

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y
Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,
Mecánica Eléctrica y Mecatrónica



**PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL
USANDO TÉCNICAS RCM EN PALAS ELÉCTRICAS DE CABLE 7495
HYDRACROWD PARA UNA MINA UBICADA EN MOQUEGUA**

Tesis presentada por el Bachiller:

Valencia Flores, Víctor Andrés Hernán

Para optar por el Título Profesional de:

Ingeniero Mecánico – Electricista

Asesor:

Mg. Quispe Ccachuco, Marcelo

Arequipa - Perú

2022

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 02 de Enero del 2022

Dictamen: 002710-C-EPIMMEM-2022

Visto el borrador del expediente 002710, presentado por:

2011224221 - VALENCIA FLORES VICTOR ANDRES HERNAN

Titulado:

**PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL USANDO RCM EN PALAS
ELÉCTRICAS DE CABLE 7495 HYDRACROWD PARA UNA MINA UBICADA EN MOQUEGUA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**1733 - VALENCIA SALAS MARIO JOSE
DICTAMINADOR**



**1839 - DONAYRE CAHUA JESUS MANUEL
DICTAMINADOR**

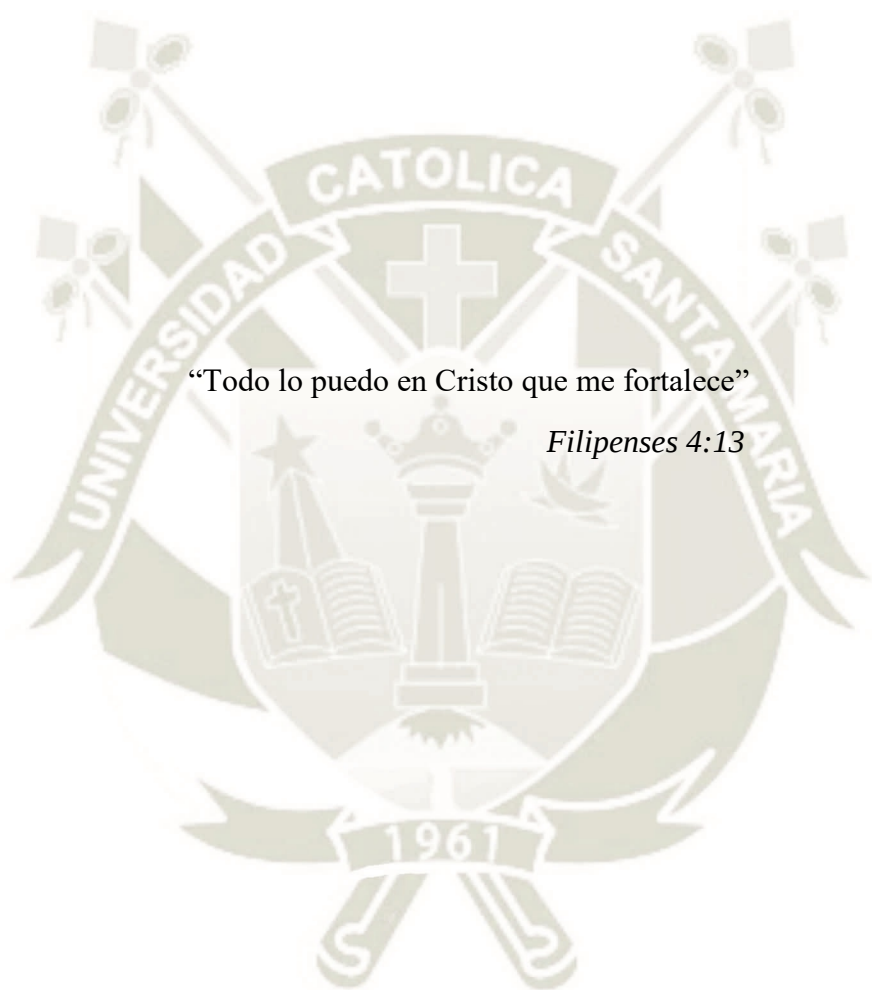


**2396 - CACERES NUÑEZ AUGUSTO EMILIO CARLOS
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

Para Irma, quien con su apoyo y amor incondicional lograron hacer de mi un hombre de bien en este mundo. A mi madre María Azalia y mi padre Hernán Roberto, gracias por darme la vida y siempre creer en mí desde el primer momento. A mis hermanos Adolfo y Giancarlo que siempre fueron protección, ejemplo y guía de cómo hacer las cosas bien. A Raúl y Karina por motivarme y siempre estar pendiente de mi desarrollo profesional. En el cielo a mis abuelos que me bendicen todos los días. Para mi esposa Dayana quien siempre me motiva a salir adelante e ir siempre un escalón arriba. Para Valentina, cuando leas esta dedicatoria te sirva de ejemplo para saber que puedes alcanzar todos tus sueños ¡Vamos por más!



“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”

Filipenses 4:13

RESUMEN

La siguiente tesis tiene como finalidad poder utilizar el modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) descrito en las normas SAE JA-1011 y SAE JA-1012 con el objetivo de incrementar la confiabilidad operacional (MTBF) de las Pala Eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd*. La principal fuente de información para el desarrollo de este trabajo se basa en la recolección y registro que se tiene de los principales modos de falla ocurridos en estos equipos ubicados en la unidad minera Las Bambas durante los años 2017, 2018 y 2019. Haciendo uso de esta información se busca implementar una estrategia de mantenimiento basada en el RCM para ser aplicada desde la puesta en servicio en una flota de tres palas del mismo modelo las cuales serán utilizadas en una mina ubicada en el departamento de Moquegua a partir del 2020.

Se desarrolló paso a paso el modelo de Mantenimiento RCM diseñado por Moubray y cuyo detalle se puede revisar con mayor profundidad en los capítulos III y IV de la presente tesis. Posterior a ello se obtuvo como resultado que el tipo de mantenimiento que mejor se adapta a nuestro estudio es el Mantenimiento Proactivo para el que se desarrolló una cartilla de mantenimiento (*Job Card*) enfocada en los principales modos de falla ocurridos en estos equipos sin dejar de lado las tareas básicas de mantenimiento dadas por el fabricante con el objetivo de reducir los principales modos de falla del equipo. Los resultados obtenidos durante el periodo de estudio demuestran que los esfuerzos realizados para la implementación del plan basado en RCM demuestran un incremento del 45.93% al cierre de octubre 2021 en la confiabilidad operacional (MTBF) de estos equipos.

También se realizó el cálculo del costo hora por operación de una Pala Eléctrica para la cual se obtuvieron valores entre los 0.16 a 0.18 USD/TM por tonelada movida. Adicional y para finalizar este trabajo se realizó el cálculo del gasto por parada evitado debido a la aplicación de este plan bajo dos escenarios: 15000 USD/hr por parada de equipo cargando mineral y 7000 dolares/hr por parada de equipo cargando desmonte, bajo ambos escenarios se obtuvieron valores económicos que justifican la aplicación de este plan.

Palabras clave: Mantenimiento, confiabilidad, RCM, *Job Cards*.

ABSTRACT

The purpose of the following research project is to be able to use the reliability-centered maintenance (RCM) model described in the SAE JA-1011 and SAE JA-1012 standards with the objective of increasing the operational reliability (MTBF) of the Electric Rope Shovels 7495 Hydracrowd. The main source of information for the development of this work is based on the collection and registration of the main failure modes that occurred in these equipments located in the Las Bambas mining unit during the years 2017, 2018 and 2019. Through this information collected seeks to implement a maintenance strategy based on the RCM to be applied from the commissioning of a fleet of three shovels of the same model that will be used in a mine located in the department of Moquegua from 2020.

The RCM Maintenance model designed by Moubray was developed step by step and the details of which can be reviewed in chapters III and IV. After this, it was obtained as a result that the type of maintenance that best suits our study is Proactive Maintenance for which a maintenance primer (Job Card) was developed focused on the main failure modes that occurred in these equipment without stopping side the basic maintenance tasks given by the manufacturer in order to reduce the main failure modes of the equipment. The results obtained during the study period show that the efforts made to implement the RCM-based plan show an increase of 45.93% at the end of October 2021 in the operational reliability (MTBF) of these equipment.

The hourly cost per operation of an Electric Shovel was also calculated, for which values between 0.16 and 0.18 USD per ton moved were obtained. Additionally, and to finish this work, the calculation of the cost per stop avoided due to the application of this plan was carried out under two scenarios: 15,000 USD per stop of equipment loading ore and 7,000 dollars per stoppage of equipment loading waste, under both scenarios values were obtained economic that justify the application of this plan.

Keywords: Maintenance, reliability, RCM, Job Cards.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DE TRABAJO	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. HIPÓTESIS	5
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4.1. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA	5
1.4.2. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	5
1.5. VARIABLE	5
1.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE	5
1.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE	5
1.6. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	6
1.6.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	6
1.6.2. ANTECEDENTES NACIONALES	8
1.6.3. ANTECEDENTES LOCALES.....	9
CAPÍTULO II	11
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. VISTA GENERAL DE LA MÁQUINA.....	11
2.1.1. PRINCIPALES SISTEMAS	13
2.1.2. PRINCIPALES COMPONENTES	21
2.1.3. PLATAFORMA GIRATORIA.....	26
2.1.4. EQUIPOS DEL EXTREMO FRONTAL	27

2.1.5.	INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO	30
2.1.6.	TIPOS DE MANTENIMIENTO	33
2.1.7.	MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD	36
2.1.8.	INDICADORES DE MANTENIMIENTO	44
CAPÍTULO III		48
3.	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	48
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	48
3.2.	POBLACIÓN DEL ESTUDIO	48
3.3.	FUENTES DE INFORMACIÓN	49
3.4.	TÉCNICA Y ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN	49
3.5.	INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN	49
3.6.	PRE - DESARROLLO DEL PLAN RCM	49
3.6.1.	PASO 1 – SELECCIÓN DEL EQUIPO	49
3.6.2.	PASO 2 - FUNCIÓN DE LA PALA ELÉCTRICA 7495 HYDRACROWD	
	55	
CAPÍTULO IV		60
4.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	60
4.1.	PASO 3 – DEFINIR FALLAS FUNCIONALES	60
4.1.1.	TAXONOMÍA	60
4.1.2.	DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2017	71
4.1.3.	DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2018	73
4.1.4.	DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2019	74
4.1.5.	DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2020	76
4.1.6.	ANÁLISIS DE CRITICIDAD POR SISTEMAS	77
4.2.	PASO 4 – IDENTIFICAR PRINCIPALES MODOS DE FALLA	92
4.3.	PASO 5 – IDENTIFICAR EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE FALLA	93
4.3.1.	PRINCIPALES FALLAS RELEVANTES - PERIODO 2017 - 2019	93
4.4.	PASO 6 – SELECCIONAR TIPO DE MANTENIMIENTO	111
4.4.1.	CÁLCULO DE CONFIABILIDAD A TRAVÉS DE LA FUNCION WEIBULL	111
4.5.	PASO 7 – IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO	116
4.6.	RESULTADOS DE LA AUDITORIA INTERNA DE MANTENIMIENTO	116
4.6.1.	RESULTADOS DE AUDITORIA A PLANEAMIENTO	116

4.6.2.	RESULTADOS DE AUDITORIA A LOGÍSTICA	117
4.6.3.	RESULTADOS DE AUDITORIA A EJECUCIÓN.....	118
4.6.4.	RESULTADO GENERAL DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO.....	119
4.7.	MÉTODO ISHIKAWA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE GESTIÓN 120	
4.8.	RESULTADOS DE CONFIABILIDAD (MTBF Y MTTR).....	120
4.9.	RESULTADOS EN INDICADORES DE MANTENIMIENTO	124
4.10.	RESULTADOS ECONÓMICOS	127
4.11.	CONCEPTOS PARA DETERMINAR COSTO HORARIO DE POSESIÓN 128	
4.11.1.	VALOR DE ADQUISICIÓN (Va)	128
4.11.2.	VIDA ECONÓMICA ÚTIL (VEU).....	128
4.11.3.	VALOR DE RESCATE (Vr)	128
4.11.4.	DEPRECIACIÓN (D).....	128
4.11.5.	INTERÉS HORARIO DEL CAPITAL INVERTIDO (I).....	129
4.12.	CONCEPTOS PARA DETERMINAR COSTO HORARIO DE OPERACIÓN	130
4.12.1.	INVERSIÓN MEDIA ANUAL (IMA).....	130
4.13.	COSTO HORARIO DE PALA ELÉCTRICA DE CABLE	131
4.14.	COMPARATIVO DE PARADAS POR AÑO.....	131
5.	CONCLUSIONES	134
6.	RECOMENDACIONES.....	135
	REFERENCIAS.....	136
	ANEXOS	138
	ANEXO 1: POOL DE EQUIPOS EN OPERACIONES MINA	138
	ANEXO 2: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE COBRE.....	139
	ANEXO 3: ANÁLISIS DE MODO DE FALLA Y EFECTOS (AMFE)	140
	ANEXO 4: HORÓMETRO DE HISTORIAL DE FALLA	150
	ANEXO 5: PLAN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO.....	161
	ANEXO 6: INDICADORES DE CONFIABILIDAD MTBF Y MTTR 2017-2020 167	
	ANEXO 7: CÁLCULO DEL COSTO POR HORA PALA ELÉCTRICA 7495	169
	ANEXO 8: CÁLCULO CON SOFTWARE RELIABILITY & MAINTENANCE ANALYST.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd	2
Figura 2 - Cuadro de variables	6
Figura 3 - Vista lateral Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd	12
Figura 4 - Sistema de giro – Swing System	13
Figura 5 - Sistema de levante – Hoist System.....	14
Figura 6 - Modulo de potencia hidráulico.....	15
Figura 7 - Sistema de propulsión – Propel System	16
Figura 8 - Esquemático de sistema de aire comprimido	18
Figura 9 - Sistema de lubricación automática	20
Figura 10 - Maquinaria inferior – Lower works	21
Figura 11 - Estructura de transporte – Truck Frame	22
Figura 12 - Estructura de orugas – Crawler Frame	23
Figura 13 - Maquinaria de propulsión – Propel Machinery	24
Figura 14 - Cremallera de giro – Swing rack.....	25
Figura 15 - Estructura giratoria – Revolving frame	26
Figura 16 - Pluma - Boom.....	28
Figura 17 - Cilindro hidráulico Hydracrowd	29
Figura 18 - Balde – Dipper.....	30
Figura 19 - Evolución del mantenimiento.....	33
Figura 20 - Pilares del TPM	36
Figura 21 - Pasos del proceso básico RCM	39
Figura 22 - Categoría I de modos de falla.....	42
Figura 23 - Categoría II de modos de falla	43
Figura 24 - Categoría III de modos de falla	43
Figura 25 - Palas Eléctricas objeto de estudio	48
Figura 26 - Pool de equipos de carguío – Las Bambas	51
Figura 27 - Factores para análisis de criticidad.....	52
Figura 28 - Matriz de criticidad de equipos	54
Figura 29 - Ubicación geográfica Las Bambas	57
Figura 30 - Ficha técnica Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd.....	59
Figura 31 - Clasificación de niveles taxonómicos	60
Figura 32 - Clasificación de sistema Hydracrowd	61
Figura 33 - Clasificación de sistema de implementos.....	62
Figura 34 - Clasificación de sistema estructural	63
Figura 35 - Clasificación de sistema de control	64
Figura 36 - Clasificación de sistema eléctrico de potencia	65
Figura 37 - Clasificación de sistema de lubricación	66
Figura 38 - Clasificación de sistema de aire	67
Figura 39 - Clasificación de sistema de giro.....	68
Figura 40 - Clasificación de sistema de propulsión	69
Figura 41 - Clasificación del sistema de levante.....	70

Figura 42 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd – Periodo 2017	72
Figura 43 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd – Periodo 2018	74
Figura 44 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd - Periodo 2019.....	75
Figura 45 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd - Periodo 2020.....	77
Figura 46 - Matriz de criticidad	78
Figura 47 - Cuadro de factor de frecuencia de fallas	80
Figura 48 - Cuadro de factor de impacto operacional.....	80
Figura 49 - Cuadro de factor de flexibilidad operacional	80
Figura 50 - Cuadro de factor por costos de mantenimiento	81
Figura 51 - Cuadro de factor seguridad, higiene y medio ambiente	81
Figura 52 - Cuadro de evaluación Sistema Hydracrowd	83
Figura 53 - Matriz de criticidad sistema Hydracrowd	83
Figura 54 - Cuadro de evaluación de sistema implementos.....	85
Figura 55 - Matriz de criticidad sistema Implementos.....	85
Figura 56 - Cuadro de evaluación de sistema de aire.....	87
Figura 57 - Matriz de criticidad sistema de aire.....	87
Figura 58 - Matriz de criticidad sistema de aire.....	89
Figura 59 - Matriz de criticidad sistema Propulsión	89
Figura 60 - Cuadro de evaluación sistema levante.....	91
Figura 61 - Matriz de criticidad sistema Levante.....	91
Figura 62 - Cuadro de resultados - Evaluación de criticidad	92
Figura 63 - Fractura en Mounting Plate – Pala SH001	94
Figura 64 -Fuga de aceite hidráulico en cilindro Hydracrowd – Pala SH001	94
Figura 65 - Carga axial sobre Mounting Plate	95
Figura 66 - Tap de purgado lado vástago con fuga por impacto – Pala SH001.....	96
Figura 67 - Tap de purgado lado vástago con fuga – Pala SH001.....	96
Figura 68 - Diseño de placa de montaje original (Mounting Plate)	97
Figura 69 - Diseño de placa de montaje mejorada (Mounting Plate)	98
Figura 70 - Vista isométrica de encoder de empuje de cilindro Hydracrowd.....	99
Figura 71 - Encoder de empuje diseño original	100
Figura 72 - Encoder de empuje láser diseño mejorado	100
Figura 73 - Vista isométrica de sistema de apertura de compuerta.....	102
Figura 74 - Vista isométrica de barretón (Latch bar)	103
Figura 75 - Segunda fractura de inserto de barretón – Pala SH001	103
Figura 76 - Reemplazo de barretón sin inserto – Pala SH001	104
Figura 77 - Resquebrajamiento de inserto de barretón – Pala SH001	105
Figura 78 - Desgaste prematuro de inserto de barretón	105
Figura 79 - Sistema de apertura de compuerta Latch Free.....	106
Figura 80 - Prueba de apertura en vacío sistema Latch Free	107
Figura 81 - Partes del sistema Latch Free	108
Figura 82 - Fajas de compresor de aire Quincy QSB30.....	109
Figura 83 - Compresor antiguo modelo Quincy QSB 30.....	110
Figura 84 - Nuevo compresor dual de aire Sullair ES-6.....	110

Figura 85 - Parámetros Weibull – Sistema Hydracrowd Pala SH001	112
Figura 86 - Parámetros Weibull – Sistema Hydracrowd Pala SH002	112
Figura 87 - Parámetros Weibull – Sistema de implementos Pala SH001	113
Figura 88 - Parámetros Weibull – Sistema de implementos Pala SH002	113
Figura 89 - Parámetros Weibull – Sistema de aire Pala SH001	114
Figura 90 - Parámetros Weibull – Sistema de aire Pala SH002.....	114
Figura 91 - Auditoria interna - Planeamiento	116
Figura 92 - - Auditoria interna - Logística	117
Figura 93 - - Auditoria interna - Ejecución	118
Figura 94 - Resultado gestión de mantenimiento.....	119
Figura 95 - Método Ishikawa - Gestión de Mantenimiento	120
Figura 96 - Indicador de confiabilidad MTBF – Las Bambas	122
Figura 97 - Indicador de confiabilidad MTTR – Las Bambas	122
Figura 98 - Indicador de disponibilidad física – Las Bambas.....	123
Figura 99 - Histórico MTBF – Moquegua 2021	125
Figura 100 - Histórico MTTR – Moquegua 2021	126
Figura 101 - Histórico Disponibilidad Física – Moquegua 2021.....	126
Figura 102 - Costo horario de maquinaria	128
Figura 103 - Comparativo de paradas por año	131
Figura 104 - Gráfica comparativa MTBF	132
Figura 105 - Diferencia adicional en horas con RCM	132
Figura 106 - Toneladas movidas adicionales con RCM	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Evaluación de criticidad – Flota de carguío	54
Tabla 2 - Tabla comparativa - Contexto operacional.....	58
Tabla 3 - Clasificación de fallas por sistemas - Periodo 2017	72
Tabla 4 - Clasificación de fallas por sistemas - Periodo 2018	73
Tabla 5 - Clasificación de fallas por sistemas – Periodo 2019	75
Tabla 6 - Clasificación de fallas por sistemas – Periodo 2020	76
Tabla 7 - Resumen de resultados Weibull.....	115
Tabla 8 - Resumen MTBF y MTTR - Las Bambas (2017-2020)	121
Tabla 9 - Resultados de implementación durante 2021	125
Tabla 10 - Historial de fallas Sistema Implementos - SH001.....	150
Tabla 11 - Historial de fallas Sistema Implementos - SH002.....	152
Tabla 12 - Historial de fallas Sistema Hydracrowd - SH001.....	154
Tabla 13 - Historial de fallas Sistema Hydracrowd - SH002.....	156
Tabla 14 - Historial de fallas Sistema Aire - SH001.....	157
Tabla 15 - Historial de fallas Sistema Aire - SH002.....	159
Tabla 16 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2017	167
Tabla 17 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2018	167
Tabla 18 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2019	167
Tabla 19 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2020	168

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El Perú al ser un país minero se ha convertido en un referente en extracción de cobre ocupando en el 2018 el segundo puesto a nivel mundial en producción de concentrado de cobre superado sólo por Chile y por encima de países como China, Estados Unidos y Australia, llegar a estos objetivos no sería posible si no se utilizara la más alta tecnología de equipos y maquinarias en perforación, voladura, carguío, acarreo, transporte, chancado y procesamiento de mineral como la que se utiliza hoy en día en nuestro país, dichos equipos y maquinarias están compuestas por sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos y electrónicos que aumentan las posibilidades de fallas imprevistas durante su operación.

Esta tesis tiene como objetivo principal incrementar la confiabilidad operacional (MTBF) de las Pala Eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd*. La fuente principal de información para el desarrollo de este trabajo se basa en la recolección y registro que se tiene de los principales modos de falla ocurridos durante el 2017, 2018 y 2019 en estos equipos ubicados en la unidad minera Las Bambas. Por medio de esta información recolectada se busca implementar una estrategia de mantenimiento basada en el RCM para ser aplicada desde la puesta en servicio de una flota de tres Palas Eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd* que serán utilizadas en una mina ubicada en el departamento de Moquegua a partir del 2020.

La mina en la cual se realizará la propuesta está localizada en el Departamento de Moquegua a unos 37 km al noreste del centro de la ciudad de Moquegua a una altura entre los 3500 y 4000 m.s.n.m. y cuenta con una reserva inicial proyectada de 30 años y utilizará un proceso de extracción a tajo abierto y flotación para poder producir el concentrado de cobre, también producirá molibdeno y plata y otros sub-productos. La expectativa es que esta mina produzca en promedio 300 mil toneladas de cobre por año en sus primeros 10 años de operación, en el año 2018 se realizó la compra de un total de 03 Palas Eléctricas de Cable modelo 7495 *Hydracrowd* de la marca CATERPILLAR con las cuáles planea realizar el carguío de la flota de camiones modelo 794 AC también de la marca Caterpillar.

A estos equipos se les realizan los planes de mantenimiento preventivo especificados por los fabricantes, los cuáles deberían de poder garantizar que el equipo opere de forma continua, esto se logra interviniendo los equipos de manera programada y/o a través del cambio de componentes mayores y menores cada cierto periodo de tiempo establecido por el fabricante.

Reducir estas fallas no solo tendrá un impacto en el coste operacional del equipo y en la rentabilidad de la empresa sino también permite reducir la exposición al riesgo del personal de mantenimiento y hacer que los tiempos de reparación sean menores ayudando así a obtener buenos resultados en equipo críticos dentro el proceso de minería como son las Palas Eléctricas de cable.



Figura 1 - Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd

Fuente: Caterpillar; (2021)

1.1. PLANTEAMIENTO DE TRABAJO

La presente tesis plantea poder incrementar la confiabilidad operacional (MTBF) de las palas eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd* de la marca Caterpillar a través del uso de una estrategia de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM). La fuente principal de información para esta tesis se basa en la recolección de datos de modos de falla ocurridos durante los años 2017, 2018 y 2019 de estos mismos equipos ubicados en una mina en el departamento de Apurímac, haciendo uso de dicha información se busca plantear una estrategia de mantenimiento, la cual será aplicada en palas eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd* desde su puesta en servicio en una mina ubicada en el departamento de Moquegua la cual iniciará su producción en el año 2021.

Regresando al RCM, esta técnica fue inicialmente desarrollada en el sector de la aviación allá por los años 1950 cuando se alcanzó una cifra de más de 60 accidentes por millón de despegues, dicha cifra trasladada al día representaría un promedio de 2 accidentes aéreos por día en algún lugar del mundo hablando de aviones de 100 pasajeros a más. Allá en 1950, dos tercios de los accidentes eran generados por fallas en los equipos, que esta sea la principal causa de muerte implicaba que se tenía que atacar de forma agresiva las fallas y que el enfoque principal sería mejorar la seguridad en los equipos. Después de un arduo trabajo de implementación con resultados exitosos en la industria de la aviación es que se trasladó esta técnica al campo militar y mucho después a la industria.

El objetivo principal de implementar el sistema de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o RCM en el campo de las Palas Eléctricas de Cable nace de la importancia que tienen estos equipos en el ciclo de producción de concentrado de cobre y/u otros minerales que se vayan a explotar en cada yacimiento a tajo abierto a nivel mundial, estos equipos tienen que tener un alto grado de confiabilidad en su etapa inicial, es decir, se debe de hacer todo lo necesario para asegurar la mínima cantidad de paradas del equipo (MTBF) y que las paradas imprevistas que existan sean solucionadas en el menor tiempo posible (MTTR).

Para poder elaborar este plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se tomará como referencia la flota de Palas Eléctricas de Cable 7495 modelo *Hydracrowd* de la marca Caterpillar que se encuentran operando en una mina ubicada en el departamento de

Apurímac. En base a la experiencia, datos e histórico de fallas recolectados durante los años 2018, 2019 y 2020 en esta flota de equipos es que se busca establecer una tabla de criticidad de componentes y así poder diseñar estrategias de mantenimiento enfocadas en atacar los principales problemas de estos equipos, este plan será aplicado en la flota de equipos adquiridos por la empresa minera ubicada en el departamento de Moquegua los cuáles serán ensamblados y puestos en operación durante los años 2020 y 2021.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un plan de mantenimiento para incrementar la confiabilidad operacional usando la metodología RCM en Palas Eléctricas 7495 *Hydracrowd* para una mina ubicada en Moquegua.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análisis a través de Diagrama de Pareto para seleccionar los sistemas con mayor ocurrencia de falla durante los años 2017, 2018, 2019 y 2020.
- Elaborar un análisis con la metodología RCM paso a paso con la finalidad de establecer los modos de falla, efectos y consecuencias que afectan la confiabilidad del equipo.
- Diseñar un plan de mantenimiento con tareas estratégicas, las cuáles serán aplicados desde la puesta en servicio de los equipos.
- Mostrar los valores reales de Disponibilidad, MTBF y MTTR que se obtuvieron durante 2021 con la implementación de este plan.
- Establecer el costo horario de la Pala Eléctrica de Cable en US\$/hr y el rendimiento en TM/hr
- Determinar el costo por parada evitado debido a la aplicación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

1.3. HIPÓTESIS

¿Cómo presentar una propuesta para incrementar la confiabilidad operacional usando técnicas RCM en Palas Eléctricas 7495 *Hydracrowd* para una mina ubicada en Moquegua?

1.4. JUSTIFICACIÓN

1.4.1. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

Este plan de mantenimiento busca mantener un equipo de primera línea con buenos indicadores de confiabilidad (MTBF y MTTR) y buena disponibilidad física. Unos buenos indicadores de mantenimiento permiten que el área de operaciones mina tenga una alta utilización del equipo, de esta forma se podrá alcanzar las metas de toneladas de material movido fijados por el cliente. A mayor cantidad de material movido, mayor concentrado de cobre será procesado en la planta para su posterior exportación.

1.4.2. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

Una vez implementado este plan de mantenimiento el personal encargado de la atención de estos equipos podrá efectuar labores de mantenimiento concentradas en prevenir aquellos modos de falla más recurrentes en aquellos sistemas con mayor grado de criticidad en base a la experiencia obtenida en otra operación donde se identificó los sistemas con mayor ocurrencia de falla. De esta manera se podrá reducir los tiempos y distribuir de manera más eficiente los recursos para la atención de estos equipos.

1.5. VARIABLE

1.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Elaboración de un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

1.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Disponibilidad física y confiabilidad.

Figura 2 - Cuadro de variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	KPI	HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN
Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)	Independiente	Tiempo	Cartillas de mantenimiento, manual de servicio y mantenimiento del equipo	Garantizar que los activos continúen operando bajo un determinado contexto operacional.
Disponibilidad	Dependiente	MTBF y MTTR	RCM	Cociente entre el tiempo disponible para producir y el tiempo total de paradas.
Confiabilidad	Dependiente	MTBF	RCM	Probabilidad de que un activo pueda funcionar correctamente fuera de falla por un determinado tiempo

Fuente: Elaboración propia

1.6. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

Se realizó la revisión documentaria de otros trabajos de investigación sobre temas relacionados a gestión de mantenimiento y estrategia de mantenimiento centradas en la confiabilidad de equipos pesados en minería. Se presenta a continuación un extracto de dichos trabajos de investigación con la finalidad de que sirvan de preámbulo para el desarrollo de la siguiente tesis, se tomó como referencia 2 trabajos de investigación internacionales, 2 del ámbito nacionales y 2 locales.

1.6.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Tesis Maestría: “Desarrollo de una estrategia de confiabilidad en planta chancado División Gabriela Mistral – Codelco Chile”, Universidad de Chile, Chile

En esta investigación el objetivo principal de la tesis fue desarrollar una estrategia de mantenimiento centrada en la confiabilidad aplicada en una planta de chancado de mineral, la cual tiene como fin incrementar la disponibilidad pero a su vez disminuir los costos operativos, para el desarrollo de esta investigación se emplearon diversos métodos para la recolección y análisis de información, entre estos métodos se puede destacar el uso de análisis Jack Knife, análisis Pareto y eficiencia general de los equipos (OEE) aplicados al área de Mantenimiento de Chancado en la mina Gabriela Mistral perteneciente a la empresa CODELCO, una vez finalizada esta investigación se logró determinar que el principal activo que genera mayor impacto

en pérdidas de tonelaje fueron las chancadoras con un total de 2' 301,931 tmh/año en 2017, lo cual impactó negativamente en el costo global de la gerencia de mantenimiento. Esta investigación favorece el desarrollo de nuestra propuesta puesto que en ella se determina que mediante la implementación de una estrategia de Mantenimiento Centrada en la Confiabilidad (RCM) se puede identificar e intervenir de manera temprana los síntomas de falla por medio de un monitoreo de las variables operacionales de los equipos, esto es de gran importancia para el desempeño del equipo ya que nos da la posibilidad de anticiparnos y evitar consecuencias que sean negativas para la confiabilidad operacional. (Cabrera, 2019)

Tesis Maestría: “Elaboración de una propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para el equipo Komatsu PC8000-6E serie 12041”, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

En esta investigación el objetivo principal fue elaborar una propuesta para el mantenimiento de una Pala modelo PC 8000-6E de la serie 12041 de la marca KOMATSU basados en las técnicas descritas en la metodología del RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) con el objetivo principal de poder incrementar favorablemente la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del equipo, la información necesaria para el desarrollo de esta investigación se obtuvo a través de la base de datos con la que cuenta la empresa DRUMMOND LTD y también se utilizaron manuales de operación e información recolectada por experiencias personales y entrevistas realizadas a los operadores y personal de mantenimiento de la Pala PC8000-6E de la SERIE 12041 de la marca KOMATSU utilizada en los proyectos de extracción de carbón en Colombia, se llegó a la conclusión de que esta propuesta elaborada permitió consolidar por medio de la práctica y a través de un caso de análisis real los diferentes conceptos teóricos relacionados a la elaboración de un plan centrado en la confiabilidad (RCM). Esta investigación resulta ser importante para el desarrollo de nuestra propuesta puesto que determina como es que influyen los modos y efectos de falla en la operación de las Palas ya que estas son equipos muy críticos dentro del proceso de extracción de mineral, una vez identificados los modos y efectos de falla se asignaron tareas de mantenimiento específicas dependiendo de qué es lo que se busca

corregir con la finalidad de incrementar la confiabilidad operacional del equipo. (Anturi y Villanova, 2018)

1.6.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Tesis Maestría: “Implementación de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para el área de Chancado Terciario en una Planta Concentradora”. Universidad Católica de Santa María, Arequipa.

En la siguiente tesis de maestría se indica por medio de la técnica de análisis de criticidad realizado a los activos físicos de la chancadora terciaria (HPGR) se puede determinar aquellos equipos que son: altamente críticos, medianamente críticos y bajamente críticos. Al realizar esta distribución de equipos se pudo encontrar todos aquellos eventos que son capaces de generar una falla funcional en el activo. En este trabajo de maestría también se realiza el análisis Weibull para poder determinar los tiempos óptimos para realizar el cambio de algunos componentes como por ejemplo los rodillos y rodamientos, de esta manera a través de la fijación de tiempos óptimos se puede establecer tiempos de mantenimiento programados más precisos. Este trabajo de investigación también demuestra que al realizar la comparación entre la estrategia de mantenimiento actual vs un plan de mantenimiento aplicando la técnica del RCM se obtiene un ahorro de \$ 3,514,100 dólares de ahorro en un periodo de 05 años de aplicación de dicha estrategia. Esta condición nos permite determinar que la aplicación del RCM es viable desde todo punto de vista. (Fernández, 2018)

Tesis Grado: “Propuesta de gestión de mantenimiento para mejorar la disponibilidad de las Palas electromecánicas TZ modelo WK-12 en la minera Shougang Hierro Perú S.A.A”, Universidad Nacional del Callao, Callao

En este trabajo de tesis se planteó como objetivo principal de la investigación proponer una serie de mejoras para incrementar la disponibilidad de las Palas Electromecánicas TZ Modelo WK-12 en la minera Shougang Hierro Perú S.A.A; esto a partir de que estos equipos contaban con una baja disponibilidad, lo cual impactaba directamente en el proyecto de ampliación de la unidad minera en mención, para el desarrollo de esta investigación se realizó una auditoria de mantenimiento realizando encuestas a todo el

personal involucrado en la operación y mantenimiento de estos equipos, la población abarcada por este trabajo fueron un total de 6 equipos que conforman la flota de Palas electromecánicas TZ modelo WK-12. De este trabajo de investigación se llegó a la conclusión que analizando las propuestas de mejora planteadas de manera técnica y alineadas a las estrategias de gestión de mantenimiento, desde instrucción al personal técnico que trabaja con estos equipos, implementación de cartillas de mantenimiento y flujogramas de trabajo se lograría incrementar la disponibilidad de los equipos en un 1.5% generando beneficio directo en la producción y las ganancias generadas con estos equipos. Esta investigación resulta importante para el desarrollo de nuestra tesis ya que analiza conceptos claves como son el MTTR y el MTBF. (Córdova, 2017)

1.6.3. ANTECEDENTES LOCALES

Tesis Maestría: “Diseño de un plan mantenimiento con la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad para Perforadoras Atlas Copco CT20 en la empresa Explo Drilling”. Universidad Católica de Santa María, Arequipa.

En este trabajo de maestría se tiene como objetivo general diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) con el objetivo de mejorar el MTBF de una flota de perforadoras Atlas Copco CT20 en la empresa Explo Drilling a través de un diagnóstico de la situación actual del mantenimiento de la flota, análisis funcional de cada uno de los sistemas, determinación de la criticidad, análisis de modos y efectos de falla (AMFE) para finalmente establecer las mejores estrategias de mantenimiento para los sistemas de la perforadora Atlas Copco CT20. De este trabajo de investigación se concluyó que al diseñar un plan de mantenimiento a través de la filosofía del RCM se logra mejorar el indicador del MTBF en un 13% estableciendo estrategias de mantenimiento centradas en la confiabilidad en los sistemas más críticos como son: sistema de potencia, sistema de rotación, y el sistema hidráulico. De igual manera en este trabajo de investigación se realizó un análisis de modos y efectos de falla (AMFE) para poder priorizar las fallas más relevantes y de esta manera asignar tareas específicas para prevenir paradas no programadas. (Nayhua, 2018)

Tesis Grado: “Implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM2) en Palas Hidráulicas PC4000-6 Komatsu para el incremento de la disponibilidad”, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

En este trabajo de suficiencia profesional se planteó como objetivo principal determinar y de esta manera implementar estrategias y un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM2 para la flota de Palas Hidráulicas de la marca KOMATSU modelo PC4000-6 ubicado en la unidad minera Lagunas Norte; para el desarrollo de este trabajo se utilizó la metodología de RCM2 desarrollada por John Moubray y contó con el patrocinio para su implementación por parte de la gerencia de mantenimiento de la unidad minera Laguna Norte, esta metodología fue aplicada en las 2 Palas Hidráulicas KOMATSU modelo PC4000-6 y se llegó a la conclusión que los costos operativos de mantenimiento sufrieron una reducción considerable como consecuencia de la optimización de las estrategias de mantenimiento, también la implementación del RCM2 tuvo impacto en objetivos estratégicos de la empresa debido a que se incrementó la producción en un 4%, también se logró obtener una reducción en los costos de mantenimiento de un 5% (USD 3.5 MM). Esta investigación resulta ser importante para el desarrollo de nuestra tesis puesto que analiza, desarrolla e implementa el uso de una metodología de mantenimiento basada en el RCM propuesto por John Moubray, la cual será la metodología que utilizaremos nosotros para el desarrollo de nuestra propuesta, también es valioso el aporte de esta investigación puesto que es aplicada en una flota crítica de carguío como son las Palas Hidráulicas, en nuestro caso nuestra flota crítica son las Palas Eléctricas de cable por lo que podremos encontrar puntos en común en ambas propuestas. (Merma, 2018)

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

La minería al día de hoy como la conocemos, no sería posible sin el uso de equipos gigantes de excavación como parte integral del proceso de extracción de mineral. El ciclo de carguío es conocido como el proceso a través del cual las excavadoras recogen el material y lo depositan sobre la tolva de los equipos de acarreo.

