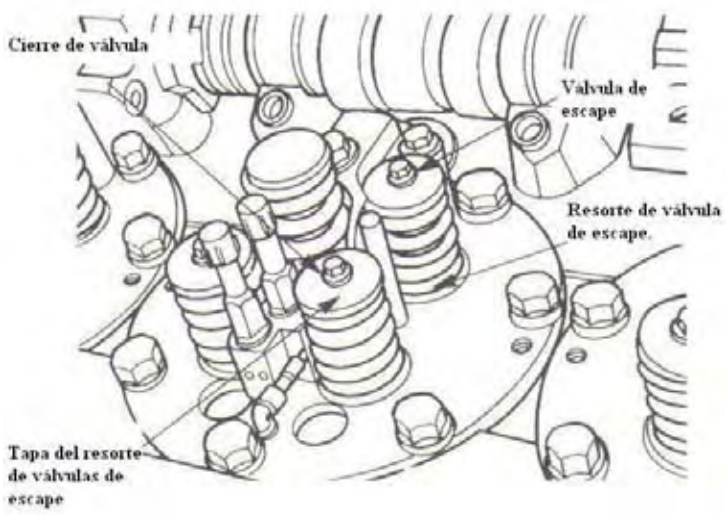


Fig. 2.15 Ubicación de las válvulas de escape.
Fuente: Detroit Diesel Serie 149TI, 1977.

2.2.7 Sistema de Protección

Los sistemas de protección del motor sirven para advertir al operador que hay condiciones anormales de funcionamiento. Los sistemas de protección los podemos dividir en dos grupos: alarma y detención.

2.2.7.1 Baja presión de aceite (alarma y detención): El primer sensor activa una alarma sonora en el tablero de control, cuando la presión del aceite baja a los 30 psi. El segundo sensor envía una señal para la detención automática del motor cuando la presión del aceite baja a los 20 psi. (Detroit Diesel Serie 149T, 1993)

2.2.7.2 Alta temperatura de refrigerante (alarma y detención): El primer sensor activa una alarma sonora cuando la temperatura excede los 105ºC y el segundo envía una señal para la detención automática del motor cuando la temperatura el refrigerante alcanza los 110ºC. Para evitar la formación de vapor, el sistema se encuentra presurizado (Detroit Diesel Serie 149T, 1993)

2.2.7.3 Velocidad excesiva del motor (alarma y detención): Se utiliza un sensor de sobrerevoluciones, el que emite una alarma y detiene el motor cuando sobrepasa los 1580 rpm (Detroit Diesel Serie 149T, 1993)

2.2.7.4 Alta presión de cárter (alarma y detención): Un sensor activa una alarma y detiene el motor cuándo la presión del cárter alcanza las 2,4”H_20 (0,01 kgf/cm²).

2.2.7.5 Alta temperatura gases de escape (alarma): A la salida de los gases de escape, después de pasar por el turboalimentador, se utilizan termocuplas para medir la temperatura de éstos. Cuando la temperatura de los gases sobrepasa los 550º C, se activa una alarma sonora. (Detroit Diesel Serie 149T, 1993)

2.2.7.6 Baja presión de combustible (alarma): Cuando la presión de combustible baja a 50 psi en el múltiple de combustible se activa una alarma sonora. (Detroit Diesel Serie 149T, 1993)

2.2.7.7 Parada de emergencia manual: Consiste en válvulas montadas en la caja de interrupción del aire, las que permiten al operador activarlas para cortar el suministro de aire y así detener el motor, cuando se suscite una condición anormal en la cuál pueda ser dañado el motor.

CAPÍTULO III

MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM

Desde el punto de vista de Ingeniería hay dos elementos que hacen al manejo de cualquier activo: debe ser mantenido y de tanto en tanto quizás también debe ser modificado. Esto sugiere que “mantenimiento” significa preservar algo y modificarlo significa cambiarlo de alguna manera. Por ello una definición de mantenimiento sería: “asegurar que los activos continúen haciendo lo que los usuarios quieren que hagan” (Moubray, Pág. 8, 1997)

Ahora los requerimientos de los usuarios van a depender de cómo y cuándo se utilice el activo (contexto operacional); esto lleva a la siguiente definición formal de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad: “proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo en su contexto operacional” (Moubray, Pág. 9 1997). A la luz de la anterior definición de mantenimiento, una definición más completa de RCM sería: “proceso utilizado para determinar que debe hacerse para asegurar que todo activo continúe haciendo lo que sus usuarios quieran que hagan en su actual contexto operacional” (Moubray, Pág. 9, 1997).

El proceso RCM formula siete preguntas acerca del activo que se va a someter al análisis RCM, fig. 3.1:

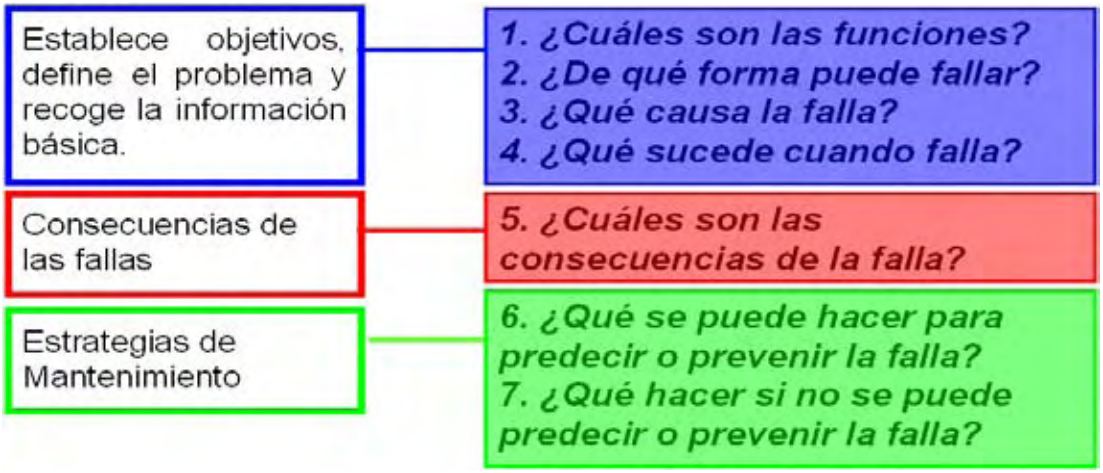


Fig. 3.1 Las 7 preguntas del RCM.
Fuente: B.S., 2002.

Para llevar a cabo lo anterior el RCM emplea técnicas de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo. Los siete puntos anteriores son detallados a continuación.

3.1 Funciones

La descripción de la función de un activo debe consistir de un verbo, un objeto y un parámetro de funcionamiento deseado, los que deben ser descritos tomando en cuenta el contexto operacional del activo.

Todo activo físico tiene más de una función, frecuentemente varias, y todas ellas deben ser identificadas junto con sus parámetros de funcionamiento específicos.

Las funciones se dividen en dos categorías principales: funciones primarias y secundarias.

3.1.1 Funciones primarias

Son la razón principal de porque es adquirido y existe el activo, por eso se debe cuidar de definirlas tan precisamente como sea posible. Las funciones primarias son fáciles de reconocer, de hecho el nombre de la mayoría de los activos físicos industriales se basa en su función primaria.

3.1.2 Funciones secundarias

Se pretende que la mayoría de los activos cumplan una o más funciones además de la primaria, las cuales se conocen como funciones secundarias.

La función o funciones secundarias son menos obvias que la principal, pero a veces requieren mayor atención y las consecuencias de falla de estas pueden ser de mayor gravedad que las primarias, por lo que deben ser claramente identificadas.

3.1.3 Parámetros de Funcionamiento

El objetivo del mantenimiento es asegurarse de que los activos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga, lo que puede definirse como parámetro mínimo de funcionamiento.

Esto significa que el funcionamiento puede ser definido de las siguientes dos formas:

- **Funcionamiento deseado** : lo que el usuario quiere que haga
- **Capacidad inicial** : lo que puede hacer

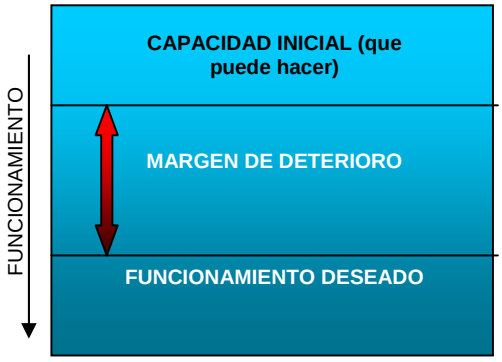


Fig. 3.2 Parámetros de funcionamiento.
Fuente: Moubray, 1997.

Cuando cualquier activo es puesto en funcionamiento, debe ser capaz de rendir más que el parámetro mínimo de funcionamiento deseado por el usuario.

Los parámetros de funcionamiento los podemos subdividir en diferentes categorías:

- **Parámetros de funcionamiento múltiple:** muchas descripciones de funciones incorporan generalmente varios parámetros de funcionamiento.
- **Parámetros de funcionamiento cuantitativos:** Deben ser cuantificados cuando fuese posible, ya que éstos pueden medirse (Ej.: temperatura, presión, velocidad, etc.).
- **Parámetros de funcionamiento absolutos:** Una descripción que no indica ningún parámetro de funcionamiento, por lo general implica que se trata de un absoluto (Ej.: contener un fluido).

3.1.4 El contexto operacional

Indica las condiciones de operación del activo, y afecta a todo el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento, comenzando por la definición de funciones. Algunos de los factores importantes que deben ser considerados son:

- **Aplicación**
- **Turnos de trabajo.**
- **Sobrecargas.**
- **Condición física del lugar.**

3.2 Fallas funcionales

Un activo falla cuando no hace lo que el usuario desea que haga. Una falla funcional puede ser una pérdida total de una función o también puede ser en las que el comportamiento funcional queda al margen de los parámetros de funcionamiento establecidos.

Cada activo tiene más de una función, por lo tanto al ser posible que cada una de éstas falle, se deduce que cualquier activo puede tener una variedad de estados de fallas diferentes. Entonces es preciso definir una falla en términos de “pérdida de una función específica” y no con la “falla del activo como un todo”. Dado que este se aplica a funciones individuales, podemos definir una falla funcional como: “*la incapacidad de cualquier activo de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario*” (Moubray, Pág. 18, 1997).

3.3 Modos de falla

Un modo de falla puede ser definido como cualquier evento que causa una falla funcional. La descripción correcta de un modo de falla debe consistir de un sustantivo y un verbo.

3.3.1 Categorías de modos de falla

Los modos de falla pueden ser clasificados en tres grupos de la siguiente manera, fig. 3.3:

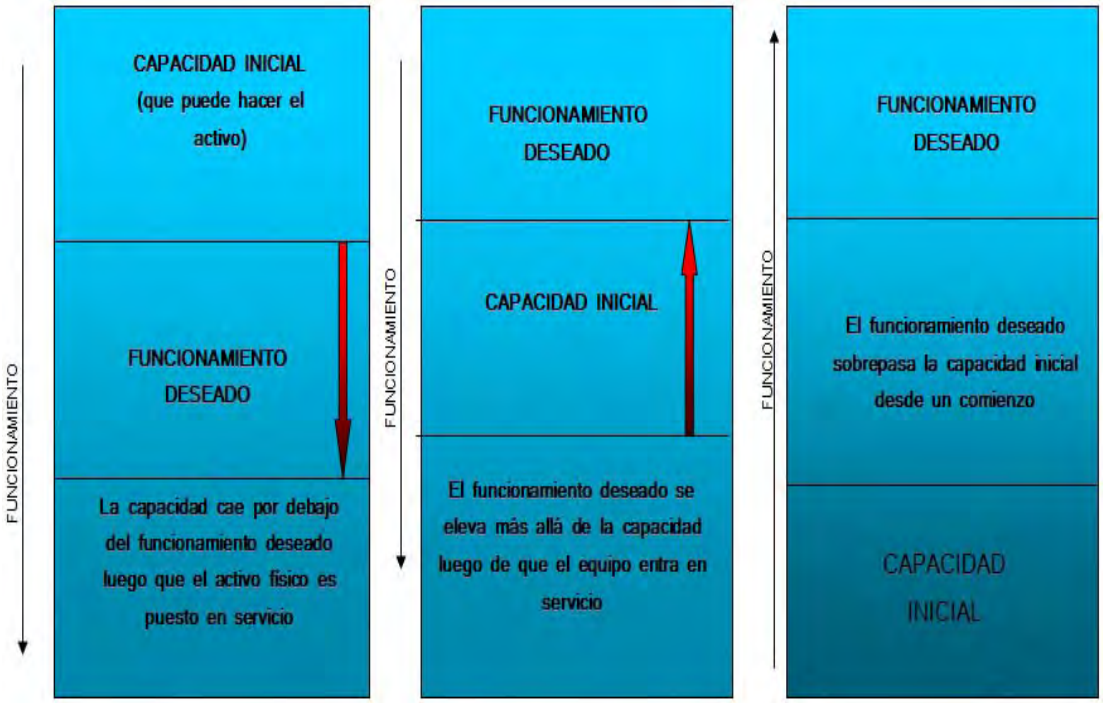


Fig. 3.3 Categorías de modos de falla.

Fuente: Moubray, 1997.

- **Capacidad bajo el funcionamiento deseado:** Deterioro (fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación, etc.), fallas de lubricación (falta y falla del lubricante), polvo o suciedad, desarme (falla en: soldaduras, uniones, remaches, bulones, conexiones, etc.), errores humanos (reducción de capacidad).
- **Capacidad por sobre el funcionamiento deseado:** El funcionamiento deseado aumenta hasta que el activo no puede responder, el aumento del esfuerzo causa que se acelere el deterioro hasta el punto en que el activo se torna tan poco confiable que deja de ser útil.

- **Capacidad Inicial fuera del rango desde el inicio:** A veces surgen situaciones en las que el funcionamiento deseado está fuera del rango de capacidad inicial desde el comienzo.

3.3.2 Cantidad de Detalle

El nivel de detalle afecta profundamente la validez del análisis de modos de falla y la cantidad de tiempo que requiere hacerlo. La escasez de detalles y/o modos de falla puede llevar a un análisis superficial y hasta peligroso. Por el contrario demasiados modos de falla o demasiado detalle hacen que todo el proceso RCM lleve mucho más tiempo que el necesario. Esto significa que es esencial tratar de lograr un equilibrio correcto.

3.4 Efectos de las fallas

En el proceso de implementación de RCM hay que hacer una lista de lo que sucede al producirse cada modo de falla. Esto se denomina efectos de falla. Al describir los efectos de una falla, debemos incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación de las consecuencias de las fallas y debe hacerse constar lo siguiente:

- **La evidencia de que se ha producido una falla:** Debe permitir a los operarios si la falla será evidente para ellos en el desempeño de sus tareas normales. También debe indicar si va precedida por: ruidos, fuego, humo, fugas de fluidos, si se detiene el equipo, etc. Si se tratase de dispositivos de seguridad, debe detallarse que sucedería si fallase el dispositivo protegido mientras el dispositivo de seguridad se encuentra en estado de falla.
- **En que forma la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente:** Debe señalarse la manera en que pueda lesionarse o morir alguna persona o infringir alguna normativa o reglamento relativo al medio ambiente como consecuencia de una falla.

- **Las maneras en que afecta a la producción o a las operaciones:** Debe indicarse cómo y cuánto afecta, ya sea por parada de máquina o varias de ellas, interrupción líneas de proceso, etc.

- **Los daños físicos causados por la falla:** Cuantificar los daños.
- **Que debe hacerse para reparar la falla:** Cuales son las medidas correctivas a tomar para repararla.

3.4.1 Fuentes de Información sobre modos y efectos

Las fuentes de información más comunes acerca de modos de falla y sus efectos son las siguientes:

- **El fabricante o proveedor del equipo.**
- **Otros usuarios de la misma maquinaria.**
- **Personal de mantención.**
- **Operadores del equipo.**
- **Listas genéricas de modos de falla.**

Las fuentes de información anteriores, son importantísimas a la hora de establecer un análisis RCM, pero no deben ser absolutas ni las únicas, ya que no siempre se adecuarán a las funciones, parámetros de funcionamiento y contexto operacional del activo a analizar.

3.5 Consecuencias de las fallas

Las consecuencias de las fallas se clasifican en cuatro categorías de importancia decreciente de la siguiente manera:

- **Consecuencias del Fallo Oculto:** Un modo de falla tiene consecuencias por fallas ocultas si la pérdida de función causada por este

modo de fallo actuando por sí solo en circunstancias normales es evidente a los operarios.

- **Consecuencias para la Seguridad o el Medio Ambiente:** Un modo de falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente si causa una pérdida de función y produce daños que pudieran lesionar o matar a alguien; o infringir cualquier normativa o reglamento ambiental conocido.
- **Consecuencias operacionales:** Un modo de falla tiene consecuencias operacionales si tiene un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional afectando: el volumen de producción, calidad del producto, servicio al cliente o incrementar el costo operacional.
- **Consecuencias no operacionales:** No ejercen un efecto adverso directo sobre la seguridad, el medio ambiente o la capacidad operacional, sólo tiene consecuencias en los costos directos de reparación.

3.5.1 Funciones ocultas y evidentes

Una función evidente es aquella cuya falla finalmente e inevitablemente será evidente por sí sola a los operadores en circunstancias normales. No obstante, algunas fallas ocurren de tal forma que nadie sabe que el elemento se ha averiado a menos que se produzca alguna otra falla. Esto significa que una función oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operarios bajo circunstancias normales, si se produce por sí sola.

3.5.2 Fallas ocultas y dispositivos de seguridad

Los dispositivos de seguridad o de protección funcionan de una de cinco maneras:

- **Alertar ante condiciones anormales de funcionamiento.**
- **Parar el equipo en caso de falla.**
- **Eliminar o aliviar las condiciones anormales originadas por una falla y de que otra manera podrían causar daños más serios.**

- **Asumir control de una función que ha fallado.**
- **Prevenir que surjan situaciones peligrosas.**

3.5.3 Prevención de la falla oculta

Para prevenir una falla múltiple, debemos asegurar que la función oculta no se encuentre en estado de falla y si cuando falla la función protegida. Hay que dar la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable, entonces: "Para fallas ocultas, merece la pena realizar una tarea proactiva si asegura la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable" (Moubray, 1997).

Si no es posible encontrar una manera adecuada de prevenir una falla oculta, todavía es posible reducir el riesgo de una falla múltiple revisando la función oculta periódicamente para saber si sigue funcionando. Si ésta revisión es llevada a cabo a intervalos adecuados y si la función es restaurada en cuánto se descubre que está defectuosa, todavía es posible asegurar altos niveles de disponibilidad.

3.6 Tareas proactivas

Son tareas comenzadas antes de que ocurra una falla, con el objetivo de prevenir que el componente llegue a un estado de falla. Engloban lo que comúnmente se denomina mantenimiento preventivo y predictivo, aunque el RCM utiliza los términos de reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, y mantenimiento a condición.

3.6.1 Factibilidad técnica y merecer la pena

Cuando preguntamos si una tarea proactiva es técnicamente factible, estamos simplemente preguntando si a la tarea le es posible prevenir o

anticipar la falla en cuestión. Si una tarea proactiva es técnicamente factible o no, depende de las características técnicas del modo de falla y de la tarea.

Cualquier tarea preactiva sólo merece la pena ser realizada si resuelve adecuadamente las consecuencias de la falla que se pretende evitar. Esto ciertamente supone que es posible anticipar o prevenir la falla. Si una tarea proactiva es técnicamente factible o no, depende de las características técnicas de la tarea, y de la falla que pretende evitar.

3.6.2 Fallas potenciales

La fig. 3.4 ilustra lo que sucede en los estados finales de la falla. Se llama curva P-F, porque muestra como comienza la falla, como se deteriora al punto en que puede ser detectada (P) y luego, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose, generalmente muy rápido, hasta que llega al punto de falla funcional (F).

El punto en el proceso de la falla en el que es posible detectar si la falla está ocurriendo o si está a punto de ocurrir se conoce como falla potencial. En otras palabras una falla potencial es un estado identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o en el proceso de ocurrir.

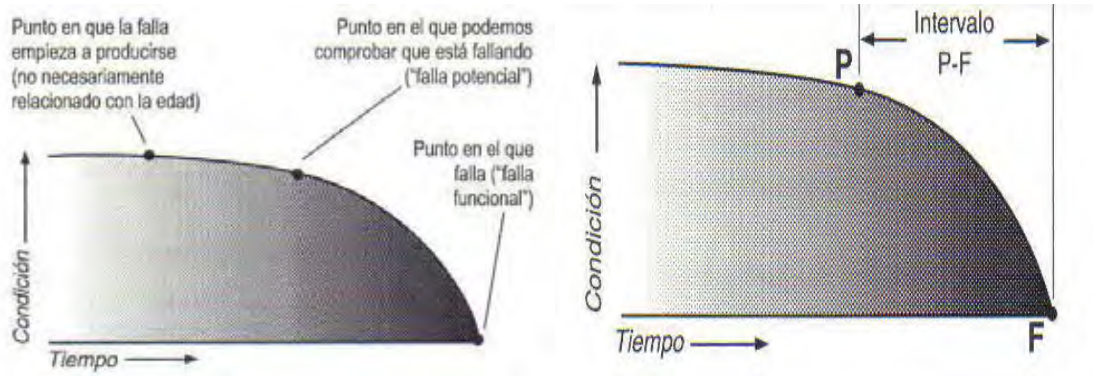


Fig. 3.4 Curva e intervalo P-F.

Fuente: Moubray, 1997.

3.6.2.1 El intervalo P-F

Además de la falla potencial en sí misma, necesitamos considerar la cantidad de tiempo que transcurre entre el punto en el que ocurre una falla potencial y el punto en el que se deteriora llegando a la falla funcional. Como lo muestra la fig. 3.4 este rango se conoce como el intervalo P-F. El intervalo P-F nos permite decir con que frecuencia deben realizarse las tareas a condición. Si queremos detectar la falla potencial antes de que se convierta en falla funcional, el intervalo entre las revisiones debe ser menor al intervalo P-F. En la práctica generalmente basta con seleccionar una frecuencia de tarea igual a la mitad del intervalo P-F. Esto lleva al concepto de intervalo P-F neto.

3.6.2.2 Intervalo P-F neto

El intervalo P-F es el mínimo intervalo que es probable que transcurra entre el descubrimiento de una falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional. Esto se ilustra en la fig. 3.5, la que muestra una falla con un intervalo P-F de nueve meses, lo que indica que si el elemento es inspeccionado mensualmente, el intervalo P-F es de 8 meses.

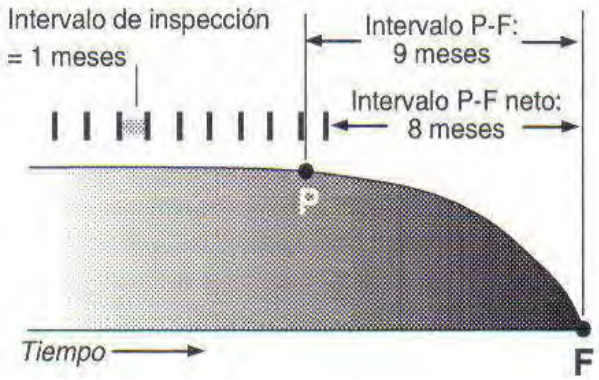


Fig. 3.5 Intervalo P-F Neto.

Fuente: Moubray, 1997.

Ahora las tareas a condición consisten en chequear si hay fallas potenciales, que permitan actuar para prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la falla funcional

3.6.3 Tareas de reacondicionamiento cíclico

El reacondicionamiento cíclico consiste en actuar periódicamente para reacondicionar a su condición original una pieza o componente existente. Una definición específica sería: “El reacondicionamiento cíclico consiste en reconstruir un componente o hacer una gran reparación a un conjunto ensamble completo antes de, o en el límite de edad específico, independientemente de su condición en ese momento” (Moubray, Pág. 44, 1997).

3.6.3.1 Frecuencia de reacondicionamiento cíclico

La frecuencia de una tarea de reacondicionamiento cíclico está gobernada por la edad en la que la pieza o componente muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla. Las tareas de reacondicionamiento cíclico son satisfactoriamente determinadas sobre la base de antecedentes históricos confiables.

3.6.3.2 Factibilidad técnica del reacondicionamiento cíclico

Las tareas de reacondicionamiento cíclico son técnicamente factibles si:

- **Hay una edad identificable en la que la pieza muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.**
- **Que la mayoría de las piezas sobrevivan a ésta edad.**
- **Se restaura la resistencia original de la pieza a la falla.**

3.6.3.3 Efectividad del reacondicionamiento cíclico

Aunque sea técnicamente factible, puede que no merezca la pena el reacondicionamiento cíclico porque puede que otras tareas sean aún más efectivas. Algunas de las razones por las que no vale la pena realizar reacondicionamiento cíclico son:

- **Una reducción en el número de fallas no es suficiente si la falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, porque queremos eliminar totalmente estas fallas.**

- **Si las consecuencias son económicas, necesitamos estar seguros de que a lo largo de un período de tiempo, el costo de realizar la tarea de reacondicionamiento cíclico es menor al costo de permitir que ocurra la falla.**

3.6.4 Tareas de sustitución cíclica

Las tareas de sustitución cíclica consisten en descartar un elemento o componente antes de, o en el límite de edad específico, independiente de su condición en el momento. La filosofía de estas tareas es reemplazar la parte usada por una nueva, la que restaurará a su condición original.

3.6.4.1 Frecuencia de la sustitución cíclica

Al igual que las tareas de reacondicionamiento cíclico, la frecuencia de una tarea de sustitución cíclica está gobernada por la edad a la que la pieza o componente muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.

3.6.4.2 Factibilidad técnica de la sustitución cíclica

Las tareas de sustitución cíclicas son técnicamente factibles bajo las siguientes circunstancias:

- **Hay una edad identificable en la que la pieza muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.**
- **La mayoría de los elementos sobreviven a esta edad**

3.6.5 Tareas a condición

Las tareas a condición son conocidas como mantenimiento predictivo, ya que se evalúa el estado del componente y se decide cuál acción tomar.

3.6.5.1 Factibilidad técnica de tareas a condición

Las tareas a condición son técnicamente factibles si:

- Es posible definir una condición clara de falla potencial.
- El intervalo P-F es razonablemente consistente.
- Resulta práctico monitorear el elemento a intervalos menores al intervalo P-F.
- El intervalo P-F neto es lo suficientemente largo como para ser de alguna utilidad, o lo suficientemente largo como para actuar a fin de reducir o eliminar las consecuencias de la falla funcional

3.6.5.2 Categorías de técnicas a condición

Las cuatro categorías principales de técnicas a condición son las siguientes:

- **Técnicas de monitoreo de condición:** implica el uso de algún equipo especializado para monitorear el estado de otros equipos y sus fallas

potenciales. Algunas de ellas son clasificadas como de efectos: dinámicos, de partículas, químicas, físicas, de temperatura, eléctricas, etc.

- **Técnicas basadas en variaciones en la calidad del producto.**
- **Técnicas de monitoreo de los efectos primarios:** que implican el uso inteligente de indicadores existentes y equipo de monitoreo de procesos.
- **Técnicas de inspección basadas en los sentidos humanos.**

3.6.5.3 Realización tareas a condición

Las tareas a condición deben satisfacer los siguientes criterios para que justifique su ejecución:

- **Si una falla es oculta, no tiene consecuencias directas**: Entonces una tarea a condición cuya intención es prevenir una falla oculta, debe reducir el riesgo de una falla múltiple a un nivel aceptablemente bajo. En la práctica, debido a que la función es oculta, muchas de las fallas potenciales que normalmente afectan a las evidentes también serán ocultas.
- **Si la falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente:** sólo merece la pena realizar una tarea a condición si fiablemente da suficiente advertencia de la falla como para que se pueda actuar a tiempo para evitar las consecuencias para la seguridad o el medio ambiente.
- **Si la falla no afecta a la seguridad, la tarea debe ser eficaz en cuanto a los costos:** O sea a lo largo de un período de tiempo el costo de realizar la tarea a condición debe ser menor al costo de no hacerla.

3.6.6 Selección de tareas proactivas

Muchas veces es difícil decidir si una tarea proactiva es técnicamente factible. Las características de la falla rigen esta decisión, y generalmente son lo suficientemente claras como para que la decisión sea simplemente cuestión de sí o no, ahora decidir si merece la pena ser realizadas

suele requerir más deliberación. El orden básico de preferencia para seleccionar tareas proactivas es el siguiente.

3.6.6.1 Tareas a condición

Las tareas a condición son consideradas primero en el proceso de selección de tareas, por las siguientes razones:

- **Generalmente son realizadas sin desplazar el activo físico de su ubicación y normalmente mientras funciona:** Rara vez interfieren en el proceso de producción y son fáciles de organizar.
- **Identifican condiciones específicas de falla potencial**: de modo que se puede definir claramente la acción correctiva antes de que comience el trabajo, lo que reduce la cantidad de trabajos de reparación, y hace posible realizarlos más rápidamente.
- **El identificar el punto de falla potencial en los equipos**: les permite cumplir con casi toda su vida útil.

3.6.6.2 Tareas de reacondicionamiento cíclico

Si no puede encontrarse una tarea a condición apropiada para una falla en particular, la opción siguiente es una tarea de reacondicionamiento cíclico. Ésta también debe ser técnicamente factible, por lo que las fallas deben estar concentradas alrededor de una edad promedio. Si lo están, el reacondicionamiento cíclico antes de esta edad puede reducir la incidencia de fallas funcionales. Algunas de las ventajas del reacondicionamiento cíclico son:

- **Solamente pueden realizarse deteniendo el activo y enviándolo al taller:** por lo que estas tareas de alguna manera afectan a la producción.
- **El límite de edad se aplica a todos los elementos:** entonces muchos elementos o componentes que podrían haber sobrevivido más tiempo serán removidos.

- **Las tareas de reacondicionamiento involucran trabajos de taller:** por lo que generan una carga mucho mayor que las tareas a condición.

3.6.6.3 Tareas de sustitución cíclica

La sustitución cíclica normalmente es la menos eficaz en cuanto a costos de las tres tareas proactivas. Sin embargo cuando es técnicamente factible, posee algunas características deseables. Puede ocurrir que la sustitución de un elemento sea capaz de prevenir ciertas fallas que no estaban consideradas o se pasaron por alto críticas.

3.6.6.4 Combinación de tareas

Para algunos modos de falla con consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, no se puede encontrar una tarea que por sí sola reduzca el riesgo de falla a un nivel tolerablemente bajo, ni tampoco un rediseño adecuado. En estos casos a veces es posible encontrar una combinación de tareas, generalmente de dos categorías de tareas diferentes, lo que reduce el riesgo de falla a un nivel tolerable. Cada tarea es llevada a cabo con frecuencia propia.

3.7 Acciones “a falta de”

Este punto trata de que se debe hacer si no se encuentra una tarea proactiva adecuada. Esto comienza con una revisión de las tareas de búsqueda de falla y luego considera el rediseño.

3.7.1 Búsqueda de falla y fallas múltiples

Las tareas de búsquedas de falla consisten en chequear una función oculta a intervalos regulares para ver si ha fallado.

Una falla múltiple ocurre cuando falla una función protegida mientras un dispositivo de protección se encuentra en estado de falla. La probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida aumentando la disponibilidad del dispositivo de seguridad.

3.7.2 Aspectos técnicos de la búsqueda de falla

El objetivo de la búsqueda de falla es darnos la tranquilidad de que un dispositivo de seguridad proveerá la protección requerida si fuese necesario, o sea estamos chequeando que todavía funcione. Algunos de los puntos principales que se le hacen a este tema son:

3.7.2.1 Chequear el sistema de protección completo

Una tarea de búsqueda de falla debe asegurar de detectar todos los modos de falla que tienen posibilidad de causar la falla del dispositivo de seguridad. Lo ideal sería hacerlo simulando las condiciones a las que el circuito debería responder, y chequear si el elemento que actúa da la respuesta correcta.

3.7.2.2 No perturbarlo

Desarmar cualquier cosa trae consigo la posibilidad de que se vuelva a armar de manera incorrecta, si es que es posible hacer esto.

3.7.3 Conceptos Asociados al análisis de confiabilidad

El diseño de un programa eficiente de mantenimiento implica la comprensión de los fenómenos de falla de los equipos. Dado que las fallas en los equipos son eventos aleatorios, utilizaremos conceptos y modelos estadísticos que nos permitan controlar y mejorar la confiabilidad.

Las tareas de mantenimiento predictivo y preventivo están basados sólo en el intervalo P-F. Para establecer los intervalos de búsqueda de falla, deben tomarse en cuenta la disponibilidad y confiabilidad.

3.7.3.1 Tiempo medio entre fallas (MTBF) o confiabilidad

Este indicador permite medir la frecuencia entre fallas promedio transformándose en una medida de la confiabilidad de los equipos o dispositivos.

$$MTBF = \frac{\#Equipos \times Tiempo\ operativo}{\#De\ fallas} \quad [1]$$

3.7.3.2 Disponibilidad (DISP)

La disponibilidad de un equipo o activo se define como el porcentaje de tiempo en que está operativo, o disponible a funcionar en cualquier instante. Las unidades de medida pueden ser horas, días, etc.

$$DISP = \frac{Tiempo\ de\ Operación - Tiempo\ de\ Parada}{Tiempo\ de\ Operación} \quad [2]$$

3.7.3.3 Intervalos de búsqueda de falla (FFI)

En inglés Failure Finding Interval y está dado por la expresión:

$$FFI = 2 \times (100\%-Disp\%) \times MTBF \quad [3]$$

3.7.4 Factibilidad técnica de búsqueda de falla

Para que una tarea de búsqueda de falla sea técnicamente factible, debe ser posible realizarla sin aumentar el riesgo de la falla múltiple, y debe ser práctico realizar la tarea en el intervalo requerido. La búsqueda de falla es técnicamente factible si:

- **Es posible realizar la tarea.**
- **La tarea no incrementa el riesgo de una falla múltiple.**
- **Es práctico realizar la tarea al intervalo requerido.**

El objetivo de una tarea de búsqueda de falla es reducir la probabilidad de la falla múltiple asociada con la función oculta a un nivel tolerable. Solo merece la pena realizarla si logra este objetivo.

Si se ve que una tarea de búsqueda de falla no es técnicamente factible o no merece la pena realizarla, hemos agotado todas las posibilidades que pueden permitirnos obtener la prestación deseada del activo. Esto nos condiciona a las consecuencias de la falla múltiple como sigue:

- **Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla apropiada y la falla múltiple podría afectar la seguridad o el medio ambiente**: algo debe cambiarse para que la situación sea segura. Entonces el rediseño es obligatorio.

- **Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla y la falla múltiple no afecta la seguridad ni el medio ambiente:** entonces es aceptable.

3.7.5 Ningún mantenimiento programado

Sólo es válido si:

- **No puede encontrarse una tarea cíclica apropiada para una función oculta, y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente.**
- **No puede encontrarse una tarea proactiva que sea eficaz en cuanto a costos para fallas que tienen consecuencias operacionales o no operacionales.**

3.7.6 Rediseño

Se refiere a cualquier cambio en la especificación de cualquier componente de un equipo. Esto significa cualquier acción que implique un cambio en un plano o una lista de piezas. Incluye una modificación en la especificación de un componente, el agregado de un elemento nuevo, la sustitución de una máquina entera por una diferente, o el cambio de lugar de una máquina.

3.8 Diagrama de Flujo del RCM

La fig. 3.6 ilustra la primera parte del proceso RCM, que consta de la identificación del sistema, la definición de funciones, las fallas y los modos de falla y la identificación de las consecuencias de las fallas. La toma de decisiones aplica un diagrama de decisión estructurado, que se explicará en detalle en el capítulo IV.

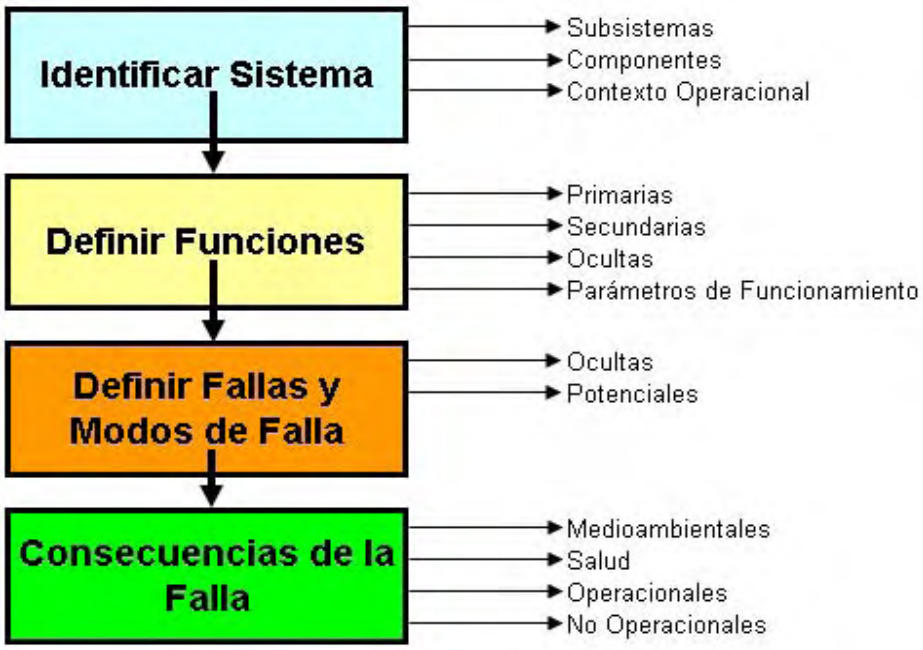


Fig. 3.6 Diagrama de Flujo del RCM.

Fuente: Pérez, 1997

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DEL RCM

4.1 Selección del equipo

Codelco División Andina, está implementando el RCM en todos los equipos críticos y de importancia para la producción. Es por ello que la selección de los motores Detroit 149 es vital, y su importancia se verá reflejada en la gestión de la mantención en la Unidad de Servicio de Mantenimiento Industrial de la Superintendencia de Servicios y Suministros.

La selección de los motores Detroit 149 para el análisis RCM fue entregada como trabajo de titulación por la Superintendencia de Servicios y Suministros.