Con referencia a los pasos que construyen el ciclo de carguío, (Caterpillar, 2019) refiere que este proceso consta principalmente de 4 pasos:

- Primer paso – Llenado de balde
- Segundo paso - Giro hacia la zona de descarga
- Tercer paso - Descarga de material
- Cuarto paso - Retorno al frente de excavación

La cantidad de segundos para cada paso dentro del ciclo de carguío varía y depende de algunos factores como la capacidad, tipo de cucharón, densidad del material, técnicas de operación, tipo de fragmentación del material. A continuación, mostraremos la referencia que se tiene de tiempo para el ciclo de carguío en una Pala Eléctrica modelo 7495 equipada con un cucharón de 59 yd³ trabajando con un material bien fragmentado.

Asimismo, referente al equipo que vamos a investigar en esta tesis, refiere, que dentro del mundo de la minería a tajo abierto las Palas Eléctricas de cable son considerados los equipos más confiables y de mayor tiempo de vida útil. Además, las Palas Eléctricas de cable son conocidas a nivel mundial por ser equipos de mayor facilidad y menor costo de mantenimiento. (Rodion, 2015)

2.1.1. VISTA GENERAL DE LA MÁQUINA

Referente a la Pala Eléctrica de cable. Caterpillar (2013) refiere que este es un equipo que ha sido diseñado y fabricado para operar bajo las condiciones de trabajo más severas y que a su vez es capaz de brindar un servicio eficiente a todos sus usuarios.

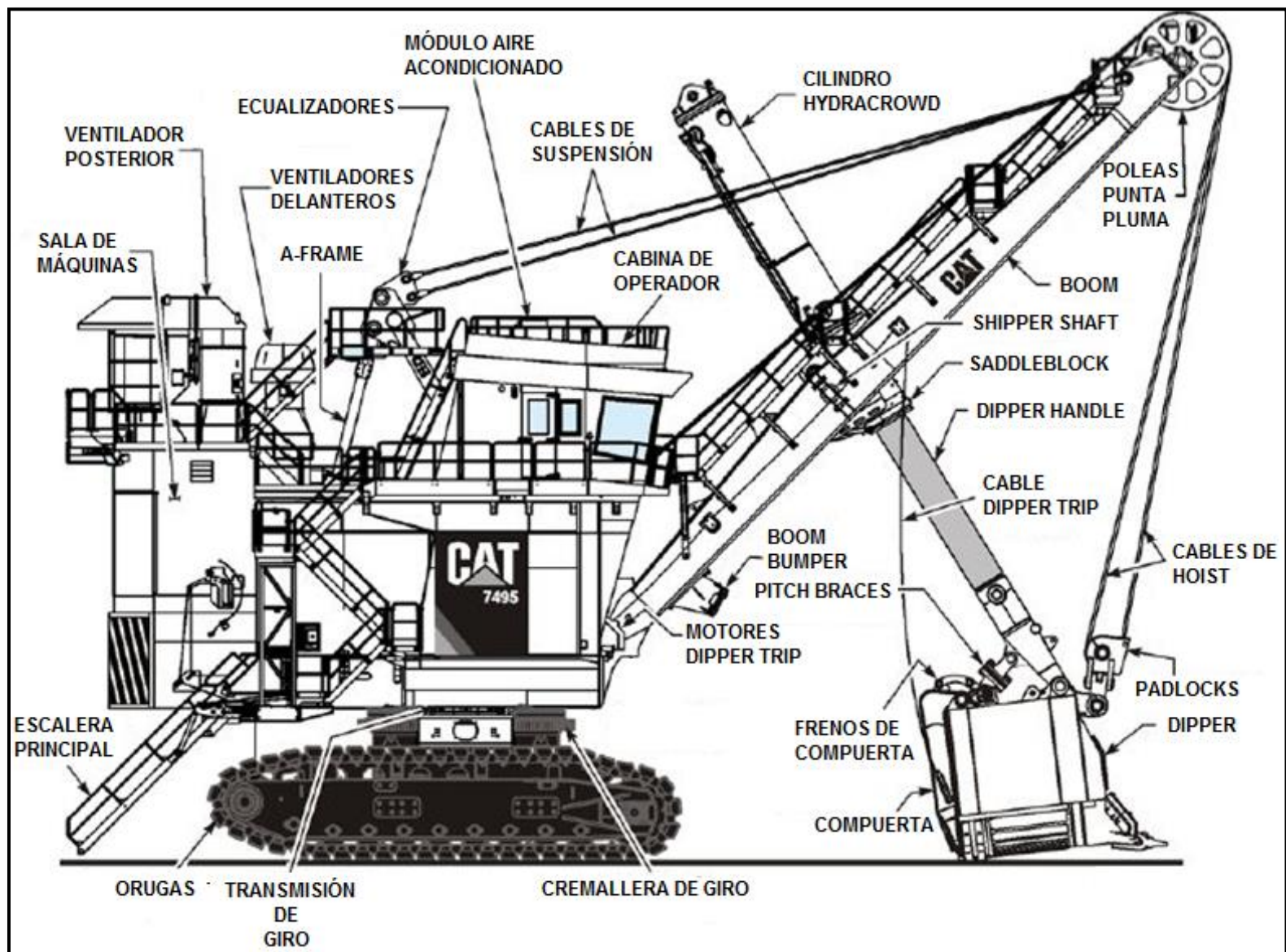


Figura 3 - Vista lateral Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.2. PRINCIPALES SISTEMAS

2.1.2.1. SISTEMA DE GIRO

Como comenta Caterpillar (2013), el sistema de giro cuenta en cada lado con una caja de engranajes planetarios sumergidas en aceite, las cuales son accionadas por motores eléctricos de corriente alterna instalados de manera vertical en cada uno de los lados, cada una cuenta con su respectivo freno de discos accionado por resortes y liberados por presión de aire del compresor. De cada una de las cajas de engranajes planetarios salen dos piñones de ataque que van en contacto directo con la corona de giro también conocida como Swing Rack, esta cremallera debe de permanecer lubricada constantemente con la cantidad adecuada y controlada de compuesto lubricante para engranajes abiertos también conocida como OGL, la finalidad del compuesto lubricante es evitar daños prematuros en los flancos de contacto de la corona de giro con los piñones de ataque. Uno de los dos motores eléctricos de giro cuenta con un tacómetro digital para el registro de la velocidad de giro del equipo.

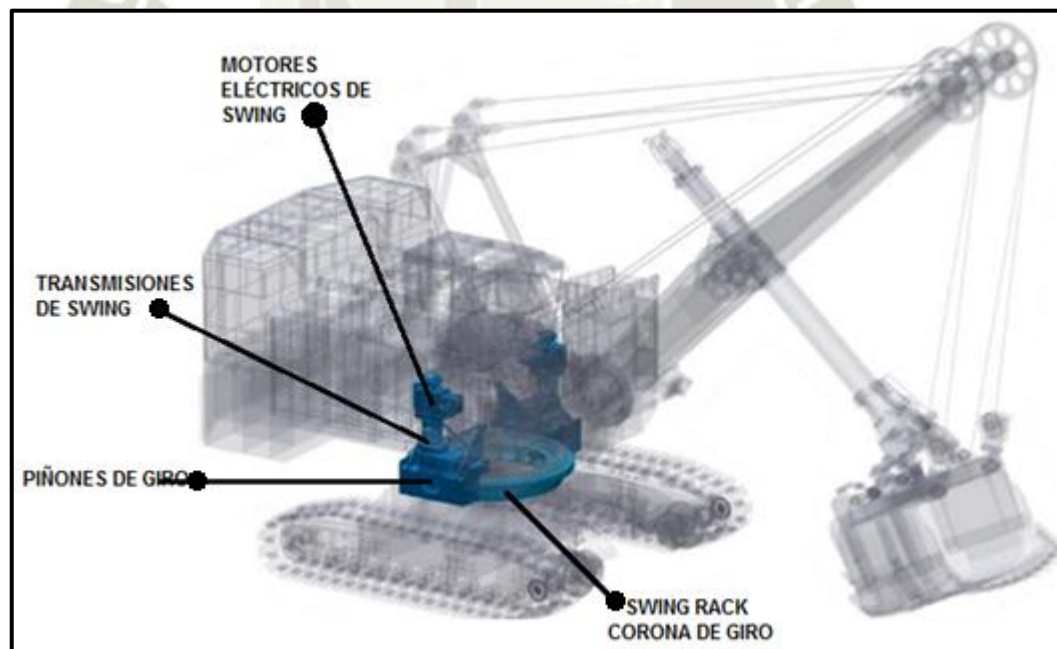


Figura 4 - Sistema de giro – Swing System

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.2.2. SISTEMA DE LEVANTE

Referente al sistema de levante Caterpillar (2013) indica que este está compuesto principalmente de los siguientes elementos: Tambor de levante, corona de levante, caja de engranajes planetarios con doble piñón de salida los cuales entran en contacto directo con la corona para transferir el movimiento, motor eléctrico de corriente alterna con discos de freno accionados por resorte y liberados por presión de aire, un eje flotante de unión entre el motor eléctrico y la caja de engranajes planetarios debidamente protegida con una guarda de protección metálica, un ventilador montado sobre el motor eléctrico para su enfriamiento continuo y dos cables acerados de levante enrollados en el tambor para subir y bajar el balde.

Estos elementos trabajan en conjunto para permitir los movimientos de levante (*Hoist*) y bajada (*Lower*) a requerimiento del operador según sea la orden dada por él a través de los joysticks ubicados en el asiento dentro de la cabina del operador ubicada en el lado derecho superior del equipo, esto con la finalidad de brindar una mejor visibilidad para el carguío.

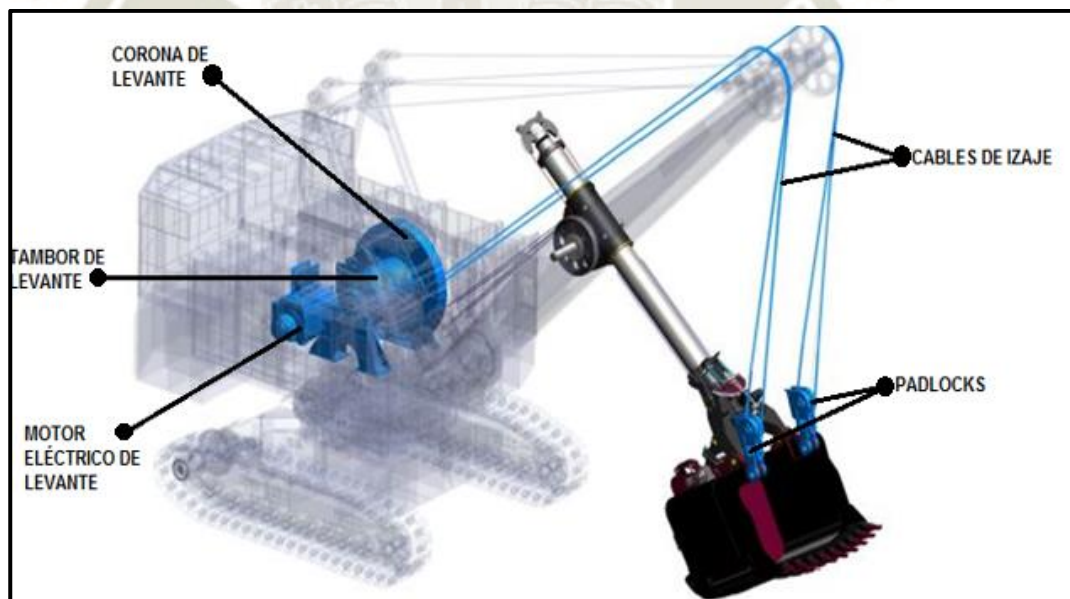


Figura 5 - Sistema de levante – Hoist System

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.2.3. SISTEMA DE EMPUJE

Con referencia al sistema de empuje, también conocido como sistema Hydracrowd Caterpillar (2013) indica que, el sistema de empuje utiliza fluido hidráulico para poder generar el movimiento de empuje y retracción de la Pala, el sistema de empuje traslada el aceite hidráulico desde un tanque superior hacia un pistón hidráulico por medio de un módulo de potencia, el módulo de potencia hidráulico consiste de los siguientes elementos: tanque hidráulico superior e inferior, motor eléctrico de empuje, transmisión de bombas principales, bombas principales

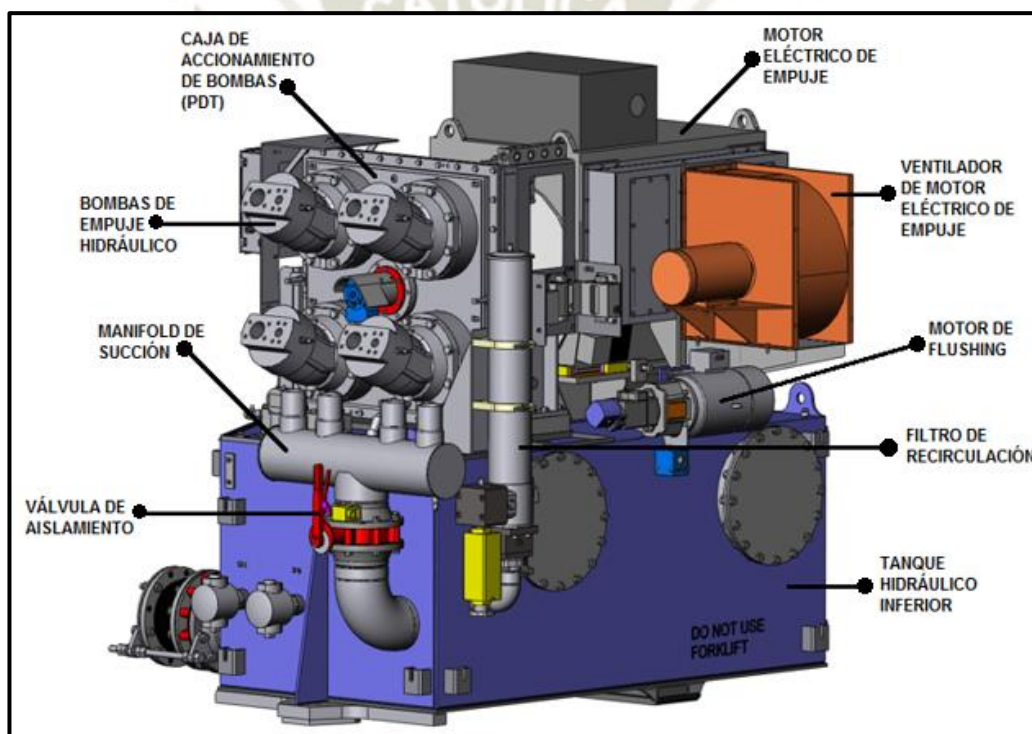


Figura 6 - Modulo de potencia hidráulico

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.2.4. SISTEMA DE PROPULSIÓN

Con referencia al sistema de propulsión Caterpillar (2013) indica que, dos motores eléctricos de corriente alterna, dos ventiladores de enfriamiento montados sobre ambos motores, dos frenos accionados por resorte y liberados por presión de aire, dos tacómetros magnéticos para el registro de la velocidad de giro de los motores eléctricos, dos cajas de planetarios de propulsión montada una en cada lado del equipo a 10° de orientación sobre el eje horizontal, dos ejes principales de propulsión para la transferencia de movimiento desde el planetario hacia dos *sprockets* o ruedas dentadas. Estas ruedas dentadas se encargan de transferir el movimiento hacia el conjunto de zapatas las cuales están fabricadas de una aleación especial de hierro fundido con el objetivo de mejorar la resistencia y durabilidad del material. Ambas cajas de planetarios están sumergidas en aceite sintético con alto grado de viscosidad con el objetivo de evitar el contacto directo entre metales debido a las altas cargas de trabajo durante el traslado del equipo.

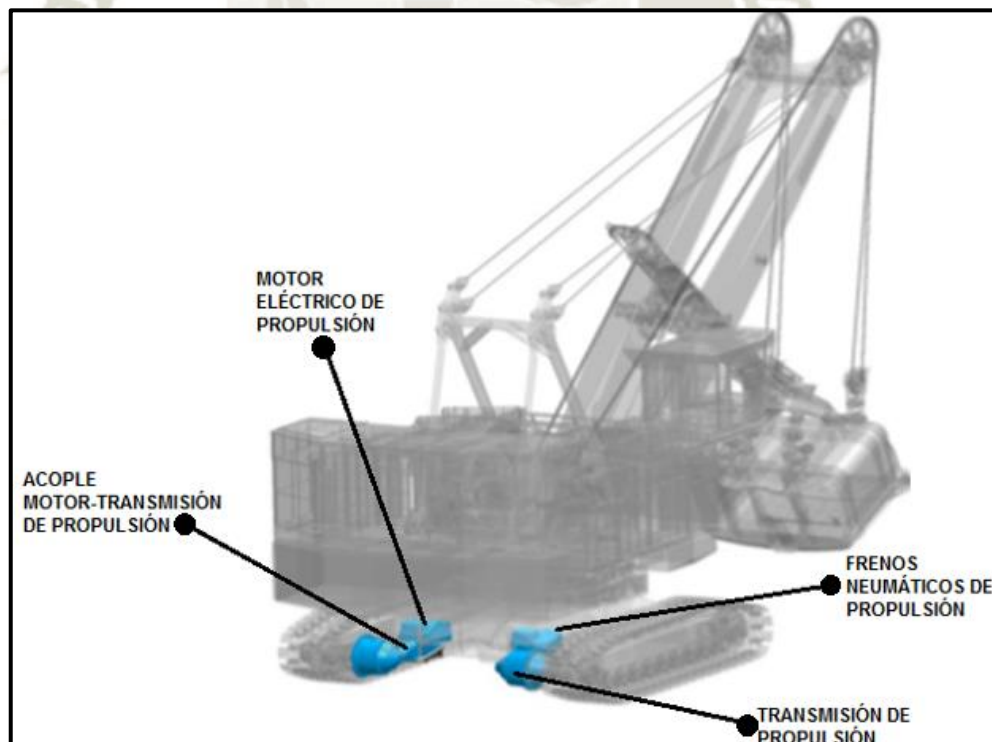


Figura 7 - Sistema de propulsión – Propel System

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.2.5. SISTEMAS AUXILIARES

A. SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

Con referencia al sistema de aire comprimido, Caterpillar (2013) indica que este es un sistema auxiliar que tiene como principales funciones: la liberación de los frenos de motor de los sistemas de giro, propulsión y levante y a su vez el accionamiento de las bombas neumáticas del sistema de lubricación automática. Además de ello el sistema de aire comprimido se utiliza para el accionamiento de las bocinas del equipo, limpieza de filtros del sistema de aire acondicionado y filtros de la sala de control electrónico Skid Siemens. Caterpillar también indica que este sistema auxiliar está conformado por dos compresores de aire tipo tornillo dispuestos de forma vertical y horizontal, un tanque de recepción y almacenamiento de aire comprimido con un sistema de purgado automático para la eliminación del condensado, frenos de aire para los sistemas de giro, propulsión y levante, líneas de aire para el accionamiento de las 6 bombas neumáticas de engrase ubicadas en la sala de lubricación y líneas de aire para el accionamiento de válvulas spray para la lubricación de rodillos del círculo de giro y lubricación de la corona de giro. Existen configuraciones de equipos opcionales que cuentan con un sistema de enrollamiento del cable de alimentación de 7.2 kV conocido como Cable Reel la cual requiere para su funcionamiento una línea de aire comprimido que se extrae del freno de propulsión del lado derecho. La operatividad y correcto funcionamiento del sistema auxiliar de aire comprimido es de vital importancia para preservar el buen desempeño del equipo, cualquier falla presente en este sistema debe de ser reportada y solucionada inmediatamente por el personal de mantenimiento. El operador cuenta con un conjunto de sensores distribuidos en varios puntos del sistema de aire comprimido los cuales le alertaran una posible baja presión de aire.

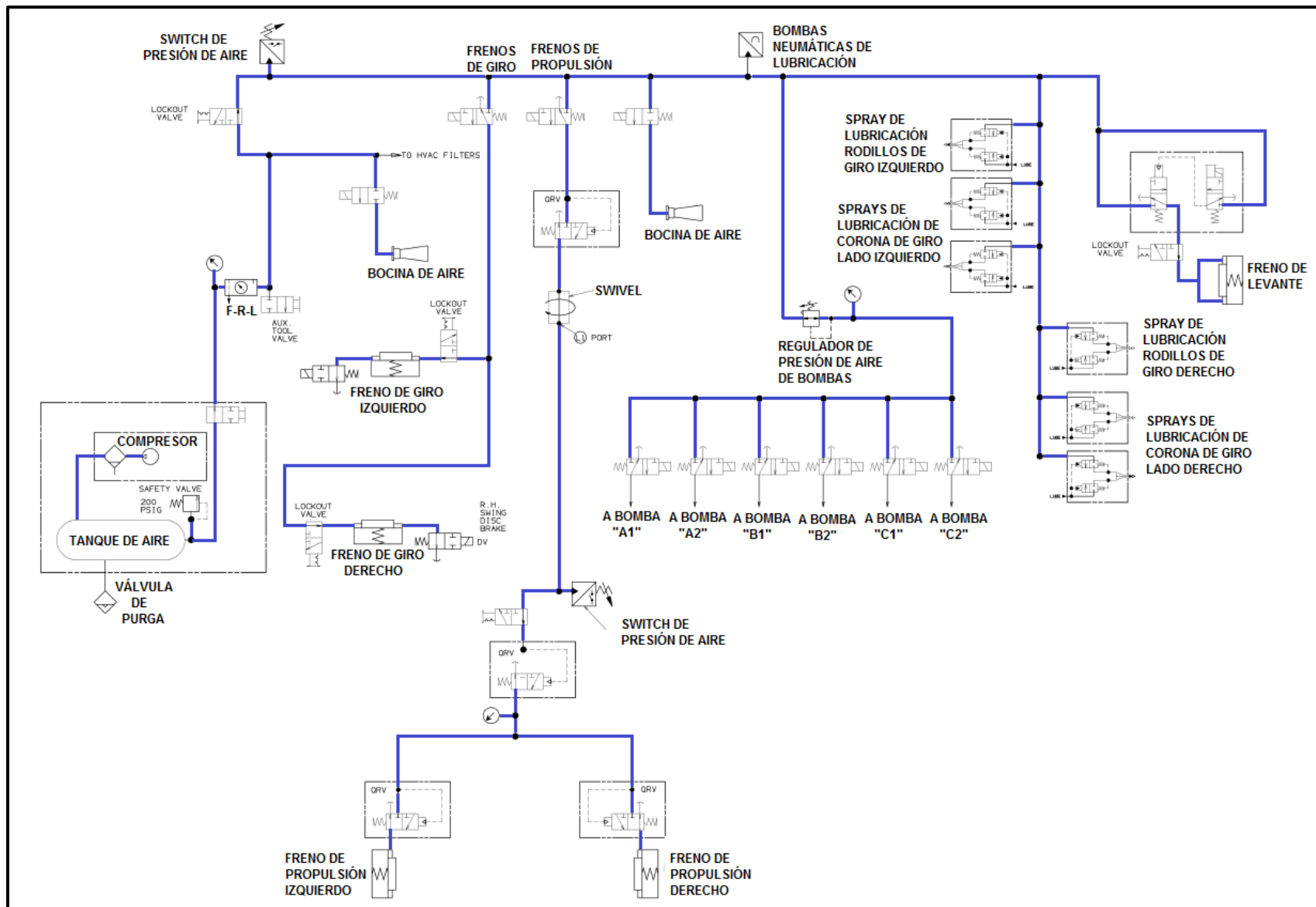


Figura 8 - Esquemático de sistema de aire comprimido

Fuente: Elaboración propia, 2021

B. SISTEMA DE LUBRICACIÓN AUTOMÁTICA

Con referencia al sistema de lubricación automática Caterpillar (2013), indica que este tiene como finalidad aplicar lubricante a los diversos puntos de la Pala Eléctrica por medio de 6 bombas neumáticas de lubricación (4 para grasa OGL y 2 para grasa MPG), cada uno de los 6 sistemas es controlado individualmente por un PLC que se encarga de controlar cada cuanto tiempo el sistema accionará las bombas neumáticas. Caterpillar también nos comenta que aquellos puntos como los motores eléctricos, pasadores de los cables de suspensión y algunos pasadores del balde se deben de lubricar manualmente.

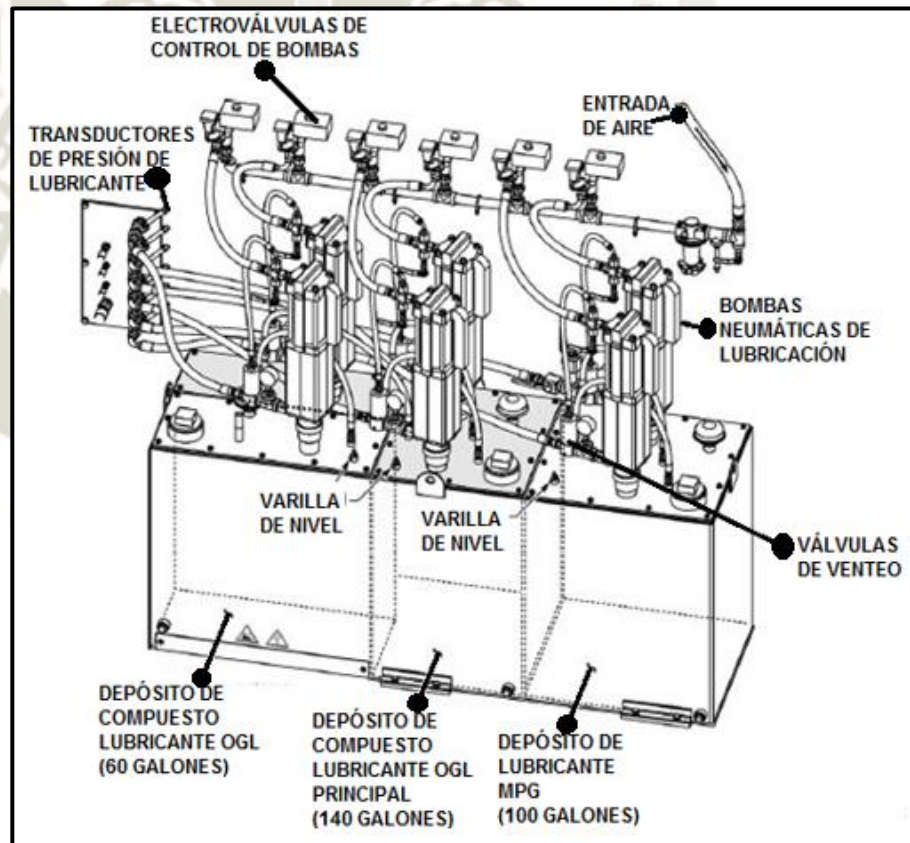


Figura 9 - Sistema de lubricación automática

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.3. PRINCIPALES COMPONENTES

La maquinaria inferior también conocida como *Lower Works* es aquella que se encarga de sostener la estructura superior y a su vez permite que el equipo se pueda desplazar de un lugar hacia otro. Esta estructura está conformada principalmente por los siguientes componentes: Estructura de transporte (*Truck Frame*), estructuras de oruga izquierda y derecha (*Crawler Frames*), cadenas de oruga (*Crawler belts*), maquinaria de propulsión (*Propel Machinery*), cremallera de giro (*Swing Rack*) y el círculo de rodillos (*Roller Circle*). (Caterpillar, 2013)

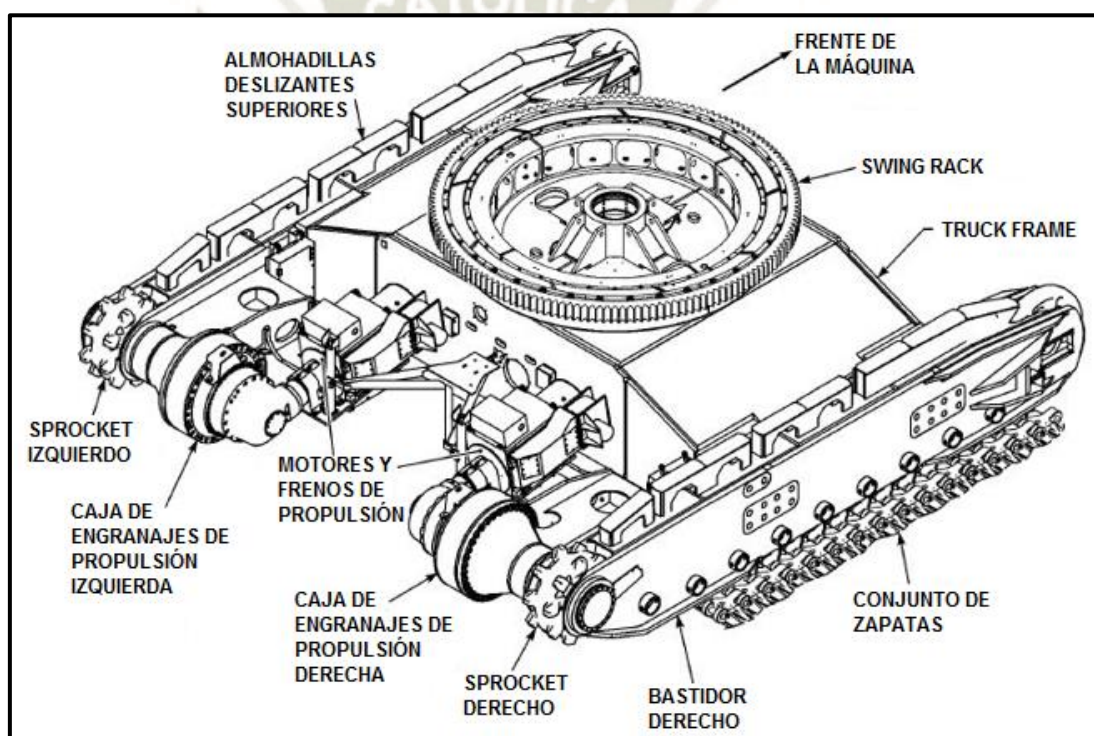


Figura 10 - Maquinaria inferior – Lower works

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.3.1. ESTRUCTURA DE TRANSPORTE (*TRUCK FRAME*)

La estructura de transporte también conocida como *Truck Frame* tal como se señala, es una estructura soldada con un posterior tratamiento térmico de alivio de tensiones, el material utilizado para su fabricación es acero resistente al alto impacto, esta serie de características aseguran que la estructura posea una gran durabilidad y buena resistencia

debido al amplio rango de temperaturas a las que trabaja el equipo durante su aplicación. (Caterpillar, 2013).

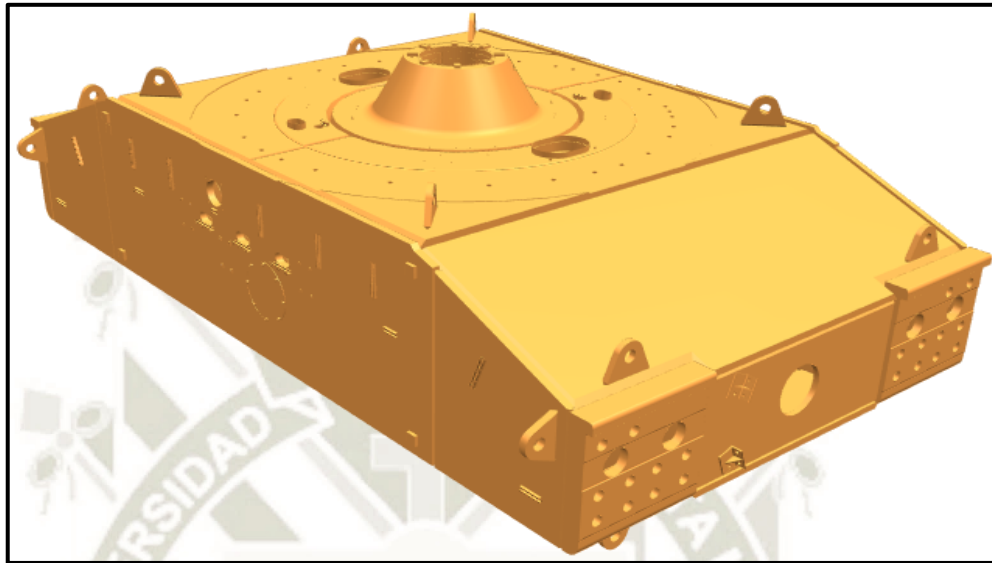


Figura 11 - Estructura de transporte – Truck Frame

Fuente: Adaptado de “Teamcenter Siemens – Desing Reuse” por CATERPILLAR, (2021).

2.1.3.2. ESTRUCTURA DE ORUGAS (*CRAWLER FRAMES*)

Con referencia a la estructura de orugas también conocida como *Crawler Frames* Caterpillar (2013) detalla que, en cada lado del equipo este cuenta con una estructura de oruga que se accionan cada una de manera independiente. Caterpillar también indica que, cada estructura de oruga tanto del lado derecho como del lado izquierdo van unidas a la estructura de transporte (*Truck Frame*) por medio de pernos de gran dimensión y tuercas con torque. Para realizar el movimiento del equipo este cuenta con cadenas propulsadas por una rueda dentada (*Sprocket*), el material utilizado para la fabricación de las cadenas es aleación de acero pesado fundido y van unidas entre sí con pasadores tratados térmicamente.



Figura 12 - Estructura de orugas – Crawler Frame

Fuente: Adaptado de “CAT ® 7495 SERIES ELECTRIC ROPE SHOVEL ERECTION GUIDELINE” por Caterpillar, (2014)

2.1.3.3. CADENAS DE ORUGA (*CRAWLER BELTS*)

Con referencia a las cadenas de orugas también conocida como *Crawler Belts* Caterpillar (2013) menciona que, estas son fabricadas de una aleación de acero pesado fundido y a su vez van conectadas entre sí por medio de pasadores tratados térmicamente con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Cada conjunto de orugas consiste de un total de 47 zapatas las cuales representan un total de 128,500 libras de peso por cada lado. Las cadenas de oruga transfieren el peso completo del equipo hacia el suelo. Caterpillar también menciona que, cada cadena de oruga puede ser tensada de manera independiente, un correcto tensado de la cadena de oruga prolongan su vida de servicio y reducen el desgaste.

2.1.3.4. MAQUINARIA DE PROPULSIÓN (*PROPEL MACHINERY*)

Con referencia a la maquinaria de propulsión también conocida como *Propel Machinery*, está conformada por dos motores de corriente alterna cada uno con un freno de discos accionados por resortes y liberados a través de presión de aire, estos motores van montados sobre una base recta formando un ángulo de 10° respecto a la horizontal y van acoplados mecánicamente a una caja de engranajes planetarios que se encargan de transferir el movimiento hacia el conjunto de orugas (Caterpillar, 2013). Esto permite

que el equipo pueda trasladarse en línea recta hacia adelante o hacia atrás y también poder realizar giros sobre su eje según sea la necesidad del operador.