La justificación para realizar el análisis RCM es que estos equipos han tenido altos costos de mantención/reparación y han estado fuera de servicio durante períodos prolongados desde su operación desde el año 1998.

4.2 Contexto operacional

División Andina posee 3 Grupos Generadores (GG) de 1MW de potencia cada uno, ubicados a 2.900 m.s.n.m., los que operan en una caverna de 44x10x8m, y son accionados por 3 motores Detroit Diesel 16V-149TI cada uno.

La generación de emergencia es utilizada sólo cuando se pierden los suministros de 66 y 220 KV de Sistema Interconectado Central (SIC), con el fin de mantener el suministro eléctrico a las cargas consideradas como críticas por el proceso de producción. También es utilizada para el abastecimiento eléctrico de iluminación de emergencia y ventilación (Gerencia de Planificación y Desarrollo, 2002).

La cogeneración es utilizada para disminuir la facturación por concepto de demanda eléctrica en horas de punta, establecida en el contrato con ESSA, lo que implica que se debe cogenerar durante las horas de punta, entre las 18:00 y 23:00 hrs. durante los meses entre Abril y Septiembre (Gerencia de Planificación y Desarrollo, 2002).

4.3 Situación motores Detroit serie 149

4.3.1 Costos asociados a mantención

La información que se tiene sobre las mantenciones y reparaciones es vaga e incompleta y lo realizado a estos equipos corre desde el año 2003, ya que fue ese año en que se ingresa su gestión al software SAP. La fig. 4.1 muestra los costos por motor entre el período 2003-2005.

	2003	2004	2005
Motor 1	$ 2.264.702	$ 3.140.089	$ 475.218
Motor 2	$ 23.865.668	$ 3.475.125	$ 860.503
Motor 3	$ 30.360.741	$ 3.536.273	$ 1.208.026

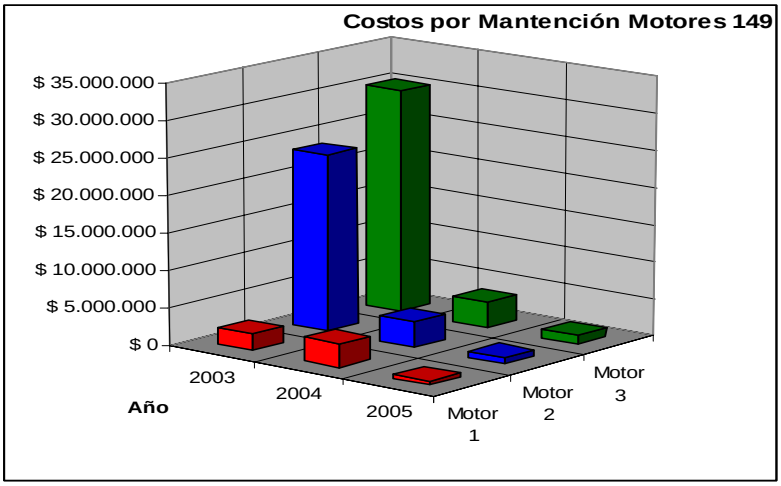
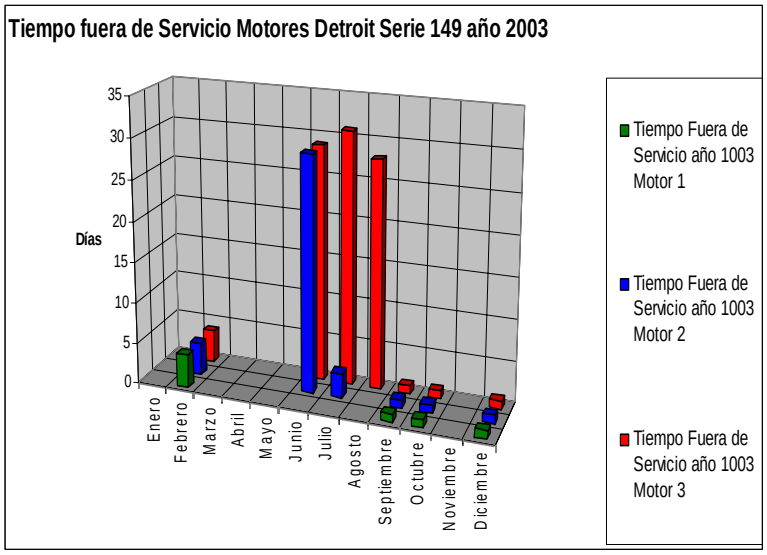


Fig. 4.1 Costos asociados a Mantención.

Fuente: Base de Datos Software SAP.

4.3.2 Disponibilidad motores serie 149

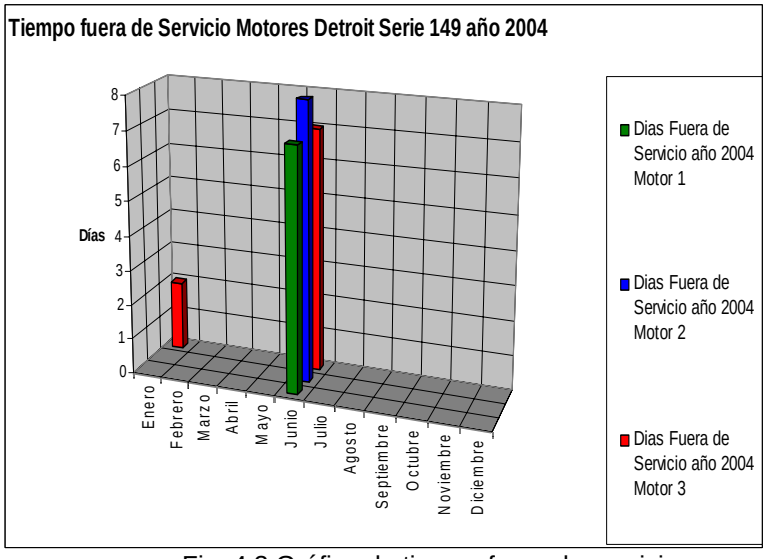
A continuación se detalla el tiempo que estuvo el equipo fuera de servicio, por mantención o reparación entre los años 2003 y 2005.



Días Fuera de Servicio año 2003			
	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Enero			
Febrero	4	4	4
Marzo			
Abril			
Mayo			
Junio		29	29
Julio		3	31
Agosto			28
Septiembre	1	1	1
Octubre	1	1	1
Noviembre			
Diciembre	1	1	1

Fig. 4.2 Gráfico de tiempo fuera de servicio por motor año 2003.

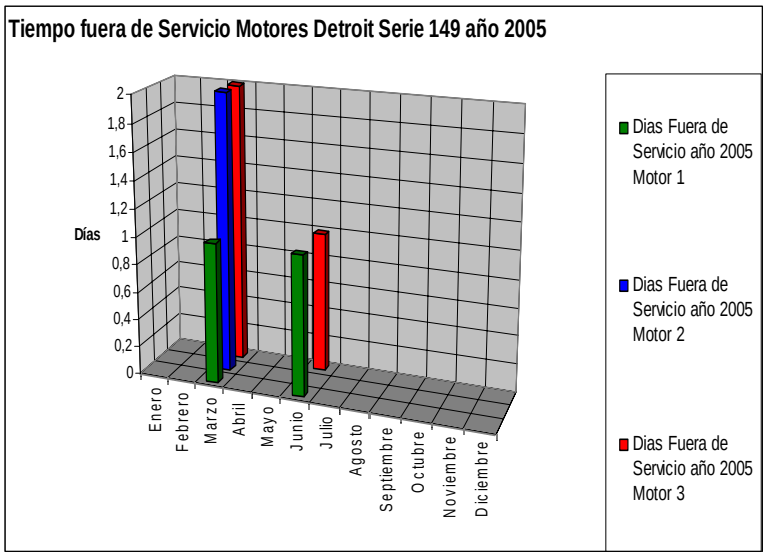
Fuente: Base de Datos Software SAP.



Días Fuera de Servicio año 2004			
	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Enero			2
Febrero			
Marzo			
Abril			
Mayo			
Junio	7	8	7
Julio			
Agosto			
Septiembre			
Octubre			
Noviembre			
Diciembre			

Fig. 4.3 Gráfico de tiempo fuera de servicio por motor año 2004.

Fuente: Base de Datos Software SAP.



Días Fuera de Servicio año 2005			
	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Enero			
Febrero			
Marzo	1	2	2
Abril			
Mayo			
Junio	1		1
Julio			
Agosto			
Septiembre			
Octubre			
Noviembre			
Diciembre			

Fig. 4.4 Gráfico de tiempo fuera de servicio por motor año 2005.

Fuente: Base de Datos Software SAP.

Resumen Días Fuera de Servicio Motores Serie 149									
	2003			2004			2005		
	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 1	Motor 2	Motor3	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Enero						2			
Febrero	4	4	4						
Marzo							1	2	2
Abril									
Mayo									
Junio		29	29	7	8	7	1		1
Julio		3	31						
Agosto			28						
Septiembre	1	1	1						
Octubre	1	1	1						
Noviembre									
Diciembre	1	1	1						
Total	**7**	**39**	**95**	**7**	**8**	**9**	**2**	**2**	**3**

Fig. 4.5 Resumen tiempo fuera de servicio motores 149

Con los datos anteriores podemos calcular la disponibilidad de cada motor durante los años mencionados.

Disponibilidad por Motor									
	2003			2004			2005		
Disp %	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 1	Motor 2	Motor 3
	98.08	89.31	73.97	98.08	97.80	97.53	99.45	99.45	99.17

Fig.4.6 Disponibilidad de cada motor 149

- **Ejemplo de cálculo disponibilidad motor 1 año 2003**

$$DISP = \frac{\text{Tiempo Total Operación} \times \text{Tiempo Fuera Servicio}}{\text{Tiempo Total Operación}} = \frac{365\ \text{Días} - 7\ \text{Días}}{7\ \text{Días}} = 98{,}08\%$$

DISP= 98,08%

Como se puede apreciar, durante el año 2003 hubo una gran indisponibilidad de los motores 2 y 3, lo que ocurrió durante los meses de Junio, Julio y Agosto (Meses de punta). Uno de los objetivos de éste trabajo es aumentar la disponibilidad, manteniendo todos los parámetros sobre el 99,5%.

4.3.3 Tiempo medio entre fallas de los dispositivos de seguridad

Se calculará el tiempo medio entre fallas para los dispositivos de protección. Éste dato nos servirá para poder calcular el intervalo de búsqueda de falla sobre estos mismos. Se calculará este parámetro sólo a aquellos dispositivos en los cuales la pérdida de su función podría llevar a fallas graves del motor, los cuáles son: Sensor de Alta temperatura de refrigerante, sensor de baja presión de aceite lubricante, sensor de alta presión de cárter y sensor de sobrerevoluciones.

Sensor	Nº Sensores	Horómetro (Al 31/08/2005)			Fallas	MTBF
		Motor 1	Motor 2	Motor 3		
Alta presión de cárter	3	2.107	2.227	2.056	2	3.084
Alta temperatura de refrigerante	6				3	4.112
Baja presión de aceite	6				2	6.168
Sobrerevoluciones	3				1	6.168

Fig. 4.7 Tiempo medio entre fallas dispositivos de seguridad

- **Ejemplo de cálculo tiempo medio entre fallas sensor de alta presión de cárter**

$$MTBF = \frac{\text{Nº Sensores Presión Cárter x Horómetro}}{\text{Nº Fallas Sensor}} = \frac{\text{3 Sensores x 2.056 Horas}}{\text{2 Fallas}}$$

MTBF= 3.084 Horas Sensor/Falla

Se utilizó el horómetro del motor Nº 3, ya que tenía menos horas de operación, ya que así nos dará un valor menor entre los intervalos de fallas.

4.3.4 Cálculo de MTBF en Serie y en Paralelo

Durante la generación de emergencia y la cogeneración, los grupos generadores trabajan en configuraciones de dos; esto es: GG1-GG2; GG1-GG3 y GG2-GG3. A continuación la tabla 4.8 muestra el resumen de los cálculos de MTBF hechos en serie y en paralelo.

MTBF	Config. GG1-GG2		Config. GG2-GG3		Config. GG1-GG3	
	En Serie	En Paralelo	En Serie	En Paralelo	En Serie	En Paralelo
Alta presión de cárter	6500	1623	6424	1603	6244	1560
Alta temperatura de refrigerante	8668	2165	8566	2138	8326	2081
Baja presión de aceite	13002	3248	12849	3207	12489	3121
Sobrerevoluciones	13002	3248	12849	3207	12489	3121

Fig. 4.8 MTBF en serie y en paralelo de las distintas configuraciones de los GG.

- **Ejemplo de cálculo tiempo medio entre fallas en serie y en paralelo de alta presión de cárter.**
- **a) En Serie:**

$MTBF_{GG1+GG2} = MTBF_{GG1}+MTBF_{GG2} = 3.160+3.340 = 6500$ Horas sensor/Falla

$MTBF_{GG1+GG2}$ = 6.500 Horas Sensor/Falla (en serie)

- **b) En Paralelo:**

$$\frac{1}{MTBF_{GG1+GG2}} = \frac{1}{MTBF_{GG1}} + \frac{1}{MTBF_{GG2}} = \frac{1}{3.160} + \frac{1}{3.340} = 1.623 \text{ Horas sensor/Falla}$$

$MTBF_{GG1+GG2}$ = 1.623 Horas Sensor/Falla (en paralelo)

Al realizar los cálculos de MTBF en serie y en paralelo tenemos que en paralelo hay menos tiempo entre intervalos de falla y por eso se adopta éste valor para programar los intervalos de búsqueda de falla.

4.3.5 Intervalo de búsqueda de falla de los dispositivos de seguridad

Este parámetro nos dará la frecuencia de las tareas de búsqueda de falla en los dispositivos de seguridad. Se calculó en base al tiempo medio entre fallas de ellos, dato que fue proporcionado por Detroit y a la disponibilidad que desea Andina de ellos.

Sensor	Disponibilidad deseada (%)	MTBF	FFI (%)	FFI (hrs.)
Alta presión de cárter	99	1.560	31,2	486
Alta temperatura de refrigerante	99	2.081	41,62	866
Baja presión de aceite	99	3.121	62,42	1.948
Sobrerevoluciones	99	3.121	62,42	1.948

Fig. 4.9 Intervalo de búsqueda de falla

- **Ejemplo de cálculo Intervalo de búsqueda de falla sensor de alta presión de aceite**

FFI = 2(100%-Disp%)*MTBF = 2 (100%-99%) 1.560 = 31,2%

FFI = 31,2% de MTBF de 1.560 es 486 hrs, o cada 486 horas realizar tareas de búsqueda de falla.

Ahora para efectos prácticos, si un motor cogenera entre abril y septiembre unas 5 horas diarias, tenemos un tiempo de operación de aproximadamente 915 horas por año, y si la tarea de búsqueda de falla del dispositivo de seguridad de alta presión de cárter es de cada 486 hrs. tenemos un intervalo de búsqueda de falla de 2 veces por año para ese dispositivo de seguridad.

4.4 Grupos de análisis

Idealmente la conformación típica de un grupo de análisis RCM sería la siguiente:

Fig. 4.10 Grupo de análisis RCM típico.

Fuente: Moubray, 1997.

Sin embargo, las posiciones de cada grupo no tienen que ser ocupadas exactamente por las mismas personas que muestra la fig. 4.10. El

objetivo de un grupo de análisis es armar un equipo de personas que puedan proveer toda la información acerca del equipo en cuestión. Para el análisis RCM del motor Detroit 149 el grupo se conformó de la siguiente manera:

Fig. 4.11 Grupo Análisis RCM Motor Detroit 149

- **Facilitador:** David Vásquez Oyarzún (Estudiante memorista).
- **Supervisor de Mantención:** Marcelo Toro Cornejo.
- **Mecánico Andina:** Héctor Urtubia Urtubia.
- **Técnico Detroit:** Cristian Faúndez

4.4.1 Función facilitador

La función primaria de un facilitador de RCM es aplicar la filosofía RCM haciendo preguntas a un grupo de personas seleccionadas por su conocimiento de un activo o proceso específico, asegurando que el grupo llegue a un consenso de respuestas. El facilitador debe conocer la lógica RCM y debe asegurarse que:

- Planifica, programa y dirige las reuniones.
- Guía al grupo en la realización del análisis de los modos y efectos de falla, y la selección de las actividades de mantenimiento.
- Ayuda a decidir a qué nivel será realizado el análisis de modos de falla.

- Asegura que las reuniones se realicen profesionalmente y que se lleven a cabo con fluidez y normalidad.
- El RCM sea claramente comprendido y aplicado correctamente por parte de los miembros del grupo.
- Que el grupo llegue al consenso en forma rápida y ordenada.
- Registra el resultado del análisis.

En este caso en particular yo como estudiante memorista actué como facilitador, previo estudio de la metodología RCM.

4.4.2 Función supervisor de mantención

La función del supervisor de mantención es tener una visión global de la empresa y del equipo a analizar en el proceso para aplicarlo posteriormente en el análisis RCM y su toma de decisiones. Es la persona encargada de administrar el contrato establecido con la empresa Detroit. El supervisor de mantención seleccionado ha trabajado como mecánico en motores Detroit Diesel Serie 50, 60 y 149.

4.4.3 Función mecánico Andina

Su función dentro del grupo de análisis es aportar todo el conocimiento técnico de los motores 149, ya que fue mecánico de éstos motores anteriormente. Actualmente es la persona encargada de gestionar todas las reparaciones y mantenciones realizadas a los motores Detroit Serie 50, 60 y 149.

4.4.4 Función técnico Detroit

Su función es aportar todo el conocimiento técnico sobre los motores. Es la única persona externa del grupo. Por lo que es la que tiene el

menor aporte, pero no menos válido. La función del técnico es realizar todas las reparaciones y mantenciones en los equipos.

4.5 Presentación de los resultados

4.5.1 Hoja de Información de RCM

Aquí se muestra una hoja típica de un análisis RCM, fig. 4.12, la que se divide en cuatro columnas donde quedan registrados la descripción de funciones, la pérdida de la función (total o parcial), las causas de la falla y las consecuencias de la falla. Las funciones son enumeradas en orden de importancia, o primarias y secundarias. Las Funciones y los Modos de Falla son registrados numéricamente mientras que las Fallas Funcionales son registradas mediante letras.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	**SISTEMA/ACTIVO**	**SISTEMA Nº**			**Hoja**
			FACILITADOR	**Fecha**	
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	**SUB-SISTEMA Nº**			**De**

FUNCIÓN	**FALLA FUNCIONAL**	**MODO DE FALLA (Causa de la Falla)**	**EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla)**

Fig. 4.12 Estructura de la Hoja de Información de RCM.

Fuente: Moubray, 1997.

4.5.2 Hoja de Decisión de RCM

La Hoja de Decisión de RCM está dividida en dieciséis columnas, FIG. 4.13. Las columnas tituladas F, FF y MF identifican el modo de falla que se analiza en esa línea. Se utilizan para correlacionar las referencias entre las Hojas de Información y las Hojas de Decisión.

<table>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">HOJA DE DECISIÓN RCM</td><td colspan="4">SISTEMA/ACTIVO</td><td colspan="3">SISTEMA Nº</td><td colspan="2" rowspan="2">FACILITADOR</td><td rowspan="2">Fecha</td><td>Hoja</td></tr>
<tr><td colspan="4">SUB-SISTEMA/COMPONENTE</td><td colspan="3">SUB-SISTEMA Nº</td><td>De</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Referencia de Información</td><td colspan="4" rowspan="2">Evaluación de las consecuencias</td><td>H1
S1
O1</td><td>H2
S2
O2</td><td>H3
S3
O3</td><td colspan="3">Tareas "a falta de"</td><td colspan="2" rowspan="2">Tareas Propuestas</td><td colspan="2" rowspan="2">Frecuencia Inicial</td><td rowspan="2">A realizar por</td></tr>
<tr><td>F</td><td>FF</td><td>MF</td><td>H</td><td>S</td><td>E</td><td>O</td><td>N1</td><td>N2</td><td>N3</td><td>H4</td><td>H5</td><td>S4</td></tr>
</table>

Fig. 4.13 Estructura de la Hoja de Decisión de RCM.

Fuente: Moubray, 1997.

4.5.3 Diagrama de Decisión

El Diagrama de Decisión de RCM, fig. 4.14, integra todos los procesos de decisión en un marco de trabajo estratégico y estructurado; y da respuesta a las preguntas formuladas en el:

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

Los siguientes ítems describen paso a paso cómo realizar la evaluación de las consecuencias de las fallas, la factibilidad técnica de asignársele tareas y que debe hacerse si no se encuentra una tarea apropiada.

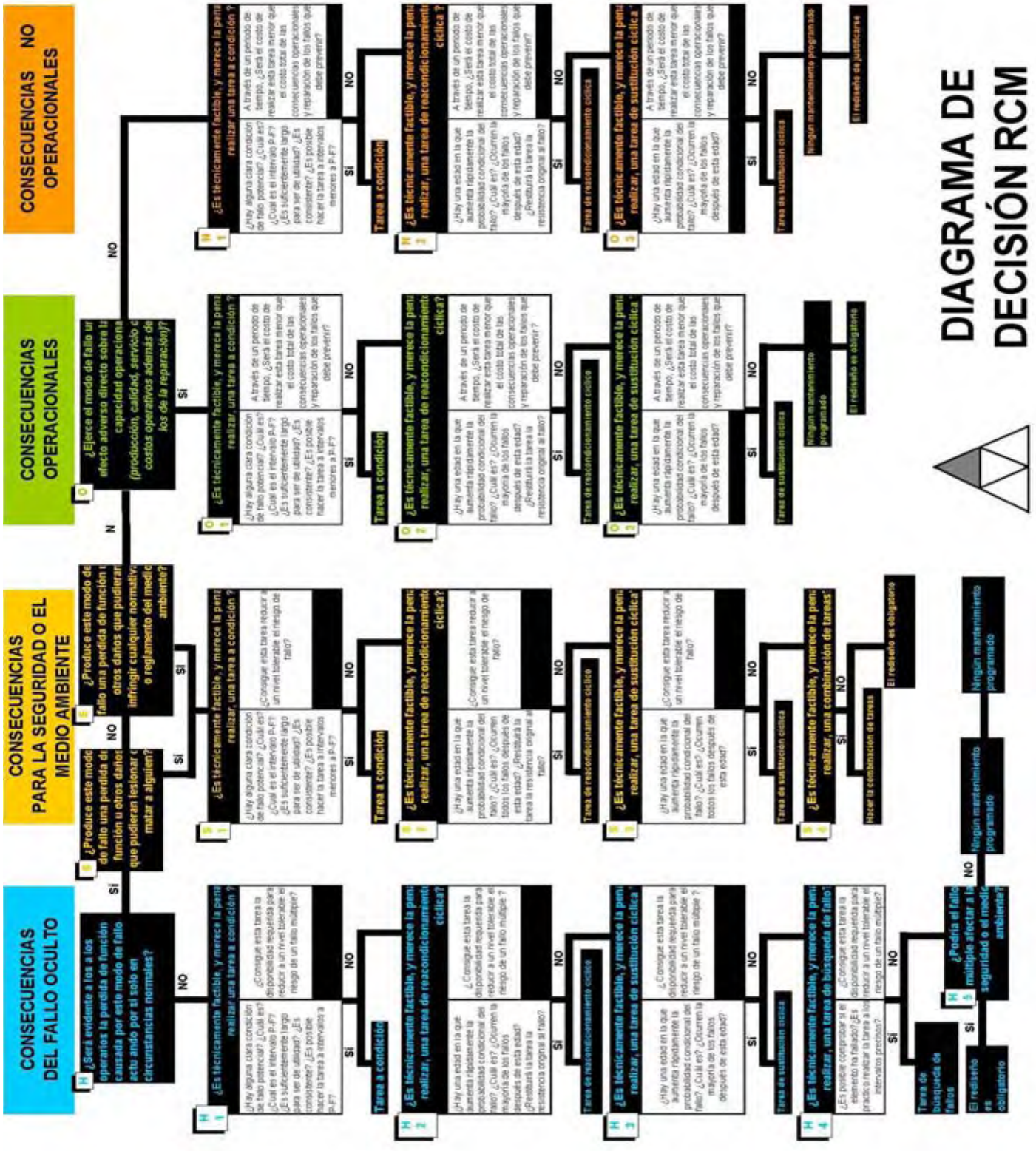


Fig. 4.14 Diagrama de decisión.

Fuente: Moubray, 1997.

4.5.4 Evaluación de las consecuencias de la falla

La fig. 4.15 clasifica todas las fallas basándose en sus consecuencias. Al hacerlo así, separa las fallas ocultas de las fallas evidentes, y luego ordena las consecuencias de las fallas evidentes en un orden de importancia decreciente.

Las columnas tituladas H, S, E, O y N de la fig. 4.13; que son detalladas en la fig. 4.15; son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla.

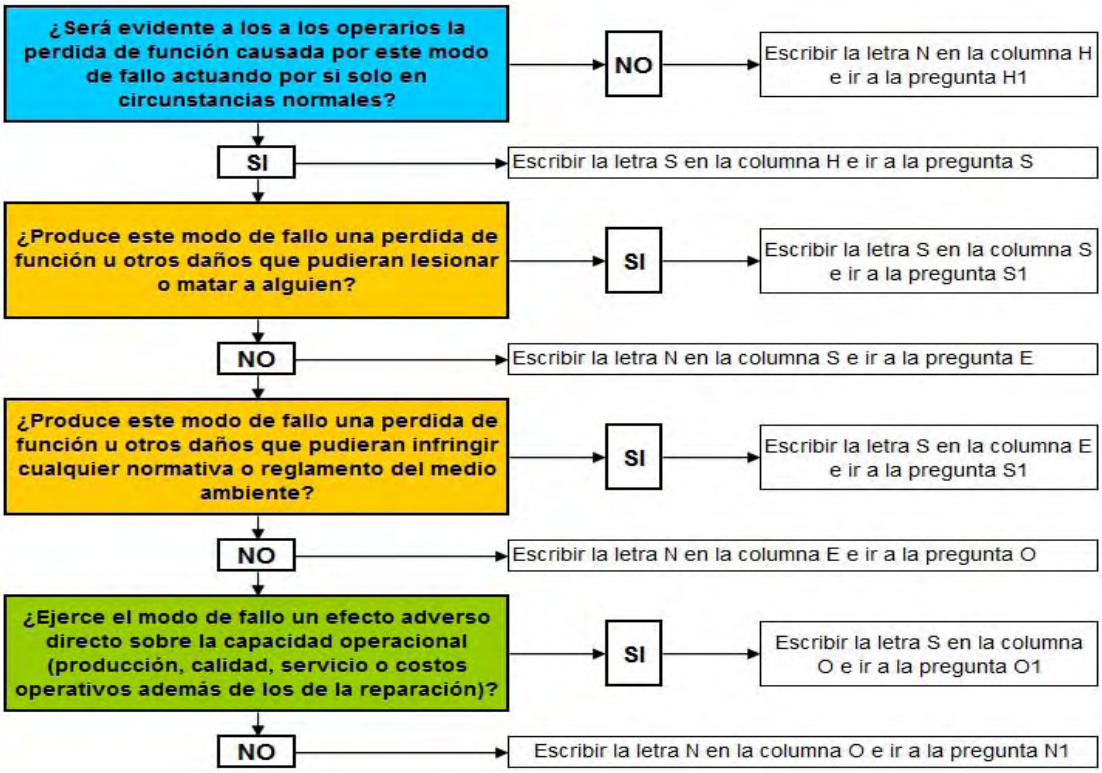


Fig. 4.15 Como se registran las consecuencias de falla en la hoja de decisión.

Fuente: Moubray, 1997.

La fig. 4.16 muestra cómo se registran las respuestas a estas preguntas en la hoja de decisión.

Cada modo de falla es ubicado en una sola categoría de consecuencias. Entonces si es clasificado como que tiene consecuencias ambientales, no se evalúan sus consecuencias operacionales.

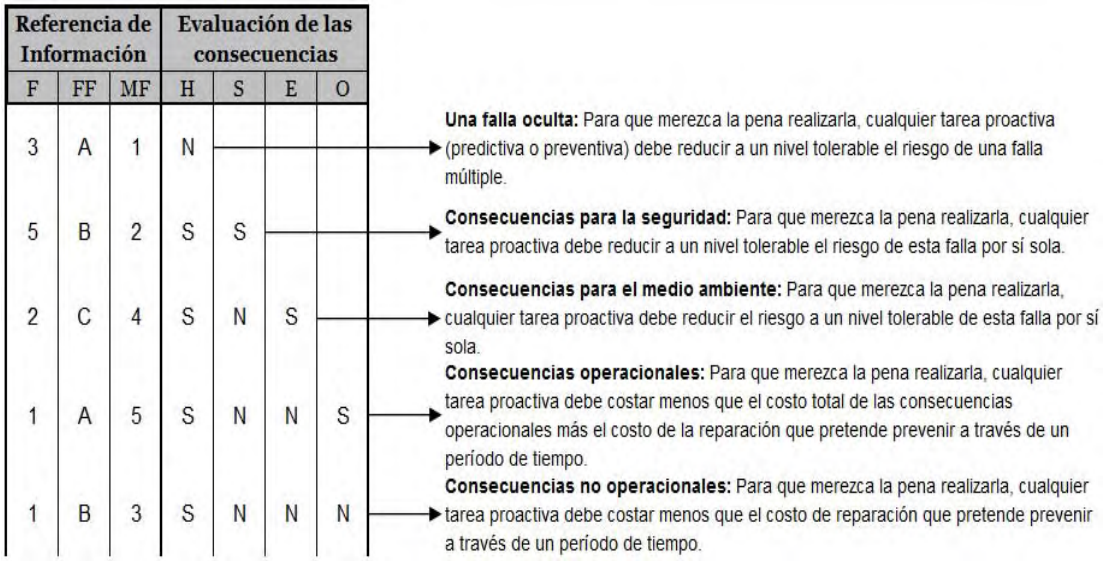


Fig. 4.16 Resumen de las consecuencias de falla.

Fuente: Moubray, 1997.

4.5.5 Factibilidad técnica de tareas proactivas

De la octava a la décima columna de la Hoja de Decisión, son utilizadas para registrar si ha sido seleccionada una tarea proactiva, de la siguiente manera:

- La columna titulada H1/S1/O1/N1 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias.
- La columna titulada H2/S2/O2/N2 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento cíclico apropiada para prevenir las fallas.
- La columna titulada H3/S3/O3/N3 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.

En cada caso, una tarea sólo es apropiada si merece la pena realizarla y si es técnicamente factible.

Para que una tarea sea técnicamente factible y merezca la pena realizarla, debe ser posible dar una respuesta positiva a todas las preguntas que muestra la fig. 4.17, que se aplican a ésta categoría de tareas, y la tarea debe responder al criterio de “merece la pena ser realizada” también de la fig. 4.17. Si la respuesta a cualquiera de estas preguntas es negativa o se desconoce, entonces se rechaza la tarea totalmente.

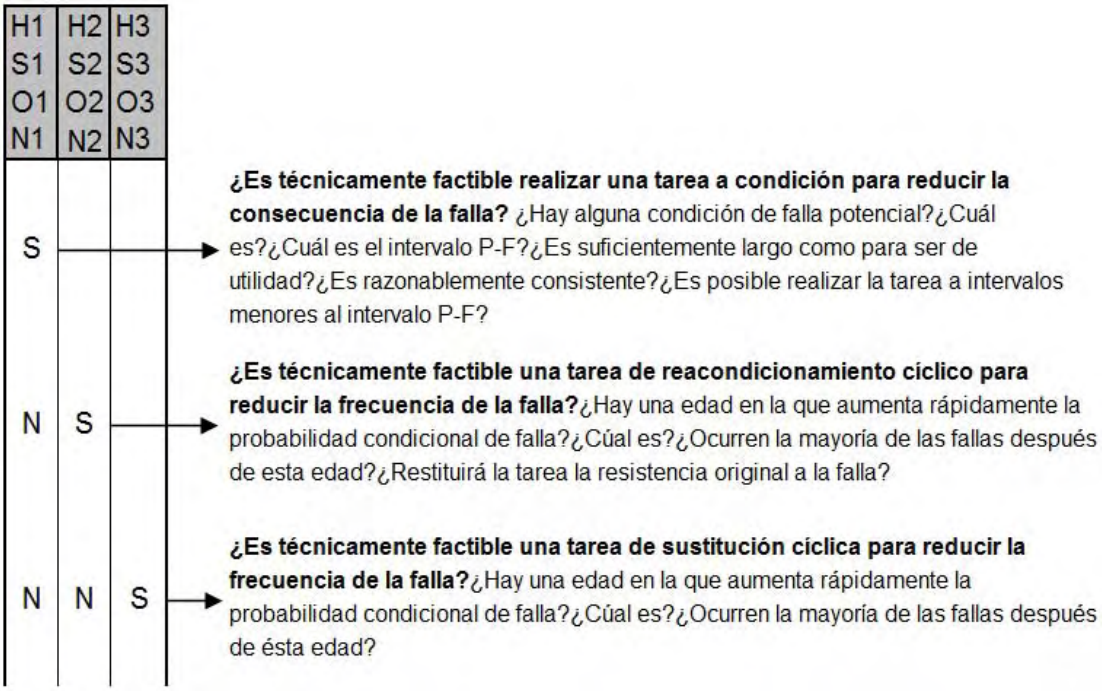


Fig. 4.17 Criterios de factibilidad técnica.

Fuente: Moubray, 1997.

Si se selecciona una tarea, se registra una descripción de la tarea; con el suficiente detalle y precisión para que quede lo suficientemente claro a la persona que realizará la tarea y la frecuencia con la que debe ser realizada.

4.5.6 Las preguntas “a falta de”

Las columnas tituladas H4, H5 y S4 en la hoja de Decisión son utilizadas para registrar las respuestas a las tres preguntas “a falta de”. La fig. 4.18 muestra como se responden a éstas tres preguntas. Nótese que éstas preguntas sólo se harán si las respuestas a las tres preguntas previas de factibilidad técnica de las tareas proactivas fueron todas negativas.

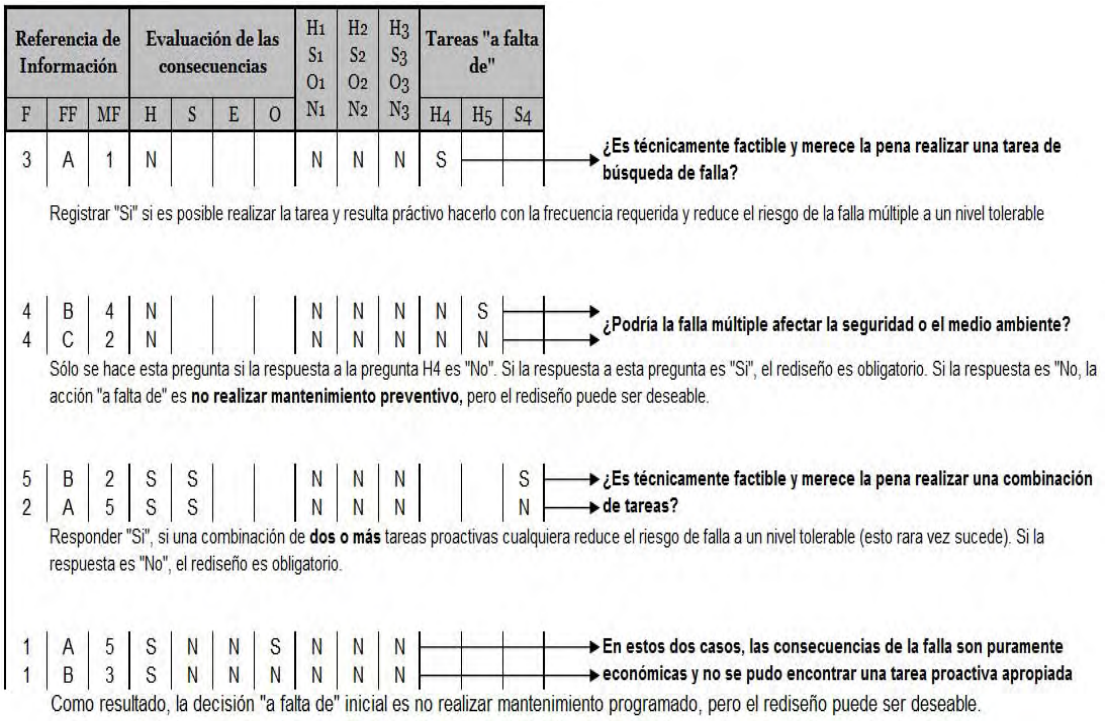


Fig. 4.18 Las preguntas “A Falta de”.
Fuente: Moubray, 1997.

- Si se hace necesario responder cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas encabezadas con H4, H5 o S4 son las que permiten registrar esas respuestas.

Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con la que debe hacerse y quién ha sido seleccionado para realizarla. La columna de “Tareas Propuestas” también se

utilizan para registrar los casos en los que se requiere rediseño o si se ha decidido que el modo de falla no necesita mantenimiento programado.