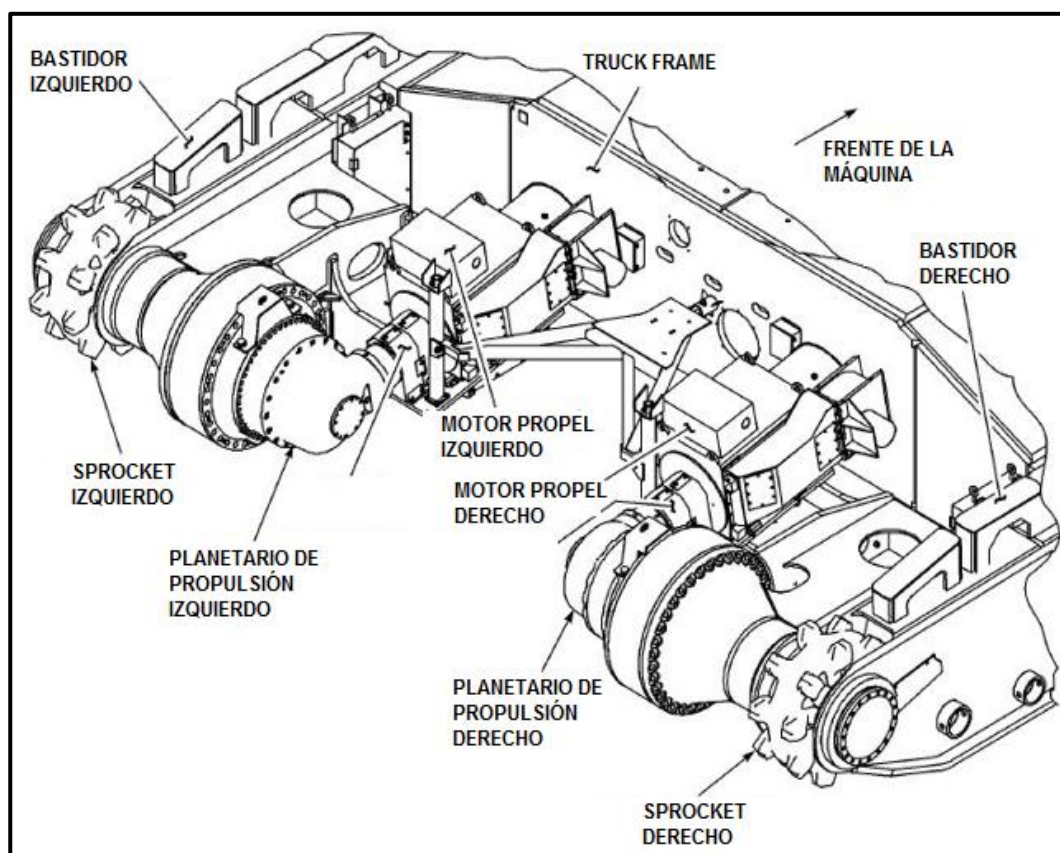


Figura 13 - Maquinaria de propulsión – Propel Machinery

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.3.5. CREMALLERA DE GIRO (SWING RACK)

Con referencia a la cremallera de giro también conocida como *Swing Rack*, esta va montada en la parte superior de la estructura de transporte (*Truck Frame*) por medio de pernos y soldadura. La cremallera de giro no es más que un engranaje de gran diámetro con dientes en la parte exterior (Caterpillar, 2013).



Figura 14 - Cremallera de giro – *Swing rack*

Fuente: Adaptado de “CAT ® 7495 SERIES ELECTRIC ROPE SHOVEL ERECTION GUIDELINE” por Caterpillar, (2014)

2.1.3.6. CIRCULO DE RODILLOS (ROLLER CIRCLE)

Con referencia al círculo de rodillos también conocida como *Roller Circle*, este está conformado por un total de 50 rodillos cónicos, rieles de sujeción tanto en la parte superior e inferior y jaulas de retención en la parte interior y exterior. Los rodillos tienen una forma cónica con la finalidad de asegurar el contacto antideslizante con los rieles y se encuentran alineados entre sí por medio de pasadores y bujes (Caterpillar, 2013). Estos van montados sobre la cremallera de giro y permiten el giro de la plataforma rotatoria.

2.1.4. PLATAFORMA GIRATORIA

La plataforma rotatoria consta de una estructura giratoria (*revolving frame*), que va unida con la estructura de transporte (*truck frame*) por medio de un eje central (*center pintle*), en las partes laterales se encuentran las extensiones de cubierta derecha e izquierda. En esta plataforma también se ubican los componentes de la sala de máquinas dentro de la cual están incluidos los principales componentes del sistema eléctrico, sistema de giro, sistema de levante, sistema de empuje, sistema de lubricación, sistema de aire. Finalmente, sobre la plataforma giratoria se encuentra la estructura “A” (*A-Frame*) y la cabina del operador (Caterpillar, 2013).

2.1.4.1. ESTRUCTURA GIRATORIA (*REVOLVING FRAME*)

Con referencia a la estructura de giro, Caterpillar (2013) indica que esta es la principal estructura de la plataforma giratoria que cuenta con orejas para el montaje de la estructura “A” (*A-Frame*), pluma (*Boom*). Caterpillar también indica que la estructura de giro cuenta con disposiciones para el montaje de las extensiones de cubierta laterales (*deck extensions*), caja de contrapeso y cabina de operador.



Figura 15 - Estructura giratoria – Revolving frame

Fuente: Adaptado de “CAT ® 7495 SERIES ELECTRIC ROPE SHOVEL ERECTION GUIDELINE” por Caterpillar, (2014)

2.1.4.2. EJE CENTRAL (*CENTER PINTLE*)

Con referencia al eje central, Caterpillar (2013) indica que este eje es un cilindro hueco de gran diámetro forjado en su proceso de fabricación, roscado en su base para la instalación de una tuerca de ajuste, este eje central es el encargado de permitir la unión estructural entre la plataforma giratoria (*revolving frame*) y la estructura de transporte (*truck frame*). De igual manera, Caterpillar refiere que otra función del eje central es proporcionar pasajes que permiten el paso de líneas de aire, líneas de grasa y cables eléctricos desde la parte superior del equipo hacia la maquinaria inferior.

2.1.4.3. ESTRUCTURA “A” (*A-FRAME*)

Con referencia a la estructura “A” Caterpillar (2013) indica que esta estructura que va montada sobre la plataforma giratoria tiene como principal función soportar la pluma (*Boom*) por medio de cables estructurales, en su construcción esta se encuentra conformada por tubos de aleación de acero frontales y vigas de acero posteriores fabricadas para trabajar en climas muy fríos sin presentar desperfectos en su estructura.

2.1.5. EQUIPOS DEL EXTREMO FRONTAL

Los equipos del extremo frontal de la Pala Eléctrica 7495 *Hydracrowd* son aquellos que se pueden ubicar en la parte delantera del equipo y que en su extremo más alejado tiene instalado el balde (*Dipper*) pero que también cuenta con los siguientes elementos: pluma (*Boom*), candados (*Padlocks*), bloque de caballete (*Saddleblock*), mango del balde (*Dipper Handle*), cables de suspensión (*Suspension Strands*) y otros componentes que permiten el carguío de material dentro del balde. (Caterpillar, 2013)

2.1.5.1. PLUMA (*BOOM*)

Con referencia a la pluma Caterpillar (2013) indica que esta es una estructura de acero soldada resistente al alto impacto, esta estructura cuenta con orificios por los cuales se puede ingresar al interior para realizar inspecciones estructurales de manera periódica. Caterpillar también indica que esta pluma esta sujeta en su parte superior a la estructura en “A” por medio de cuatro cables de acero estructurales.



Figura 16 - Pluma - Boom

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.5.2. BLOQUE DE CABALLETE (*SADDLEBLOCK*)

Con referencia al bloque de caballete (*Saddleblock*) Caterpillar (2013) indica que este se encuentra ubicado en la sección intermedia de la pluma (*Boom*), este bloque oscilante se va unido a la pluma por medio de un eje de carga (*Shipper Shaft*) y su función principal es servir de guía para el desplazamiento del mango del balde (*Dipper Handle*).

2.1.5.3. MANGO DEL BALDE (*DIPPER HANDLE*)

Con referencia al mango del balde (*Dipper Handle*) Caterpillar (2013) indica que este es un tubo de una sola pieza de un gran diámetro que en un extremo va unido con el balde (*Dipper*) y en el otro extremo va con el cilindro hidráulico de empuje, este cilindro se utiliza para extender y retraer el mango del balde.

2.1.5.4. CILINDRO HIDRÁULICO (*HYDRACROWD*)

El cilindro hidráulico es un pistón hidráulico de doble efecto que utiliza la energía que proviene del aceite hidráulico para realizar sus movimientos de extender (empuje) y retraer el mango (*Dipper Handle*). El fluido hidráulico es bombeado desde el tanque inferior por medio de cuatro bombas de pistones axiales por medio del múltiple de control de bombas hasta el múltiple de control de cilindro hidráulico a través de una serie de válvulas, líneas,

tuberías. El movimiento del cilindro hidráulico es controlado por el PLC según los requerimientos del operador a través de los joysticks ubicados en la cabina. El cilindro de empuje hidráulico se encuentra dentro de una camisa de protección y unido con el *Saddleblock*, por último y como dato general el cilindro mide 34 pies cuando está completamente retraído y aproximadamente 54 pies cuando está completamente extendido. El peso del cilindro hidráulico seco es de aproximadamente 21,000 libras.

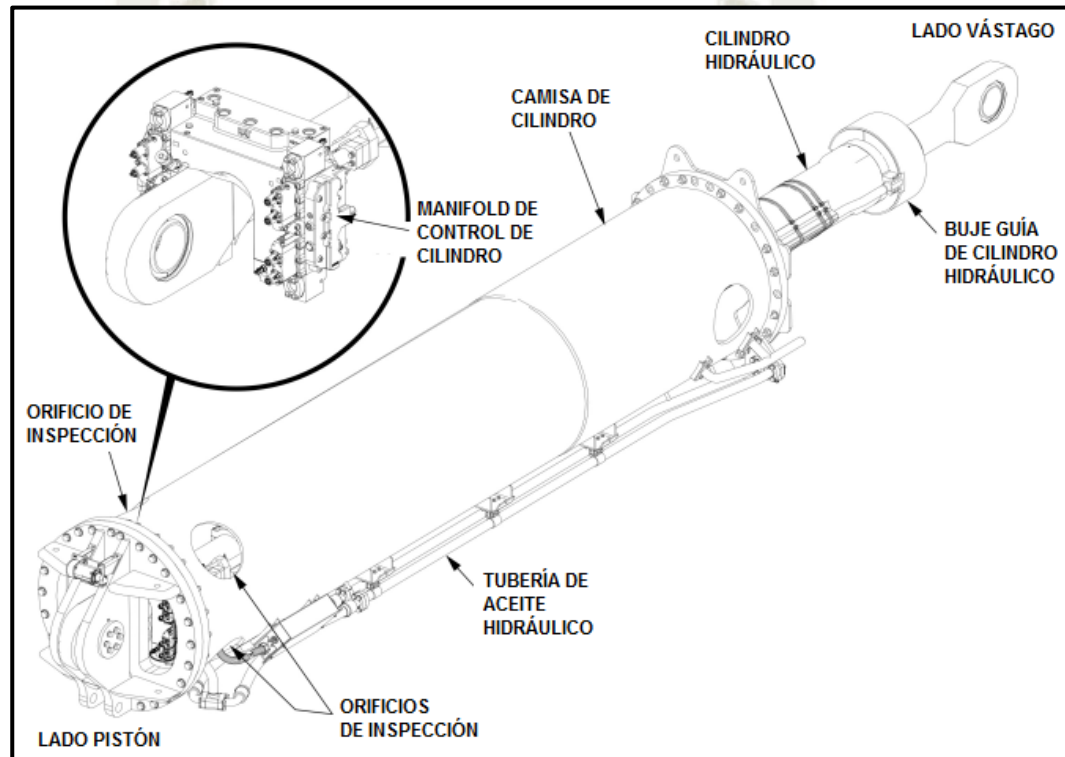


Figura 17 - Cilindro hidráulico Hydracrowd

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.5.5. BALDE (*DIPPER*)

Con referencia al balde (*Dipper*) Caterpillar (2013) indica que este consta de una compuerta y un cuerpo principal construido principalmente de piezas fundidas y planchas soldadas, el labio y la parte delantera inferior del balde son fabricadas de una aleación de acero fundido con post-tratamiento térmico. De igual manera Caterpillar nos menciona que en su parte delantera, el balde cuenta con “dientes” reemplazables que van fijados al labio delantero y que sirven para poder penetrar al banco.



Figura 18 - Balde – Dipper

Fuente: Elaboración propia, 2019

2.1.5.6. CANDADOS (*PADLOCKS*)

Con referencia a los candados (*Padlocks*) Caterpillar (2013) indica que los candados van instalados en las orejas delanteras del balde (*Dipper*) y haciendo uso de los cables de levante permiten realizar los movimientos de levante y descenso del balde según sea la necesidad del operador.

2.1.6. INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

Desde el año 1930, Moubray (1997) refiere que la historia y evolución del mantenimiento se puede resumir 3 principales etapas o generaciones.

2.1.6.1. PRIMERA GENERACIÓN

Referente a la primera generación Moubray (1997) indica que este periodo abarca desde la primera hasta la segunda guerra mundial (1773-1938), época en la cual el mantenimiento en la industria no era altamente mecanizado, durante este periodo los tiempos de inactividad durante el proceso productivo no tenían gran relevancia en la

mente de los gerentes de las industrias. Los equipos que conformaban las plantas industriales tenían una alta confiabilidad a partir de su facilidad para ser reparados lo cual no requería de habilidades específicas por parte de sus trabajadores más allá de realizar labores de limpieza y lubricación diaria, actividades de mantenimiento que podrían ser descritas como netamente correctivas o reactivas.

2.1.6.2. SEGUNDA GENERACIÓN

Con la segunda guerra mundial el mundo del mantenimiento sufre un cambio drástico a partir de la alta demanda que surgió por todo tipo de provisiones y a su vez el déficit considerable y sensible en la mano de obra lo que llevo a los gerentes de las industrias a mecanizar sus procesos de fabricación, la industria estaba empezando a depender de mayor número de máquinas con mayor complejidad de reparación. (Moubray, 1997) Esto trajo a la mente de las personas que las fallas de estas máquinas podían ser prevenidas, lo que dio inicio al concepto de mantenimiento preventivo que para el año de 1960 consistía principalmente del reacondicionamiento de los equipos en intervalos de tiempo fijos, lo que naturalmente trajo consigo un incremento en los costos. Esta generación abarcó los periodos desde (1939-1966).

2.1.6.3. TERCERA GENERACIÓN

En la segunda generación y con el mantenimiento preventivo se empezó a realizar cambios de componentes cada cierto periodo de tiempo, componentes que en muchos casos aún contaban con vida útil remanente, esto originaba incrementos en el costo de manutención de los equipos y envejecimiento prematuro de los componentes por desconocimiento en las técnicas de desarmado de los mismos. Para combatir esta condición se llega a la conclusión que el mantenimiento preventivo no debe de ser aplicado de igual manera a todos los equipos sin antes no haber realizado una evaluación de su condición actual, de su antigüedad y de su afectación en la línea de producción en caso de interrupciones imprevistas. (Linares, 2012)

Entonces, para el análisis de la condición actual de los equipos se desarrollaron técnicas de inspección de parámetros físicos para la predicción de fallas antes de su ocurrencia, esto da inicio al mantenimiento predictivo que, según Linares, combina

mantenimiento de generaciones anteriores ya que a partir de inspecciones programadas propias del mantenimiento preventivo se puede identificar puntos en los que se debe de aplicar mantenimiento correctivo. La etapa del mantenimiento predictivo abarca los periodos desde 1967 a 1989.

2.1.6.4. PRÁCTICAS MODERNAS DE MANTENIMIENTO

Es conocido por todos que el mantenimiento ha tenido una amplia evolución en cuanto a sus últimas tendencias, deficiencias y resultados a partir sobretodo de 1980. Las técnicas de análisis de vibración, análisis de aceite, inspección por termografía infrarroja, ensayos no destructivos, etc. Estas “mantecnologías” fueron reemplazando a las inspecciones periódicas preventivas que hasta entonces se realizaban como parte del mantenimiento. (Gonzales, 2004)

La definición moderna de mantenimiento verifica que la misión principal del mantenimiento es asegurar la disponibilidad de equipos e instalaciones para garantizar que el proceso productivo sea ejecutado de manera segura, preservando el medio ambiente y a un costo adecuado. En esta etapa aparece el concepto de confiabilidad y también se caracteriza por la aplicación de técnicas de mantenimiento relacionadas al TPM y al RCM, este periodo abarca desde 1990 al 2002. (Linares, 2012)

2.1.6.5. INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

La ingeniería del mantenimiento según Linares es conocida como la quinta generación y significa estar al nivel del mantenimiento de países del primer mundo, y realiza labores de mantenimiento con el objetivo de trabajar bajo los más altos estándares de desempeño en términos de disponibilidad, confiabilidad, costo de ciclo de vida útil. Este periodo abarca desde 2003 y continua en desarrollo.

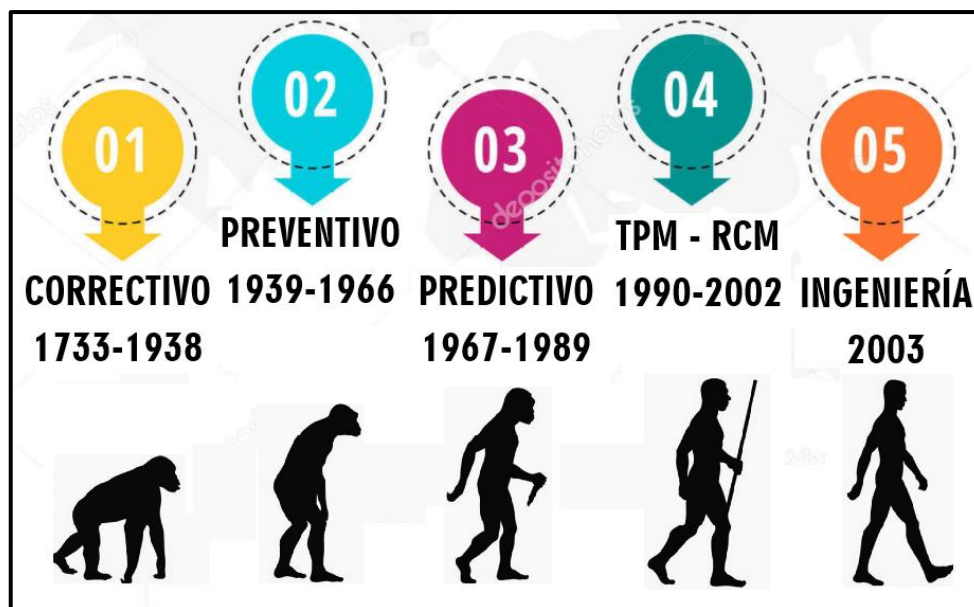


Figura 19 - Evolución del mantenimiento

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.7. TIPOS DE MANTENIMIENTO

2.1.7.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Con referencia al mantenimiento correctivo, este también es conocido como un mantenimiento “*Run-to-Failure*” que podría ser interpretado en español como, hacer funcionar al componente hasta que falle, tal como lo menciona Keith (2002) este concepto es simple y sencillo: “Si la máquina se detiene, hay que arreglarla y si nada está roto, no lo arregles.” (p. 2). Este concepto suena razonable si lo que se busca es “ahorrar” en costos de mantenimiento ya que no se invertiría dinero alguno hasta que el equipo o componente presentara una falla notable que genere una parada.

Sin embargo, Keith también menciona que, este tipo de mantenimiento es el más costoso en cuanto a gestión y es por eso que son muy pocas las plantas que utilizan una filosofía “*run-to-failure*” en todos sus procesos, la gran mayoría utilizan una gestión preventiva con tareas de lubricación, ajustes, etc. Los resultados de gestionar mis equipos bajo la filosofía “*run-to-failure*” son: altos costos en inventario estático, gran cantidad de tiempo de parada de equipos y por lo tanto baja disponibilidad y producción. Finalmente, se menciona que los costos asociados a realizar mantenimiento correctivo o

reactivo serían 3 veces más altos que si se realizara la misma reparación de manera programada y planificada.

2.1.7.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Con referencia al mantenimiento preventivo existen muchos conceptos para definirlo, según Keith (2002) refiere que estas estrategias de mantenimiento están basadas en periodos de tiempo u horas de operación. Como su nombre lo indica, lo que este mantenimiento busca es “prevenir” paradas no-programadas y daños prematuros en los equipos que derivan en acciones correctivas. Esta gestión de mantenimiento se centra principalmente en aplicar paradas programadas para ejecutar tareas planificadas de limpieza, revisión, lubricación y ajustes recomendados por el diseñador del equipo para mantener este dentro de los niveles aceptables de confiabilidad y disponibilidad.

Este modelo de mantenimiento, el cual tiene como objetivo identificar fallas en los equipos de manera prematura para ser reparados de manera oportuna en una intervención programada presenta dos categorías según Duffaa, Raouf y Dixon (2006), las cuales son: Mantenimiento preventivo basado en el tiempo: Esta se encarga de hacer frente a las posibles fallas que podría presentar en el equipo basándose en el calendario establecido u horas de funcionamiento que este tiene. Este tipo requiere de un alto nivel en el control de horas de uso y rutinas planificadas. Mantenimiento preventivo basado en la condición: Esta se basa en la condición actual del equipo, la cual se identifica por medio de rutinas de inspección programadas. Este enfoque de mantenimiento preventivo da inicio al concepto de mantenimiento predictivo. Su aplicación satisfactoria brinda grandes beneficios a la organización como son: reducción de tiempo entre fallas, correcta selección del momento cuando se debe de aplicar el mantenimiento, planificación correcta de recursos, entre otros beneficios.

2.1.7.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Este tipo de mantenimiento como ya se mencionó, tiene como punto de partida al mantenimiento preventivo basado en la condición, por lo consiguiente y según (Keith, 2002), el mantenimiento predictivo tiene como premisa el monitoreo regular de las condiciones mecánicas del equipo para de esta manera asegurar lo intervalos máximos

que debe de haber entre una reparación y otra para de esta manera minimizar el número y costo de paradas no-programadas generadas a partir de fallas en los equipos. Keith también menciona que el mantenimiento predictivo no es la aplicación de herramientas predictivas de monitoreo de vibraciones, inspección visual, análisis de aceite, termografía u otras técnicas no destructivas, mantenimiento predictivo es mucho más que esto. Se debe de entender al mantenimiento predictivo como “una filosofía que utiliza las herramientas predictivas para conocer la condición actual de operación de los equipos y sistemas para de esta manera mejorar la calidad, optimizar e incrementar la productividad de nuestra planta” (Keith, 2002, p. 5)

2.1.7.4. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL

También en 1970 en Japón, aparece una nueva manera de organizar el mantenimiento con la creación del TPM (*Total Productive Maintenance*). En cuanto a la definición del TPM Nakajima (1988) refiere que, este es un mantenimiento productivo que implica una participación total de toda la compañía desde la alta dirección hasta los trabajadores de planta de las áreas de ingeniería, operaciones y mantenimiento.

Para complementar este concepto Gulati (2009) refiere que “es una estrategia de mantenimiento que hace énfasis en la cooperación entre operaciones y mantenimiento, este objetivo incluye cero defectos, cero accidentes, cero paradas y un ambiente de trabajo efectivo diseñado para reducir los costos de mantenimiento.” (p. 165)

El TPM basa sus fundamentos en 5 específicos, claros y sólidos principios los cuales pueden ser interpretados como los 5 pilares del TPM, los cuales son descritos por (Stephens, 2010) mejora continua, mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado, formación y gestión temprana del equipo.



Figura 20 - Pilares del TPM

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.8. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

2.1.8.1. HISTORIA DEL RCM

Referente a la historia del RCM Moubray (1997) indica que, este nace en 1974 a partir de que el Departamento de Defensa de los Estados Unidos le solicita a la aerolínea *United Airlines* que elabore un informe detallado referente a cómo es que se realiza el mantenimiento a las aeronaves en la aviación civil. En 1978 los ingenieros Howard Heap y Stanley Nowland de *United Airlines* presentan el libro titulado *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad*. Entonces podemos evidenciar que el RCM nació en la industria de la aviación, pero ya para principios de 1980, Moubray y su grupo de colaboradores comenzaron a aplicar los conceptos del RCM en el mundo minero y de manufactura con una ligera modificación a lo hasta entonces conocido. Los riesgos medioambientales comenzaron a tomar igual relevancia que los riesgos en seguridad, como resultado de esto, para 1988 Moubray comenzó a trabajar con muchas compañías multinacionales encargadas de desarrollar un enfoque preciso en todas las fallas que afectaban también al medio ambiente. Esta investigación concluyó con agregar una nueva pregunta al diagrama de decisión del RCM tradicional, esta modificación generó

un cambio tal que dio inicio al concepto del RCM2 el cuál se lanzó en septiembre de 1990 con todos los cambios que esta evolución implicaba.

2.1.8.2. MANTENIMIENTO Y RCM

Para dar inicio a la siguiente propuesta es muy importante que primero podamos definir que es el mantenimiento, la Real Academia Española (2021) explica que mantenimiento es “conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que las instalaciones, edificaciones, industrias, etc., continúen funcionando adecuadamente” (párr. 2), las palabras claves aquí son: **continúen funcionando adecuadamente**, esto nos da a entender que todo activo físico es fabricado para que cumpla o desempeñe una o varias funciones para las que fue diseñado, por lo tanto nosotros mantenemos un activo con la finalidad de que este siga cumpliendo con dichas funciones, así como lo describe también Moubray (1997) “Mantenimiento: asegurar que los bienes físicos continúen cumpliendo las funciones que los usuarios esperan” (p. 11), esto dependerá de como y donde esten siendo utilizados los activos o bienes. Otros autores definen al mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM por sus siglas en inglés como un proceso sistemático, diseñado para establecer todo aquello que debe de llevarse a cabo para garantizar que cualquier instalación física (ya sea una máquina, proceso o planta industrial) sea capaz de cumplir de manera ininterrumpida las funciones para las cuales ha sido diseñada bajo un contexto operativo actual. El RCM se centra en el mantenimiento preventivo de aquellos modos de falla específicos con mayor probabilidad de ocurrencia. Si del total de tiempo destinado para el mantenimiento el 25% de este esta destinado para la atención de fallas, la aplicación del RCM puede ser beneficiosa.

2.1.8.3. OBJETIVOS Y PRINCIPIOS DEL RCM

Aquí mostramos algunos objetivos importantes de la aplicación del RCM:

- Ante todo, el RCM debe de tener como finalidad la seguridad de todos los trabajadores y a su vez generar un incremento en la economía de la empresa. Si su implementación deja un balance económico negativo, su aplicación debe de ser descartada.

- El RCM debe de desarrollar tareas de mantenimiento enfocadas en eliminar aquellos modos de falla que disminuyen la confiabilidad del equipo debido a su constante ocurrencia.
- Obtener información útil de los modos de falla de tal manera que se pueda proponer re-diseños o modificaciones en el diseño original, con el objetivo de incrementar la confiabilidad del mismo. Así mismo el RCM es consciente de las limitaciones en el diseño.
- Uno de los principios del RCM es que este debe y está orientado a garantizar la funcionabilidad del sistema y/o equipo donde se aplique.
- Otro de los principios es que las tareas del RCM deben de ser aplicables de manera segura por el personal de mantenimiento. No se puede canjear confiabilidad por seguridad, ambos deben de ir de la mano.

2.1.8.4. SIETE PREGUNTAS DEL RCM

Para iniciar con el proceso de implementación del RCM Moubray (1997) refiere que el equipo implementador pueda responder las siguientes siete preguntas:

- 1) ¿Cuáles son las funciones y los niveles de desempeño que se esperan de este activo en su contexto operacional actual?
- 2) ¿Cuáles son las razones de cada falla funcional o modo de falla?
- 3) ¿Qué es lo que genera cada falla funcional?
- 4) ¿Cuáles son los efectos de cada uno de los modos de falla?
- 5) ¿Qué consecuencia genera cada modo de falla?
- 6) ¿Qué medidas correctivas se puede tomar para prevenir o predecir cada modo de falla?
- 7) ¿Qué debe de hacerse si es que no se encuentra un plan de acción adecuado para atacar un modo de falla?

2.1.8.5. PASOS DEL PROCESO DEL RCM

Una vez resueltas las siete preguntas básicas se deben de considerar los siguientes pasos para la aplicación del proceso del RCM.

- 1) Seleccionar el equipo a través de un análisis de criticidad.
- 2) Definir las funciones del equipo.
- 3) Identificar las fallas funcionales del equipo.
- 4) Identificar los modos de falla del equipo.
- 5) Identificar los efectos de falla y sus consecuencias.
- 6) Utilizar la lógica del RCM para seleccionar la estrategia de mantenimiento adecuada.
- 7) Documentar y ajustar el programa de mantenimiento conforme la experiencia que se vaya obteniendo de campo.

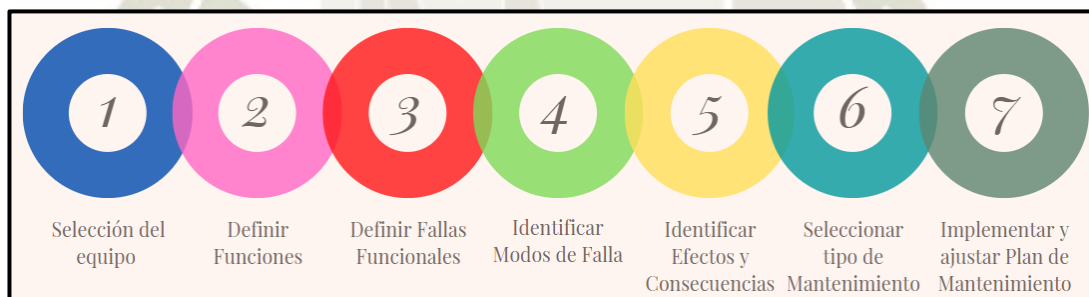


Figura 21 - Pasos del proceso básico RCM

Fuente: Elaboración propia, 2021

2.1.8.6. CONTEXTO OPERACIONAL

En cuanto a la definición de contexto operacional la norma internacional SAE JA1011 hace una descripción breve de contexto operacional como “las circunstancias bajo las cuales un activo físico o sistema se espera que opere.” (SAE International JA1011, 1999, p. 5) esta descripción nos indica que el contexto operacional debe de incluir definiciones

de cómo se utilizará el activo, en que lugar será utilizado y otros criterios como producción, rendimiento, seguridad, medioambiente, etc.

2.1.8.7. FUNCIONES

Tal y como se describe en el proceso de implementación del RCM el primer paso que se tiene que hacer según Moubray (1997) son dos cosas: Poder determinar cuál o cuáles son las funciones que los usuarios quieren que su activo cumpla y la segunda es poder asegurar que el bien o activo es capaz de iniciar su funcionamiento con aquello que el usuario espera que haga, es por eso que las funciones de los activos deben dividirse en categorías.

A. FUNCIONES PRIMARIAS

Estas funciones cubren aquellas características principales por las que el bien o activo físico fue principalmente adquirido, dichas características pueden abarcar parámetros físicos como: velocidad, rendimiento, calidad de producto, capacidad de almacenamiento y/o transporte.

B. FUNCIONES SECUNDARIAS

Estas funciones son aquellas que el usuario busca adicionalmente en su bien o activo físico más allá de simplemente cumplir con su función primaria ya que los usuarios también tienen expectativas adicionales que esperan que su bien o activo físico pueda satisfacer como son: seguridad, control, confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia operacional, cumplimiento medioambiental y hasta aspectos estéticos de buena apariencia del activo.

A su vez cada función, independiente si es primaria o secundaria puede ser subdividida en referencia a si es evidente u oculta, con respecto a esto Moubray (1997) indica que “las funciones evidentes son aquellas cuya falla es inevitablemente evidente por sí misma para los operadores bajo circunstancias de operación normales.” (p. 89) mientras que las funciones ocultas Moubray también nos indica que estas son exactamente lo contrario “son aquellas cuya falla **no** es evidente por sí misma para los operadores bajo circunstancias de operación normales.” (p. 89)

2.1.8.8. FALLAS FUNCIONALES

Aquel acontecimiento que evita que nuestro bien o activo físico deje de funcionar al nivel o parámetros requeridos es conocido como falla, es por eso que en el proceso de implementación del RCM es muy importante identificar que o quien genera que nuestro activo caiga en este estado de falla, Moubray (1997) describe que estos estados de falla son conocidos dentro del mundo del RCM como fallas funcionales y son aquellas que generan que el bien o activo físico sea incapaz de cumplir con una función a un nivel de rendimiento deseado por el usuario, de esto podemos inferir que la definición formal de falla es “incapacidad de que un bien pueda cumplir con las funciones que el usuario espera que realice” (p. 45) y falla funcional es “incapacidad de que un bien pueda cumplir con una función a un nivel de desempeño aceptable por el usuario” (p. 46)

Las fallas funcionales contemplan dos escenarios: la pérdida total del funcionamiento del bien en la que el equipo no se encuentra disponible para el usuario en ningún aspecto y la pérdida parcial del funcionamiento en la que el bien continúa en funcionamiento pero fuera de los límites deseados por el usuario, cada una de ellas representa consecuencias diferentes, es por que identificar y registrar todas las posibles fallas funcionales que puedan afectar a nuestro bien es muy importante en el proceso de implementación del RCM.

2.1.8.9. MODO DE FALLA

Respecto a la definición Moubray (1997) nos indica que un modo de falla es cualquier suceso o evento que genera una falla funcional, el autor también indica que la mejor manera que existe de describir una falla de forma gramatical es utilizarse como mínimo un sustantivo seguido de un verbo y con una extensión lo suficientemente correcta que nos permita escoger planes de acción adecuados y no perder demasiado tiempo en el proceso de análisis, la esencia del mantenimiento proactivo se basa en actuar antes de que el evento ocurra, nosotros llamaremos a los eventos como modos de falla, los cuales tienen diferentes categorías, las cuáles serán descritas a continuación.

A. CATEGORIA I: CAPACIDAD EN DESCENSO

Esta primera categoría de modos de falla cubre todas aquellas situaciones en las que la capacidad del bien se encuentra por encima del desempeño deseado, pero una vez que el bien es puesto en servicio la capacidad desciende por debajo del desempeño deseado por el usuario, teniendo entre sus principales causas los siguientes elementos: deterioro, fallas en la lubricación, suciedad, desmontaje deficiente, errores humanos. (Moubray, 1997)

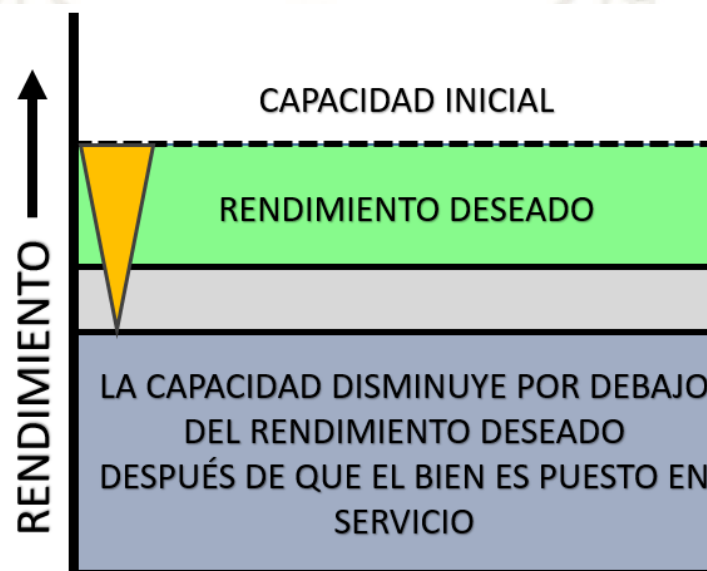


Figura 22 - Categoría I de modos de falla

Fuente: Adaptado de “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” por Moubray, (1997)

B. CATEGORÍA II: CAPACIDAD EN AUMENTO

Esta segunda categoría tiene lugar cuando la capacidad del bien se encuentra por encima del desempeño deseado, pero posteriormente las expectativas de crecimiento del usuario hacen que la capacidad inicial del bien se vean superadas, esto genera que el activo falle ya sea porque este no es capaz de cumplir el nuevo desempeño deseado o que el incremento en el esfuerzo genere deterioro hasta el punto que el bien se vuelve inútil. (Moubray, 1997)

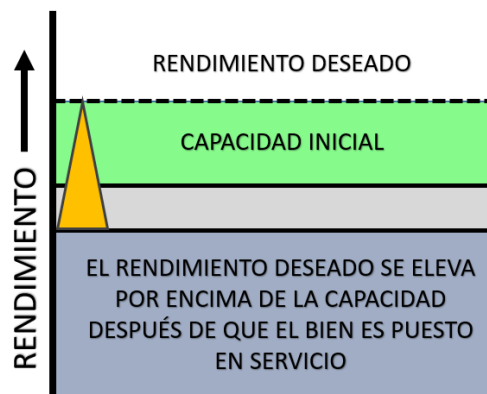


Figura 23 - Categoría II de modos de falla

Fuente: Adaptado de “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” por Moubray, (1997)

C. CATEGORÍA III: PROBLEMAS DE DISEÑO

Para que un bien pueda ser susceptible de mantenimiento desde su diseño se debe de contemplar que la capacidad inicial siempre cubra el rendimiento deseado por el usuario, pero en algunos casos los bienes no son diseñados de esta manera, de tal forma que el rendimiento deseado por el usuario supera la capacidad del bien, lo cual no afecta al bien en su totalidad, pero si afecta en una o dos funciones que disminuyen la eficiencia de la cadena de producción. Estos problemas de diseño deben de ser identificados y enunciados en nuestro análisis de modos de falla durante el proceso del RCM. (Moubray, 1997)

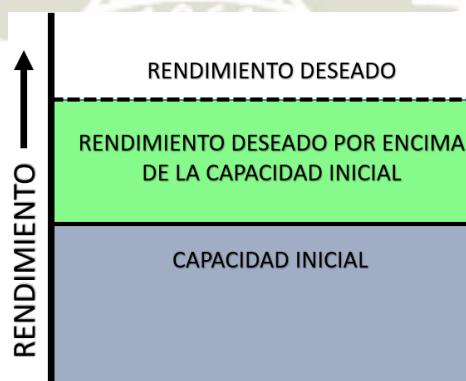


Figura 24 - Categoría III de modos de falla

Fuente: Adaptado de “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” por Moubray, (1997)

2.1.8.10. EFECTOS DE FALLA

Respecto a la descripción de efecto de falla Moubray (1997) indica que este sucede una vez que se presenta un modo de falla y que de ninguna manera representan lo mismo, el efecto de falla responde a la pregunta ¿qué sucede?, cuando se describe un efecto de falla se debe de considerar los siguientes puntos: que evidencias hay de que la falla ocurrió, que amenaza representa para la seguridad y el medioambiente, de qué manera afecta en la producción u operaciones, que daño físico es generado por la ocurrencia de la falla y sobretodo que se debe de hacer para reparar la falla.