4.6 Aplicación del RCM

Tras haber realizado el análisis RCM como se detalla anteriormente, se generan las Hojas de Trabajo e Información; las cuáles son ingresadas en la base de datos del software RCM Toolkit MR. Este software administra eficientemente todos los resultados de un análisis RCM, y es utilizado desde la red interna o intranet de Codelco División Andina.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS RCM

5.1 Hoja de información RCM Nº 1 Sistema de combustible

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº	FACILITADOR	Fecha	Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI				1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Combustible	1			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Dosificar e inyectar la cantidad exacta de combustible dentro de la cámara de combustión, en el instante preciso, atomizado y a alta presión.	**A** Incapaz de inyectar combustible, o lo hace de manera deficiente.	**1** Fallo de los sellos de agua en culata, que separa sistema de enfriamiento del de inyección.	Al mezclarse refrigerante con petróleo, el motor funciona en forma errática y se detiene.
		2 Colador y líneas del combustible restringidos.	Pérdida de potencia, funcionamiento irregular. Posibilidad de detención.
		3 Exceso o distribución irregular del combustible	Humo negro o gris. Verifique la sincronización de los inyectores y la debida posición de las palancas de control de las cremalleras de los inyectores. Sincronice los inyectores y haga la afinación debida del regulador. Reemplace los inyectores defectuosos si esta condición persiste después de haber sincronizado los inyectores y de haber afinado el motor. evite el trabajo forzado del motor, pues esto causa combustión incompleta
		4 Boquilla rociadora o orificios del inyector bomba obstruidos parcialmente	Mezcla pobre, pérdida de potencia del motor. La obstrucción puede deberse a material particulado en el combustible. Limpie la boquilla rociadora según procedimiento. Tiempo de trabajo: 1 día
		5 Orificios del inyector agrandados.	Exceso de combustible dentro de la cámara. Combustible sin quemar dentro de la cámara. Reemplace el conjunto de válvula de aguja y boquilla rociadora. Tiempo de trabajo: 1 día.
		6 Acumulación de suciedad en el inyector.	Baja inyección de combustible dentro de la cámara. Atomización deficiente. Presión baja de apertura de la válvula. Desarme el inyector y limpie todas las piezas. Tiempo de trabajo 1 día.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº	FACILITADOR	Fecha	Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI	12			2
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Combustible	1			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
2 Transferir el combustible desde el estanque a los inyectores de combustible a una presión entre 60 y 80 psi y devolver el exceso al estanque.	**A** Incapaz de transferir el combustible	**1** Falta de combustible	Circuito de combustible captará aire, por lo que el motor funcionará de forma errática y se apagará. Llene el tanque principal de combustible. Tiempo de trabajo: 1 hora.
		2 Conexiones sueltas entre la bomba de combustible, línea de aspiración y el tanque.	Pérdida de potencia, funcionamiento irregular. Posibilidad de detención. Posibilidad de derrame de combustible. Apriete todas las abrazaderas de la línea. Cebe el sistema. Tiempo de trabajo: 2 horas
		3 La bomba de combustible no gira	No hay abastecimiento de petróleo. Determine la condición del impulsor de la bomba de combustible y reemplace las piezas que estén defectuosas.
		4 Engranajes o cuerpo de la bomba desgastados	Bajo abastecimiento de petróleo, funcionamiento irregular del motor. Reemplace el conjunto de engranaje y eje o el cuerpo de la bomba.

5.2 Hoja de decisión RCM Nº 1 Sistema de combustible

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº	FACILITADOR	Fecha	Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI				1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Combustible	1			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	1	S	N	N	S	S						Haga la comprobación de caudal de combustible y, de ser necesario, reemplace los elementos del colador , filtro del combustible y las líneas de combustible	A condición	Técnico Detroit
1	A	3	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	4	S	N	N	S	S						Haga los debidos cambios de filtros de combustible, primario y secundario. Verifique calidad del combustible.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit
1	A	5	S	N	N	S	S						Haga los debidos cambios de filtros de combustible, primario y secundario. Verifique calidad del combustible.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit
1	A	6	S	N	N	S	S						Haga los debidos cambios de filtros de combustible, primario y secundario. Verifique calidad del combustible.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit
2	A	1	S	N	N	S	S						Revise nivel de combustible. el tanque de combustible tiene que estar lleno por encima del nivel del tubo de aspiración del combustible.	Cada turno	Operador
2	A	2	S	N	N	S	S						Revise conexiones de combustible, abrazaderas.	Semanal	Operador
2	A	3	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
2	A	4	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		

5.3 Hoja de información RCM Nº 2 Sistema de lubricación

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº	FACILITADOR	Fecha	Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI				1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Lubricación	2			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Transferir el aceite lubricante desde el cárter hacia los filtros de aceite lubricante, enfriador de aceite lubricante y galería principal del aceite lubricante en el bloque de cilindros a una presión entre 52 y 70 psi.	**A** Incapaz de transferir el aceite lubricante o lo hace a una presión inferior a 52 psi.	**1** Nivel de aceite bajo.	Pérdida de lubricación de elementos móviles del motor. Sobrecalentamiento del motor. Rellene con aceite hasta el nivel de la varilla medidora. Tiempo de trabajo: 30 minutos.
		2 Enfriador de aceite obstruido.	El enfriador de aceite obstruido se manifiesta por temperatura excesivamente alta del aceite lubricante. Si hay alta temperatura del aceite, verifique funcionamiento del sistema de enfriamiento del motor. Remueva y limpie el núcleo del enfriador de aceite. Tiempo de trabajo: 1 día.
		3 Tapones faltantes de la galería, cigüeñal o árbol de levas.	Baja presión de aceite, circulación pobre dentro del motor. Sobrecalentamiento.
		4 Tamices de admisión parcialmente obstruidos.	Baja presión de aceite. Circulación pobre. Sobrecalentamiento. Remueva y limpie el cárter y el tamiz de admisión del aceite. Cambie los filtros del aceite.
		5 Pérdida de la succión del tamiz	No hay aspiración de aceite. Oriente o alargue tubería del tamiz de succión del aceite lubricante.
		6 Bomba de aceite desgastada o dañada	Pobre circulación de aceite y presión baja de éste. Reemplace o repare la bomba.
		7 Fuga de aire en la aspiración de la bomba	Pérdida en la presión de aceite. Desarme la tubería e instale juntas nuevas. Tiempo de trabajo: 4 hrs.
		8 Válvulas de alivio, reguladora de presión o de desvío del enfriador defectuosas.	Pérdida en la presión del aceite. Reemplace la o las válvulas defectuosas.
	B Transfiere el aceite lubricante a una presión mayor a 52 psi.	**1** Exceso de aceite en el cárter.	Alto consumo de aceite lubricante. El aceite puede pasarse al interior de los cilindros produciéndose la quema de éste. Presciencia de humo negro. Retire el aceite excedente del cárter. Tiempo de trabajo: 30 min.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	2
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Lubricación	2			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
2 Lubricar elementos del motor	**A** Incapaz de lubricar o lo hace de manera defectuosa	**1** Aceite lubricante incorrecto	Sobrecalentamiento del motor, ya que éste no lubricará correctamente los componentes que tienen roce y se producirá un desgaste excesivo.
		2 Aceite contaminado	Buje central del eje armónico se sale de su posición debido a esto baja la presión de aceite produciéndose un desgaste interno. Pérdida de potencia y torque. Cambie aceite lubricante y filtros de aceite. Tiempo de trabajo: 2 hrs.
3 Contener el aceite lubricante	**A** Incapaz de contener el aceite lubricante por fugas de éste.	**1** Cárter roto o dañado	Pérdida de aceite proporcional al daño del cárter. Falta de lubricación debido a la disminución de aceite y a la baja de presión. Reemplazar el cárter
		2 Niples de sensores de presión de aceite con hilo cortado o falta de teflón.	Pérdida de aceite por este sector, la cuál es mínima. Cambiar niple de sensor o agregar teflón en hilo para sellar. Tiempo de trabajo: 30 minutos.
		3 Pérdida de aceite sector damper	Fuga de aceite por interior de la masa del cigüeñal. Revise tapón del cigüeñal. Limpie de las partes involucradas en el montaje. Instale tapón con Loctite 515. Tiempo de trabajo 4 hrs.

5.4 Hoja de decisión RCM Nº 2 Sistema de lubricación

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Lubricación	2			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	S						Antes de cada turno revisar nivel de aceite lubricante de cada motor y añadir hasta el nivel indicado en la varilla.	Cada turno.	Operario.
1	A	2	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	3	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	4	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	5	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	6	S	N	N	S	S						Revise condición bomba de aceite lubricante	Anualmente	Técnico Detroit
1	A	7	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	A	8	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	B	1	S	N	N	S	S						Antes de cada turno revisar nivel de aceite lubricante de cada motor.	Diario	Operario
2	A	1	S	N	N	S	S						Agregue aceite lubricante correcto SAE 15W-40, junto con el cambio de filtros correspondientes.	A condición	Técnico Detroit
2	A	2	S	N	N	S	S						Toma de muestras de aceite.	Cada 125 hrs.	Operario
3	A	1	S	N	S		N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
3	A	2	S	N	S		N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
3	A	3	S	N	S		N	N	N				Ningún mantenimiento programado		

5.5 Hoja de información RCM Nº 3 Sistema de admisión de aire

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Admisión de Aire	3			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Suministrar una masa de aire comprimida al interior de los cilindros.	**A** Incapaz de suministrar la masa de aire, o inyecta menos de la debida.	**1** Lóbulos del soplador trabados por agente extraño.	Poca masa de aire al interior de los cilindros, muy poca potencia debido a mezcla muy pobre. Revisar y desarmar el soplador. Si se ha producido ralladura en los lóbulos, éstos deben ser reemplazados.
		2 Falta de lubricación de los cojinetes	Soplador funciona forzado y no proporciona la masa de aire debida. Pérdida de potencia.
	B Porción de masa de aire se desvía hacia el cárter.	**1** Junta entre el soplador y el bloque dañada.	Alta presión de cárter. Cambie la junta. Tiempo de trabajo: Alrededor de 4 horas.
		2 Fugas por la junta de la placa de extremo del bloque.	Alta presión de cárter. Reemplace la junta de la placa de extremo. Tiempo de trabajo: Alrededor de 5 hrs.
		3 Anillos de lubricación gastados.	Alta presión de cárter. Compresión baja. Pérdida de potencia. Aire pasa desde la cámara de combustión al cárter produciendo un aumento de presión en el mismo. Reemplace juego de anillos. Revise estado de aceite. Tiempo de trabajo 1 día
		4 Pistón rajado/quebrado o camisa de cilindro dañada.	Alta presión de cárter. Compresión baja. Pérdida de potencia. Reemplace kit completo (pistón, anillos camisa de cilindro.). Tiempo de trabajo:
		5 Juntas de las culatas de los cilindros en mal estado.	Pérdida de potencia. Verifique compresión de cada cilindro y reemplace la junta del cilindro que presenta problemas. Tiempo de trabajo: 5 hrs.
2 Aumentar la eficiencia del motor.	**A** Incapaz de aumentar la eficiencia del motor.	**1** Insuficiencia de Lubricación por: aceite fuera de la especificación u obstrucción en las tuberías o canales de lubricación de la carcaza central del turbo.	Se producen desgaste en elementos como: bujes radiales y de apoyo; cuello del eje, alojamientos de los bujes radiales en la carcaza central. Desgaste en las superficies del sello del plato del compresor y collarín. Se puede producir desbalanceo. También se ven huellas de bronce y azulado en los cuellos de los ejes. Se pueden apreciar exceso de humo, y una pérdida considerable de potencia. Enviar turbo a reparación empresa Detroit Chile S.A. Instalar Turbo nuevo. Tiempo de recambio 4 horas.
		2 Aceite contaminado por: carbonización por alta temperatura, partículas provenientes del desgaste de otros componentes del motor o residuos de combustión incompleta.	Se producen ralladuras y desgaste en: bujes radiales, cuellos del eje, bujes de apoyo y collarín, desbalanceo y/o ruptura de componentes del turbo. Se puede apreciar exceso de humo y una pérdida considerable de potencia. Enviar turbo a reparación a empresa Detroit Chile S.A. Instalar Turbo nuevo. Tiempo de recambio 4 horas.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Admisión de Aire	3			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
		3 Obstrucción en el sistema de admisión de aire	Pérdida de potencia del motor. Limpie el conjunto de admisión de aire. Tiempo de Trabajo no más de 3 horas.
		4 Material ajeno alojado en las ruedas del compresor o de turbina.	Turbo funciona incorrectamente o no lo hace. Verifique si el elemento ajeno dañó los alabes del compresor o de la turbina. Si fuese así reemplácelas por unas nuevas. Tiempo de trabajo 3 horas.
		5 Acumulación de suciedad en el compresor.	Pérdida de potencia del motor. Limpie el compresor y sus elementos. Tiempo de trabajo 2 horas.

5.6 Hoja de decisión RCM Nº 3 Sistema de admisión de aire

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Admisión de Aire	3			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	N	N	N				Verifique que la admisión de aire esté limpia y con su rejilla en óptimas condiciones. Después de alguna mantención al sistema de admisión de aire procure no dejar piezas o partes sueltas que puedan ser aspirados por el soplador.	A condición	Técnico Detroit
1	A	2	S	N	N	S	N	N	S				Realice los cambios de aceite y filtros según pauta Detroit.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit
1	B	1	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	B	2	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	B	3	S	N	N	S	S						Realice los cambios de aceite y filtros según pauta Detroit.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit
1	B	4	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
1	B	5	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
2	A	1	S	N	N	S	S						Limpie los turbos según pauta de mantención Detroit. Reemplace el aceite lubricante junto con los respectivos cambios de filtros.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit
2	A	2	S	N	N	S	S						Realizar toma de muestra de aceite lubricante y líquido refrigerante.	Cada 250 hrs.	Operador
2	A	3	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado		
2	A	4	S	N	N	S	S						Revise estado de filtros del lado aspiración. Apriete la abrazadera del filtro para que no tenga juego.	Semanal	Operario
2	A	5	S	N	N	S	S						Realice el cambio de filtro, según estado de éste.	A Condición	Operario

5.7 Hoja de información RCM Nº 4 Sistema de enfriamiento

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Enfriamiento	4			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Mantener una temperatura adecuada de funcionamiento del motor y del líquido refrigerante entre 81 y 95ºC.	**A** No mantiene una temperatura adecuada de funcionamiento, la cuál está por debajo de los 81ºC.	**1** Fugas excesivas por el sello del termostato.	Presencia de humo blanco. Motor no logra alcanzar su potencia nominal. Reemplace los sellos del termostato. Tiempo de trabajo: No más de 2 hrs.
	B No mantiene una temperatura adecuada de funcionamiento, la cuál está por sobre los 95ºC.	**1** Circulación pobre de refrigerante, debido a falta de éste en el circuito. También puede deberse a mangueras deterioradas o dobladas	Alta temperatura de refrigerante, lo que provocará un calor excesivo del motor. Con ello la película de aceite lubricante se adelgazará en exceso, perderá sus propiedades lubricantes y refrigerantes, lo que podría ocasionar el desgaste de piezas y componentes internos.
		2 Transferencia de calor insuficiente, debido a formación de escamas en el circuito de refrigeración.	Alta temperatura de refrigerante. Las escamas y depósitos pueden ocasionar fallas en el sistema de enfriamiento si aíslan el refrigerante de los componentes que requieren ser enfriados. La transferencia de calor reducida al refrigerante ocasiona sobrecalentamiento del motor y puede ocasionar que se pandeen los componentes. Es frecuente ver cabezas o monobloques fracturados, deterioro de mangueras, pérdida de potencia, contaminación de aceite y fallas en el sistema de escape cuando hay una condición de sobrecalentamiento.
2 Bombear el líquido refrigerante por los enfriadores de aceite, el bloque de cilindros, las culatas y el intercambiador de calor.	**A** Incapaz de bombear el líquido refrigerante o lo hace de manera defectuosa.	**1** Impulsor de la bomba de agua suelto o dañado.	Poca circulación de refrigerante por las partes del motor. Esto provocará un sobrecalentamiento del motor. Apriete el impulsor o reemplace si se encontrase deteriorado. Tiempo de trabajo: 3 hrs.
		2 Cavitación debido a aire atrapado en el sistema.	La cavitación es ocasionada por burbujas de aire que colapsan en el exterior de las paredes de las camisas de los cilindros durante la combustión. Estas burbujas de aire implosionan repetidamente en contra del costado de la camisa y puede ocasionar erosión de la misma que puede avanzar hacia la cámara de combustión. Debido a que la cavitación no puede eliminarse completamente, es necesaria la utilización de aditivos de refrigerante suplementarios para contar así con un recubrimiento protector continuo de la superficie metálica.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº	FACILITADOR	Fecha	Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI				2
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Enfriamiento	4			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
3 Regular el flujo del refrigerante proveniente de los múltiples de agua y recircularlo por el motor según temperatura.	**A** Incapaz de regular el flujo de refrigerante o lo hace de manera incorrecta.	**1** Termostato no cierra.	Funcionamiento con temperatura baja de refrigerante, ya que aunque este bajo los 81 ºC igual circulará por el intercambiador de calor. Poca potencia. Presencia de humo blanco. Remueva, inspeccione y compruebe el termostato. Instale uno nuevo su fuese necesario. Tiempo de trabajo: No más de 3 hrs.
4 Contener el líquido refrigerante.	**A** Incapaz de contener el líquido refrigerante.	**1** Fuga de refrigerante por sellos eje bomba.	Baja de nivel de refrigerante lo que produce un aumento de temperatura debido a la despresurización del sistema.

5.8 Hoja de decisión RCM Nº 4 Sistema de enfriamiento

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Enfriamiento	4			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado.		
1	**B**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Verifique el nivel del refrigerante y llene hasta el cuello del llenador si el nivel de refrigerante esta bajo. Inspeccione las mangueras para ver si están aplastadas o deterioradas. Reemplace las mangueras defectuosas.	Diario	Operador
1	**B**	**2**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Limpie el sistema con un limpiador de sistemas de enfriamiento e inunde el sistema para remover los depósitos escamosos. Limpie el exterior del núcleo del intercambiador de calor. Agregue el refrigerante y los aditivos adecuados y en cantidades establecidas por Detroit Diesel.	Anual	Técnico Detroit
2	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado		
2	**A**	**2**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**S**				Drene el sistema de enfriamiento y mantener limpio.	Anual	Técnico Detroit
3	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Haga la inspección del termostato según manual motor.	Anual	Técnico Detroit
4	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Chequear estanquedad del sistema en pautas de mantención. Tomar muestras de refrigerante nuevo y con 500 hrs. de operación para análisis.	Cada 250 hrs.	Técnico Detroit

5.9 Hoja de información RCM Nº 5 Sistema eléctrico

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Eléctrico	5			1

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Proveer la fuente de energía para arrancar el motor y suplir los requerimientos eléctricos de éste.	**A** Incapaz de suministrar energía.	**1** Banco de Baterías descargado.	Motor no parte. Tiempo de cambio de las baterías: No más de 20 minutos.
		2 Conexiones eléctricas dañadas o sueltas.	Motor no parte. Reemplazar o reparar las conexiones eléctricas, esto incluye cable y terminales. Tiempo de trabajo: Alrededor de 2 horas.
		3 Bornes en mal estado.	Motor no parte. Cambiar todos los bornes de las baterías. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
	B Incapaz de hacer arrancar el motor.	**1** Bendix del motor de arranque pegado.	Motor no parte. Enviar arranque a reparación empresa Atlas Copco. Instalar arranque de repuesto. Tiempo de recambio: No más de 2 horas.
		2 Dientes del piñón del motor de arranque fracturados.	Dependiendo del grado de fractura es posible que no alcancen a engranar correctamente los dientes y el volante no alcance la inercia necesaria para que parta el motor. Enviar arranque a reparación empresa Atlas Copco. Instalar arranque de repuesto. Tiempo de recambio: No más de 2 horas.
		3 Depósitos de carbón entre las delgas del motor de arranque.	Pérdida de fuerza del motor de arranque. Con ello no gira a la velocidad necesaria para arrancar el motor. Enviar arranque a reparación empresa Atlas Copco. Instalar arranque de repuesto. Tiempo de recambio: No más de 2 horas.
		4 Inducido del motor de arranque quemado.	Motor de arranque no gira. Enviar arranque a reparación empresa Atlas Copco. Instalar arranque de repuesto. Tiempo de recambio: No más de 2 horas.
2 Mantener la carga de la batería.	**A** Incapaz de mantener la carga de la batería.	**1** Regulador de carga del alternador quemado.	Batería no cargará, el sistema de protección se encuentra inoperativo debido a la falta de electricidad. Reemplazar regulador de carga por uno nuevo. Tiempo de recambio: No más de 1 hora.

5.10 Hoja de decisión RCM Nº 5 Sistema eléctrico

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Eléctrico	5			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Revisar cargadores de baterías 24V cargando.	Diario	Operador
1	**A**	**2**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Revisar estado de cables y terminales eléctricos del motor. Esto incluye baterías, alternador y motor de arranque.	Diario	Operador
1	**A**	**3**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Revisar bornes de batería. Apretar si fuese necesario.	Diario	Operador
1	**B**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado.		
1	**B**	**2**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado.		
1	**B**	**3**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado.		
1	**B**	**4**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado.		
2	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**				Ningún mantenimiento programado.		

5.11 Hoja de información RCM Nº 6 Sistema de escape

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Escape	6			1

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Abrir y cerrar las canalizaciones (válvulas de escape) por donde escapan los gases quemados del interior de los cilindros.	**A** Abre o cierra las válvulas de manera defectuosa.	**1** Válvula pegajosa, por depósitos de carbón en asientos o cabeza de válvula.	Debido a que las válvulas no asientan bien se produce una pérdida de compresión. Esto lleva a una pérdida de potencia. Limpie las válvulas, guías e insertos con combustible. Tiempo de trabajo: 1 día.
		2 Válvula doblada.	Determine si existe contacto entre la cabeza de válvula y el pistón. Posibles daños en la guía e inserto de la válvula, la culata de cilindro o el pistón. Debido a que las válvulas no asientan bien se produce una pérdida de compresión. Esto conlleva a una pérdida de potencia. Reemplace las válvulas dobladas. Tiempo de trabajo: 1 día.
		3 Todas las válvulas dobladas	Pérdida considerable de potencia, ya que todas las válvulas asientan incorrectamente. Verifique y corrija si existe una sincronización incorrecta del tren de engranajes. Tiempo de trabajo: 1 día.
2 Conducir todos los gases quemados a un punto situado fuera de la sala de generación.	**A** Incapaz de conducir los gases o hay demasiada contrapresión de escape.	**1** Tubería de escape defectuosa	Alta presión de cárter. Pérdida de potencia. Revisar tubería de escape y cambiar o reparar según corresponda.

5.12 Hoja de decisión RCM Nº 6 Sistema de escape

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Escape	6			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**S**					Revisión estado de válvulas de escape.	Anual	Técnico Detroit
1	**A**	**2**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**S**					Revisión estado de válvulas de escape.	Anual	Técnico Detroit
1	**A**	**3**	**S**	**N**	**N**	**S**	**N**	**S**					Revisión estado de válvulas de escape.	Anual	Técnico Detroit
2	**A**	**1**	**S**	**N**	**N**	**S**	**S**						Revisar tubería de escape. Inspección visual.	Mensual	Operario

5.13 Hoja de información RCM Nº 7 Sistema de protección

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Protección	7			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
1 Activar una alarma sonora cuando la presión del aceite lubricante baje a los 30 psi y activar el mecanismo de detención del motor cuando la presión del aceite lubricante descienda a los 20 psi.	**A** Incapaz de activar la alarma sonora ni activar el mecanismo de detención del motor.	**1** Conexiones eléctricas flojas del sensor.	Al descender la presión de aceite lubricante bajo los 20 psi, habrá una lubricación pobre o no lubricación de los elementos móviles, lo que llevará a un aumento de temperatura de éstos y desgaste o rotura prematuro. Reemplace o repare cableado eléctrico. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
		2 Sensor en falla o descalibrado	Al descender la presión de aceite lubricante bajo los 20 psi, habrá una lubricación pobre o no lubricación de los elementos móviles, lo que llevará a un aumento de temperatura de éstos y desgaste o rotura prematuro. Cambie sensor por uno nuevo. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
2 Activar una alarma sonora cuando la temperatura del líquido refrigerante suba a los 105ºC y activar el mecanismo de detención del motor cuando la temperatura del líquido refrigerante alcance los 110ºC.	**A** Incapaz de activar la alarma sonora ni activar el mecanismo de detención del motor.	**1** Conexiones eléctricas flojas del sensor.	Al aumentar la temperatura del refrigerante por sobre los 110ºC se produce un sobrecalentamiento del motor. Esto provoca un rápido sobrecalentamiento de las camisas de los cilindros, pudiendo provocar daños directos sobre culatas y cilindros. Repare o reemplace cableado eléctrico. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
		2 Sensor en falla o descalibrado	Al aumentar la temperatura del refrigerante por sobre los 110ºC se produce un sobrecalentamiento del motor. Esto provoca un rápido sobrecalentamiento de las camisas de los cilindros, pudiendo provocar daños directos sobre culatas y cilindros. Cambie sensor por uno nuevo. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
3 Activar una alarma sonora y activar el mecanismo de detención del motor cuando éste alcance una frecuencia de 55Hz.	**A** Incapaz de activar la alarma sonora ni activar el mecanismo de detención del motor.	**1** Conexiones eléctricas flojas del sensor.	El aumento de la frecuencia del motor se debe a un problema de la inyección de combustible o a la motorización del generador en la cogeneración. Esto puede provocar una desincronización de las partes móviles y graves daños internos al motor. Repare o reemplace cableado eléctrico. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora
		2 Sensor en falla o descalibrado	El aumento de la frecuencia del motor se debe a un problema de la inyección o a la motorización del generador en la cogeneración. Esto puede provocar una desincronización de las partes móviles y graves daños internos al motor. Repare o reemplace sensor. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	2
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Protección	7			2

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LAS FALLAS
4 Activar una alarma sonora y activar el mecanismo de detención del motor cuando la presión del cárter exceda los 2,4"H2O	**A** Incapaz de activar la alarma sonora ni activar el mecanismo de detención del motor.	**1** Conexiones eléctricas flojas del sensor.	Alto consumo de aceite, aceite pasa a la cámara de combustión produciéndose la quema de éste. Pérdida de potencia, humo negro. Reemplace o repare cableado eléctrico. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
		2 Sensor en falla o descalibrado	Alto consumo de aceite, aceite pasa a la cámara de combustión produciéndose la quema de éste. Pérdida de potencia, humo negro. Reemplace o repare cableado eléctrico. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
5 Activar una alarma sonora cuando la temperatura de los gases de escape alcancen los 550ºC.	**A** Incapaz de activar la alarma.	**1** Termocuplas dañadas o en falla.	Al aumentar la temperatura de los gases de escape, éstos pueden dañar los alabes del conjunto turboalimentador, lo que se traduciría en una pérdida de potencia por malfuncionamiento del turboalimentador.
6 Activar una alarma sonora cuando la presión de combustible en el múltiple de combustible baje a 50 psi.	**A** Incapaz de activar la alarma.	**1** Conexiones eléctricas dañadas o sueltas.	Funcionamiento irregular del motor, puede haber vibración excesiva, pérdida de potencia o apagamiento. Reemplace o repare cableado eléctrico. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
		2 Sensor en dañado o descalibrado.	Funcionamiento irregular del motor, puede haber vibración excesiva, pérdida de potencia o apagamiento. Cambie el sensor por uno nuevo. Tiempo de trabajo: No más de 1 hora.
7 Detener el motor de forma manual cuando se suscite una condición anormal.	**A** No detiene el motor.	**1** Válvulas en la cámara de interrupción de aire atascadas.	No detiene el motor. Si se suscita una condición anormal de malfuncionamiento, el motor puede resultar seriamente dañado.

5.14 Hoja de decisión RCM Nº 7 Sistema de protección

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA/ACTIVO	SISTEMA Nº			Hoja
	Motor Detroit Diesel 16V-149TI		FACILITADOR	Fecha	1
	SUB-SISTEMA/COMPONENTE	SUB-SISTEMA Nº	David Vásquez O.	31-10-2005	De
	Protección	7			1

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"			Tareas Propuestas	Frecuencia Inicial	A realizar por
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	**A**	**1**	**N**				**S**						Revisar estado de conexiones eléctricas y cables	Diario	Operario
1	**A**	**2**	**N**				**N**	**N**	**N**	**S**			Realizar tarea de intervalo de búsqueda de falla.	Cada 6 meses	Técnico Detroit
2	**A**	**1**	**N**				**S**						Revisar estado de conexiones eléctricas y cables	Diario	Operario
2	**A**	**2**	**N**				**N**	**N**	**N**	**S**			Realizar tarea de intervalo de búsqueda de falla.	Cada 6 meses	Técnico Detroit
3	**A**	**1**	**N**				**S**						Revisar estado de conexiones eléctricas y cables	Diario	Operario
3	**A**	**2**	**N**				**N**	**N**	**N**	**S**			Realizar tarea de intervalo de búsqueda de falla.	Cada 6 meses	Técnico Detroit
4	**A**	**1**	**N**				**S**						Revisar estado de conexiones eléctricas y cables	Diario	Operario
4	**A**	**2**	**N**				**N**	**N**	**N**	**S**			Realizar tarea de intervalo de búsqueda de falla.	Cada 6 meses	Técnico Detroit
5	**A**	**1**	**N**				**N**	**N**	**S**				Cambiar termocuplas.	Cada 6 meses	Técnico Detroit
6	**A**	**1**	**N**				**S**						Revisar estado de cables.	Diario	Operario.
6	**A**	**2**	**N**				**N**	**N**	**N**	**S**			Realizar tarea de intervalo de búsqueda de falla.	Cada 6 meses	Técnico Detroit
7	**A**	**1**	**N**				**N**	**N**	**N**	**S**			Accionar el sistema de parada manual para detener el motor.	Mensual	Operario.

5.15 Hoja de trabajo motor Detroit 16V-149TI

HOJA DE TRABAJO RCM	Instructivo operación motor Detroit 16V-149TI	Facilitador	Fecha	Hoja 1 De 1
		David Vásquez O.	31-10-2005	

VERIFICACIONES ANTES DE PARTIDA

Referencia	Detalle	Frecuencia	A realizar por
Aceite lubricante	Verificar el nivel de aceite motor. Si fuese necesario, añada aceite para elevar el nivel a la marca en la varilla.	Cada turno	Operario
Petróleo	Verificar si el estanque de petróleo se encuentra hasta el ¾ de su capacidad. Si no fuese así llenarlo hasta esa medida. Verificar petróleo disponible en estanque de 70.000L	Cada turno	Operario
Calefactores motor	Comprobar que éstos estén en servicio tocando el block del motor y asegurándose que este tibio.	Cada turno	Operario
Cargadores de batería	Revisar que se encuentren encendidos los indicadores de carga de baterías de 24Vcc y 125Vcc.	Cada turno	Operario
Caudal de agua	Revisar caudal de agua no inferior a 9 L/s.	Cada turno	Operario
Nivel refrigerante	Revisar en cada turno el nivel de refrigerante del estanque superior sobre 3cm visibles.	Cada turno	Operario
Extractor de aire	Debe estar en posición automático.	Cada turno	Operario
Puertas sala	Abrir completamente las puertas de la entrada a la sala de generación.	Cada turno	Operario

VERIFICACIONES DURANTE FUNCIONAMIENTO

Fugas	Observar fugas de aceite, agua o petróleo desde el Motor	Cada 1/2 HR	Operario
Ruidos	Atención a ruidos extraños desde el motor	Siempre	Operario
Refrigerante	Revisar temperatura de refrigerante	Cada 1/2 HR	Operario
Aceite lubricante	Revisar presión de aceite	Cada 1/2 HR	Operario

Conclusiones

Al realizar un análisis RCM en los motores de División Andina Codelco podemos concluir los siguientes puntos:

1.- Al término de ésta tesis no se pudo cumplir su objetivo central, el cuál fue aplicar el RCM en los Motores 16V-149TI, ya que el período proporcionado por Andina para el desarrollo de esta tesis fue desde Febrero a Octubre del año 2005; el análisis se termina en Septiembre del mismo año, y desde este mes los equipos se utilizan solo para la generación de emergencia eléctrica. Por lo que no se pudo ver los resultados de este plan de mantenimiento. Sin embargo se realizó el análisis completo del motor y se ingresó al software RCM Toolkit para su posterior aplicación por parte del Departamento de Mantención.

2.- El equipo se dividió en subsistemas para un mayor detalle en la descripción de la función, en la falla funcional, en el modo de falla y en la consecuencia de la falla.

3.- El RCM se puede aplicar a cualquier equipo o conjunto de ellos. Lo fundamental es preparar una persona experta o facilitador en RCM y alimentarlo con el personal técnico, que es el que tiene los conocimientos de los activos, en cuanto a funcionamiento, operación, fallas, mantenciones, etc.

4.- Debido a que los procedimientos de mantención de un equipo establecidos por los distribuidores, generalmente son efectivos hasta cierto punto, ya que no todos los equipos operan bajo los mismos parámetros de funcionamiento, o bajo el mismo contexto operacional, realizar un análisis RCM a un equipo nuevo o que lleve poco tiempo operando es de gran ayuda para el personal de mantención, porque se pueden tomar decisiones más rápidas y más asertivas en cuanto a las posibles fallas y su respectiva tarea proactiva a realizar.

5.- Este análisis RCM fue agregado al Software RCM Toolkit M.R., de la División para comenzar a ser aplicado por la Unidad de Servicio de Mantenimiento Industrial.

6.- Al realizar este análisis se generó una base de datos con información actual y detallada de todas las fallas que han sucedido y que posiblemente sucedan al equipo. Cabe destacar que la idea de un análisis RCM es su retroalimentación; o sea no basta con quedarse con el análisis en si, a medida que vayan sucediendo fallas no consideradas, éstas deben ser incluídas en el análisis junto con su tarea preactiva asociada.

Bibliografía

[1] *B.S. Dhillon, Ph.D*.; "**Engineering Maintenance**, A Modern Approach", CRC PRESS, Washington, D.C., 2002.

[2] *Detroit Diesel Serie 149T*, "**Guía del Operador del Motor**", Detroit Diesel Corporation, 1993.

[3] *Detroit Diesel Serie 149T*, "**Manual de Servicio**", Detroit Diesel Corporation, 1977.

[4] *Detroit Diesel*, "**Turboalimentadores: Guía del Técnico**", Detroit Diesel Corporation, 1993.

[5] *Gerencia de Planificación y Desarrollo*, "**Caso Vigente 2002**", Codelco Chile, División Andina, 2002.

[6] *Gerencia de Servicios y Suministros*, "**Instructivo Secuencia Maniobras Generación y Cogeneración**", Codelco Chile, División Andina, 2003.

[7] *Douglas J. Plucknette*, "**When and How to Template an RCM Analysis**", Reliability Solutions Inc., 2002.

[8] *Gumercindo Vilca Cáceres, Pedro Saá Herrera*, "**Gestión del Mantenimiento**", Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia, 1997.

[9] *Lozano Conejero, Antonio*, "**Confiabilidad, Teoría y Práctica**", Eudeba Editorial, Buenos Aires 1969.

[10] *Moubray, John*., "**Reliability Centered Maintenance**", Industrial Press, New York, 1997.

[11] *Pérez, Carlos Mario*, "**El Camino Hacia el RCM–Mantenimiento Centrado en Confiabilidad**", SOPORTE & CIA. LTDA., 1997.

[12] "**Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment**", National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, D.C., 1996.

[13] *Tavares Lourival*, Augusto, "**Administración Moderna de Mantenimiento**", 1999.

[14] *TermoTrane Integral Solutions*, "**Grupos Generadores Sala de Emergencia División Andina**", Proyecto NºGCC-CDA-001/04, 2004.

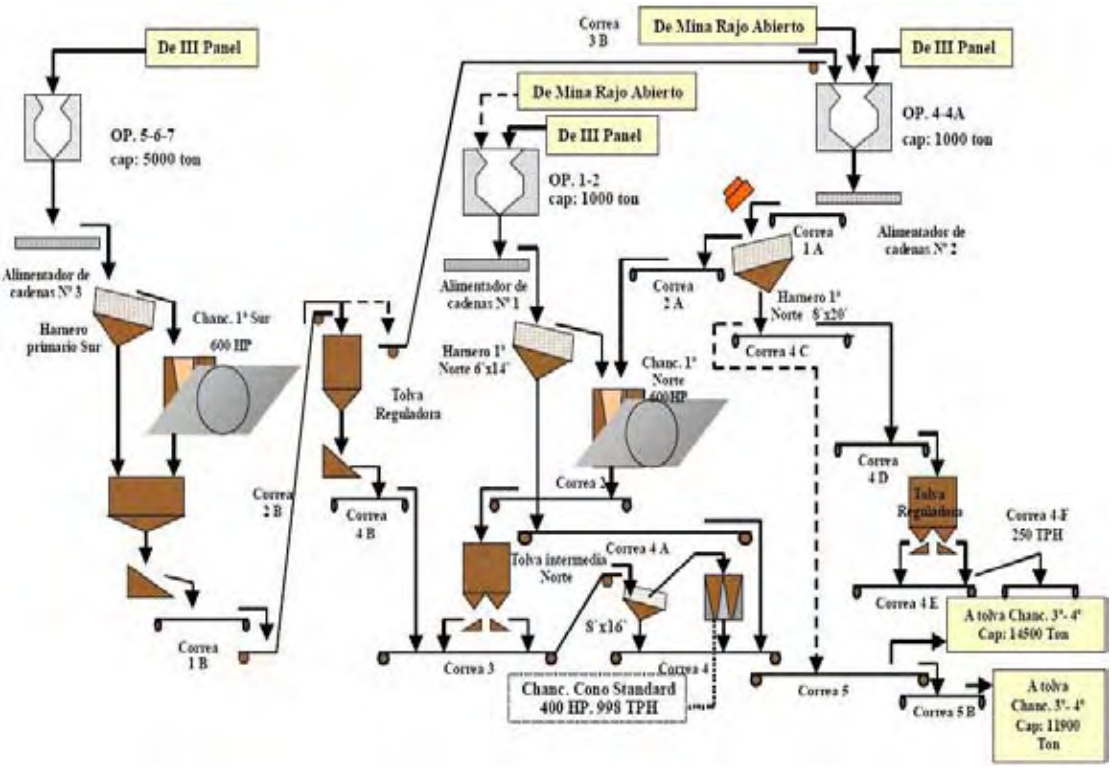
[15] *Zwingelstein, Gilles C*., "**Reliability Centered Maintenance**", Annual Reliability and Maintainability Symposium, AR&MS, 1998.