2.1.8.11. CONSECUENCIAS DE FALLA

Las consecuencias de falla describen el ¿cómo? y ¿cuánto? importa la ocurrencia de una falla Moubray (1997) indica que, si las consecuencias de falla son serias para las personas y/u organización, se hará todo lo posible para la eliminar, minimizar o evitar su ocurrencia, sobre todo si las consecuencias involucran herir o matar una persona o si tiene un impacto sobre el medioambiente. Por otro lado, también se menciona que, si la consecuencia de falla es menor, es muy probable que no se tome acción alguna y que simplemente se realice una reparación cuando la falla ocurra.

2.1.9. INDICADORES DE MANTENIMIENTO

2.1.9.1. CONFIABILIDAD

Con referencia a la definición formal del término confiabilidad Gulati (2009) menciona que es “la probabilidad de que un activo realice su función prevista en un intervalo de tiempo específico bajo un determinado contexto operacional” (p. 20). En otro título Acuña (2003) que el concepto de confiabilidad “tuvo su origen durante la Segunda Guerra Mundial, pues en aquella época era de una meta fundamental lograr una alta confiabilidad en el material bélico con la finalidad de disminuir al máximo la probabilidad de falla en cualquiera de los equipos” (p. 16). El mismo autor también subraya que la confiabilidad es la “probabilidad de que una unidad de producto se desempeñe de manera satisfactoria cumpliendo su función durante un periodo de tiempo diseñado y bajo unas condiciones previamente especificadas”. Tal como se menciona en

la definición de confiabilidad esta es una probabilidad lo que significa que su resultado debe de ser expresado en una magnitud numérica comprendida entre cero y uno.

Confiabilidad y confianza no son lo mismo, la primera hace referencia a un valor numérico que va directamente ligado al desempeño de un determinado producto en funcionamiento bajo un determinado contexto operacional, mientras que la segunda es un concepto netamente estadístico que hace referencia a la probabilidad máxima con la que podríamos garantizar que el parámetro a estimar se encuentra dentro del parámetro estimado.

El autor también menciona que la confiabilidad de un sistema, ya sea un producto o un proceso se puede estimar en cuatro fases:

1. *Definición de objetivos y requerimientos de confiabilidad.* En esta fase interviene un equipo multidisciplinario donde participa el equipo comercial que se encarga de captar los requerimientos del cliente, el equipo de ingeniería que se encarga de captar los requerimientos del proceso y es aquí donde se registran todas las limitaciones tecnológicas.

2. *Disgregación del proceso en componentes y estimación de la confiabilidad para cada componente.* Todo proceso esta conformado por diferentes componentes, y estos a su vez, divididos en partes, esto con la finalidad de poder determinar de manera mas sencilla la confiabilidad de cada una de las partes. Para realizar esto se puede hacer uso de diagramas de bloques o diagramas “gozinto” para realizar una disgregación ordenada y que ninguno de los componentes se quede fuera del proceso.

3. *Predicción de la confiabilidad del sistema en base a la confiabilidad de sus componentes.* La combinación de la confiabilidad de cada uno de los componentes da como resultado la confiabilidad del proceso como un todo. Estimar la confiabilidad de un proceso como un macro es más complicado y muchas veces está sujeta a muchos errores.

4. *Análisis del proceso para identificar debilidades y aprovechar nuevas oportunidades.* Una vez identificada la confiabilidad de todo el proceso, se procede a realizar el estudio de fallas del producto ya sea durante su proceso de manufactura o

durante su vida útil, estas etapas son excelentes para identificar todas aquellas debilidades que pueden ser corregidas y de esta manera se logre mejorar el comportamiento del proceso.

También el autor menciona que hay una serie de definiciones asociadas al estudio de la confiabilidad que deben de ser repasadas antes de dar inicio a la aplicación de la estrategia de mantenimiento centrado en la confiabilidad. Estos conceptos son: tiempo medio entre fallas, tiempo medio para reparar, tiempo medio para la primera falla, y disponibilidad. Cada uno de estos conceptos serán descritos a continuación.

2.1.9.2. TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS (MTBF)

En cuanto al término MTBF (*Mean Time Between Failures*) Gulati (2009) indica que este es “el promedio de tiempo que existe entre una falla y otra para un activo o componente, este concepto se utiliza en activos que son reparables” (p. 18)

$$MTBF [hrs] = \frac{\text{Horas efectivas de operación}}{\text{Número de paradas}}$$

Horas efectivas de operación: Representa el total de horas efectivas en las que el equipo se encuentra en operación realizando la función para la cual fue adquirido sin presentar ninguna interrupción.

Número de paradas: Es la cantidad total de paradas del equipo por falla.

2.1.9.3. TIEMPO MEDIO PARA REPARAR (MTTR)

En cuanto al término MTTR (*Mean Time To Repair*) Gulati (2009) indica que este es “el promedio de tiempo necesario para reparar un activo hasta su capacidad completa de operación después de ocurrida la falla” (p. 19)

$$MTTR [hrs] = \frac{\text{Horas efectivas de inoperatividad}}{\text{Número de paradas}}$$

Horas efectivas de inoperatividad: Representa el total de horas efectivas en las que el equipo se encuentra inoperativo y no puede realizar la función para la cual fue adquirido, ya sea por razones de mantenimiento o falla.

Número de paradas: Es la cantidad total de paradas del equipo por falla.

2.1.9.4. TIEMPO MEDIO PARA LA PRIMERA FALLA (MTFF)

En cuanto al término MTFF (*Mean Time To First Failure*) Acuña (2003) indica que este es “el tiempo medio transcurrido para la primera falla de un producto que es reparable” (p. 21). Este tiempo es muy importante puesto que es importante para la reputación de calidad que brinda el producto. El cliente busca que la primera falla ocurra después de un tiempo que no sea cercano al de la puesta en servicio del equipo o posterior al mantenimiento que se realice a este. En todos los casos lo que se busca es que la ocurrencia de fallas de un producto o equipo no sea muy recurrente ni sea catastrófica y además que la primera falla ocurra lo más lejano posible al momento en que se pone en servicio el activo.

2.1.9.5. DISPONIBILIDAD

Con referencia a la definición formal del término disponibilidad Gulati (2009) menciona que es “la probabilidad de que un activo sea capaz de realizar su función prevista satisfactoriamente cuando sea necesario bajo un determinado contexto operacional” (p. 18)

En muchos casos el indicador de disponibilidad es el más importante ya que es muy utilizado durante el análisis de gestión de mantenimiento para medir el rendimiento de nuestra flota de equipos, en simples palabras nos permite saber del 100% de tiempo, cuanto tiempo el equipo se encuentra disponible para trabajar. Generalmente este indicador se muestra de manera porcentual.

$$DISPONIBILIDAD [\%] = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

CAPÍTULO III

3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Existe muchos tipos de investigación científica y estos van directamente relacionados con la metodología y el fin que persigue determinada investigación. La investigación según Sabino (1992) puede definirse como un “esfuerzo que se emprende para resolver un problema: no un problema cualquiera, claro está, sino un problema de conocimiento” (p. 33). Visto desde el enfoque netamente científico, la investigación no es mas que un proceso metódico y sistemático que tiene como fin dar respuesta a preguntas o solución a problemas, a través de la generación de nuevos conocimientos.

Existen varios tipos de investigación dependiendo de la finalidad que esta tenga, de acuerdo con la información citada nuestra investigación será del tipo descriptiva cuyo objetivo es presentar la información recolectada tal cual es puesto que se estudiará las fallas ocurridas durante los últimos años en las dos Palas Eléctricas de cable 7495 *Hydracrowd* sin manipular ninguna situación y variable ya existentes con la finalidad de elaborar una propuesta de mejora de confiabilidad a través del diseño de técnicas RCM.

3.2. POBLACIÓN DEL ESTUDIO

En el presente trabajo de investigación la población de estudio está conformada por 02 Palas Eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd* de la marca Caterpillar ubicadas en la operación minera Las Bambas.

<i>Ítem</i>	<i>Equipo</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Serie</i>
<i>1</i>	<i>Pala Eléctrica</i>	<i>Caterpillar</i>	<i>7495 Hydracrowd</i>	<i>ER601508</i>
<i>2</i>	<i>Pala Eléctrica</i>	<i>Caterpillar</i>	<i>7495 Hydracrowd</i>	<i>ER601462</i>

Figura 25 - Palas Eléctricas objeto de estudio

Fuente: Elaboración propia

3.3. FUENTES DE INFORMACIÓN

- Registro de fallas del sistema *dispatch* Mina
- Reportes técnicos de falla del *dealer* Caterpillar
- Reporte de indicadores de mantenimiento SIRE PC
- Manuales de Operación y Mantenimiento

3.4. TÉCNICA Y ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

Las técnicas de investigación utilizadas en el presente estudio son la revisión documentaria de textos, manuales de mantenimiento e información del histórico de fallas de la empresa y páginas web.

3.5. INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

Los instrumentos de investigación utilizados en el presente estudio son la información de fallas recolectadas por el área de Confiabilidad Mina y Soporte Técnico al producto de Palas Eléctricas las cuáles serán utilizadas para la elaboración el desarrollo de esta tesis.

3.6. PRE - DESARROLLO DEL PLAN RCM

3.6.1. PASO 1 – SELECCIÓN DEL EQUIPO

La empresa minera en la que se desea implementar la propuesta de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) cuenta con una gran variedad de equipos de carguío, perforación y equipos auxiliare, los cuales se pueden ver a detalle en el Anexo 1. Para la flota de carguío se tiene un total de 3 palas hidráulicas, dos modelos 6015B y una del modelo 6060BH. El equipo más grande de carguío adquirido por la compañía minera fueron tres Palas Eléctrica 7495 del modelo *Hydracrowd* la cual debido a su importancia y criticidad serán modelo de estudio en el desarrollo de esta tesis. Para la flota de perforación se adquieren dos modelos de perforadoras pertenecientes a la empresa sueca EPIROC, tres perforadoras de bajo perfil del modelo SmartROC D65 y seis perforadoras de columna vertical del modelo Pit Viper 351. Se puede observar que los activos físicos adquiridos por la compañía son de gran variedad y cumplen cada uno diferentes funciones dentro del proceso de extracción de mineral. Se seleccionó aquellos equipos que forman parte del

contrato de mantenimiento y reparación de componentes (MARC) a cargo del distribuidor autorizado por Caterpillar en Perú, podemos dividir esta gran variedad de equipos en cuatro grandes grupos: equipos de carguío, equipos de perforación, equipos de acarreo y equipos de soporte auxiliar los cuales en conjunto nos permiten llevar a cabo el proceso de extracción y transporte de mineral. Dentro de los equipos de carguío tenemos las Palas Eléctricas las cuáles son consideradas equipos de primera línea debido a su gran importancia y criticidad dentro del proceso de extracción de mineral, las Palas Eléctricas son consideradas el equipo más crítico dentro del proceso por los siguientes motivos:

- **Medio Ambiente:** Una falla en uno de estos equipos podría generar un gran impacto por contaminación del medio ambiente, por ejemplo, debido a los altos volúmenes de fluido que utiliza para su funcionamiento, si uno de estos componentes fallara dejando escapar aceite. La contaminación del suelo sería catastrófica para el medio ambiente.
- **Seguridad:** Una falla en uno de estos equipos podría comprometer directamente la salud y hasta causar la muerte de uno o varios trabajadores si no se tiene las medidas de control adecuadas durante la operación e intervención de este equipo.
- **Tiempo de trabajo:** Estos equipos están diseñados para trabajar durante largas jornadas laborales de manera ininterrumpida durante el día y durante la noche puesto que su función es abastecer de mineral constantemente a los equipos de acarreo.
- **Entrega:** Una falla en estos equipos compromete más del 60% del proceso productivo de mineral debido a que la mayoría de la flota de carguío está soportada por este modelo de equipo.
- **Confiabilidad:** Si no se tiene un buen seguimiento a la mantenibilidad de estos equipos, una falla en ellos podría generar tiempos de detención en algunos casos no menores a las 5 horas hasta detenciones que superen las 24 horas, dependiendo de la magnitud del evento, disponibilidad de repuestos, accesibilidad al equipo, etc.
- **Mantenibilidad:** Estos equipos requieren de periodos de tiempo superiores a los 90 minutos para poder realizar labores de mantenimiento debido a su gran magnitud.

- **Costos:** Una falla en estos equipos compromete gran cantidad de costos horarios por parada debido al costo \$/Ton que representan.
- **Inversión:** El costo de adquisición de estos equipos es el mayor dentro de la gama de equipos de primera línea, rondando entre los 25 a 30 millones de dólares por equipo dependiendo de las configuraciones adicionales

Por estos motivos descritos es que las Palas Eléctricas de Cable 7495 *Hydracrowd* Caterpillar es el equipo más crítico dentro del proceso de extracción de mineral dentro del área de operaciones mina.

En el siguiente cuadro encontraremos el listado de equipos correspondiente a la flota de carguío de la Operación Minera Las Bambas que será la flota de carguío motivo de estudio para poder implementar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad en la operación minera ubicada en el departamento de Moquegua, este cuadro se construye en base a información actualizada a diciembre 2020.

Código	Equipo	Marca	Modelo
EX020	Pala Hidráulica	Komatsu	PC-2000
LD001	Cargador	LeTourneau	L-2350
SH001	Pala Eléctrica	Caterpillar	7495 Hydracrowd
SH002	Pala Eléctrica	Caterpillar	7495 Hydracrowd
SH003	Pala Eléctrica	P&H	41000 XPC DC
SH004	Pala Eléctrica	P&H	41000 XPC DC
SH005	Pala Eléctrica	P&H	41000 XPC AC
SH011	Pala Hidráulica	Caterpillar	6060FS
SH012	Pala Hidráulica	Caterpillar	6060FS
SH013	Pala Hidráulica	Caterpillar	6060FS

Figura 26 - Pool de equipos de carguío – Las Bambas

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.1. ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE EQUIPOS

El análisis de criticidad es una metodología comúnmente utilizada para poder determinar aquellos equipos, sistemas o sub-sistemas en los cuales es más necesario aplicar procesos orientados en mejorar la confiabilidad debido a su importancia dentro de la cadena de procesos. En nuestro caso se realizará el análisis a la flota de carguío de la operación minera Las Bambas y los criterios de evaluación utilizados fueron: Factor de recurrencia de eventos de falla, factor operacional, factor de flexibilidad operacional, factor de costos de mantenimiento correctivo, factor de seguridad y medio ambiente y consecuencia.

FRECUENCIA DE FALLAS – FF		
Muy malo	Mayor de 30 fallas / mes	4
Malo	De 20 a 29 fallas / mes	3
Regular	De 10 a 19 fallas / mes	2
Bueno	Menos de 10 de fallas / mes	1
IMPACTO OPERACIONAL – IO		
Parada inmediata de todo el ciclo productivo		10
Para parcial del ciclo productivo		8
No genera para del ciclo productivo		6
FLEXIBILIDAD OPERACIONAL – FO		
No existe equipo de respaldo para continuar producción		4
Existe un equipo auxiliar para ser utilizado como respaldo		2
Su salida del ciclo de producción no genera cambios		1
COSTO DE MANTENIMIENTO – CM		
Mayor a \$100,000 / mes		4
Menor a \$100,000 / mes		2
IMPACTO EN SEGURIDAD, HIGIENE Y MEDIO AMBIENTE - SHA		
Riesgo alto		8
Riesgo medio		6
Riesgo mínimo		3
Ningún riesgo		1

Figura 27 - Factores para análisis de criticidad

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la criticidad utilizaremos el método de matriz de criticidad que es bastante sencillo y práctico, este modelo está construido en base al análisis de sistemas en función al concepto de riesgo. (Parra y Crespo, 2012)

$$\text{CTR} = \text{FF} \times \text{C}$$

Donde:

- CTR : Criticidad total por riesgo
- FF : Frecuencia de fallas (fallos / año)
- C : Consencuencia de los eventos de falla.

El valor de la consencuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión

$$\text{C} = (\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}$$

Donde:

- IO: Factor de impacto en la producción
- FO: Factor de flexibilidad operacional
- CM: Factor de costos de mantenimiento
- SHA: Factor de impacto en seguridad, higiene y medio ambiente

Reemplazando todo en la fórmula inicial tendremos que:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times [(\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}]$$

Tabla 1 - Evaluación de criticidad – Flota de carguío

Modelo	FF	IO	FO	CM	SHA	CTR
PC-2000	4	6	1	2	6	28
L-2350	3	6	1	2	6	28
7495 Hydracrowd	2	10	4	4	8	104
41000 XPC AC	2	10	4	4	8	104
6060FS	2	10	2	2	6	56

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Fallas - [FF]	4				
	3		PC-2000 & L-2350		
	2			6060FS	7495 Hydracrowd & 4100 XPC
	1				
		0-13	14-26	27-39	40-52
		Criticidad Total por Riesgo - [(IO x FO) + CM + SHA]			

Figura 28 - Matriz de criticidad de equipos

Fuente: Elaboración propia

Del análisis realizado podemos determinar que las Palas Eléctricas de Cable tanto el modelo 7495 *Hydracrowd* de Caterpillar como la 4100XPC de Komatsu son los equipos con mayor criticidad dentro del proceso de carguío, para motivos de esta tesis y debido a que este mismo modelo de equipos era el utilizado en la operación minera ubicada en el departamento de Moquegua se realizará la estrategia de mantenimiento centrado den la confiabilidad (RCM) para la Pala Eléctrica de Cable 7495 *Hydracrowd*.

3.6.2. PASO 2 - FUNCIÓN DE LA PALA ELÉCTRICA 7495 HYDRACROWD

3.6.2.1. FUNCIÓN PRIMARIA

Tenemos funciones primarias que hacen referencia a la razón principal por la cual el activo fue adquirido por el cliente. Para nuestro caso la función primaria de la Pala Eléctrica 7495 *Hydracrowd* se podría definir como:

- Cargar material fragmentado desde el talud hacia la tolva de los camiones de acarreo a razón entre 100 a 110 toneladas por cada pase a una velocidad de cilindro de 120 pies/min.

3.6.2.2. FUNCIONES SECUNDARIAS

De igual manera, un activo físico también cuenta con funciones secundarias que, si bien es cierto, no son la principal razón por la cual fue adquirido el activo son funciones que deben de ser cumplidas por el activo con la finalidad de garantizar: Ecológica e integridad ambiental, seguridad, confort operacional, apariencia, protección, eficiencia, economía, etc. Descrito esto podemos nombrar algunas de las funciones secundarias de la Pala Eléctrica 7495 *Hydracrowd*.

- Convertir la energía eléctrica de alimentación de 7200 Volts a 1400 Volts para la alimentación de los motores eléctricos de levante, giro, empuje y propulsión y de 7200 Volts a 480 Volts para sistemas auxiliares de iluminación y otros motores eléctricos auxiliares.

- Transferir la presión hidráulica de 3700 psi generada por las bombas desde la unidad de potencia auxiliar hasta el cilindro hidráulico para realizar movimientos de extensión y retracción a no menos de 120 pies/min.

- Transferir movimiento rotacional desde los motores eléctricos de giro hacia la corona de giro por medio de dos cajas de engranajes planetarios de giro a razón de 1481 RPM en la entrada 21,86 RPM en los piñones de salida.

- Transferir movimiento rotacional desde el motor eléctrico de levante hacia la corona de levante por medio de una caja de engranajes planetarios a razón de 787RPM en la entrada y 60 RPM en los piñones de salida.

- Transferir movimiento rotacional desde los motores eléctricos de propulsión hacia la corona de giro por medio de dos cajas de engranajes planetarios de propulsión a razón de 987 RPM en la entrada 3,6 RPM en el eje de propulsión de salida.

- Comprimir aire a 120 psi por medio de dos compresores de tornillo ubicados en la sala de máquinas para la liberación de frenos neumáticos, accionamiento de bombas de lubricación y componentes neumáticos auxiliares.

- Bombear compuesto lubricante a 3500 psi desde las 6 bombas neumáticas ubicadas en la sala de lubricación a los diferentes puntos del equipo según los tiempos configurados en el PLC.

- Evitar el ingreso de ruido, polvo, agentes contaminantes externos al interior de la cabina de trabajo climatizada y certificada bajo norma internacional ISO (ROPS/FOPS) para de esta manera permitir al operador trabajar en un ambiente cómodo y seguro durante su jornada de 12 horas de trabajo.

- No contaminar el suelo ni el medio ambiente por medio del derrame de hidrocarburos como son los aceites sintéticos utilizados en los planetarios de levante, giro, propulsión y empuje o los compuestos lubricantes OGL y MPG utilizados en el equipo.

- Asegurar la visibilidad del operador durante todo el proceso de carguío mediante el uso de cámaras de seguridad ubicadas alrededor del equipo para de esta manera evitar los impactos operacionales con otros equipos pesados, equipos livianos y/o seres vivos.

- Asegurar la mantenibilidad del equipo a través del uso de componentes con diseño modular, los cuales permiten realizar actualizaciones, reemplazo y mantención de manera más eficiente en el menor tiempo posible.

3.6.2.3. CONTEXTO OPERACIONAL

El contexto operacional es aquel que nos brinda una visión general de cuál es el ambiente real en el que se encuentran trabajando los equipos que son motivo de estudio de esta propuesta, bajo esta premisa, en este punto vamos a proceder a explicar de manera detallada cual es el entorno de trabajo en el que se encuentran trabajando las 2 Palas

Eléctricas de Cable modelo 7495 *Hydracrowd* dentro de la operación minera a tajo abierto ubicada en el departamento de Apurímac provincia de Cotabambas.

3.6.2.4. UBICACIÓN

La operación minera Las Bambas está ubicada geográficamente entre los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba y Coyllurqui, provincia de Cotabambas, y el distrito de Progreso, provincia de Grau en la región Apurímac las zonas comprendidas por la operación minera son dos: Alto Fuerabamba denominado Zona III y Azuljaja denominado Zona IV, comprende una superficie total de 9' 633.77 ha. y se encuentra ubicada a unos 75 km de la ciudad imperial del Cusco. La operación minera se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas -14.0915, -722990 a una altitud entre los 3800 y 4600 m.s.n.m. a 289 km de la ciudad del Cusco.



Figura 29 - Ubicación geográfica Las Bambas

Fuente: Google Maps, (2021)

3.6.2.5. COMPARACIÓN DE CONTEXTO OPERACIONAL

Tabla 2 - Tabla comparativa - Contexto operacional

<i>Descripción</i>	<i>MMG</i>	<i>AAQ</i>
<i>Compañía</i>	<i>MMG-Las Bambas</i>	<i>AAQ-Moquegua</i>
<i>Tipo de mina</i>	<i>Tajo abierto</i>	<i>Tajo abierto</i>
<i>Altura</i>	<i>4700 m.s.n.m</i>	<i>4600 m.s.n.m</i>
<i>Temperatura</i>	<i>5°C</i>	<i>10°C</i>
<i>Humedad</i>	<i>37%</i>	<i>36%</i>
<i>Velocidad del viento</i>	<i>14 km/h</i>	<i>14 km/h</i>
<i>Material a extraer</i>	<i>Cobre y Molibdeno</i>	<i>Cobre y Molibdeno</i>
<i>Horas trabajadas por día</i>	<i>22 horas</i>	<i>24 horas</i>
<i>Días trabajados al mes</i>	<i>30 días</i>	<i>30 días</i>
<i>Producción cobre objetivo</i>	<i>360,000 Toneladas / año</i>	<i>300,000 Toneladas / año</i>

Fuente: Elaboración propia, 2021

3.6.2.6. FICHA TÉCNICA PALA ELÉCTRICA 7495 HYDRACROWD

FICHA TÉCNICA PALA ELÉCTRICA 7495 Hydracrowd		
CODIFICACIÓN	7495	
EQUIPO	Pala Eléctrica de Cable	
FABRICANTE	CATERPILLAR	
MODELO	Hydracrowd	
NÚMERO SERIE	ER6	
CARACTERÍSTICA	HD / HR / HF	
ÁREA	Operaciones Mina	
CARGA ÚTIL BALDE	110 Toneladas	
PESO	1'382,400 kg	
CARACTERÍSTICAS GENERALES		

SISTEMA MECÁNICO		SISTEMA ELÉCTRICO	
PROPULSIÓN	Dos cajas de engranajes planetarios	VOLTAJE NOMINAL	3 fases - 50/60 Hz - 7,200 V
GIRO	Dos cajas de engranajes planetarios verticales	POTENCIA MÁXIMA	3,778 kW
LEVANTE	Una caja de planetarios	TRANSFORMADOR AUXILIAR	350 kVA , 7,200 V Primario
CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS			
CABLES	DIMENSIONES		
LEVANTE (2) Ø 69.8 mm	BOOM Largo - 20.4 m	A-FRAME Altura - 14.0 m	ALTURA EQUIPO 20.87 m
SUSPENSIÓN (4) Ø 95.25 mm	DIPPER HANDLE Largo - 14.3 m Ø - 86.36 cm	CABINA OPERADOR Altura - 10.6 m	ANCHO EQUIPO 13.11 m
APERTURA (1) Ø 19.1 mm	REVOLVING FRAME Largo - 8.38 m Ancho - 3.68 m	ÁNGULO DE BOOM 43°	LONGITUD EQUIPO 34.54 m

Figura 30 - Ficha técnica Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. PASO 3 – DEFINIR FALLAS FUNCIONALES

Antes de iniciar con el paso 3 en adelante vamos a realizar una taxonomía de la Pala Eléctrica para poder realizar una clasificación por sistemas, sub-sistemas y partes para posterior a ello continuar con el análisis de confiabilidad de los sistemas críticos, sabiendo que la confiabilidad de los sistemas combinados representa la confiabilidad del equipo.

4.1.1. TAXONOMÍA

Realizar la taxonomía del equipo vamos a utilizar lo establecido en la norma ISO 14224 la cuál describe que la taxonomía es una clasificación de ítems en grupos generales basados en factores comunes entre sí los cuales se pueden jerarquizar en función a la siguiente pirámide descrita en el estándar internacional la cual muestra la clasificación taxonómica en función a niveles. Para nuestro caso de estudio realizaremos la división del equipo por sistemas, sub-sistemas y componentes.



Figura 31 - Clasificación de niveles taxonómicos

Fuente: Adaptador de “Norma ISO 14224:2006 - Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos” por Instituto Británico de Estándares (BSI), (2016)

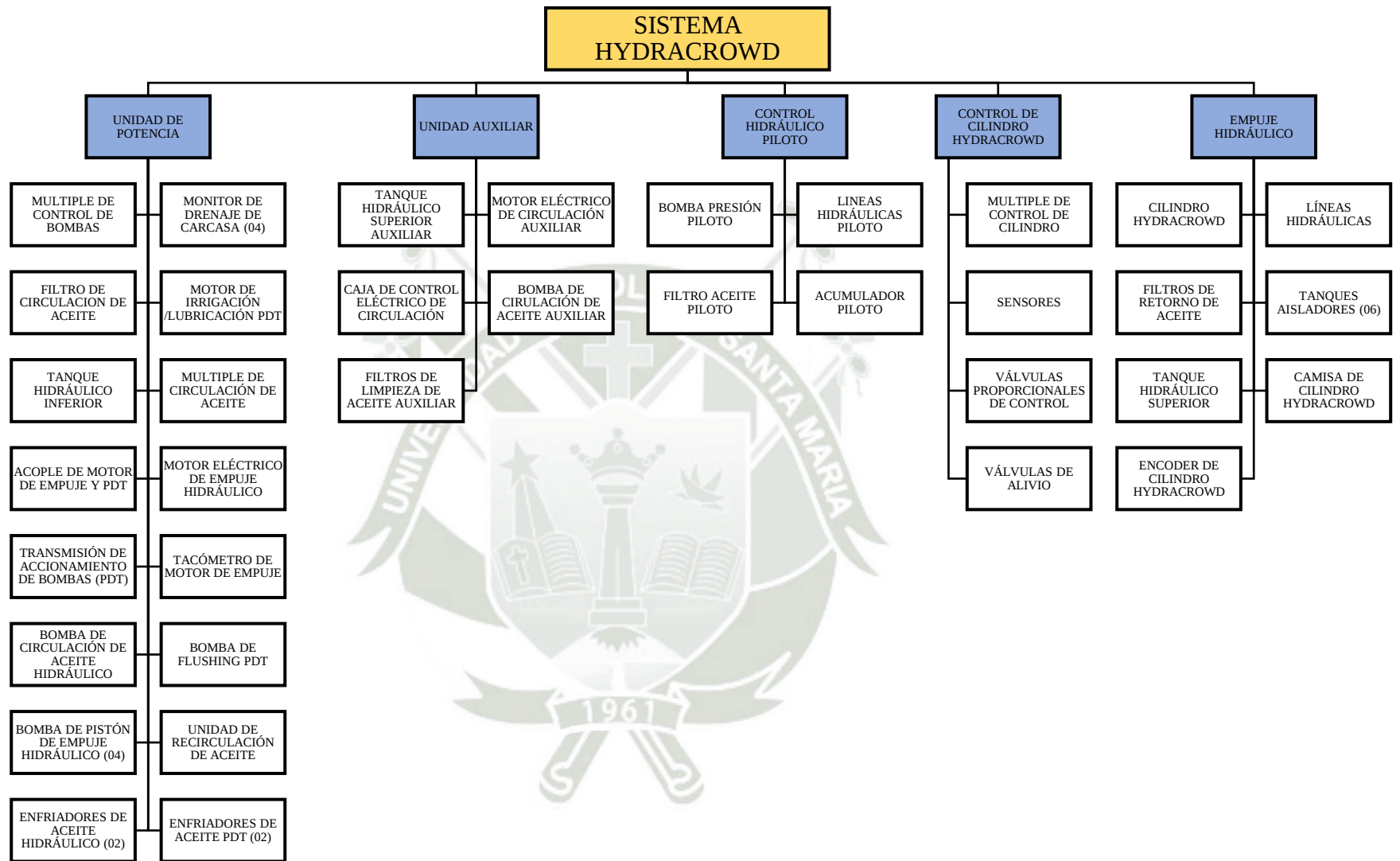


Figura 32 - Clasificación de sistema Hydracrowd

Fuente: Elaboración propia

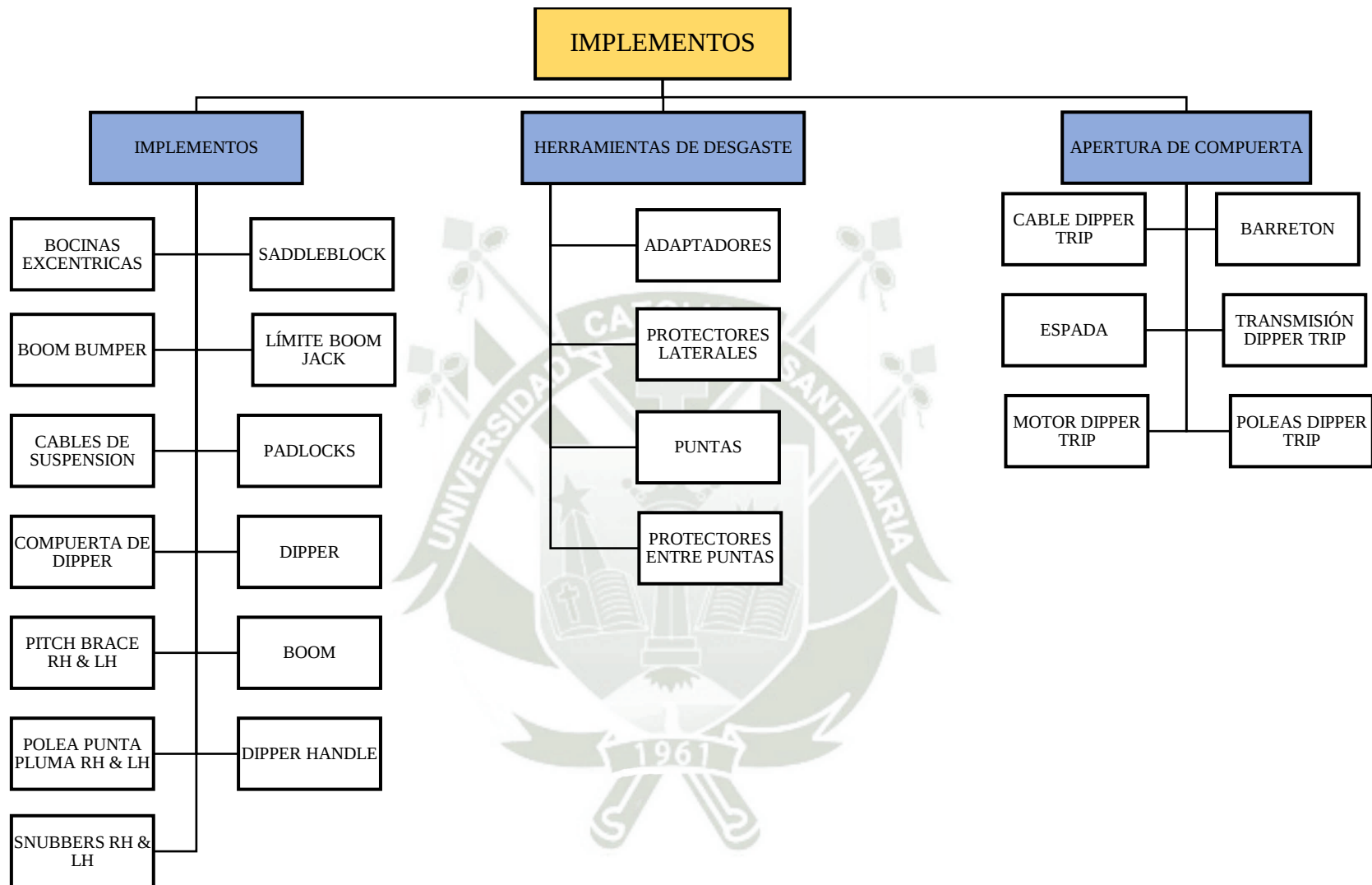


Figura 33 - Clasificación de sistema de implementos

Fuente: Elaboración propia

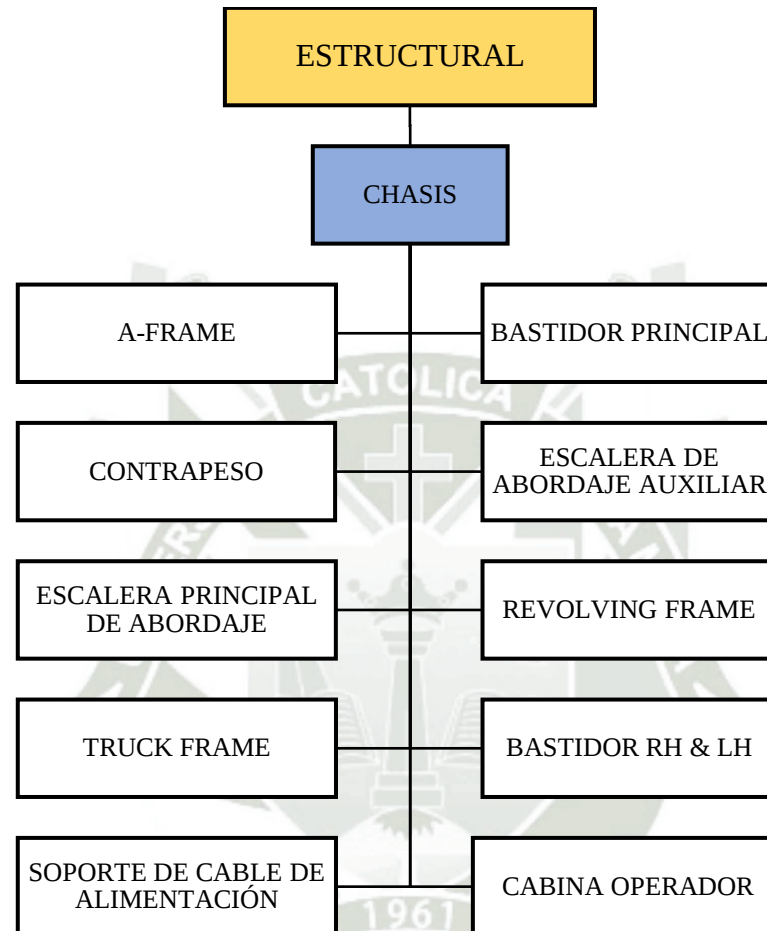


Figura 34 - Clasificación de sistema estructural

Fuente: Elaboración propia



Figura 35 - Clasificación de sistema de control

Fuente: Elaboración propia

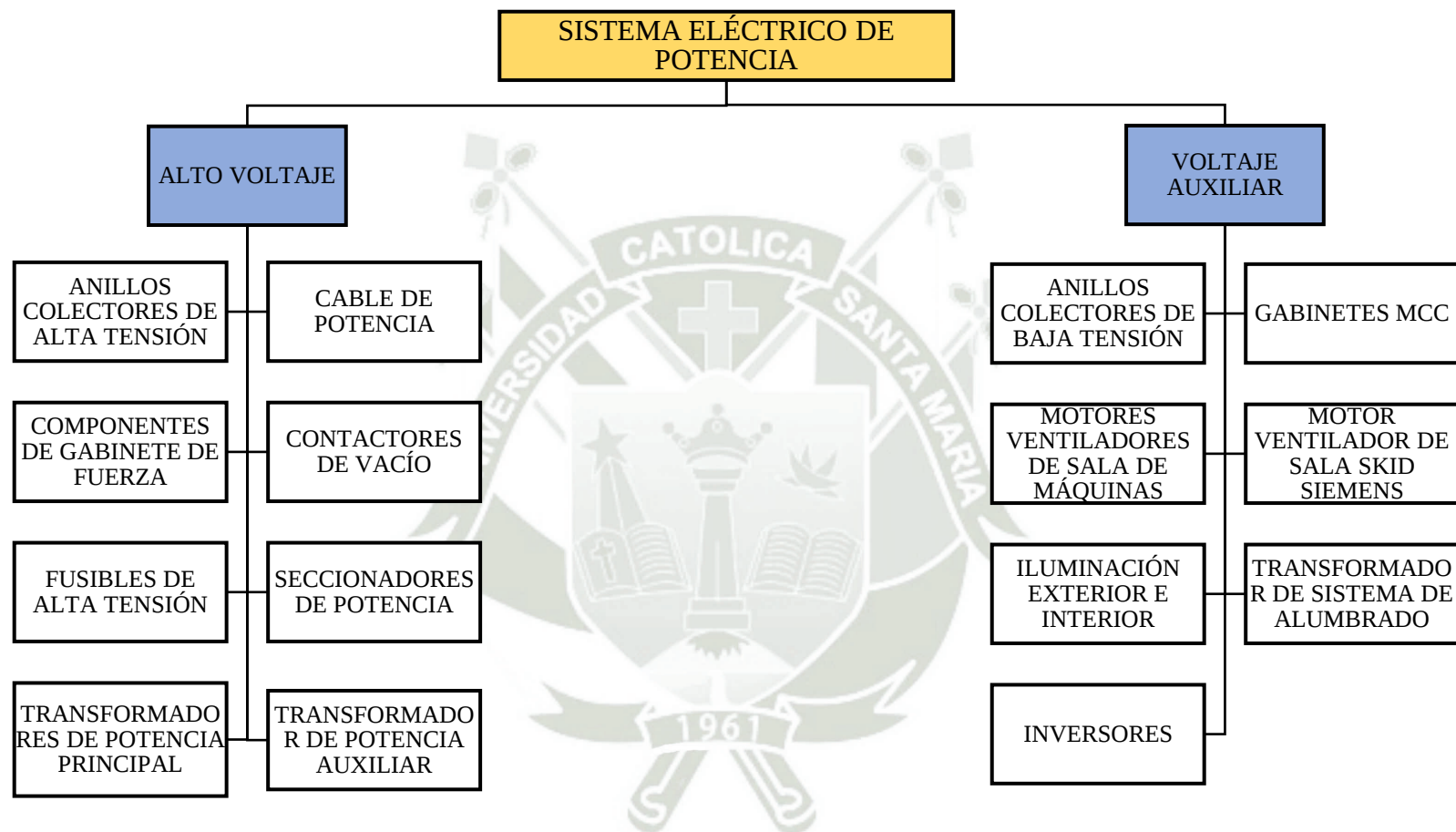


Figura 36 - Clasificación de sistema eléctrico de potencia

Fuente: Elaboración propia

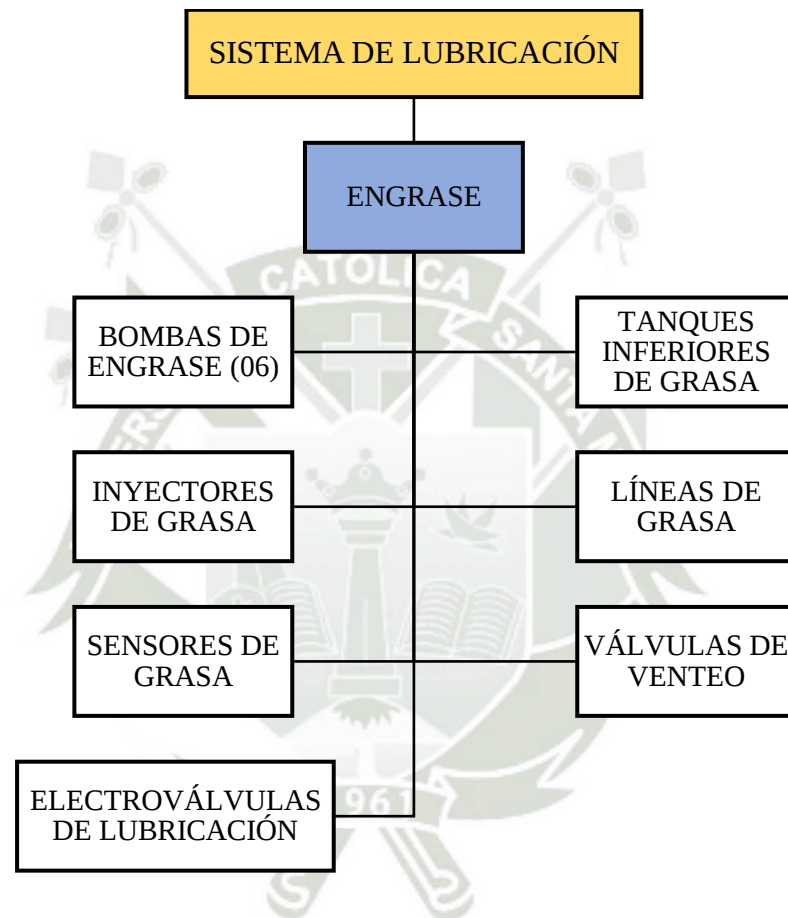


Figura 37 - Clasificación de sistema de lubricación

Fuente: Elaboración propia

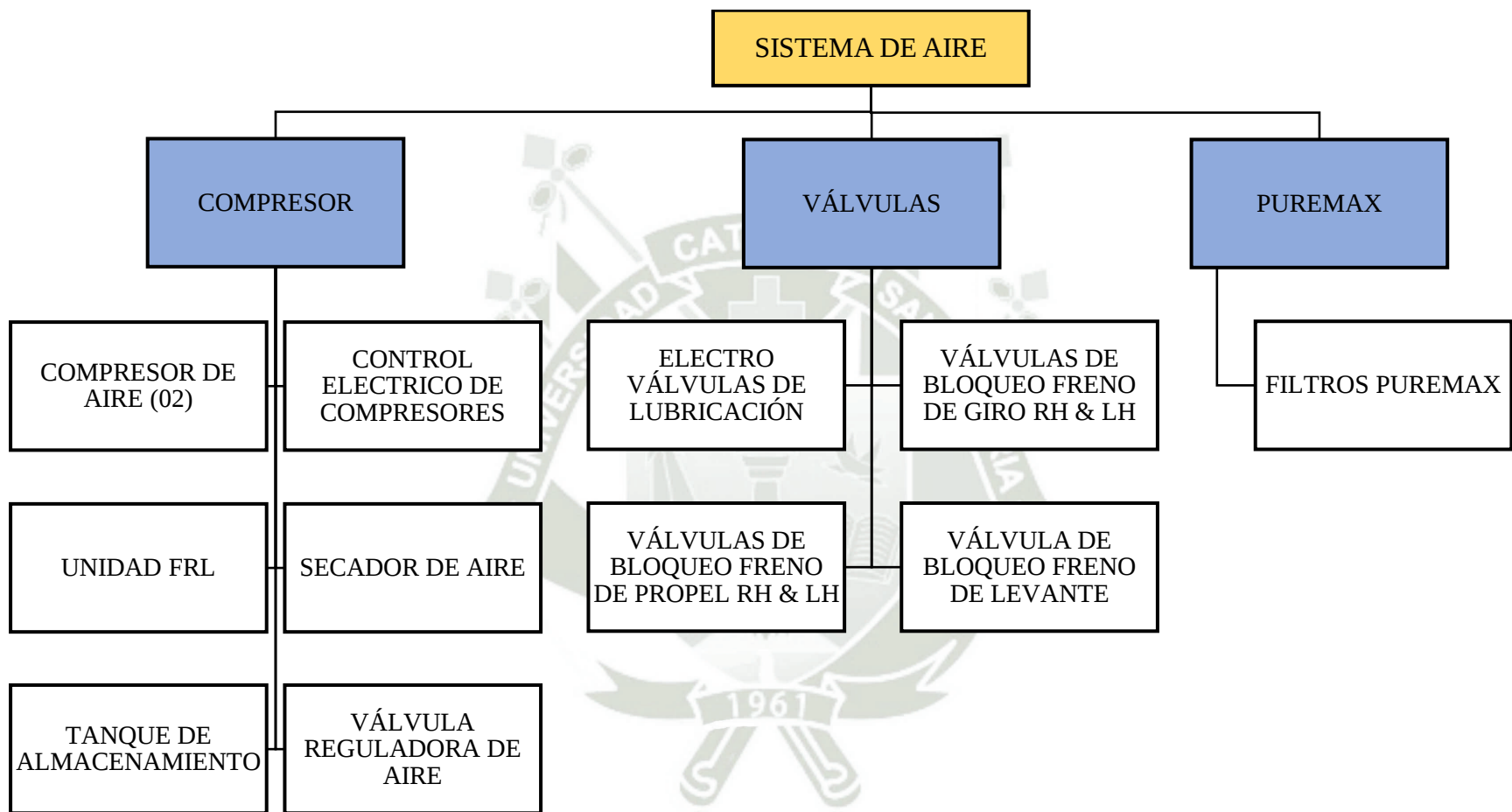


Figura 38 - Clasificación de sistema de aire

Fuente: Elaboración propia

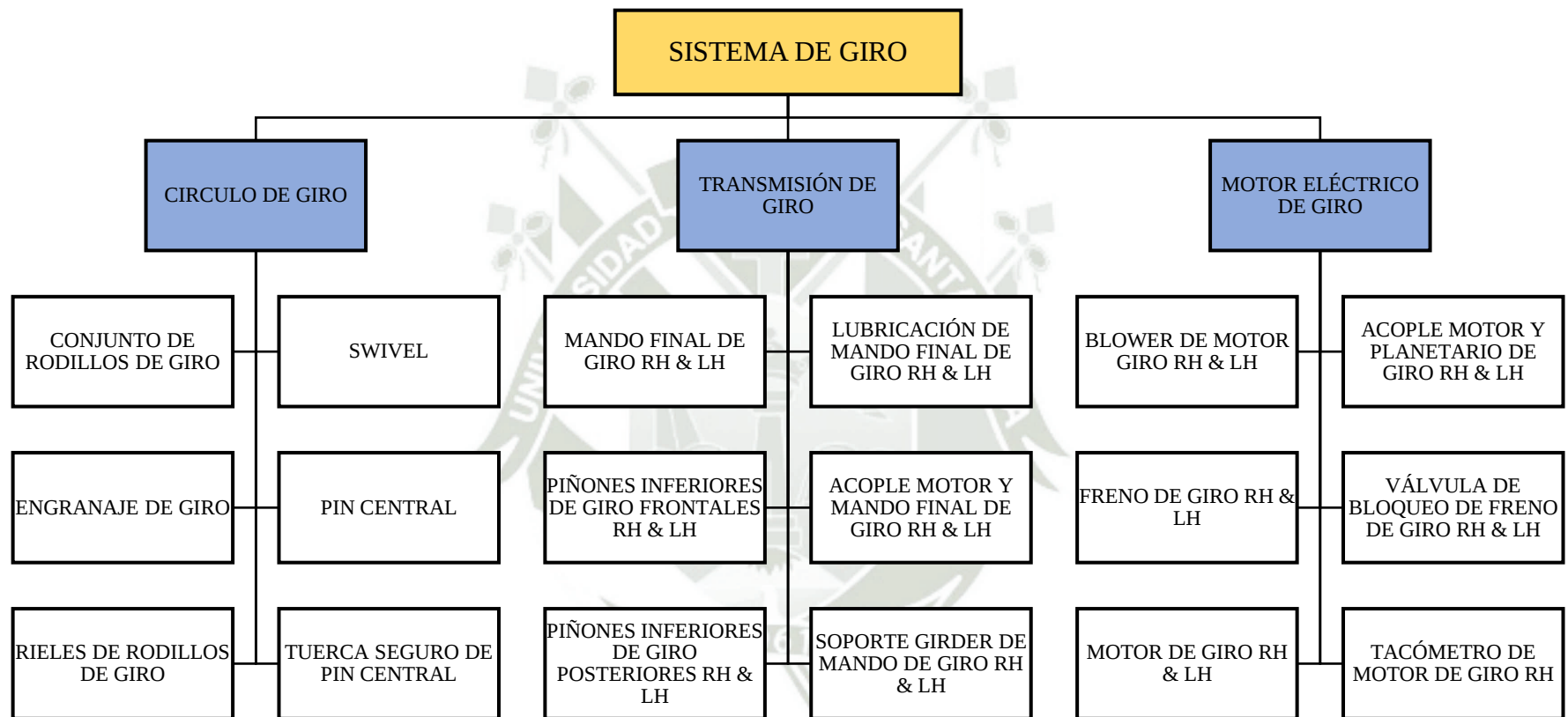


Figura 39 - Clasificación de sistema de giro

Fuente: Elaboración propia

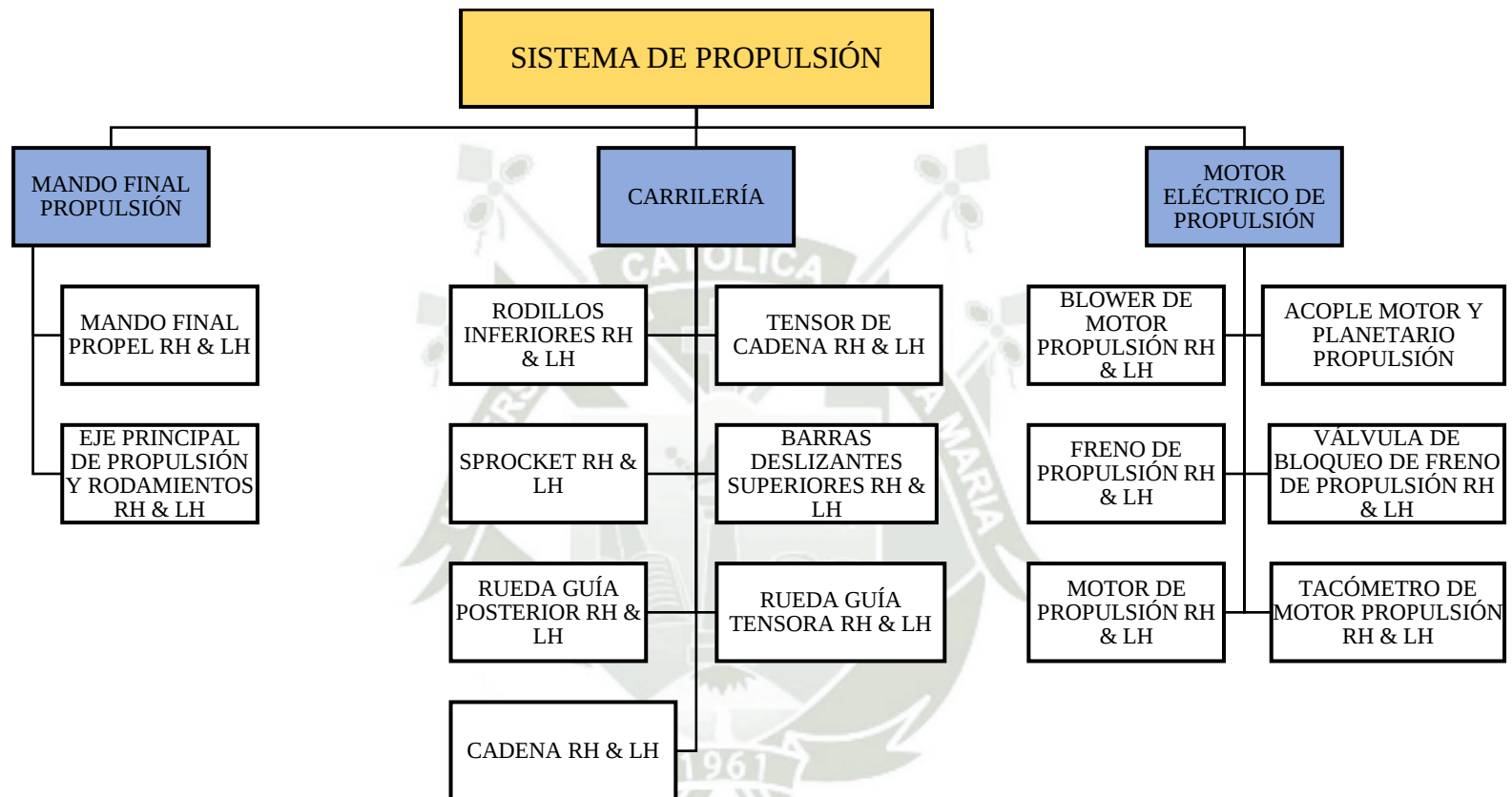


Figura 40 - Clasificación de sistema de propulsión

Fuente: Elaboración propia

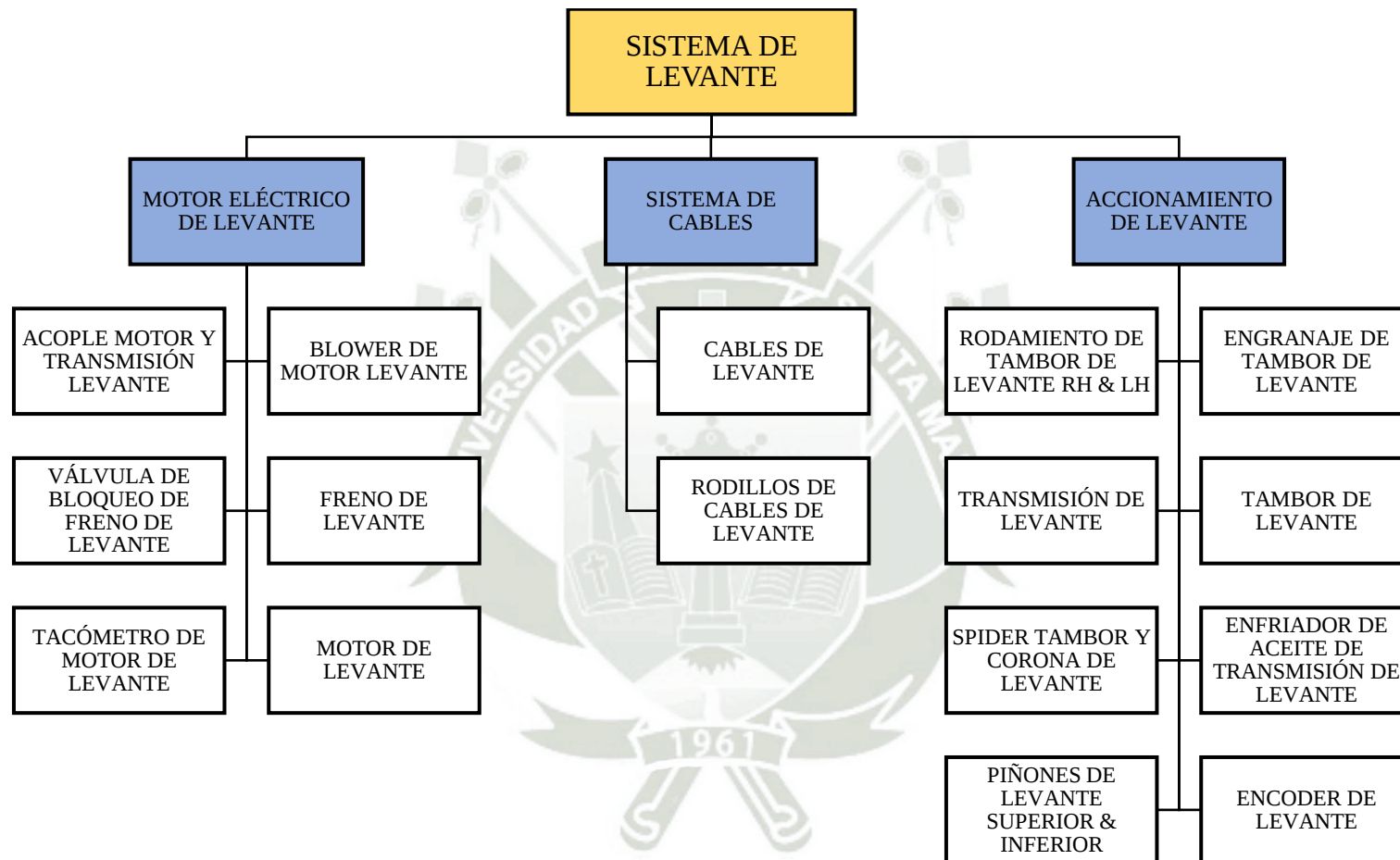


Figura 41 - Clasificación del sistema de levante

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la taxonomía del equipo por sistemas, sub-sistemas y partes principales, recolectaremos y analizaremos el historial de falla de las 02 Palas Eléctricas de cable modelo 7495 *Hydracrowd*, se cuenta con el registro detallado del historial de fallas desde el año 2017 en adelante por lo que analizaremos los periodos comprendidos entre el año 2017 y el año 2020. Para representar el impacto en cada uno de los principales sistemas del equipo de las fallas ocurridas haremos uso del Diagrama de Pareto también conocido como Distribución A-B-C la cual nos permitirá mostrar de manera gráfica los datos obtenidos durante la recolección, haremos uso de este tipo de diagrama puesto que nos permite mostrar a la izquierda de la gráfica los problemas “de mayor significancia” y a la derecha aquellos que “no son tan importantes”, esto con la finalidad de poder darle prioridad de análisis a aquellas fallas que realmente representen significancia en nuestro proceso de implementación de RCM.

4.1.2. DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2017

Luego de la recolección y clasificación correcta de las fallas según sistemas, sub-sistemas y componentes, se encuentra que en la flota de Palas Eléctricas de cable durante el periodo 2017 se registró un total de 347 paradas no programadas consideradas como falla acumuladas durante ese año, pero como mencionamos anteriormente, haremos uso del Diagrama de Pareto para identificar aquellos sistemas sobre los cuales las fallas tiene mayor incidencia de impacto para posteriormente elaborar estrategias de mantenimiento con el objetivo de disminuir al máximo posible estas fallas.

En la Tabla 3 se muestra la frecuencia de fallas ocurridas durante el periodo 2017, con un total registrado de 347 paradas no programadas por falla distribuidas en los 10 sistemas principales identificados en la Pala Eléctrica. Aplicando la regla 80/20 los sistemas de implementos, *Hydracrowd*, aire, levante y control representan el 80% del total de fallas no programadas ocurridas durante el 2017.

Tabla 3 - Clasificación de fallas por sistemas - Periodo 2017

SISTEMA	CANTIDAD DE PARADAS	%	CANTIDAD DE PARADA ACUMULADAS	80/20	% ACUMULADO
IMPLEMENTOS	94	27.09%	94	80%	27.09%
HYDRACROWD	69	19.88%	163	80%	46.97%
PROPULSIÓN	45	12.97%	208	80%	59.94%
ESTRUCTURALES	36	10.37%	244	80%	70.32%
LEVANTE	33	9.51%	277	80%	79.83%
AIRE	31	8.93%	308	80%	88.76%
CONTROL	18	5.19%	326	80%	93.95%
LUBRICACIÓN	10	2.88%	336	80%	96.83%
ELÉCTRICO	6	1.73%	342	80%	98.56%
GIRO	5	1.44%	347	80%	100.00%
TOTAL	347				

Fuente: Elaboración propia

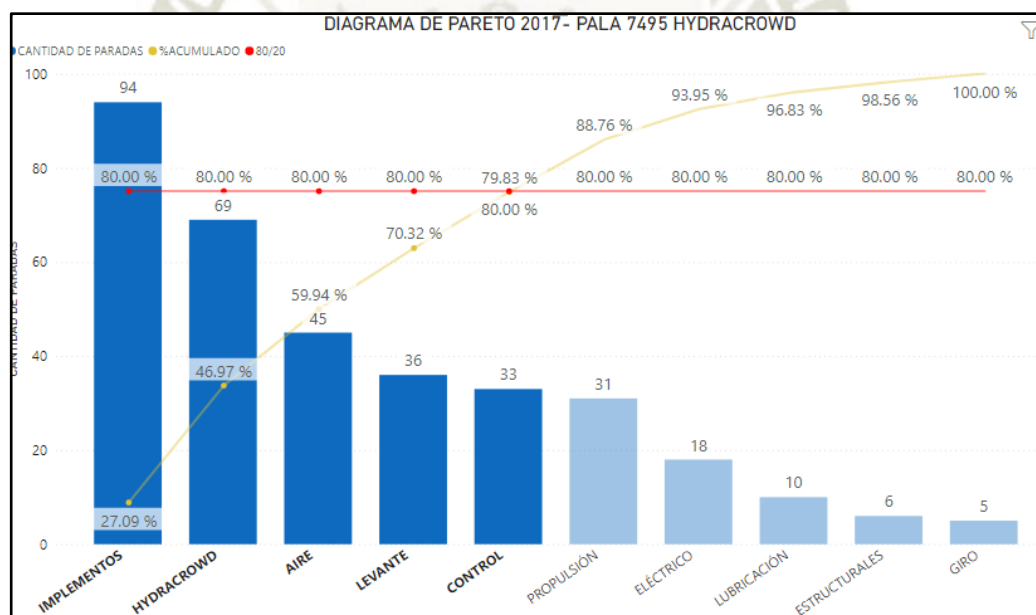


Figura 42 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd – Periodo 2017

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2018

Luego de la recolección y clasificación correcta de las fallas según sistemas, sub-sistemas y componentes, se encuentra que en la flota de Palas Eléctricas de cable durante el periodo 2018 se registró un total de 336 paradas no programadas consideradas como falla acumuladas durante ese año, pero como mencionamos anteriormente, haremos uso del Diagrama de Pareto para identificar aquellos sistemas sobre los cuales las fallas tiene mayor incidencia de impacto para posteriormente elaborar estrategias de mantenimiento con el objetivo de disminuir al máximo posible estas fallas.

En la Tabla 4 se muestra la frecuencia de fallas ocurridas durante el periodo 2018, con un total registrado de 336 paradas no programadas por falla distribuidas en los 10 sistemas principales identificados en la Pala Eléctrica. Aplicando la regla 80/20 los sistemas de implementos, Hydracrowd, propulsión, estructurales y levante representan el 80% del total de fallas no programadas ocurridas durante el 2018.

Tabla 4 - Clasificación de fallas por sistemas - Periodo 2018

SISTEMA	CANTIDAD DE PARADAS	%	CANTIDAD DE PARADA ACUMULADAS	80/20	% ACUMULADO
IMPLEMENTOS	82	24.40%	82	80%	24.40%
HYDRACROWD	79	23.51%	161	80%	47.92%
PROPULSIÓN	45	13.39%	206	80%	61.31%
ESTRUCTURALES	27	8.04%	233	80%	69.35%
LEVANTE	25	7.44%	258	80%	76.79%
AIRE	23	6.85%	281	80%	83.63%
CONTROL	22	6.55%	303	80%	90.18%
LUBRICACIÓN	17	5.06%	320	80%	95.24%
ELÉCTRICO	9	2.68%	329	80%	97.92%
GIRO	7	2.08%	336	80%	100.00%
TOTAL	336				

Fuente: Elaboración propia

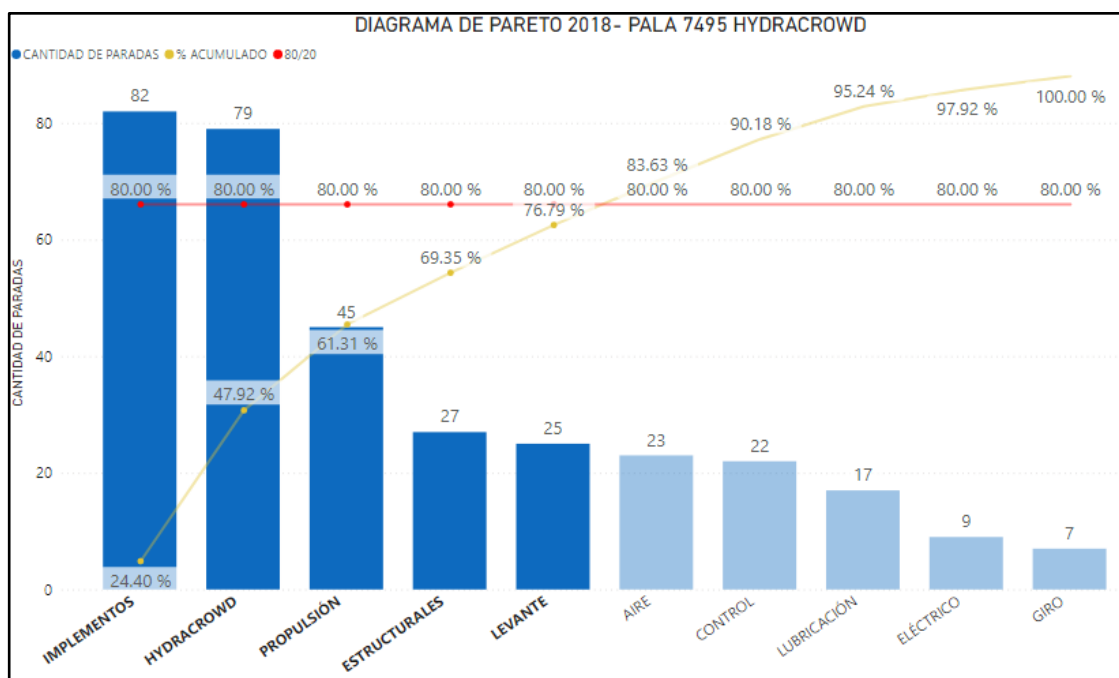


Figura 43 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd – Periodo 2018

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2019

Luego de la recolección y clasificación correcta de las fallas según sistemas, sub-sistemas y componentes, se encuentra que en la flota de Palas Eléctricas de cable durante el periodo 2019 se registró un total de 226 paradas no programadas consideradas como falla acumuladas durante ese año, pero como mencionamos anteriormente, haremos uso del Diagrama de Pareto para identificar aquellos sistemas sobre los cuales las fallas tiene mayor incidencia de impacto para posteriormente elaborar estrategias de mantenimiento con el objetivo de disminuir al máximo posible estas fallas.

En la Tabla 5 se muestra la frecuencia de fallas ocurridas durante el periodo 2019, con un total registrado de 226 paradas no programadas por falla distribuidas en los 10 sistemas principales identificados en la Pala Eléctrica. Aplicando la regla 80/20 los sistemas de implementos, Hydracrowd, propulsión, estructurales y levante representan el 80% del total de fallas no programadas ocurridas durante el 2019.

Tabla 5 - Clasificación de fallas por sistemas – Periodo 2019

SISTEMA	CANTIDAD DE PARADAS	%	CANTIDAD DE PARADA ACUMULADAS	80/20	% ACUMULADO
IMPLEMENTOS	67	29.65%	67	80%	29.65%
AIRE	34	15.04%	101	80%	44.69%
PROPULSIÓN	28	12.39%	129	80%	57.08%
HYDRACROWD	24	10.62%	153	80%	67.70%
LEVANTE	23	10.18%	176	80%	77.88%
CONTROL	19	8.41%	195	80%	86.28%
ELÉCTRICO	12	5.31%	207	80%	91.59%
LUBRICACIÓN	10	4.42%	217	80%	96.02%
ESTRUCTURALES	8	3.54%	225	80%	99.56%
GIRO	1	0.44%	226	80%	100.00%
TOTAL	226				

Fuente: Elaboración propia

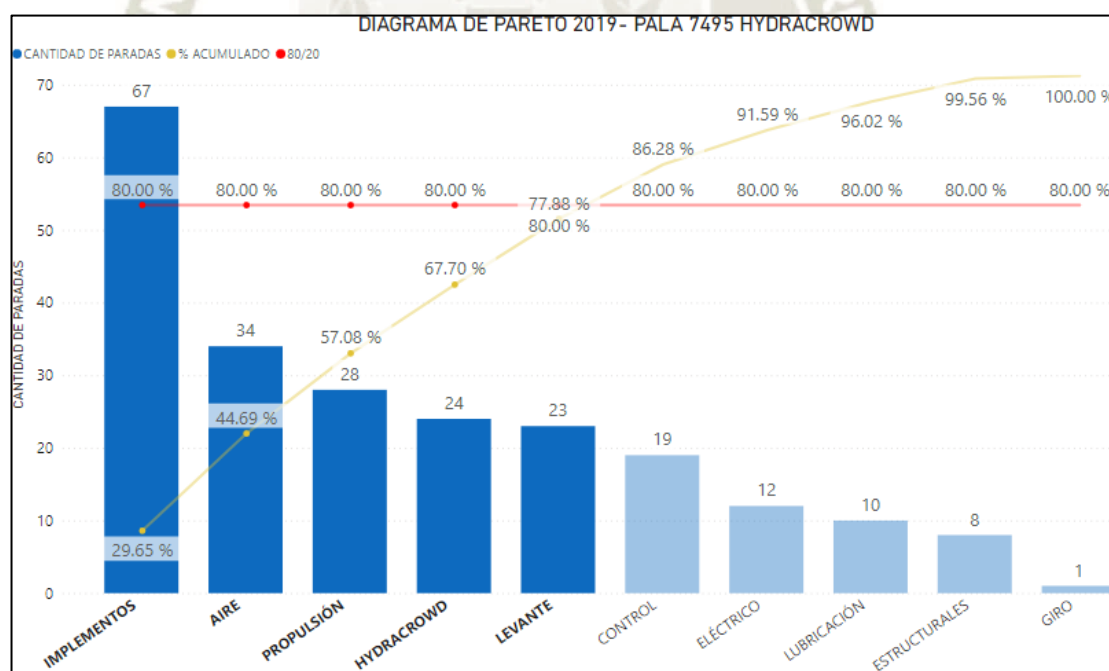


Figura 44 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd - Periodo 2019

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. DIAGRAMA PARETO PALA ELÉCTRICA 7495 - PERIODO 2020

Luego de la recolección y clasificación correcta de las fallas según sistemas, sub-sistemas y componentes, se encuentra que en la flota de Palas Eléctricas de cable durante el periodo 2020 se registró un total de 315 paradas no programadas consideradas como falla acumuladas durante ese año, pero como mencionamos anteriormente, haremos uso del Diagrama de Pareto para identificar aquellos sistemas sobre los cuales las fallas tiene mayor incidencia de impacto para posteriormente elaborar estrategias de mantenimiento con el objetivo de disminuir al máximo posible estas fallas.

En la Tabla 6 se muestra la frecuencia de fallas ocurridas durante el periodo 2020, con un total registrado de 315 paradas no programadas por falla distribuidas en los 10 sistemas principales identificados en la Pala Eléctrica. Aplicando la regla 80/20 los sistemas de implementos, Hydracrowd, aire, propulsión y levante representan el 80% del total de fallas no programadas ocurridas durante el 2020.