[16] *Pascual J., Rodrigo*, "**Mantención de Maquinaria**", Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, 2004

Anexos

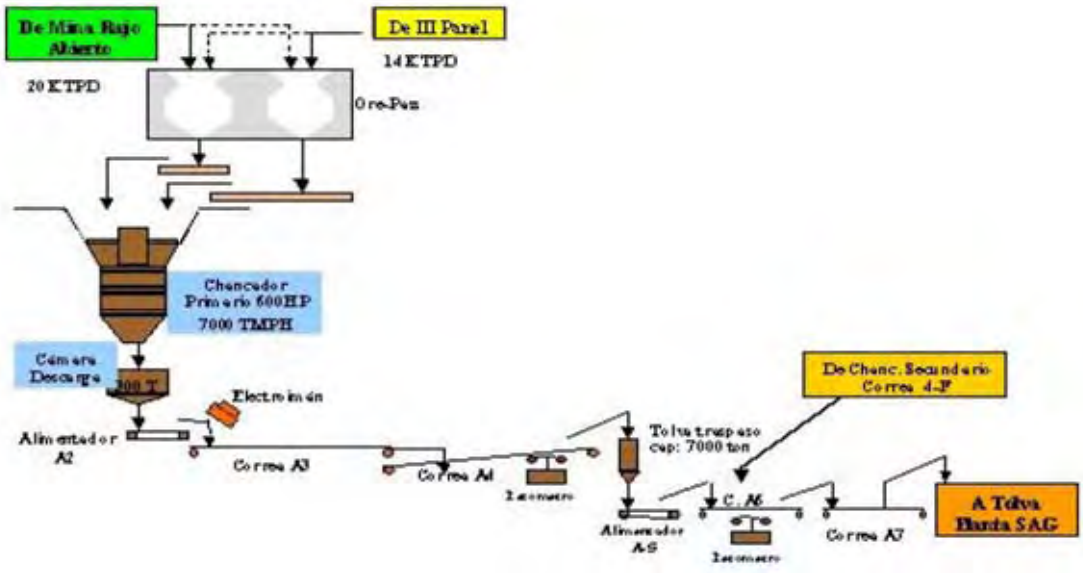
Anexo 1.1:

Circuito chancado primario-secundario.



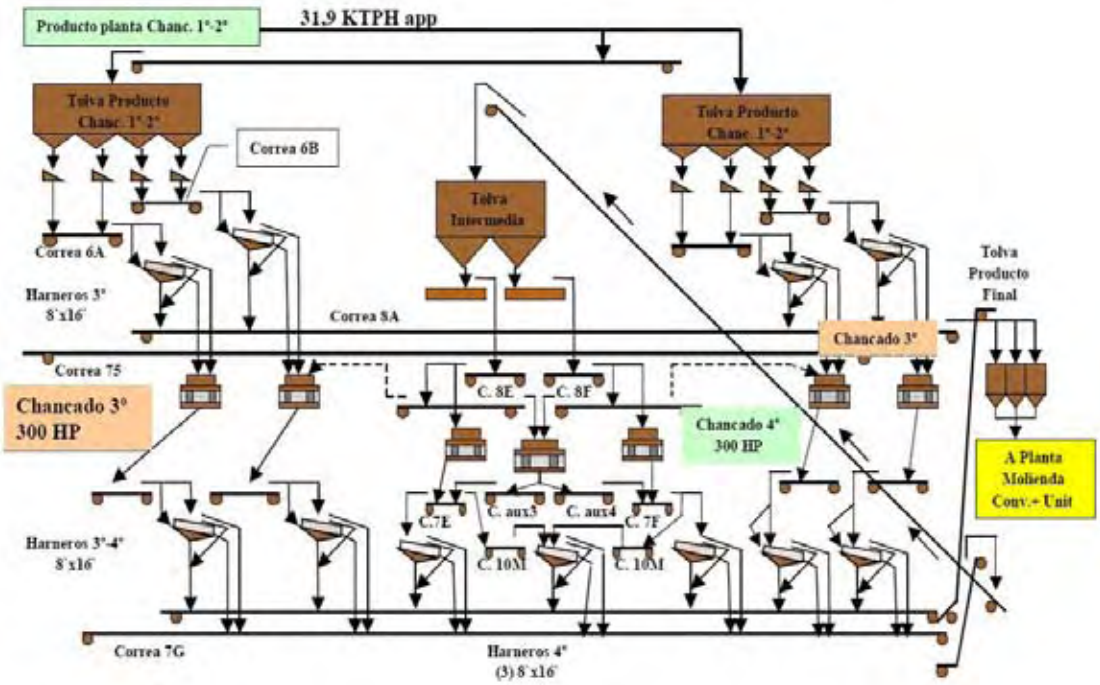
Anexo 1.2:

Circuito chancado primario Don Luís y sistema de transporte del mineral a planta SAG.



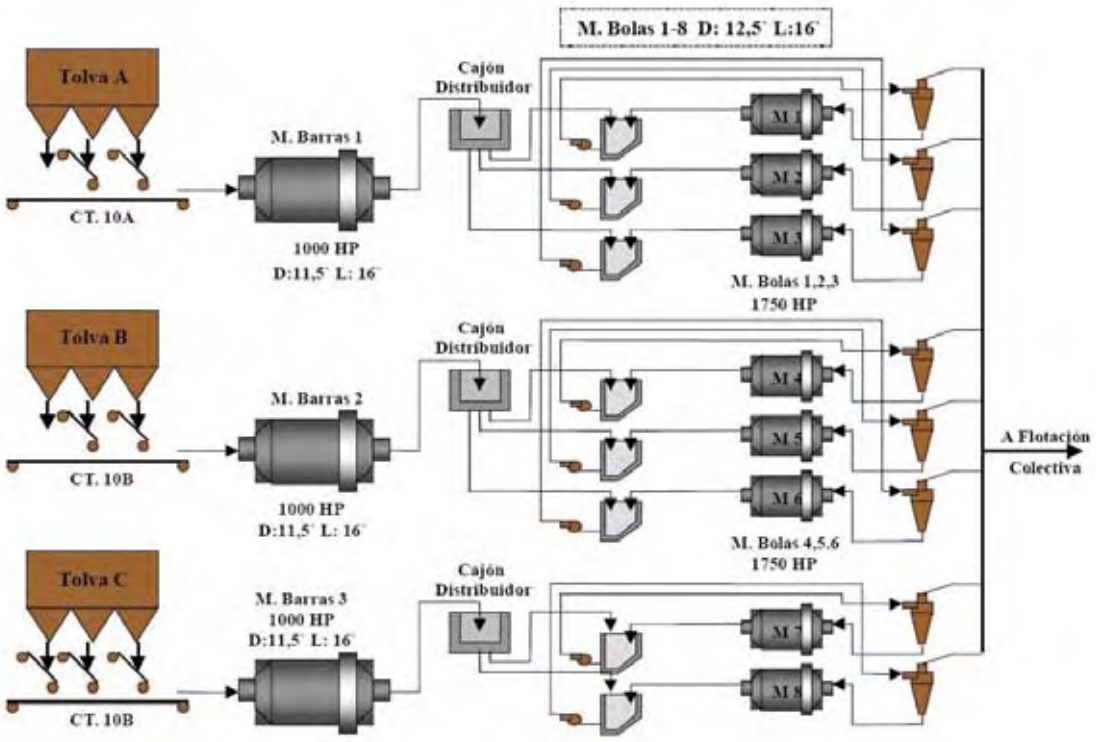
Anexo 1.3:

Circuito chancado terciario-cuaternario.



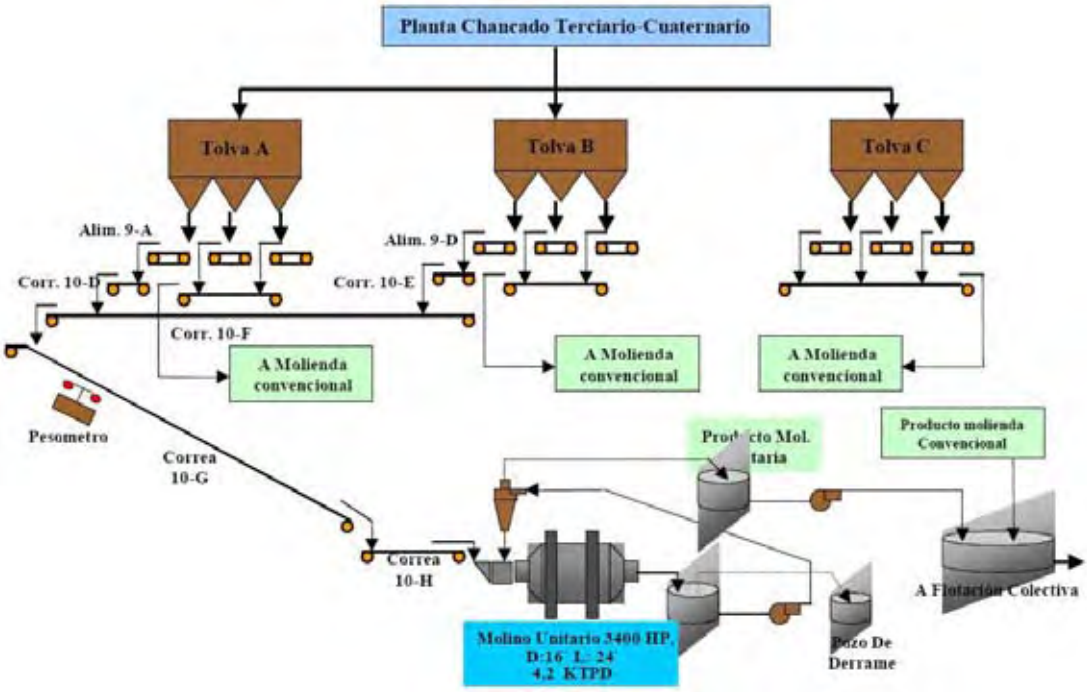
Anexo 1.4:

Circuito de molienda convencional.



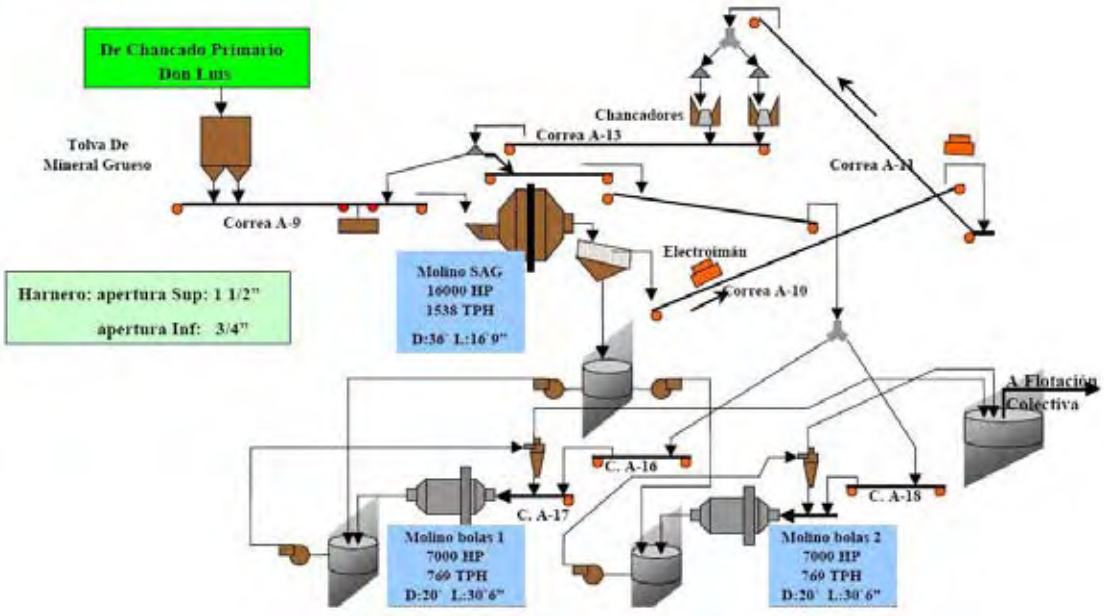
Anexo 1.5:

Circuito de molienda unitaria.



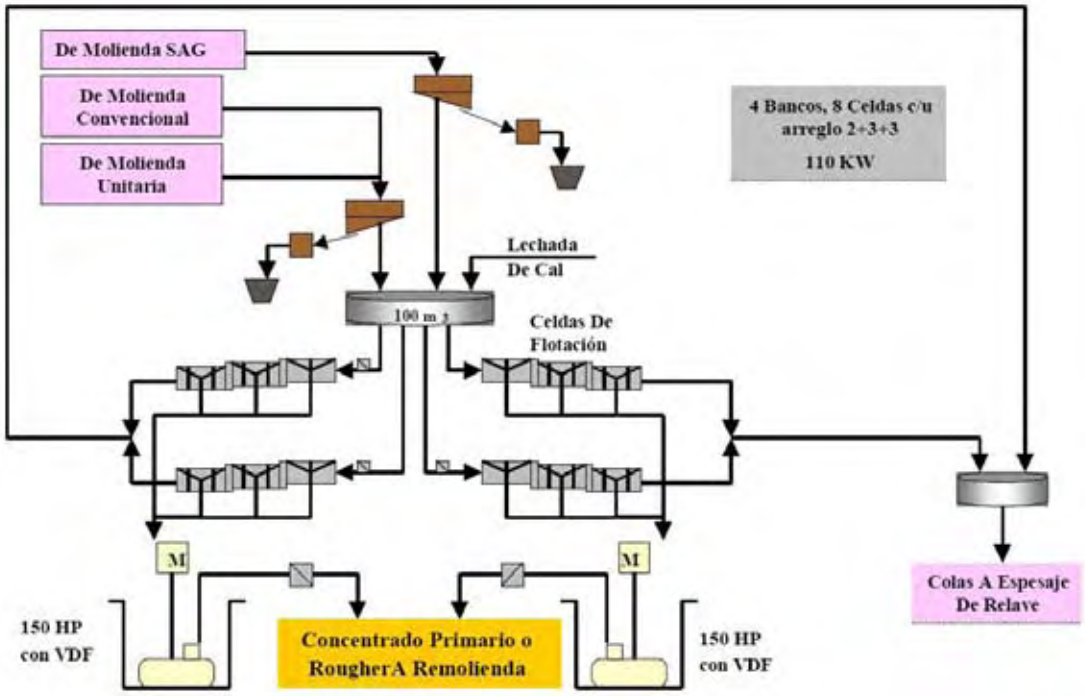
Anexo 1.6:

Circuito de molienda SAG.

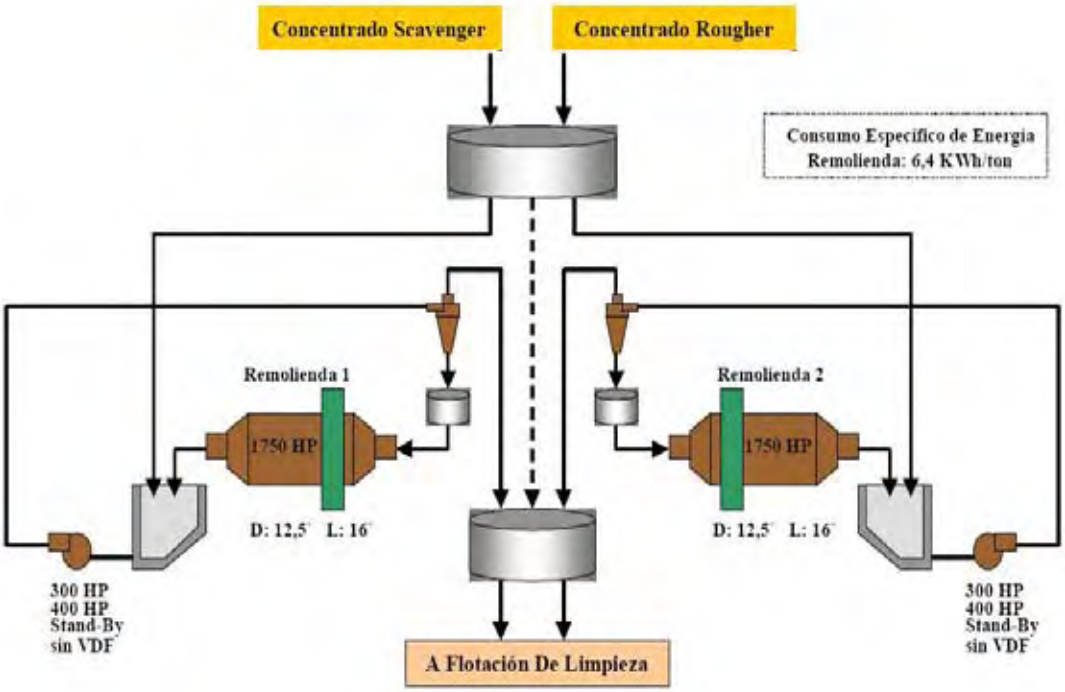


Anexo 1.7:

Circuito de flotación colectiva.

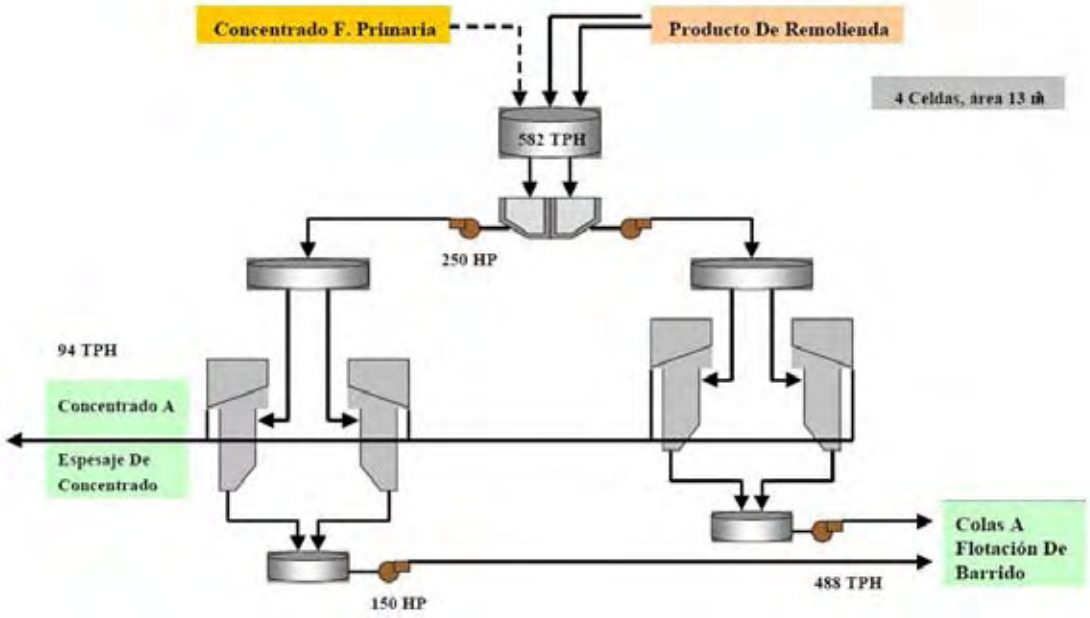


Anexo 1.8:
Circuito de remolienda.

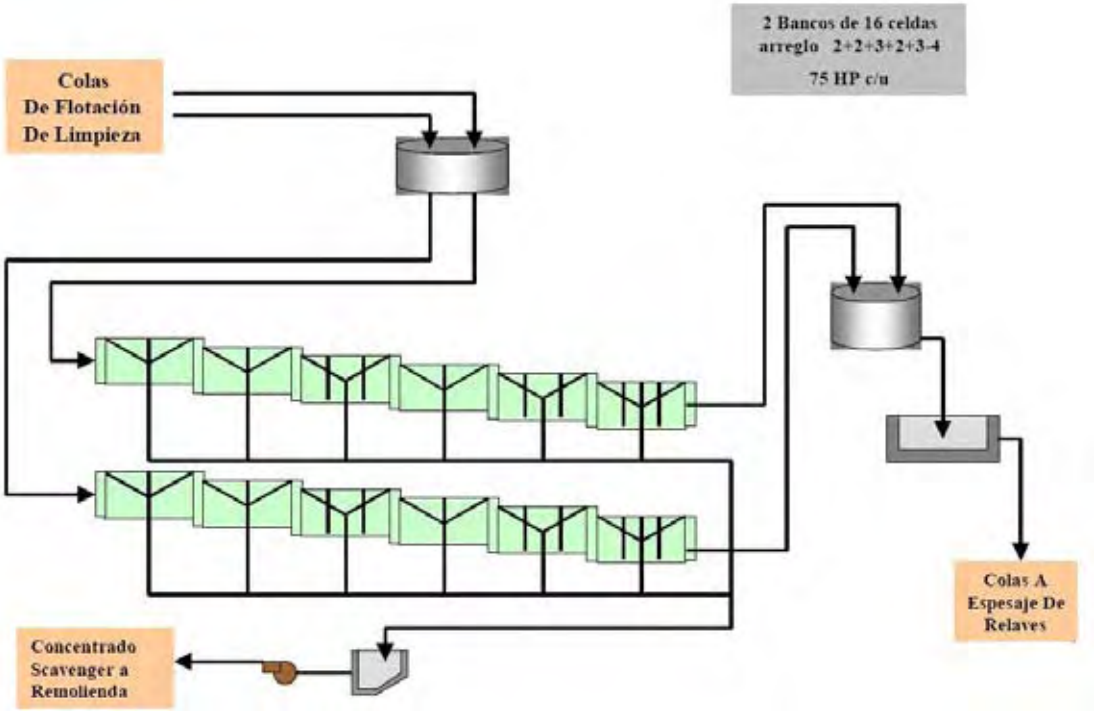


Anexo 1.9:

Circuito de flotación de limpieza.

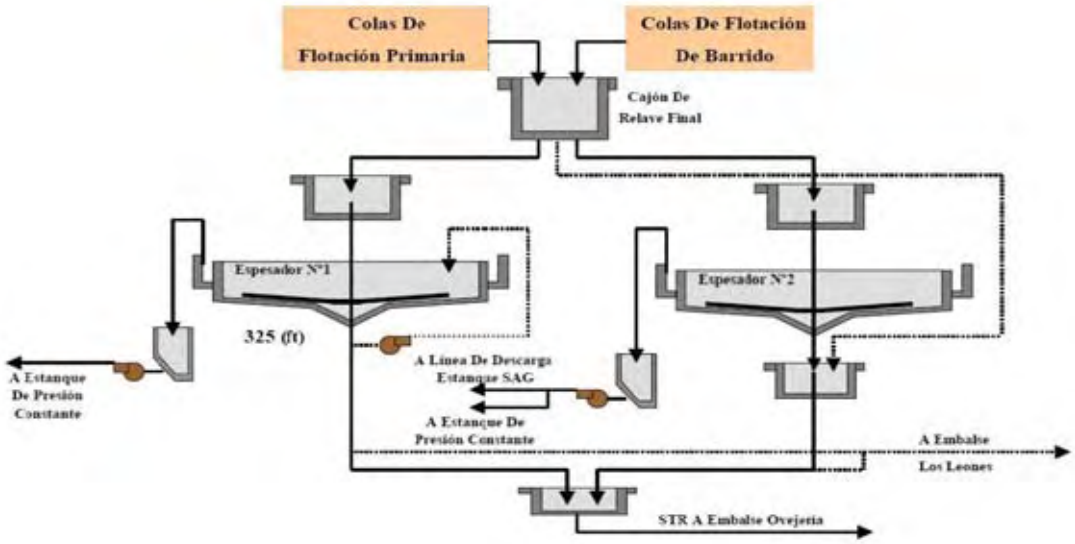


Anexo 1.10:
Circuito de flotación de barrido.

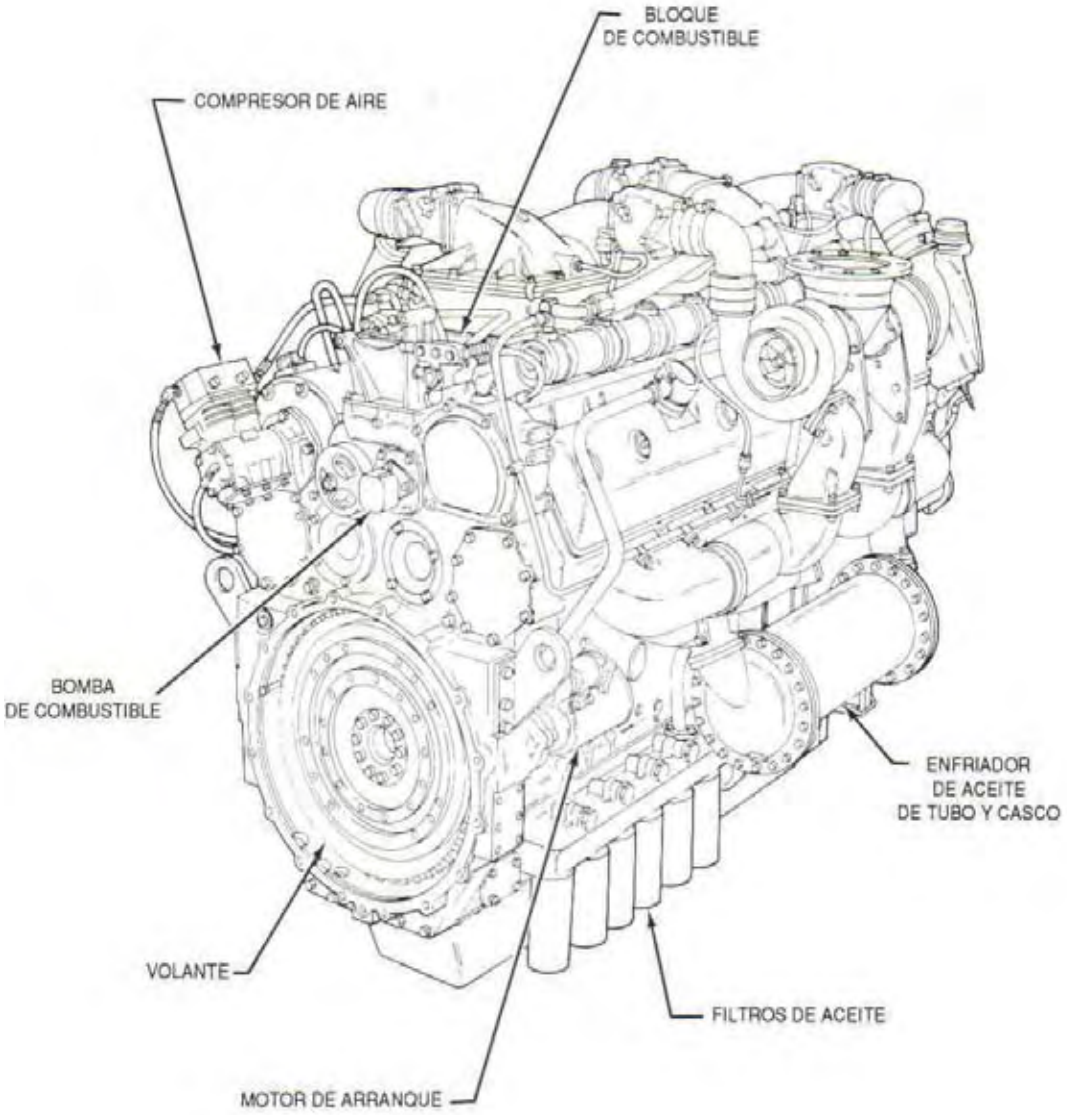


Anexo 1.11:

Circuito de espesaje de relaves.



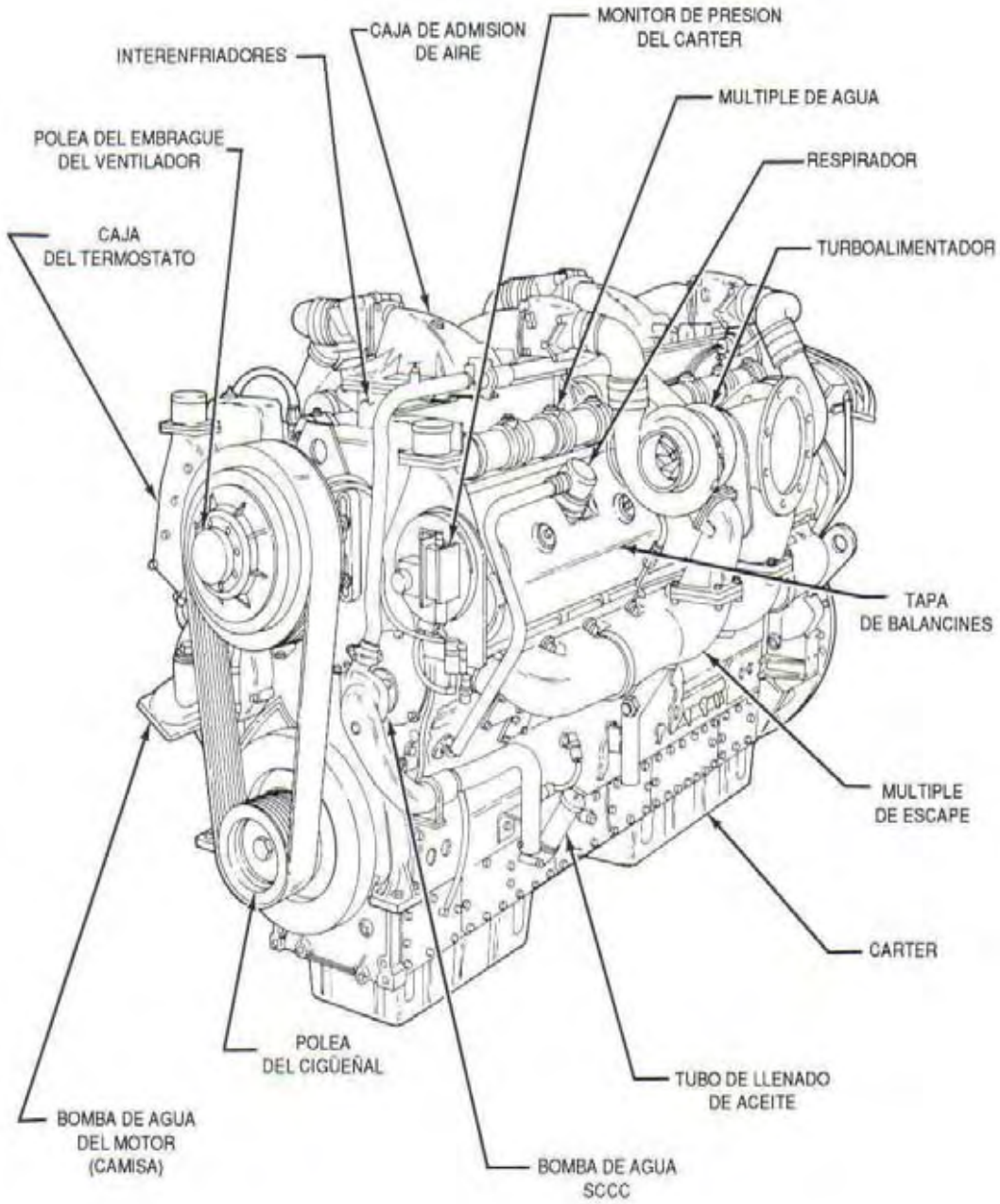
Anexo 2.1:
Motor Detroit Diesel 16V-149TI frontal.



MOTOR INDUSTRIAL (DDEC) TIPICO DE LA SERIE 149

Anexo 2.2:

Motor Detroit Diesel 16V-149TI posterior.



MOTOR INDUSTRIAL (DDEC) TIPICO DE LA SERIE 149

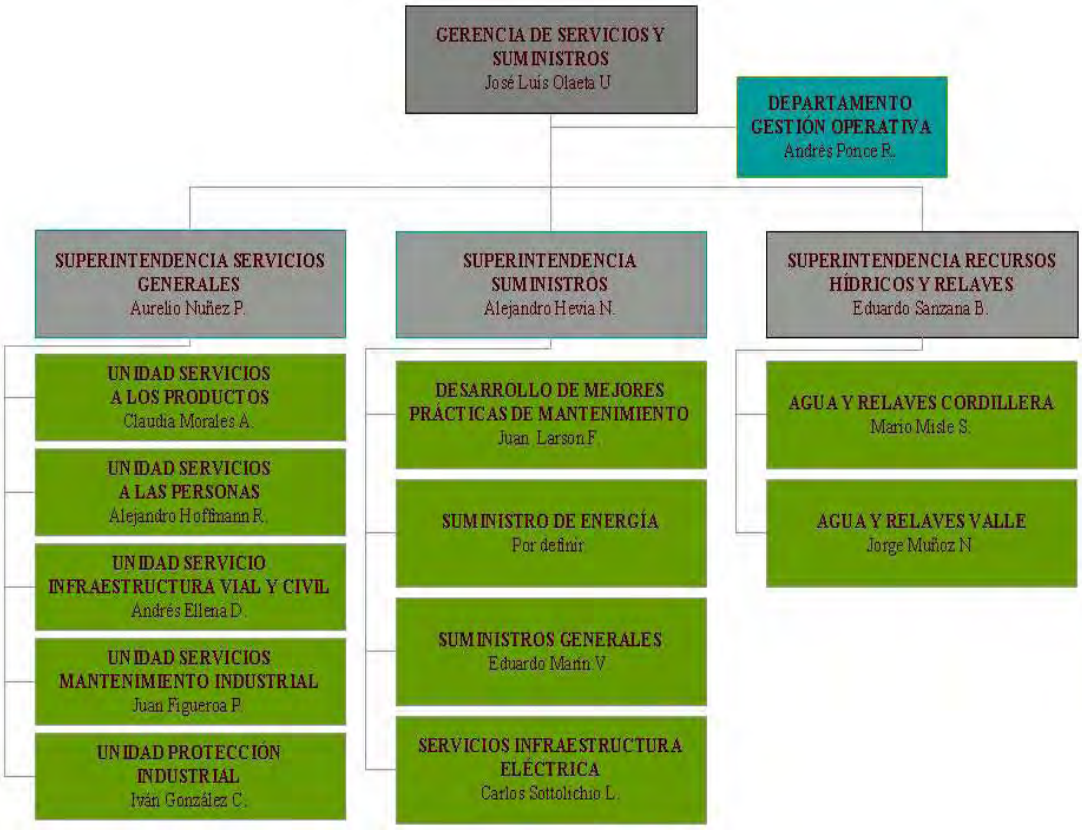
Anexo 2.3:

Datos técnicos motor Detroit Diesel 16V-149TI.

Motor	
Marca	Detroit 149 - 16V TI
Modelo	91637316
Series GG1/GG2/GG3	16E0012676
	16E0012436
	16E0012677
Velocidad de Giro (r.p.m.)	1.500
Potencia (kVA)	1.250
Volts/Amperes	4.160/173
Potencia (HP)	1.900
Sistema de Lubricación	
Presión Aceite Lubricante Mínima (psi)	50
Turboalimentador	
Presión de Salida del Compresor con Carga plena	
(in Hg)	67
(psi)	33
Sistema de Enfriamiento	
Temperatura de refrigerante (ºF) Normal	170-185
Caudal de Agua Industrial (gpm)	220
Temperatura Máxima de entrada de agua (ºF)	70
Temperatura salida del agua calculada (ºF)	98
Aceite	
Marca y Tipo	Mobil SAE 15W-40

Anexo 3.1:

Diagrama Gerencia de Servicios y Suministros Codelco División Andina.



Anexo 3.2:

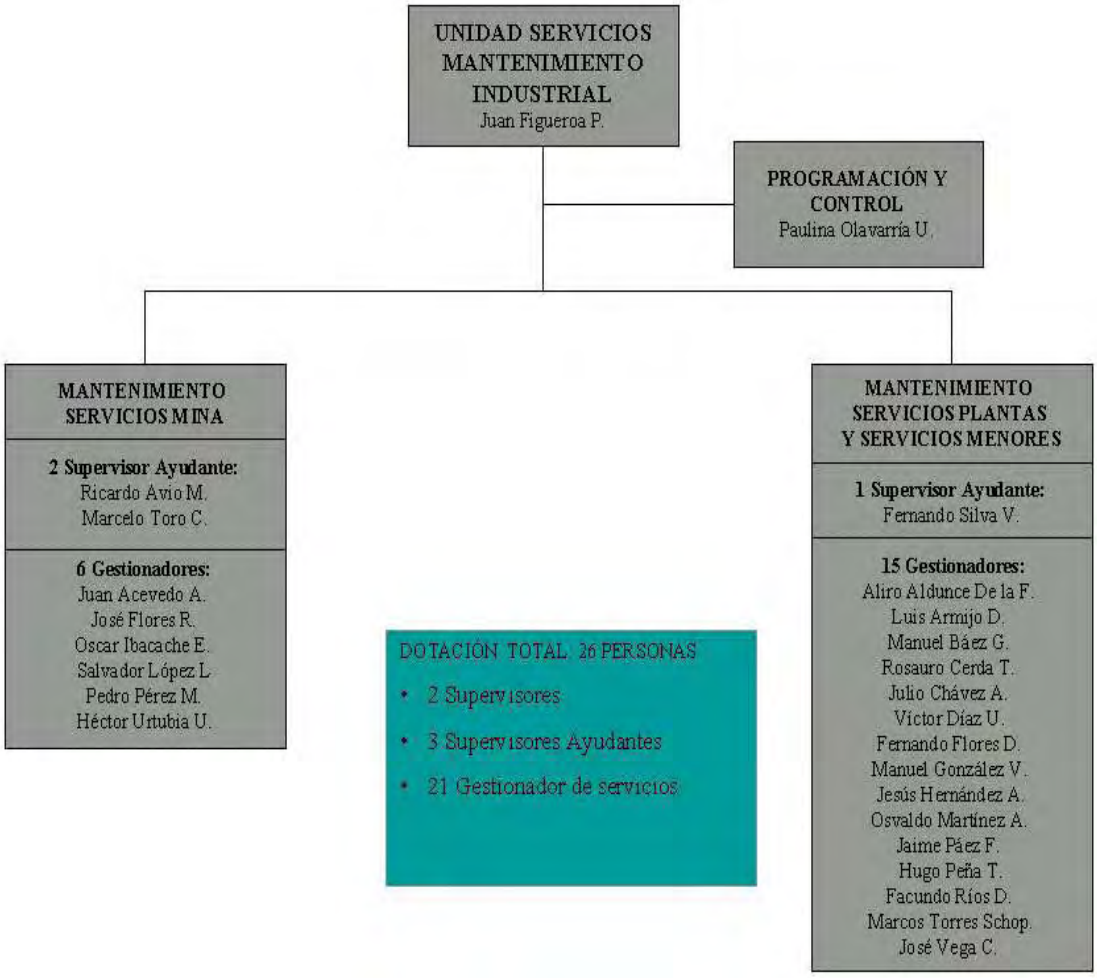



Diagrama Unidad Servicio de Mantenimiento Industrial Codelco División Andina.