Tabla 6 - Clasificación de fallas por sistemas – Periodo 2020

SISTEMA	CANTIDAD DE PARADAS	%	CANTIDAD DE PARADA ACUMULADAS	80/20	% ACUMULADO
IMPLEMENTOS	81	25.63%	81	80%	25.63%
HYDRACROWD	76	24.05%	157	80%	49.68%
AIRE	44	13.92%	201	80%	63.61%
PROPULSIÓN	24	7.59%	225	80%	71.20%
LEVANTE	22	6.96%	247	80%	78.16%
LUBRICACIÓN	21	6.65%	268	80%	84.81%
ESTRUCTURALES	16	5.06%	284	80%	89.87%
CONTROL	15	4.75%	299	80%	94.62%
ELÉCTRICO	11	3.48%	310	80%	98.10%
GIRO	6	1.90%	316	80%	100.00%
TOTAL	316				

Fuente: Elaboración propia

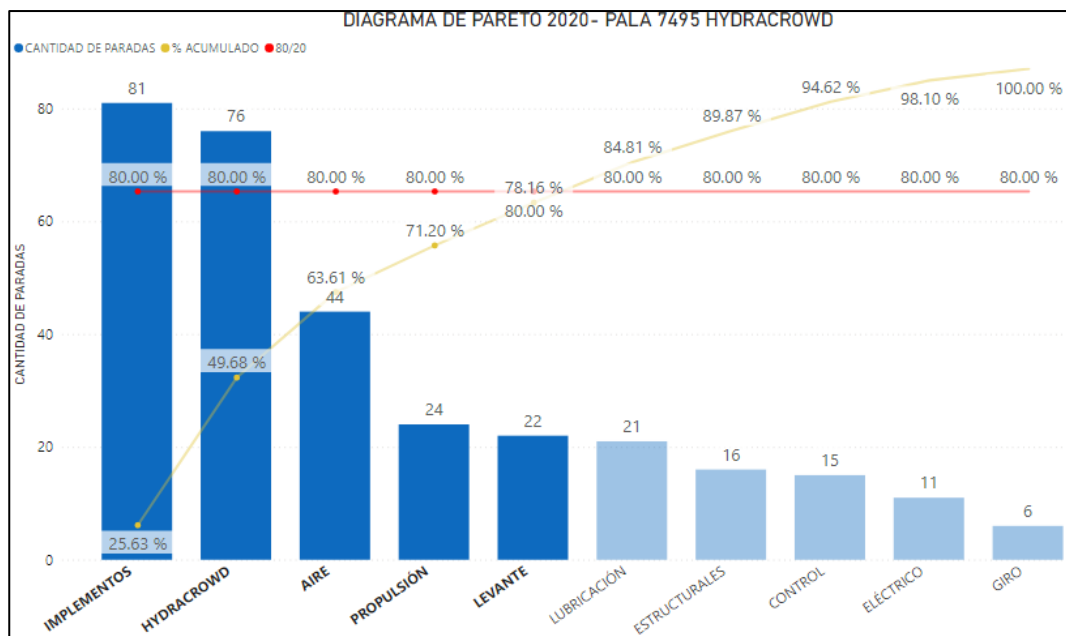


Figura 45 - Diagrama Pareto Palas 7495 Hydracrowd - Periodo 2020

Fuente: Elaboración propia

4.1.6. ANÁLISIS DE CRITICIDAD POR SISTEMAS

No todos los equipos representan el mismo nivel de relevancia dentro de una planta industrial, definitivamente algunos son más importantes que otros y debido a que los recursos dentro de una organización no son ilimitados se debe de distribuir de manera inteligente dichos recursos hacia los equipos con mayor importancia dentro de la planta. García, (2003). Es por eso que vamos a seleccionar aquellos sistemas críticos de la Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd.

Podemos distinguir tres niveles de importancia o criticidad para poder clasificar nuestros sistemas

- A) Equipo críticos. Cuya parada o mal funcionamiento afecta de manera significativa los resultados de la empresa.
- B) Equipos importantes. Cuya parada o mal funcionamiento afectan a la empresa pero la consencuencia es asumible.

- C) Equipos prescindibles. Cuya parada o mal funcionamiento tienen mínima relevancia en la empresa y sólo representarán incomodidad o un pequeño costo adicional

Para la valoración de criticidad utilizaremos:

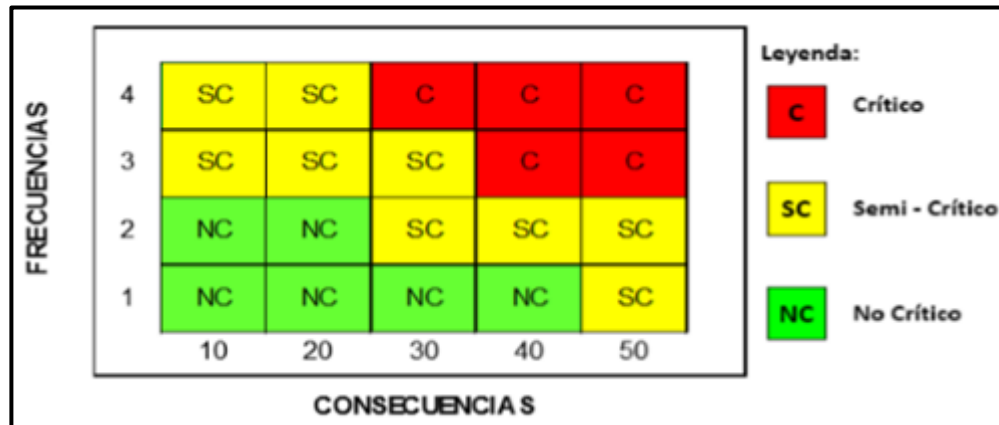


Figura 46 - Matriz de criticidad

Fuente: Adaptado de “Maestría de Ingeniería de Mantenimiento” UCSM, (2018)

Todos los sistemas de la Pala en su conjunto, son críticos, puesto que el correcto funcionamiento de cada uno de ellos depende la operatividad completa del equipo. Analizando la criticidad de la Pala Eléctrica, esta es crítica, pues a pesar que existen otros equipos como las Palas Hidráulicas y los Cargadores Frontales que pueden suplir la labor de carguío en caso de necesitarse, este es un equipo que funciona de manera continua y preferente por lo que su parada afecta considerablemente el ritmo y plan de producción.

Desde el punto de vista matemático, la criticidad puede ser vista de la siguiente manera:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Donde:

- Frecuencia: Parámetro asociado al número de eventos o fallas que presenta el sistema
- Consecuencia: Parámetro asociado al impacto que implica la perdida de la función en costos de reparación, seguridad y medio ambiente.

Para determinar la criticidad de nuestros sistemas haremos uso de un modelo de criticidad semi-cuantitativo que es bastante sencillo y práctico, este modelo está construido en base al análisis de sistemas en función al concepto de riesgo. Parra y Crespo (2012).

$$\text{CTR} = \text{FF} \times \text{C}$$

Donde:

- CTR : Criticidad total por Riesgo
- FF : Frecuencia de fallas (fallos / año)
- C : Consencuencia de los eventos de falla.

El valor de la consencuencia se obtiene a partir de la siguiente expresión

$$\text{C} = (\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}$$

Donde:

- IO: Factor de impacto en la producción
- FO: Factor de flexibilidad operacional
- CM: Factor de costos de mantenimiento
- SHA: Factor de impacto en seguridad, higiene y medio ambiente

Reemplazando todo en la fórmula inicial tendremos que:

$$\text{CTR} = \text{FF} \times [(\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CM} + \text{SHA}]$$

Los factores de ponderación de cada uno de los criterios que serán evaluados serán los siguientes:

Factor de Frecuencia de Fallas (FF) (Escala 1 a 4)	
4 - Frecuente	Mayor a 60 eventos al año
3 - Promedio	Entre 40 y 60 eventos al año
2 - Bueno	Entre 20 y 40 eventos al año
1 - Excelente	Menos de 20 eventos al año

Figura 47 - Cuadro de factor de frecuencia de fallas

Fuente: Elaboración propia

Impacto Operacional (IO) (Escala 1 al 10)	
10	$MTBF < 350$
7	$351 < MTBF < 550$
5	$551 < MTBF < 750$
3	$751 < MTBF < 1000$
1	$MTBF > 1000$

Figura 48 - Cuadro de factor de impacto operacional

Fuente: Elaboración propia

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (Escala 1 al 4)	
4	No se cuenta con repuestos en stock para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
2	Se cuenta con repuestos en stock que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
1	Se cuenta con repuestos en stock, tiempos de reparación y logística pequeños

Figura 49 - Cuadro de factor de flexibilidad operacional

Fuente: Elaboración propia

Impacto por costos de mantenimiento (CM) (Escala 1 al 2)	
2	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
1	Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

Figura 50 - Cuadro de factor por costos de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

Impacto por seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) (Escala 1 al 8)	
8	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental
6	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
3	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Figura 51 - Cuadro de factor seguridad, higiene y medio ambiente

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.1. SISTEMA HYDRACROWD

Factor de Frecuencia de Fallas (FF) (Escala 1 a 4)	
4	Mayor a 60 eventos al año
3	Entre 40 y 60 eventos al año
2	Entre 20 y 40 eventos al año
1	Menos de 20 eventos al año

Impacto Operacional (IO) (Escala 1 al 10)	
10	MTBF < 350
7	351 < MTBF < 550
5	551 < MTBF < 750
3	751 < MTBF < 1000
1	MTBF > 1000

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (Escala 1 al 4)	
4	No se cuenta con repuestos en stock para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
2	Se cuenta con repuestos en stock que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
1	Se cuenta con repuestos en stock, tiempos de reparación y logística pequeños

Impacto por costos de mantenimiento (CM) (Escala 1 al 2)	
2	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
1	Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

Impacto por seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) (Escala 1 al 8)	
8	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental
6	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
3	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Figura 52 - Cuadro de evaluación Sistema Hydracrowd

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Fallas - [FF]	4						Sistema Hydracrowd
	3						
	2						
	1						
		10	20	30	40	50	
Críticidad Total por Riesgo - [(IO x FO) + CM + SHA]							

Figura 53 - Matriz de criticidad sistema Hydracrowd

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.2. SISTEMA IMPLEMENTOS

Factor de Frecuencia de Fallas (FF) (Escala 1 a 4)	
4	Mayor a 60 eventos al año
3	Entre 40 y 60 eventos al año
2	Entre 20 y 40 eventos al año
1	Menos de 20 eventos al año

Impacto Operacional (IO) (Escala 1 al 10)	
10	$MTBF < 350$
7	$351 < MTBF < 550$
5	$551 < MTBF < 750$
3	$751 < MTBF < 1000$
1	$MTBF > 1000$

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (Escala 1 al 4)	
4	No se cuenta con repuestos en stock para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
2	Se cuenta con repuestos en stock que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
1	Se cuenta con repuestos en stock, tiempos de reparación y logística pequeños

Impacto por costos de mantenimiento (CM) (Escala 1 al 2)	
2	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
1	Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

Impacto por seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) (Escala 1 al 8)	
8	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental
6	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
3	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Figura 54 - Cuadro de evaluación de sistema implementos

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Fallas - [FF]	4	Sistema Implementos				
	3					
	2					
	1					
		10	20	30	40	50
Críticidad Total por Riesgo - $[(IO \times FO) + CM + SHA]$						

Figura 55 - Matriz de criticidad sistema Implementos

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.3. SISTEMA AIRE

Factor de Frecuencia de Fallas (FF) (Escala 1 a 4)	
4	Mayor a 60 eventos al año
3	Entre 40 y 60 eventos al año
2	Entre 20 y 40 eventos al año
1	Menos de 20 eventos al año

Impacto Operacional (IO) (Escala 1 al 10)	
10	MTBF < 350
7	351 < MTBF < 550
5	551 < MTBF < 750
3	751 < MTBF < 1000
1	MTBF > 1000

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (Escala 1 al 4)	
4	No se cuenta con repuestos en stock para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
2	Se cuenta con repuestos en stock que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
1	Se cuenta con repuestos en stock, tiempos de reparación y logística pequeños

Impacto por costos de mantenimiento (CM) (Escala 1 al 2)	
2	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
1	Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

Impacto por seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) (Escala 1 al 8)	
8	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental
6	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
3	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Figura 56 - Cuadro de evaluación de sistema de aire

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Fallas - [FF]	4					
	3					
	2			Sistema Aire		
	1					
		10	20	30	40	50
Críticidad Total por Riesgo - [(IO x FO) + CM + SHA]						

Figura 57 - Matriz de criticidad sistema de aire

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.4. SISTEMA PROPULSIÓN

Factor de Frecuencia de Fallas (FF) (Escala 1 a 4)	
4	Mayor a 60 eventos al año
3	Entre 40 y 60 eventos al año
2	Entre 20 y 40 eventos al año
1	Menos de 20 eventos al año

Impacto Operacional (IO) (Escala 1 al 10)	
10	MTBF < 350
7	351 < MTBF < 550
5	551 < MTBF < 750
3	751 < MTBF < 1000
1	MTBF > 1000

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (Escala 1 al 4)	
4	No se cuenta con repuestos en stock para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
2	Se cuenta con repuestos en stock que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
1	Se cuenta con repuestos en stock, tiempos de reparación y logística pequeños

Impacto por costos de mantenimiento (CM) (Escala 1 al 2)	
2	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
1	Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

Impacto por seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) (Escala 1 al 8)	
8	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental
6	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
3	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Figura 58 - Matriz de criticidad sistema de aire

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Fallas - [FF]	4					
	3					
	2		Sistema Propulsión			
	1					
		10	20	30	40	50
Criticidad Total por Riesgo - [(IO x FO) + CM + SHA]						

Figura 59 - Matriz de criticidad sistema Propulsión

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.5. SISTEMA LEVANTE

Factor de Frecuencia de Fallas (FF) (Escala 1 a 4)	
4	Mayor a 60 eventos al año
3	Entre 40 y 60 eventos al año
2	Entre 20 y 40 eventos al año
1	Menos de 20 eventos al año

Impacto Operacional (IO) (Escala 1 al 10)	
10	MTBF < 350
7	351 < MTBF < 550
5	551 < MTBF < 750
3	751 < MTBF < 1000
1	MTBF > 1000

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (Escala 1 al 4)	
4	No se cuenta con repuestos en stock para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes
2	Se cuenta con repuestos en stock que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios
1	Se cuenta con repuestos en stock, tiempos de reparación y logística pequeños

Impacto por costos de mantenimiento (CM) (Escala 1 al 2)	
2	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares
1	Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares

Impacto por seguridad, higiene y medio ambiente (SHA) (Escala 1 al 8)	
8	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental
6	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
3	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
1	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales

Figura 60 - Cuadro de evaluación sistema levante

Fuente: Elaboración propia

Frecuencia de Fallas - [FF]	4					
	3					
	2	Sistema Levante				
	1					
		10	20	30	40	50
Críticidad Total por Riesgo - $[(IO \times FO) + CM + SHA]$						

Figura 61 - Matriz de criticidad sistema Levante

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.6. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE CRITICIDAD

A continuación, mostraremos el cuadro 17 en la que se resume los resultados de la evaluación de criticidad en los 5 principales sistemas de la Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd™, en la que podemos obtener 3 sistemas entre mediana y alta criticidad los cuáles serán evaluados en los siguientes pasos de la implementación del RCM

Figura 62 - Cuadro de resultados - Evaluación de criticidad

ITEM	EQUIPO	UBICACIÓN	SISTEMA	CRITICIDAD
1	Pala 7495	Operaciones	Hydracrowd	Alta Criticidad
2	Pala 7495	Operaciones	Implementos	Mediana Criticidad
3	Pala 7495	Operaciones	Aire	Mediana Criticidad
4	Pala 7495	Operaciones	Propulsión	No Crítico
5	Pala 7495	Operaciones	Levante	No Crítico

Fuente: Elaboración propia

4.2. PASO 4 – IDENTIFICAR PRINCIPALES MODOS DE FALLA

El análisis de fallas tiene como principal objetivo poder identificar todas aquellas causas que provocan averías, sobre todo aquellas averías que generan fallas repetitivas o aquellas fallas que tiene una consecuencia alta en el costo de producción o de reparación. De esta manera, identificando los modos de falla y sus posibles efectos, se puede generar una lista de acciones preventivas con el fin de evitar que estas ocurran, es importante destacar esta doble función del análisis de modo de falla: Determinar el origen de la avería y proponer medidas que eviten que estas ocurran. Para la elaboración de este trabajo de investigación nos basaremos en una norma internacional para la construcción del AMFE (Análisis Modo de Falla y Efectos) de nuestra Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd™ y esta es la norma SAE JA1012 “*A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*”. Ver detalle de tablas en Anexo 3.

4.3. PASO 5 – IDENTIFICAR EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE FALLA

4.3.1. PRINCIPALES FALLAS RELEVANTES - PERIODO 2017 - 2019

En este apartado procederemos a describir cada uno de los modos de falla más recurrentes y con mayor relevancia debido al alto impacto en la disponibilidad y confiabilidad de las Palas Eléctricas 7495 *Hydracrowd* SH001 y SH002 durante el periodo 20017 al 2020, para de esta manera poder presentar los diferentes planes de acción para eliminar estos problemas en las Palas Eléctricas que se ensamblarán en la operación minera ubicada en el departamento de Moquegua.

4.3.1.1. FUGA DE ACEITE EN CILINDRO POR TAPON DE PURGA ROD END

A. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El 02 de septiembre del 2017 durante la inspección pre-uso del equipo el operador de la Pala SH001 realiza su reporta una fuga de aceite nivel II que proviene del interior del Cilindro *Hydracrowd*, el personal de mantenimiento se acerca a realizar la evaluación respectiva e identifica fractura total en la placa de montaje (*Mounting Plate*) que se encarga de unir la parte posterior del Cilindro *Hydracrowd* con el múltiple de control del cilindro. La fractura y posterior desprendimiento de la placa de montaje (*Mounting Plate*) se generó a partir de la soldadura de pernos de sujeción de la por vibración. La parte fracturada de la placa de montaje (*Mounting Plate*) impactó con el tapón de purgado del lado vástago generado su soldadura y posterior fuga de aceite.

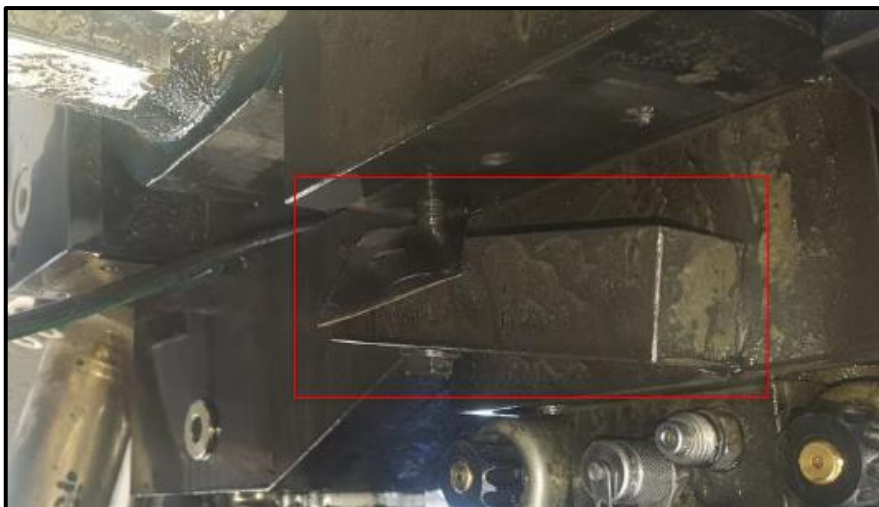


Figura 63 - Fractura en Mounting Plate – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia



Figura 64 -Fuga de aceite hidráulico en cilindro Hydracrowd – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia

Este evento repercutió en un total de 32 horas NO PROGRAMADAS de inoperatividad del equipo por evaluación del origen de la fuga de aceite y posteriores 48 horas de parada por reparación.

Fractura de pernos de Mounting Plate: Esta fractura se origina a partir de la soldadura por vibración de los pernos de unión de la placa de montaje (*Mounting Plate*) y el múltiple de control de cilindro. Sumado a ello, la carga axial a la que está sometida esta placa de montaje por el mismo trabajo del cilindro genera daños por fractura en la placa de montaje.

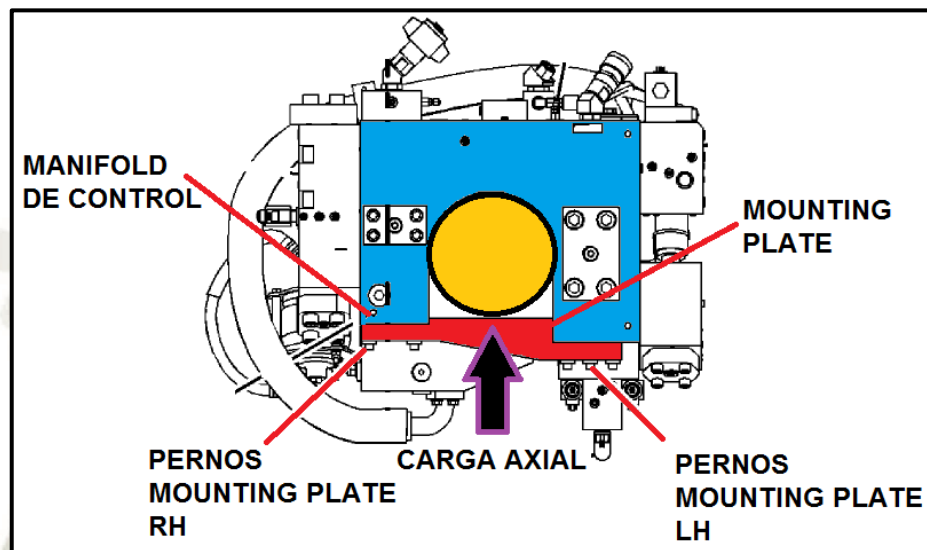


Figura 65 - Carga axial sobre Mounting Plate

Fuente: Elaboración propia

Soltura de tapón de purgado lado vástago: La soldadura del tapón de purgado ubicado en el lado vástago se debe al impacto con la parte desprendida de la placa de montaje (*Mounting Plate*) generando fuga de aceite por esta zona, cabe mencionar que esta reparación puede parecer a simple vista una tarea sencilla, pero la única manera de poder realizar una reparación en esta zona es a través del desmontaje completo del cilindro *Hydracrowd*. Este trabajo demanda una gran cantidad de horas de parada de equipo y ahí radica la importancia de tomar acciones correctivas para evitar que este problema ocurra.

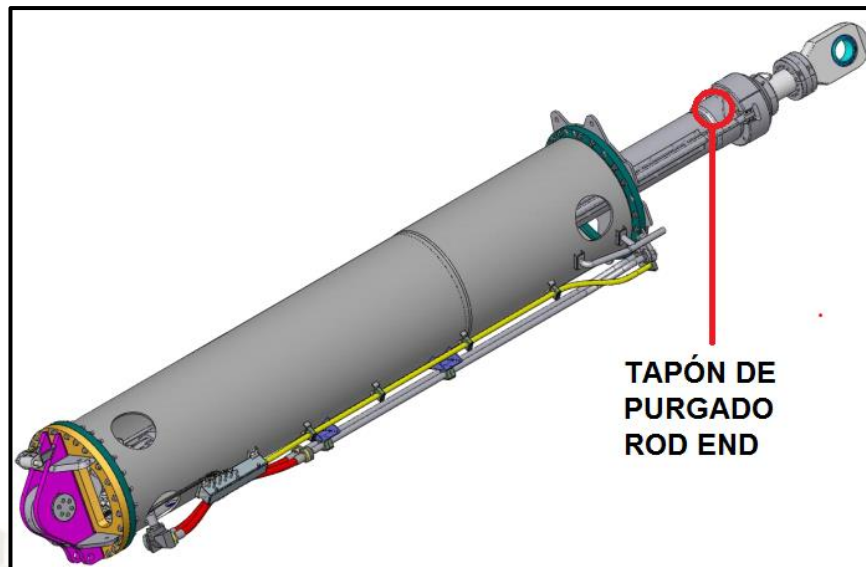


Figura 66 - Tap de purgado lado vástago con fuga por impacto – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia



Figura 67 - Tap de purgado lado vástago con fuga – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia

B. ACCIONES CORRECTIVA

Como parte de los planes de acción correctivas para eliminar este modo de falla se identificó que el diseño original de los pernos de sujeción de la placa de montaje (*Mounting Plate*) debido a su diseño y distribución son muy propensos a la soltura debido a la vibración y a las cargas axiales que estos soportan, con el diseño original se tiene que estar realizando ajustes periódicos cada 250 horas y cambio de pernos

cada 1500 horas para evitar problemas similares, esta estrategia inicial genera un incremento en el tiempo de parada por mantenimiento y a su vez un incremento en el costo de mantenimiento del equipo. A partir de esto es que, elevando estos casos repetitivos a fábrica, se procedió a aplicar un rediseño de la placa de montaje (*Mounting Plate*), este rediseño consiste en una modificación en la estructura original acompañada con un incremento en el diámetro de los 7 orificios laterales del diseño original para utilizar pernos de cabeza hexagonal M16 que reemplazaban los pernos *socket* inicialmente instalados. Además, se procedió a adicionar 3 orificios centrales para instalar pernos de cabeza hexagonal M20. Esta modificación en el diseño original eliminó por completo los eventos por soldadura de pernos, desde la aplicación de esta mejora no se volvió a tener eventos de fractura en la placa de montaje por soldadura de pernos de anclaje, como parte complementaria a esta acción correctiva se estableció localmente una estrategia de mantenimiento preventivo a través de inspección visual de las marcas de ajuste de pernos cada 500 horas y un re-torque de pernos cada 1500.

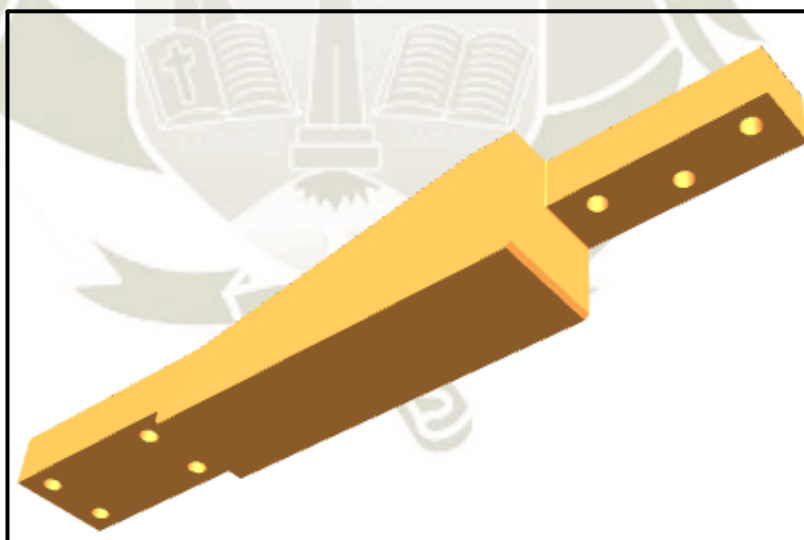


Figura 68 - Diseño de placa de montaje original (*Mounting Plate*)

Fuente: Adaptado de “*Teamcenter Siemens – Desing Reuse*” por CATERPILLAR, (2021)

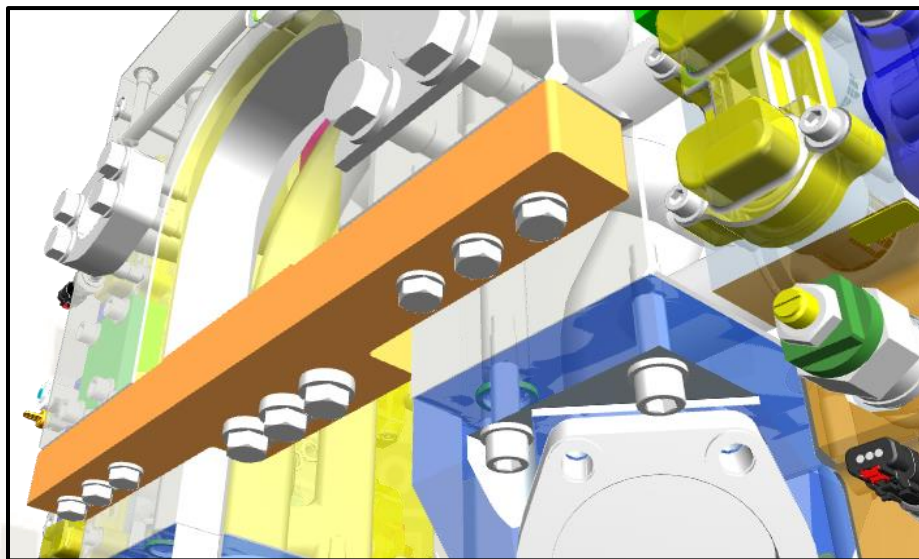


Figura 69 - Diseño de placa de montaje mejorada (Mounting Plate)

Fuente: Adaptado de “Teamcenter Siemens – Desing Reuse” por CATERPILLAR, (2021)

4.3.1.2. FALLA ENCODER DE POSICIÓN DE CILINDRO DE EMPUJE

A. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Un claro ejemplo de este problema es que sólo durante el año 2018 se registraron un total de 47 horas de parada NO PROGRAMADAS en ambas Palas debido a problemas en el *encoder* de posición del Cilindro *Hydracrowd*, la relevancia de estos eventos no radica en la cantidad de horas de parada sino en la cantidad de eventos los cuales alcanzaron un total de 32 eventos acumulados durante el año asociados al mismo problema, esta cantidad de eventos repetitivos impacta directamente en la confiabilidad del equipo y definitivamente son un problema que debe de ser solucionado si lo que buscamos es incrementar los indicadores de confiabilidad de las Palas Eléctricas. El 90% de problemas en este componente se concentran en el cable acerado que se une con el mango del cilindro (*Dipper Handle*) para de esta manera poder registrar la distancia de desplazamiento del cilindro durante sus movimientos de extensión y retracción. Este cable acerado es sometido constantemente a tracción durante su trabajo y esto genera la rotura por fatiga del cable acerado a tempranas horas de vida del componente.

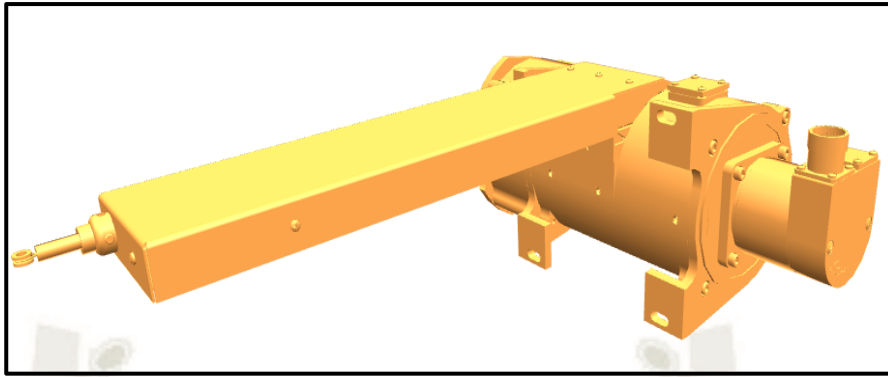


Figura 70 - Vista isométrica de encoder de empuje de cilindro Hydracrowd

Fuente: Adaptado de “Teamcenter Siemens – Desing Reuse” por CATERPILLAR, (2021)

B. ACCIÓN CORRECTIVA

Como acción correctiva para eliminar este modo de falla se identificó que el diseño original del *encoder* de empuje contempla el uso de un cable acerado que se enrolla y desenrolla sobre un pequeño tambor a medida que el cilindro de empuje se extiende o se retrae, este movimiento constante genera fatiga en el cable acerado y posterior rotura. Es por eso que a partir de los constantes eventos que se tiene con este componente es que Caterpillar replantea el diseño de este componente y en agosto del 2020 propone el remplazo del *encoder* de empuje tradicional por una nueva tecnología de sensor láser de posición para obtener la información requerida por el PLC sobre la posición del cilindro de empuje durante los movimientos de extensión y retracción. Con este nuevo sensor láser se elimina por completo el uso de cable acerado el cuál es el causante del gran número de paradas no programadas en este sistema.

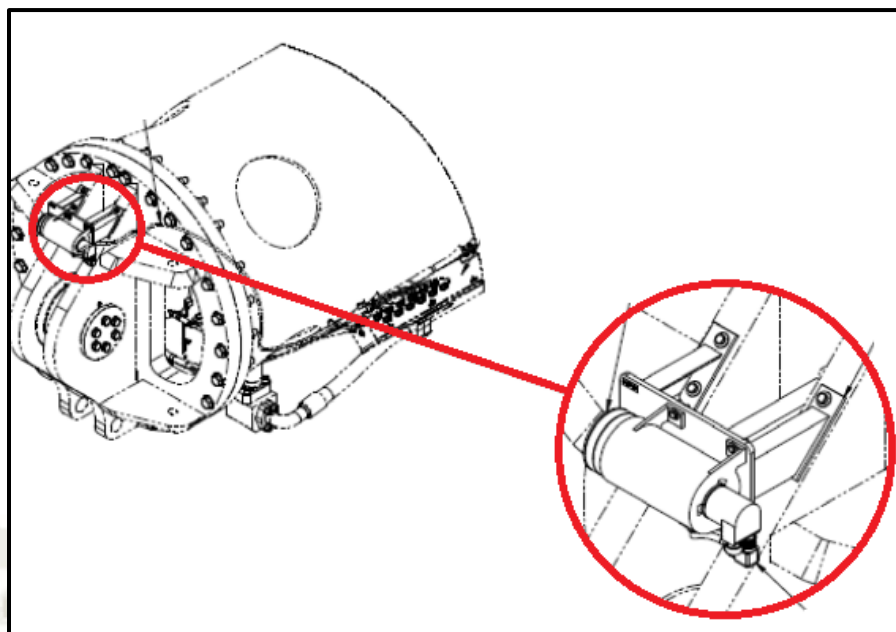


Figura 71 - Encoder de empuje diseño original

Fuente: Adaptado de Caterpillar, (2021)

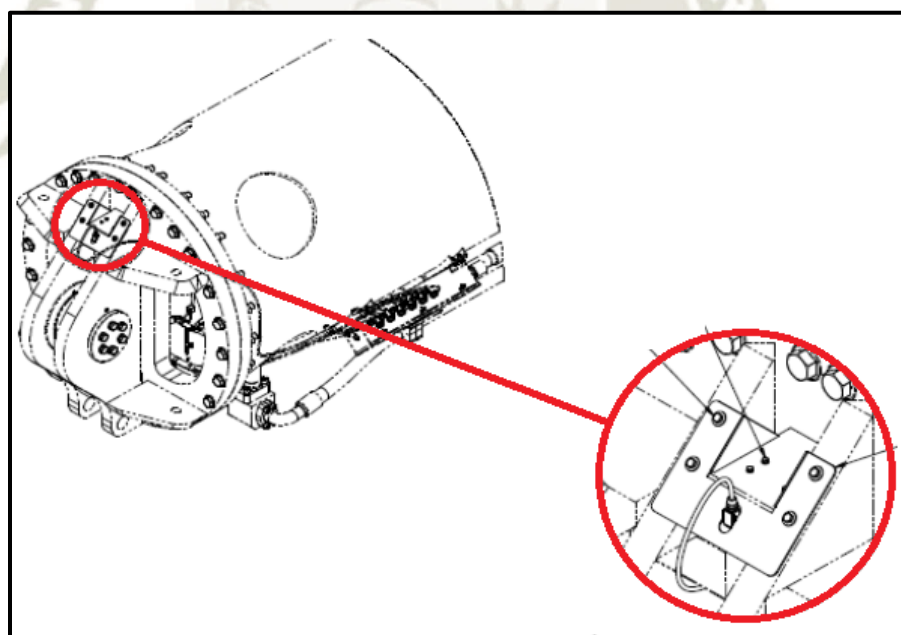


Figura 72 - Encoder de empuje láser diseño mejorado

Fuente: Adaptado de Caterpillar, (2021)

4.3.1.3. PROBLEMAS EN COMPONENTES DE APERTURA DE COMPUERTA

A. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Por medio del análisis Pareto realizado durante los periodos 2017, 2018, 2019 y 2020 pudimos identificar que el principal sistema que el Top 1 de paradas no programadas corresponden al sistema de implementos. En dicho sistema tenemos contabilizado un total de 324 paradas durante el periodo de análisis y gran cantidad de estas fallas están relacionadas con el pestillo de apertura de compuerta, más conocido como barretón (*Latch Bar*) con un total de 104 detenciones. Este pestillo como su nombre lo indica es el encargado de trabar y destrabar la compuerta del balde para descargar material sobre los camiones de acarreo y mantener la compuerta cerrada durante el periodo de carguío, su constante trabajo y desgaste produce paradas no programadas que impactan considerablemente la confiabilidad del equipo, tal es el caso que del total de fallas registradas en el sistema de implementos, el 32% de paradas están directamente asociadas al barretón, por lo que si buscamos incrementar la confiabilidad del equipo debemos de generar una estrategia que mitigue este modo de falla. Los principales modos de falla asociados están relacionados con atascamiento del barretón, rotura del inserto de barretón, rotura de espada de apertura de compuerta (*latch lever*), desgaste excesivo de elementos de apertura de compuerta, desprendimiento de guíadores inferiores y superiores de barretón, soltura de elementos de apertura de compuerta. Dada esta gran cantidad de eventos es que el fabricante decide diseñar un nuevo sistema de apertura de compuerta alternativo llamado *Latch Free*TM el cuál elimina por completo el sistema convencional de apertura de compuerta con barretón y lo reemplaza por un nuevo sistema el cual será descrito con mayor detalle como parte de la acción correctiva para eliminar estos eventos repetitivos.

Durante la inspección realizada al inserto de barretón el día 21/12/2018 se identifica fractura frágil en la parte superior del inserto del barretón el cual había sido instalado el 30/11/2018 y contaba con 400 horas de uso al momento de la inspección, esta fractura imposibilitó el volteo del inserto para sus siguientes horas de uso por lo que tuvo que ser reemplazado por un inserto nuevo, generando un sobre costo al mantenimiento y una parada más prolongada debido a que se tuvo que trasladar el nuevo repuesto desde el almacén hacia el punto de trabajo de la Pala, 33 horas después de la instalación del nuevo inserto el 22/12/2018 se presenta un nuevo evento de atascamiento del barretón por fractura del inserto. Ambos modos de falla fueron analizados y se atribuyeron a un defecto en la dureza del material de fabricación del inserto brindado por el fabricante. Ante estas constantes fallas y dado que no se tenía identificada la causa raíz se decidió instalar un barretón sin inserto como elemento de desgaste, este barretón dejó de utilizarse anteriormente debido a su elevado costo de reparación y tiempo excesivo para su mantenimiento.

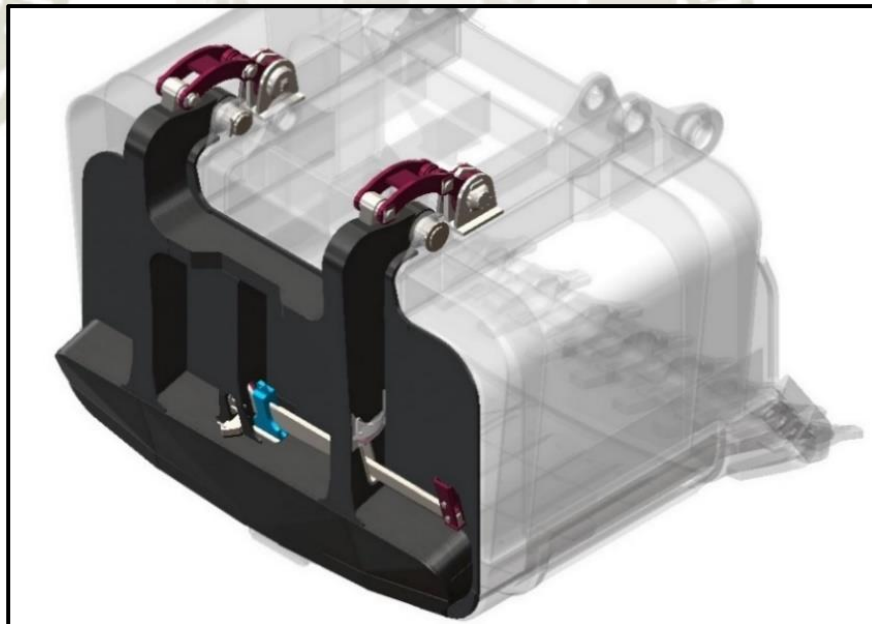


Figura 73 - Vista isométrica de sistema de apertura de compuerta

Fuente: Bucyrus, (2008)

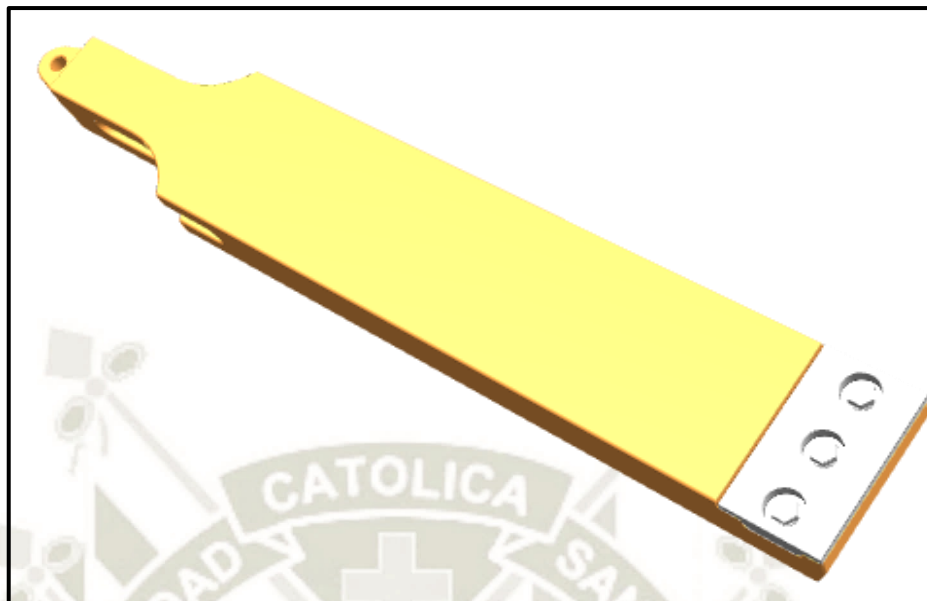


Figura 74 - Vista isométrica de barretón (Latch bar)

Fuente: Adaptado de Caterpillar, (2021) -



Figura 75 - Segunda fractura de inserto de barretón – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia



Figura 76 - Reemplazo de barretón sin inserto – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia

Otro evento ocurrido durante el desarrollo de esta tesis tuvo lugar en la operación en la cual se busca implementar la estrategia centrada en confiabilidad. Dicha falla ocurrió en la primera Pala Eléctrica ensamblada durante el 2020 y puesta en operación el 1 de abril del 2021. A las 208 horas transcurridas desde la puesta en servicio del equipo y antes de la primera parada por mantenimiento a las 250 horas, se realizó la inspección respectiva del inserto de barretón para validar el estado de desgaste, para sorpresa del personal de mantenimiento se pudo verificar que toda la superficie frontal del implemento presentaba resquebrajamiento debido al tipo de material utilizado para su fabricación, el tipo de material exacto que se utiliza en estos componentes es información confidencial de la empresa por lo que su descripción está restringida en el presente documento. Adicionalmente, el desgaste de material presente a las 208 horas superó completamente lo que se esperaba encontrar a dichas horas comparando parámetros de desgaste que se tiene como referencia de otro proyecto minero donde se utiliza un inserto fabricado localmente. Debido al desgaste prematuro de inserto hubo un impacto directo de desgaste sobre el barretón, esto generó una parada de alrededor de 16 horas para la solución del problema, impactando directamente en indicadores de disponibilidad física.



Figura 77 - Resquebrajamiento de inserto de barretón – Pala SH001

Fuente: Elaboración propia



Figura 78 - Desgaste prematuro de inserto de barretón

Fuente: Elaboración propia

B. ACCIÓN CORRECTIVA

Para eliminar este modo de falla, la fábrica proporciona información detallada para poder realizar el reemplazo completo del sistema de apertura de compuerta

tradicional con barretón por un nuevo sistema denominado *Latch Free*™, este es un sistema de apertura de compuerta patentado de bajo costo de mantenimiento, mejor confiabilidad y mayor productividad. A groso modo este sistema reemplaza el convencional barretón con un *link* de acero de 8 pulgadas de espesor posicionado en la parte posterior del balde (*Dipper*). La menor cantidad de partes en movimiento que contiene este sistema hace que se pueda generar estrategias de mantenimiento y cambio de componentes más predecibles. Una vez que se instala y regula este sistema de apertura de compuerta no se requiere ninguna regulación intermedia entre mantenimientos programados.

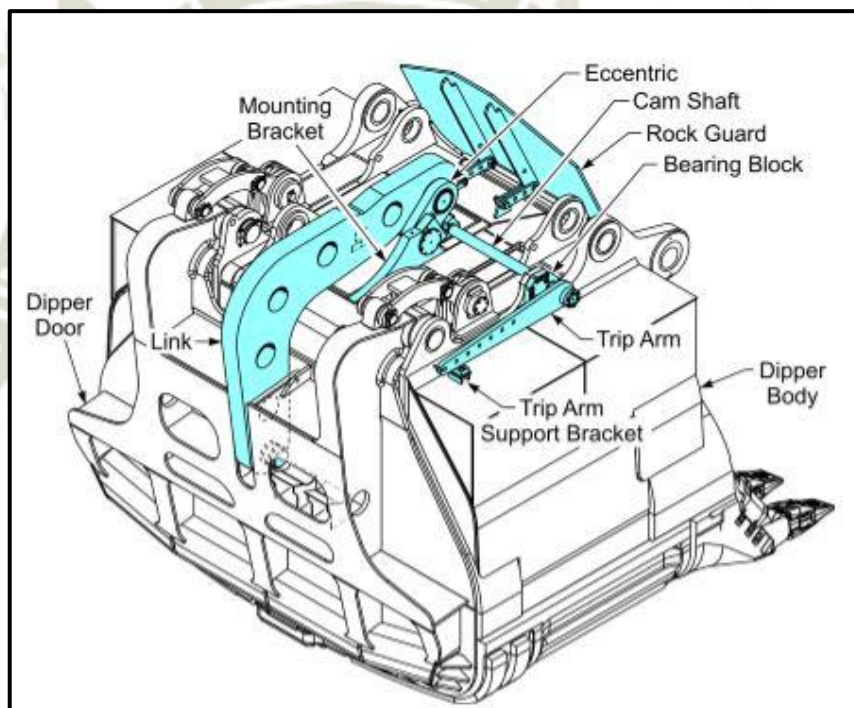


Figura 79 - Sistema de apertura de compuerta *Latch Free*

Fuente: Adaptado de Caterpillar, (2020)

Los ajustes y configuraciones iniciales para la aplicación de este sistema son realizados en fábrica y re-confirmados durante el periodo de ensamble del equipo. El correcto funcionamiento de este sistema se puede verificar a través de dos maneras:

Con el *Dipper* vacío, coloque el mango en posición horizontal y SIN necesidad de que el operador presione el botón para abrir la compuerta desde la cabina, la compuerta debe de abrirse sin ningún problema.

Con el *Dipper* lleno, coloque el mango en posición horizontal. La compuerta debe de permanecer cerrada en todo momento hasta que el operador presione el botón para abrir la compuerta desde la cabina.



Figura 80 - Prueba de apertura en vacío sistema Latch Free

Fuente: Caterpillar, (2020)

El mecanismo de apertura de compuerta *Latch Free*™ está situado en la parte superior del balde y no en la parte inferior/posterior como el sistema tradicional, justamente en esta zona es por donde fluye la mayor cantidad de material durante el proceso de descarga sobre los camiones. La compuerta se cierra mediante la acción de la fuerza de gravedad cuando el balde baja y el extremo superior del eslabón de sujeción gira sobre su centro hasta la posición de cierre. La compuerta del balde se mantiene cerrada hasta que el operador decide liberar la carga mediante la botonera de apertura desde la cabina. El cable de apertura de compuerta este sujeto a un brazo elevador y al eje central, de esta forma se eliminan los modos de falla de rotura de cable de apertura por rozamiento o por impacto que ocurren con el sistema de

apertura tradicional. Cuando se levante el balde con carga el brazo y el eje giran empujando la excéntrica sobre su centro liberando el *link* de sujeción de la compuerta permitiendo que la compuerta se abra, podemos ver que el sistema *Latch Free* es un sistema de apertura sencillo, seguro y confiable comparado con el sistema de apertura con barretón. El sistema de apertura con *Latch Free*™ está conformado principalmente por los siguientes elementos: brazo elevador, eje central, leva, excéntrica, Link, Link Pin y compuerta.

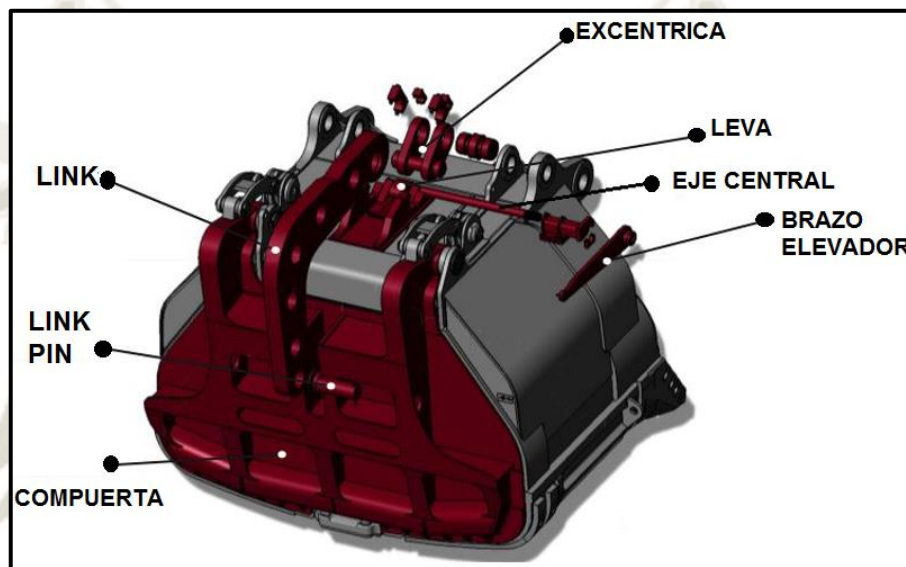


Figura 81 - Partes del sistema *Latch Free*

Fuente: Caterpillar, (2021)

4.3.1.4. ROTURA DE FAJAS DE COMPRESOR DE AIRE QUINCY QSB 30

A. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El principal modo de falla asociado a la baja presión de aire es causado por la rotura de fajas en el compresor de aire de la marca Quincy modelo QSB 30, este compresor de aire se vale de un sistema de poleas y fajas para transferir el movimiento desde el motor eléctrico hacia el compresor tipo tornillo encargado de comprimir el aire del medio ambiente para abastecer al sistema de la Pala. Debido a que el compresor de aire es uno de los componentes sometidos a mayor carga

durante la operación de la Pala debido a su constante funcionamiento es que las poleas sufren constantemente de rotura debido al desgaste prematuro generado por el desalineamiento de las poleas o resequedad de las fajas debido a la temperatura al interior de la sala de máquinas donde se encuentra ubicado el compresor de aire. Este modo de falla es tan recurrente en el equipo que solo en el 2017, del total de 24 paradas no programadas asociadas al sistema de aire, 1/3 fueron a causa de rotura en las fajas del compresor de aire. Es decir que el 33% del total de paradas pudieron ser evitadas si se tomaban acciones correctivas en torno a este problema recurrente.

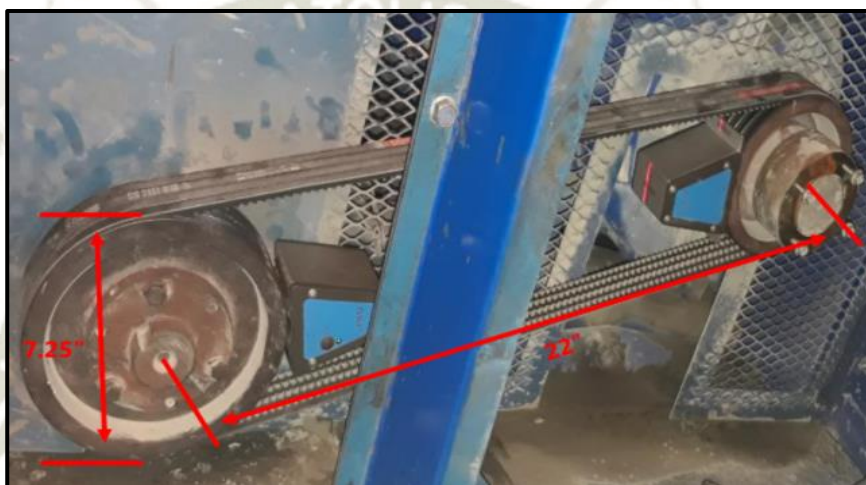


Figura 82 - Fajas de compresor de aire Quincy QSB30

Fuente: Elaboración propia, 2018

B. ACCIÓN CORRECTIVA

El fabricante consciente de este constante problema, decide realizar un re-diseño en el compresor de aire. El nuevo compresor de aire perteneciente a la empresa Sullair modelo ES-6 es de tipo tornillo rotatorio de accionamiento directo, es decir se tiene acoplado directamente el motor eléctrico al compresor de aire. De esta manera se elimina completamente el sistema de accionamiento de compresor mediante poleas y fajas y por ende se elimina por completo el modo de falla relacionado a rotura de fajas de compresor. Este re-diseño no contempla solamente la eliminación de las fajas sino también una disminución considerable en el tamaño de compresor, esto representa una mejor mantenibilidad del componente. Por último, el fabricante decide dar un paso adelante aplicando el concepto de dualidad

de compresores de aire, se reemplaza el diseño antiguo de un solo compresor robusto por dos compresores de menor dimensión, pero con igual capacidad de trabajo, esto significa que, si el personal de mantenimiento detecta un problema en alguno de los dos compresores, el sistema continuará abastecido de presión de aire debido al funcionamiento del otro compresor. Esto permite que el equipo pueda seguir operando con normalidad mientras se le da la solución necesaria al compresor.



Figura 83 - Compresor antiguo modelo Quincy QSB 30

Fuente: Elaboración propia, 2018



Figura 84 - Nuevo compresor dual de aire Sullair ES-6

Fuente: Elaboración propia, 2020

4.4. PASO 6 – SELECCIONAR TIPO DE MANTENIMIENTO

4.4.1. CÁLCULO DE CONFIABILIDAD A TRAVÉS DE LA FUNCION WEIBULL

Para el cálculo del nivel de confiabilidad de cada uno de los sistemas antes descritos utilizaremos la técnica del uso de distribuciones Weibull para el análisis y predicción de fallas para la mejor toma de decisiones.

La función confiabilidad Weibull se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Confiabilidad} = R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\text{Infiabilidad} = F(T) = 1 - R(T)$$

Donde:

- R(T): Función Confiabilidad de Weibull
- F(T): Infiabilidad
- β : Factor de forma
- η : Parámetro de escala
- γ : Parámetro de localización

Para el análisis de nuestro caso de estudio, vamos a proceder a tabular los valores obtenidos del historial de fallas acumulado durante los años 2017, 2018, 2019 y 2020 en la Pala SH001 y Pala SH002 para los tres sistemas de mayor criticidad: Sistema Implementos, Sistema Hydracrowd y Sistema de Aire. Cabe mencionar que se tiene registro detallado de las paradas de los equipos a partir del 1 enero del año 2017 en adelante, no se tiene registro de lo ocurriendo en periodos anteriores.

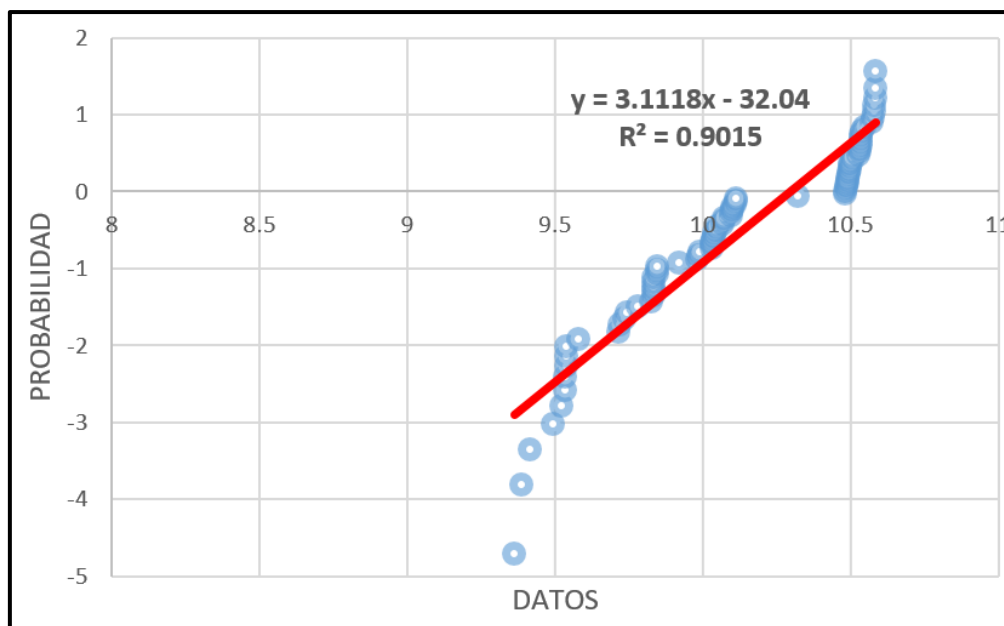


Figura 85 - Parámetros Weibull – Sistema Hydracrowd Pala SH001

Fuente: Elaboración propia

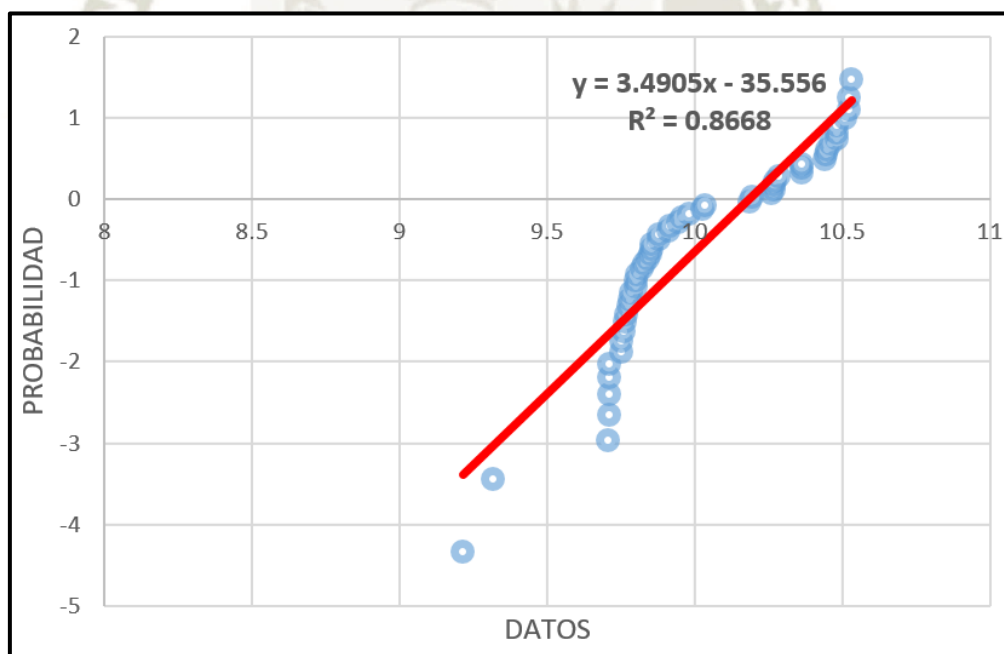


Figura 86 - Parámetros Weibull – Sistema Hydracrowd Pala SH002

Fuente: Elaboración propia

Procedemos a realizar la gráfica del diagrama Weibull de Tiempo de Falla vs F(t)

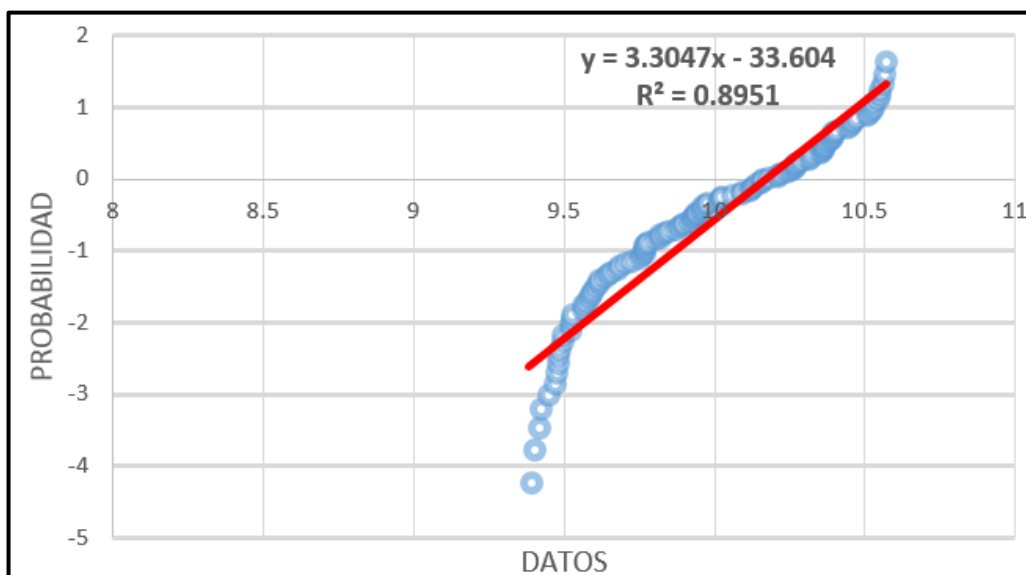


Figura 87 - Parámetros Weibull – Sistema de implementos Pala SH001

Fuente: Elaboración propia

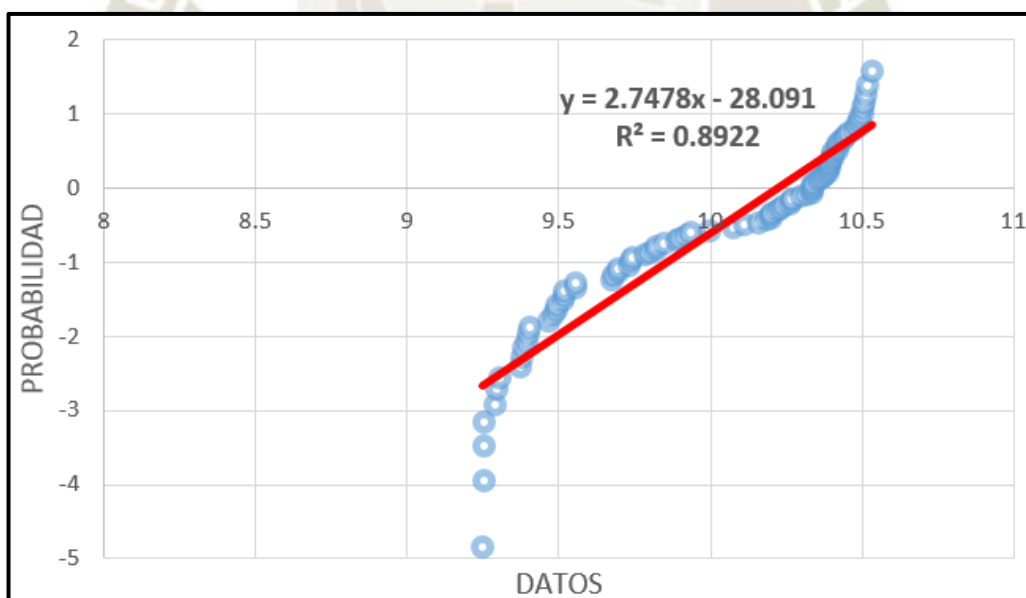


Figura 88 - Parámetros Weibull – Sistema de implementos Pala SH002

Fuente: Elaboración propia

Procedemos a realizar la gráfica del diagrama Weibull de Tiempo de Falla vs F(t)

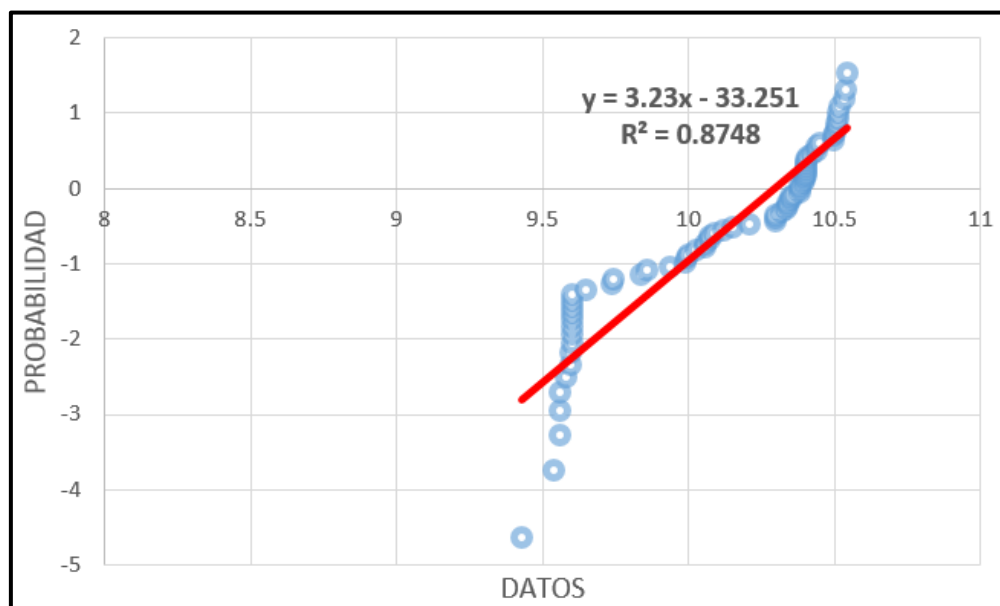


Figura 89 - Parámetros Weibull – Sistema de aire Pala SH001

Fuente: Elaboración propia

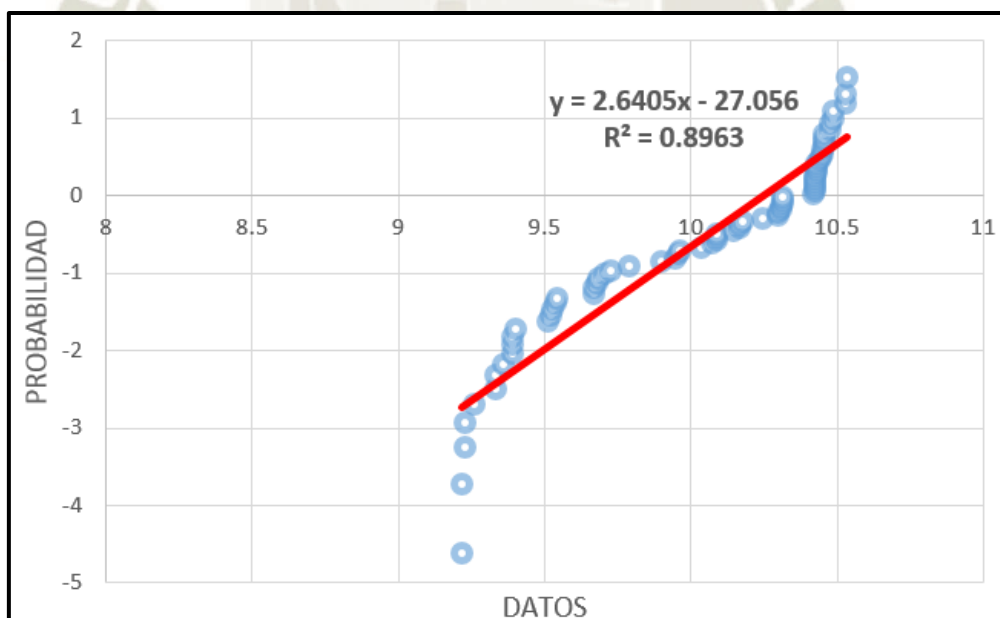


Figura 90 - Parámetros Weibull – Sistema de aire Pala SH002

Fuente: Elaboración propia

Del análisis anteriormente realizado y de acuerdo a lo determinado por Weibull podemos determinar el tipo de mantenimiento recomendado que se debe de realizar a cada uno de los sistemas analizados. La información se resume en la siguiente tabla.

Tabla 7 - Resumen de resultados Weibull

		β	η	Recomendación
SISTEMA DE IMPLEMENTOS	SH001	3.30	26070.19	$\beta > 1$ -Mantenimiento Proactivo
	SH002	2.75	27531.54	$\beta > 1$ -Mantenimiento Proactivo
SISTEMA HYDRACROWD	SH001	3.11	29622.56	$\beta > 1$ -Mantenimiento Proactivo
	SH002	3.49	26542.59	$\beta > 1$ -Mantenimiento Proactivo
SISTEMA DE AIRE	SH001	3.23	29567.38	$\beta > 1$ -Mantenimiento Proactivo
	SH002	2.64	28184.97	$\beta > 1$ -Mantenimiento Proactivo

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 podemos observar que en todos los casos el valor de β es mayor a 1, esto nos indica que bajo este escenario de frecuencias de falla el trabajo a realizar consiste en poder identificar los modos de falla recurrentes tanto mecánicos, eléctricos, operacionales y humanos que desencadenan cada una de las fallas. Estos modos de falla de muchas veces son corregidos a través de un programa de **MANTENIMIENTO PROACTIVO** de cambio cíclico de componentes mediante una estrategia planificada y un **REDISEÑO** de componentes a los cuales no se les pueda aplicar una estrategia de cambio cíclico.

4.5. PASO 7 – IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

El listado de tareas de mantenimiento centrados en mejorar la confiabilidad de la Pala Eléctrica 7495 serán distribuidos en cartillas de mantenimiento, más conocidas como *Job Cards* las cuales serán entregadas al personal técnico en cada uno de los mantenimiento preventivos programados según corresponda, para que a manera de cartilla de cumplimiento ellos puedan revisar punto a punto las tareas específicas necesarias para asegurar el buen rendimiento del equipo, las tareas que atacan a los modos de falla más recurrentes también serán incluidas dentro de este listado adjunto a manera de anexo, esta estrategia de mantenimiento está dividida en intervalos de mantenimiento cada 250 horas, de esta manera tendremos PM1, PM2, PM3 y PM4 hasta alcanzar las 6000 horas. La cantidad de técnicos mecánicos necesarios para el cumplimiento de esta estrategia es de 6. Ver Anexo 5.

4.6. RESULTADOS DE LA AUDITORIA INTERNA DE MANTENIMIENTO

Antes de la aplicación del Plan de Mantenimiento, se realizó una encuesta a manera de auditoría al personal de los departamentos de planeamiento, logística y ejecución. Con la finalidad de identificar aquellos puntos en los cuáles se tenía que trabajar.

4.6.1. RESULTADOS DE AUDITORIA A PLANEAMIENTO

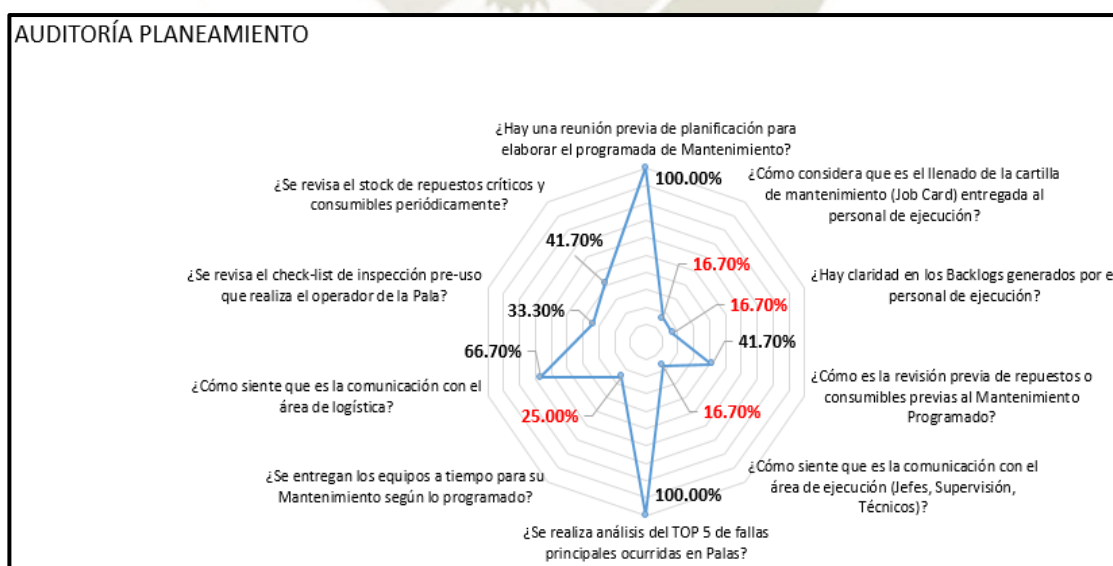


Figura 91 - Auditoria interna - Planeamiento

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos a través de la auditoria interna realizada al personal que trabaja en el departamento de planeamiento. Observamos que se percibe que la información llenada por el personal de ejecución en la cartilla de mantenimiento (*job card*) no es del todo buena, lo cual a su vez se manifiesta también en la calidad y cantidad de *backlogs* generados. También se puede percibir una oportunidad de mejora en la comunicación que hay entre este departamento y el personal de ejecución, de igual manera se percibe también una inconformidad referente al tiempo de entrega de los equipos para el mantenimiento.

4.6.2. RESULTADOS DE AUDITORIA A LOGÍSTICA

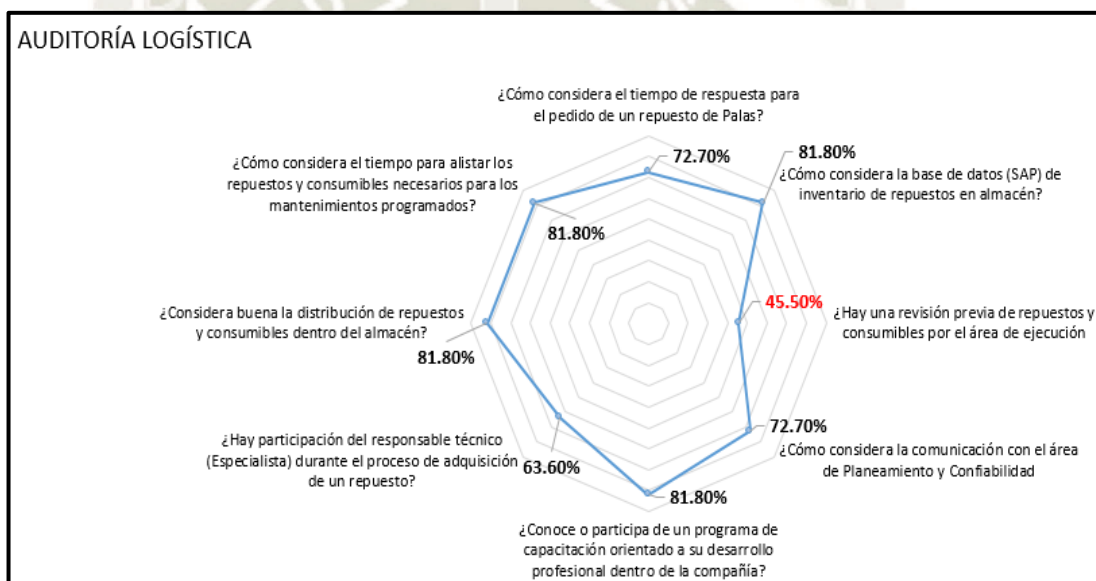


Figura 92 - - Auditoria interna - Logística

Fuente: Elaboración propia

De la encuesta realizada podemos obtener como resultado que el personal que trabaja en el área de Logística percibe que la gestión de mantenimiento dentro de su área es buena, el personal califica con mayor ponderación las preguntas realizadas en la auditoría. Aun así, se identifica una oportunidad de mejora en el proceso de revisión de repuestos y consumibles antes de la ejecución de trabajos por parte del personal de mantenimiento.

4.6.3. RESULTADOS DE AUDITORIA A EJECUCIÓN

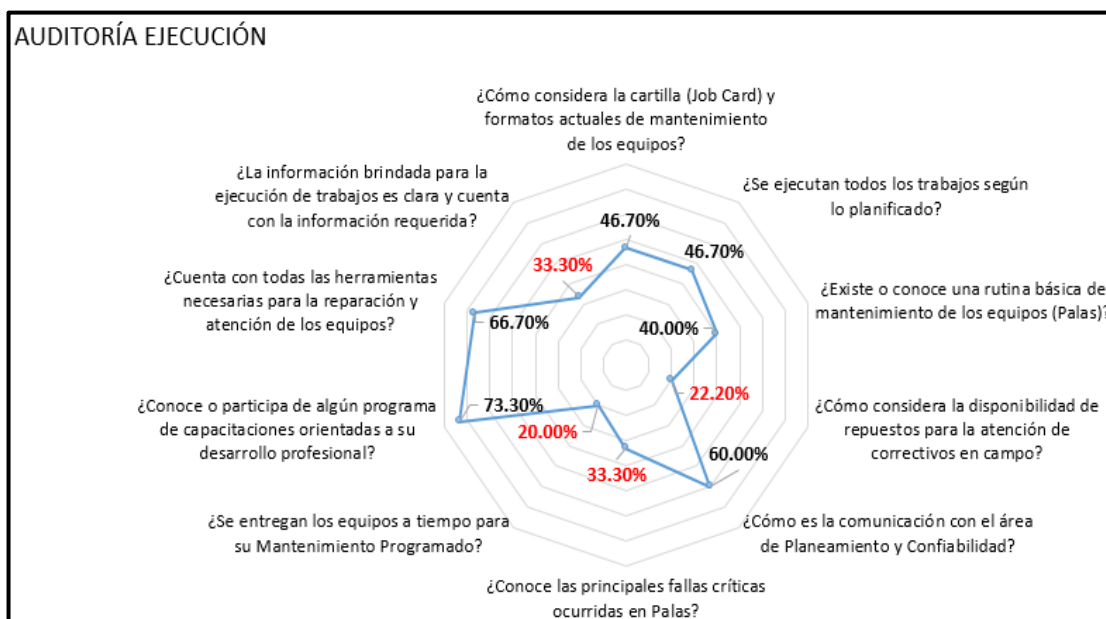


Figura 93 - - Auditoria interna - Ejecución

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la auditoría observamos que el área que pondera con menor puntaje la evaluación es el área de ejecución mantenimiento. Teniendo como principales puntos débiles de que el personal no conoce cuales son las principales fallas críticas ocurridas en las Palas, que la información que se les brinda para la ejecución de los trabajos no es del todo clara o en la mayoría de los casos está incompleta. Otro punto débil está en que el personal considera que la disponibilidad de repuestos para que puedan atender trabajos correctivos en campo es no es del todo bueno, dificultando de esta manera su trabajo.

4.6.4. RESULTADO GENERAL DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

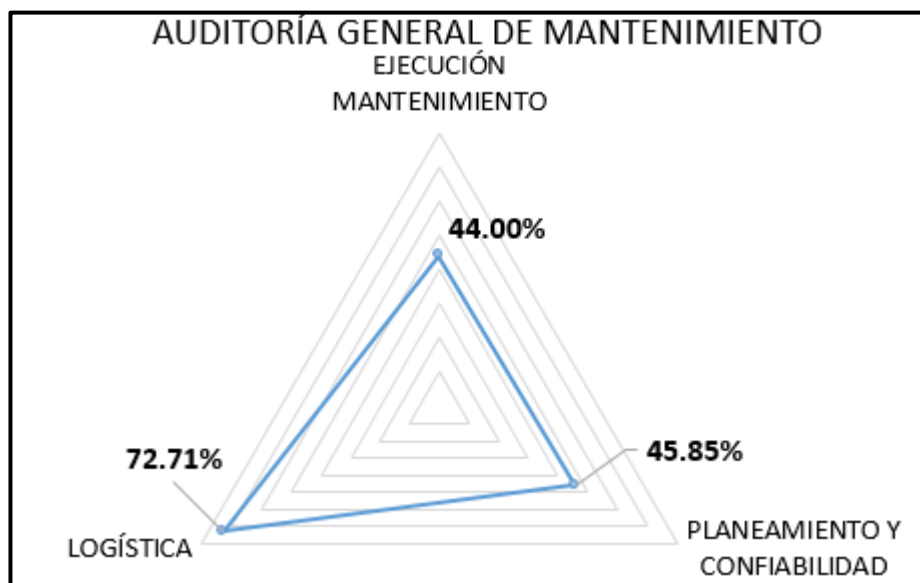


Figura 94 - Resultado gestión de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica observamos como un resumen general de la gestión de mantenimiento antes de la aplicación del plan que las áreas en las cuales se debe de concentrar mayores esfuerzos son la de Planeamiento & Confiabilidad y Ejecución Mantenimiento.

4.7. MÉTODO ISHIKAWA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE GESTIÓN

Para nuestro estudio aplicaremos el método Ishikawa para dar solución a los puntos más bajos obtenidos de la auditoría a las áreas involucradas en el proceso de gestión de mantenimiento.

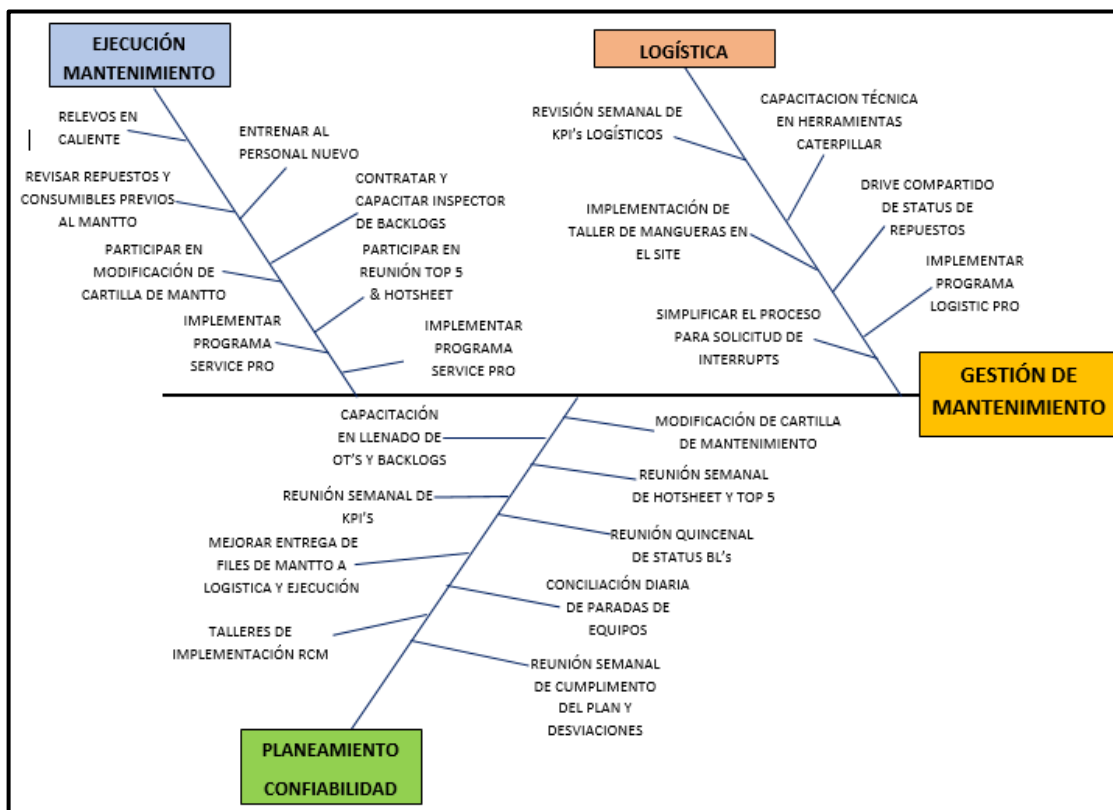


Figura 95 - Método Ishikawa - Gestión de Mantenimiento

Fuente: Elaboración propia

4.8. RESULTADOS DE CONFIABILIDAD (MTBF Y MTTR)

También revisaremos los indicadores de confiabilidad que se obtuvieron durante el periodo 2017 al 2020 en la operación que fue modelo de estudio. De esta manera poder observar como el MTBF se fue incrementando paulatinamente por medio de la aplicación únicamente de estrategias de mantenimiento enfocadas en eliminar aquellos modos de falla con mayor recurrencia. Para revisar el detalle de dicha información ver anexo 6.

Tabla 8 - Resumen MTBF y MTTR - Las Bambas (2017-2020)

Fecha	Horas Disponible [hrs]	# Fallas	Horas Falla [hrs]	MTBF [hrs]	Target MTBF	MTTR [hrs]	Target MTTR
2017	11443.00	364	620.70	31.44	36	1.71	2
2018	12336.40	349	694.10	35.35	36	1.99	2
2019	12368.50	217	402.80	57.00	36	1.86	2
2020	14346.70	349	922.50	41.11	36	2.64	2

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla observamos que conforme avanzaron los años se pudieron identificar aquellos modos de falla con mayor recurrencia en la flota de Palas 7495 Hydracrowd, el valor objetivo contractual de MTBF es de 36 y un MTTR contractual de 2. A lo largo del periodo 2017 y 2018 se fue registrando y analizando información, hecho que nos permitió realizar modificaciones en las cartillas de mantenimiento, tareas estratégicas de inspección, modificación en la frecuencia de cambio de componentes, modificaciones en el diseño de manera local y por parte de fábrica, esto de la mano a que el personal fue adquiriendo cada vez mayor experiencia en el manejo del mantenimiento en estos equipos nos llevó a obtener resultados de confiabilidad superiores al valor contractual, alcanzando una meta anual de MTBF de 57.00 a partir de la reducción considerable en la cantidad de paradas no programadas ocurridas durante este periodo con un total de 217 paradas a lo largo de todo el año 2019.

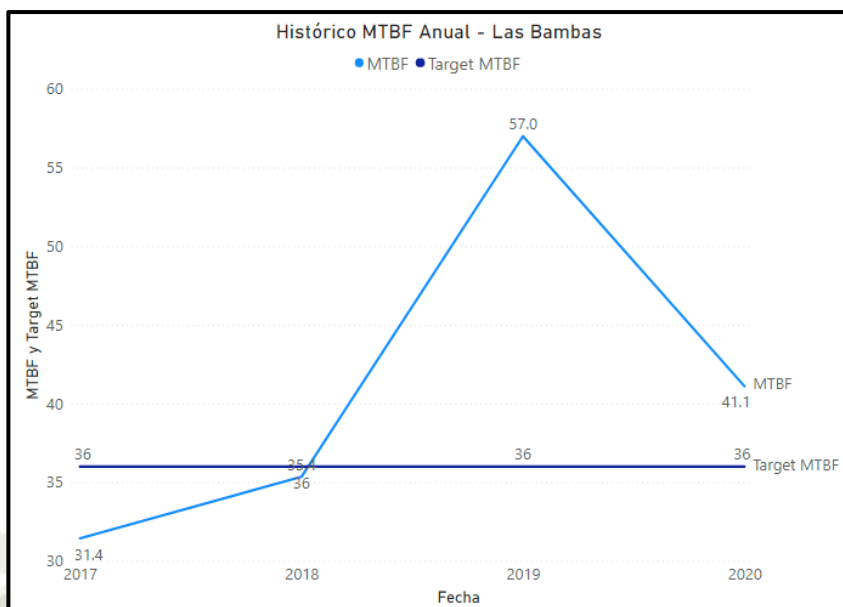


Figura 96 - Indicador de confiabilidad MTBF – Las Bambas

Fuente: Elaboración propia

En la figura 96 observamos que el valor del MTBF se vió incrementado a 57.0 en el año 2019.

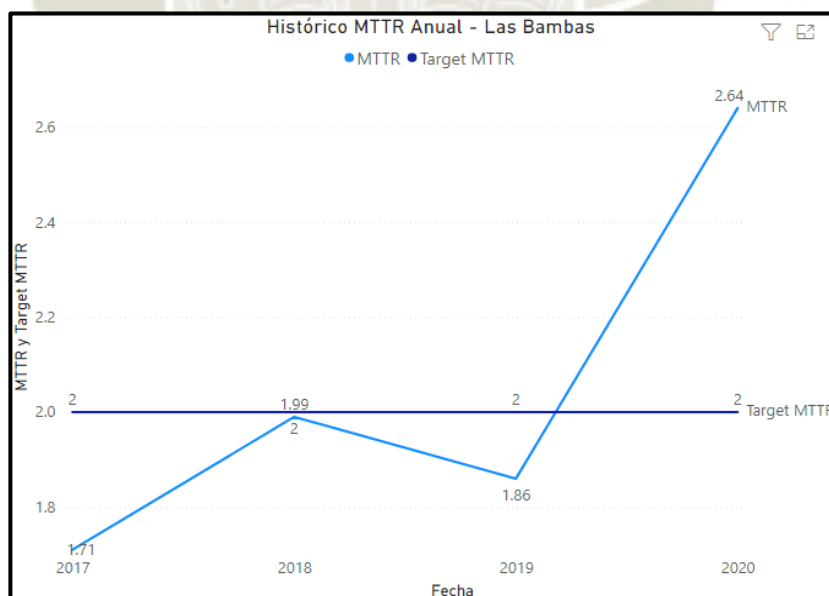


Figura 97 - Indicador de confiabilidad MTTR – Las Bambas

Fuente: Elaboración propia

En la figura 97 observamos que el valor del MTTR disminuyó hasta un 1.86 pero para el año siguiente se incrementó a 2.64, esto fue resultado de la interiorización del servicio de mantenimiento de los equipos por parte del cliente.

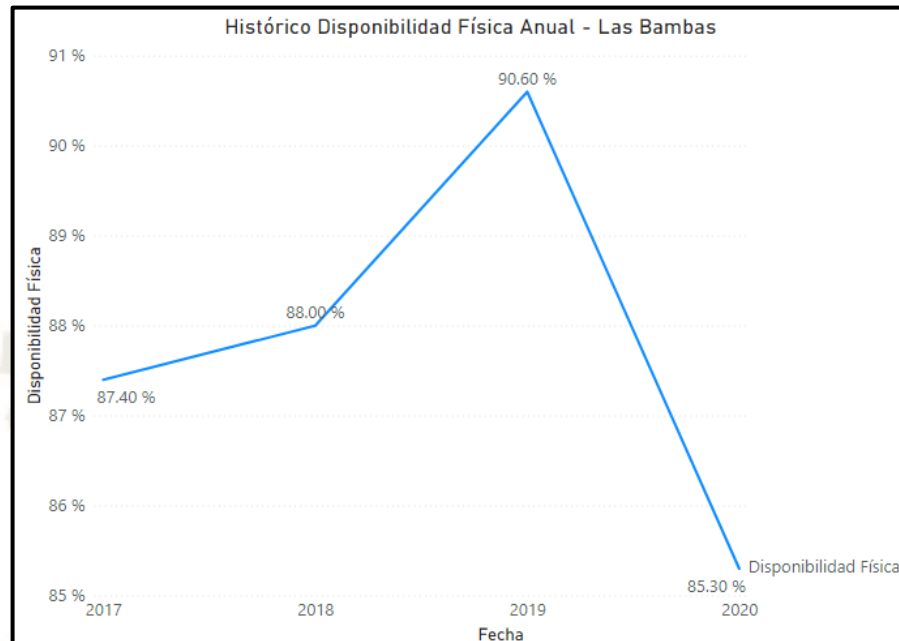


Figura 98 - Indicador de disponibilidad física – Las Bambas

Fuente: Elaboración propia

En la figura 98 observamos que la disponibilidad física pico se alcanzó en el año 2019 con un valor de 90.60% y para el año siguiente disminuyó hasta un 85.30%. Resultado de la interiorización del servicio de mantenimiento de los equipos por parte del cliente.

4.9. RESULTADOS EN INDICADORES DE MANTENIMIENTO

En esta sección, vamos a mostrar el resultado de la implementación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad desarrollado en la operación minera ubicada en el departamento de Moquegua. Los resultados que se obtuvieron a partir de la fecha de implementación de este plan desde abril 2021 fecha de la puesta en servicio de la primera Pala hasta el mes de noviembre 2021, fecha en la cual se pondrá en operación la segunda Pala. Los indicadores de confiabilidad obtenidos durante la implementación fueron progresivos en el tiempo con un periodo de aprendizaje inicial durante los tres primeros meses, tiempo durante el cual se obtuvieron los resultados más bajos en confiabilidad, a partir del cuarto mes se puede observar un incremento en la confiabilidad de manera progresiva y consecutiva durante los 4 meses siguientes alcanzando valores de hasta 137 horas de MTBF durante el mes de agosto y sosteniendo su valor en el mes de setiembre con un MTBF de 112 horas. Esto es resultado del trabajo realizado durante el primer trimestre de operación del equipo, periodo durante presente fallas por asentamiento del equipo. Durante este periodo se procedió a capacitar a los jefes de operación, supervisores de campo y técnicos de mantenimiento sobre la estrategia de mantenimiento centrado en la confiabilidad que se busca implementar desde la puesta en operación de las Palas Eléctricas 7495 *Hydracrowd*. Esta capacitación se realizó mediante talleres donde se presentó el modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad paso a paso, funcionamiento del equipo, modos de falla frecuente, técnicas correctas de operación, ruta de inspección específica del equipo para atacar los principales modos de falla, entre otros puntos importantes que permitieron poder incrementar los valores de confiabilidad a valores muy por encima del target que se tiene en esta operación minera que es de 25 horas. Durante los primeros meses de implementación del plan se pudo verificar que los valores alcanzados superaron los obtenidos en la operación minera Las Bambas donde se logró alcanzar un MTBF de 57 horas en la mejor etapa de implementación del plan. El valor de MTBF alcanzado a la fecha es de 78.1 horas en promedio superior si lo comparamos con el *benchmarking* nacional de 46.4 horas que se maneja hasta la fecha. Esto demuestra que centrar la estrategia de mantenimiento en tareas específicas que busquen minimizar y eliminar los principales modos de falla para mejorar la confiabilidad del equipo, obtiene resultados.

Tabla 9 - Resultados de implementación durante 2021

Fecha	Disponibilidad Física [%]	MTBF [horas]	Target MTBF [horas]	MTTR [horas]	Target MTTR [horas]
Abril	92.7%	47.4	25.00	2.8	1.5
Mayo	91.6%	40.5	25.00	1.5	1.5
Junio	92.6%	36.20	25.00	1.4	1.5
Julio	93.4%	84.1	25.00	2.3	1.5
Agosto	92.4%	137.4	25.00	2	1.5
Setiembre	90.4%	112.1	25.00	1.7	1.5
Octubre	90.0%	88.8	25.00	1.2	1.5
Promedio	91.9%	78.1	25.00	1.8	1.5

Fuente: Elaboración propia

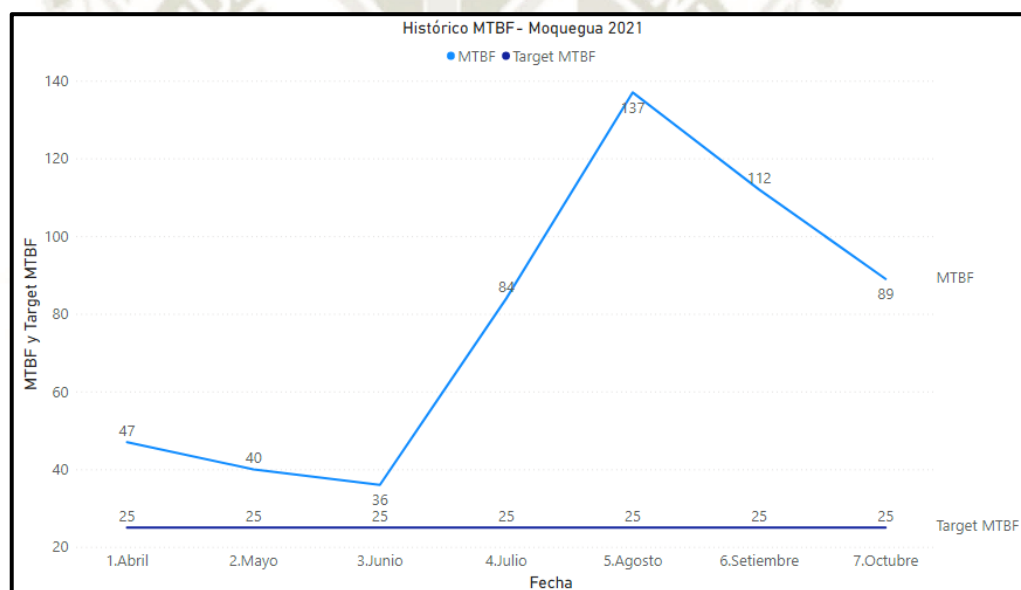


Figura 99 - Histórico MTBF – Moquegua 2021

Fuente: Elaboración propia

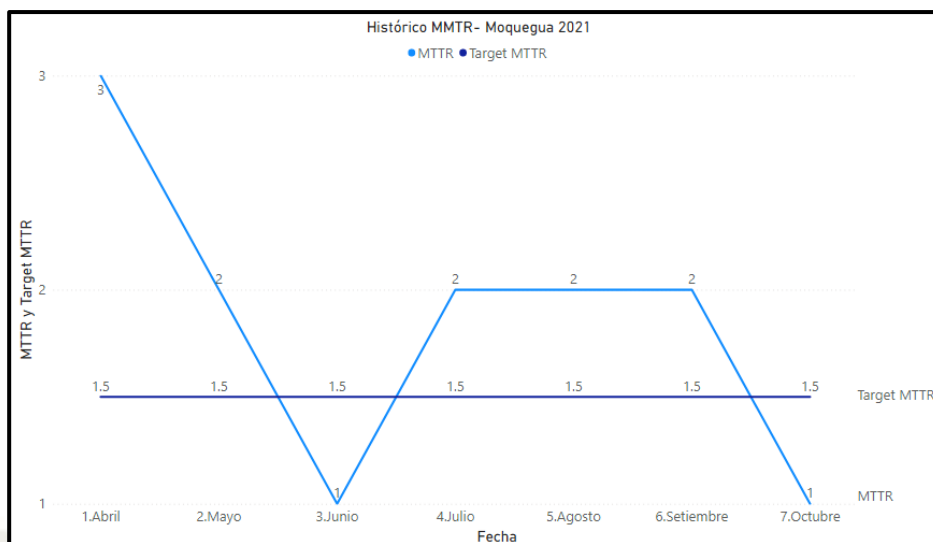


Figura 100 - Histórico MTTR – Moquegua 2021

Fuente: Elaboración propia

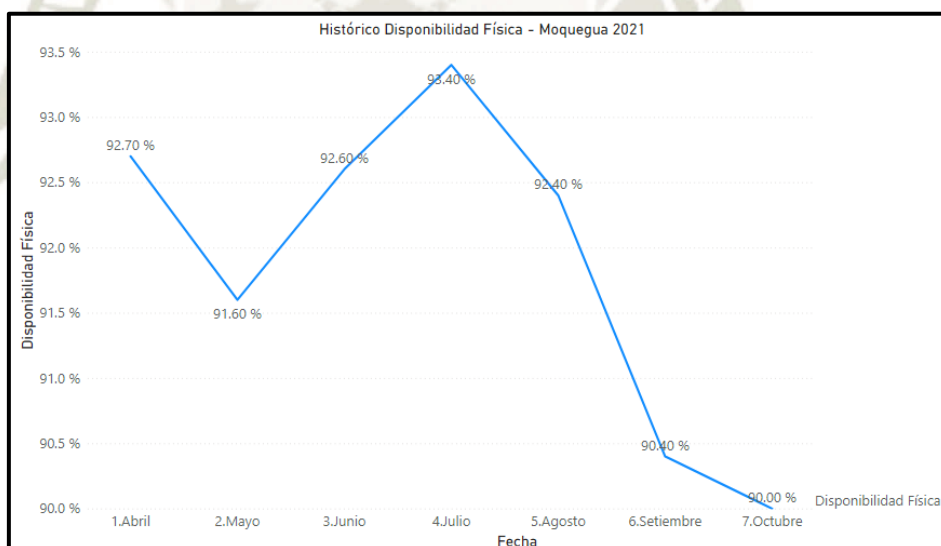


Figura 101 - Histórico Disponibilidad Física – Moquegua 2021

Fuente: Elaboración propia

4.10. RESULTADOS ECONÓMICOS

La implementación de este plan tiene como objetivo no solo incrementar los valores de confiabilidad y disponibilidad física sino también generar un impacto dentro del aspecto económico. Para dichos resultados primero debemos determinar el costo hora de la Pala eléctrica de cable, para esto haremos uso del modelo matemático establecido en la norma técnica peruana “Elementos para la determinación del costo horario de los equipos y maquinaria del sector de construcción y minería” con Resolución Directorial N°035-2010/VIVIENDA/VMCS-DNC. Esta norma tiene como objeto establecer aquellos elementos que como mínimo se deben de incluir en el cálculo del costo horario de las maquinarias y los equipos más utilizados en el sector minería y construcción.

El costo horario de posesión y de operación de la maquinaria, se define como la cantidad de dinero que se requiere para adquirir y operar un equipo, es decir, realizar los trabajos para los cuales fue adquirido, manteniéndola en un buen estado de conservación antes, durante y después de su utilización, bajo un correcto programa de mantenimiento. La maquinaria debido a su uso sufre un desgaste natural y va perdiendo su valor de adquisición a través del tiempo, independiente si se le realiza o no una rutina de mantenimiento, la productividad de este equipo disminuye con el tiempo y por lo tanto sus costos de mantenimiento y reparación se incrementan con el pasar del tiempo, hasta un determinando punto donde el equipo ya se considere obsoleto. Existen varios métodos que permiten obtener el costo de posesión y costo de operación de la máquina, pero todos brindan un costo aproximado. El costo real solamente se puede obtener a través del tiempo y por medio de los datos reales obtenidos durante la operación del equipo.

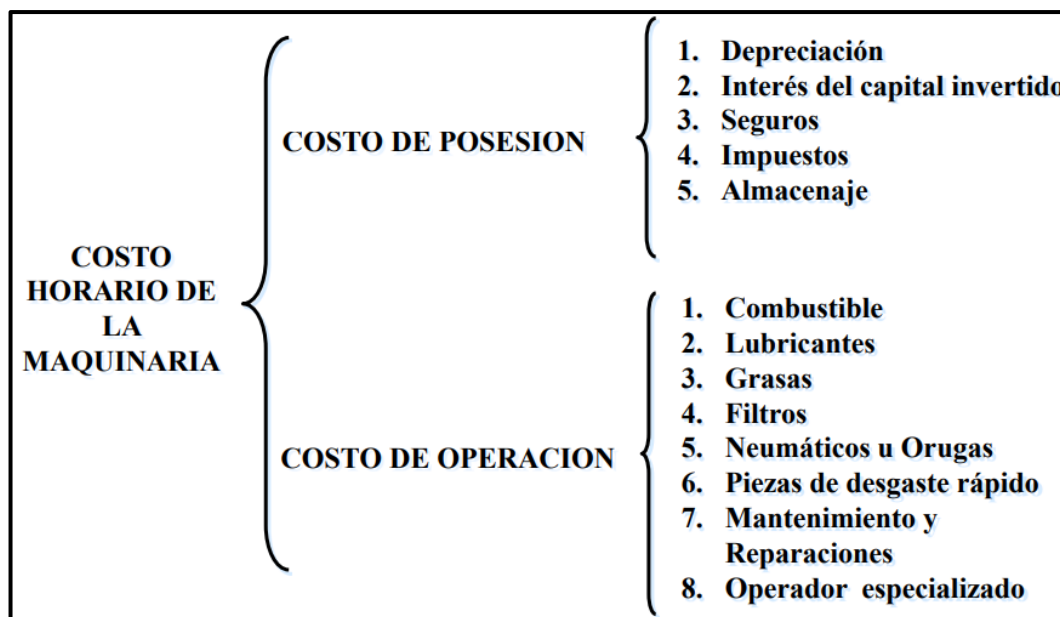


Figura 102 - Costo horario de maquinaria

Fuente: <https://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2011/cajamarca/COSTO%20HORARIO%20DE%20MAQUINARIA.pdf> , (2011)

4.11. CONCEPTOS PARA DETERMINAR COSTO HORARIO DE POSESIÓN

4.11.1. VALOR DE ADQUISICIÓN (V_a)

Precio actual del activo en el mercado y se obtiene solicitando una cotización a un proveedor en venta de maquinaria.

4.11.2. VIDA ECONÓMICA ÚTIL (VEU)

Periodo de tiempo durante el cual dicha maquinaria trabaja con rendimiento económico justificable.

4.11.3. VALOR DE RESCATE (V_r)

Valor de reventa que tendrá la máquina al final de su vida económica útil. Este valor puede oscilar entre el 20 y 25% del valor de adquisición.

4.11.4. DEPRECIACIÓN (D)

Para la determinación del costo horario de posesión de una maquinaria, a la depreciación se le conoce también como fondo de reposición del equipo y consiste en crear un fondo de

reserva para reemplazar al equipo por uno nuevo una vez este cumpla su VEU. Se puede calcular por medio de la siguiente fórmula.

$$D = \frac{Va - Vr}{VEU}$$

Donde:

- D: Depreciación por horas de servicio (US\$/Hrs)
- Va: Valor de adquisición (US\$)
- Vr: Valor de rescate (US\$)
- VEU: Vida económica útil (Hrs)

4.11.5. INTERÉS HORARIO DEL CAPITAL INVERTIDO (I)

Para poder realizar la compra de un equipo, cualquier empresa financia sus fondos por medio de un banco o un fondo de inversionistas de capital, teniendo que pagar por ello un interés correspondiente; puede darse el caso que la misma empresa cuente con los fondos suficientes para la adquisición de la máquina, pero a pesar de ello la empresa misma debe de cargarse el interés de esta inversión ya que este dinero pudo haber sido invertido en otro negocio que produzca dividendos a la empresa. Este monto se puede calcular mediante la siguiente formula

$$I = \frac{IMA * TEA * N}{VEU}$$

Donde:

- I: Interés horario del capital invertido (US\$/Hrs)
- IMA: Inversión media anual (US\$/año)
- TEA: Tasa efectiva anual (%)
- N: Vida útil (año)
- VEU: Vida económica útil (Hrs)

4.12. CONCEPTOS PARA DETERMINAR COSTO HORARIO DE OPERACIÓN

El costo horario de operación de una maquinaria está conformado por los siguientes conceptos:

- Energía (Combustible o electricidad)
- Lubricante
- Grasas
- Filtros
- Mantenimiento y reparaciones
- Mano de obra del operador
- Accesorios (Cables, reparación balde, carrilería)

4.12.1. INVERSIÓN MEDIA ANUAL (IMA)

Se define como la media aritmética de los valores que figuran en los libros contables al final de cada año, después de realizarla deducción de cuota de depreciación sobre el activo. Para el caso de maquinaria pesada se utiliza el método lineal decreciente por medio de la siguiente formula.

$$IMA = \frac{Va(N + 1)}{2N}$$

Donde:

- IMA: Inversión media anual (US\$/año)
- Va: Valor de adquisición (US\$)
- N: Vida útil (año)

4.13. COSTO HORARIO DE PALA ELÉCTRICA DE CABLE

Para ver el detalle de la determinación del costo horario de la Pala eléctrica de cable 7495 *Hydracrowd*, ver Anexo 7.

Por medio del cálculo se pudo determinar que el costo horario total es de 958.17 US\$/hr, a un rendimiento de producción de 5205 a 5856 TM/hr dependiendo si se está moviendo mineral o desmonte respectivamente, se traduce en un costo por tonelada movida de 0.16 a 0.18 US\$/TM.

4.14. COMPARATIVO DE PARADAS POR AÑO

Tomaremos los valores de MTBF obtenidos durante el periodo 2021 antes del inicio de la aplicación del RCM y posterior a ello para hacer un versus comparativo y mostrar los beneficios de la aplicación.

	MTBF [horas]		
	MTBF Sin RCM [hrs]		Con RCM [hrs]
Abril	47.4		47.4
Mayo	40.5		40.5
Junio	36.2		36.2
Julio	47.4		84.1
Agosto	40.5		137.4
Setiembre	36.2		112.1
Octubre	47.4		88.8
PROMEDIO	42.2		78.1
			45.93% 

Figura 103 - Comparativo de paradas por año

Fuente: Elaboración propia

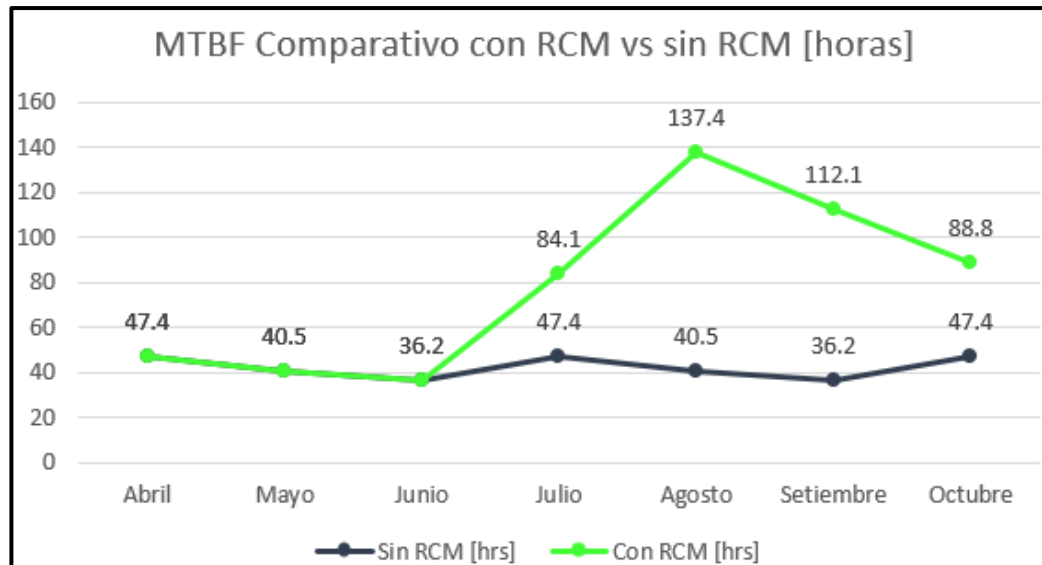


Figura 104 - Gráfica comparativa MTBF

Fuente: Elaboración propia

En este cuadro observamos que el versus comparativo del valor de MTBF obtenidos con la aplicación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM son un 45.93% mejores que si no se aplicara RCM en estos equipos.

Horas trabajadas el 2021 (7 meses)		4200	
Con RCM	4200/78.1	54	Paradas/año
Sin RCM	4200/42.2	99	Paradas/año
MTTR		1.5	
Tiempo de parada [horas/año]			
Con RCM	54*1.5	81	
Sin RCM	99*1.5	149	
Diferencia adicional		69	Horas/año

Figura 105 - Diferencia adicional en horas con RCM

Fuente: Elaboración propia

Considerando un MTTR de 1.5 horas en promedio y un total de 4200 horas trabajadas de abril a octubre 2021. Observamos que la diferencia adicional de horas de detención posterior a la aplicación del RCM es de 69 horas/año.

Toneladas movidas adicionales [Tons/año]				
Mineral	69 * 5205	356658.46	Toneladas/año	
Desmonte	69 * 5856	401266.47	Toneladas/año	
Gastos por paradas evitadas [USD]				
Mineral	14991.46*69	1027249.00	USD	
Desmonte	7027.25*69	481523.18	USD	

Figura 106 - Toneladas movidas adicionales con RCM

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, si multiplicamos estas 69 horas adicionales que se tendría el equipo disponible para producir con el rendimiento de carguío de la Pala Eléctrica 7495 *Hydracrowd* ya sea si se carga desmonte o si se carga mineral se obtiene 356658.46 Toneladas y 401266.47 Toneladas. Para finalizar podemos decir que debido al incremento de la confiabilidad operacional en un 45.93% se generó un ahorro por parada total de 1027249 USD si el equipo hubiera cargado mineral y de 481523.18 USD si hubiera cargado desmonte.

5. CONCLUSIONES

1. Se realizó análisis a través del Diagrama de Pareto para identificar aquellos sistemas con mayor ocurrencia de falla durante los años 2017, 2018, 2019 y 2020. Identificando que el 80% del total de fallas no programadas registradas recaen sobre 5 sistemas: *Hydracrowd*, implementos, aire, propulsión y levante.
2. Se elaboró un análisis paso a paso basado en la metodología RCM identificando que los sistemas con mayor criticidad son: *Hydracrowd*, implementos y aire. También por medio de diagramas de Weibull se logró determinar que el tipo de mantenimiento más adecuado en funciones a los modos de falla y el valor $\text{Beta} > 1$ obtenido es el mantenimiento proactivo.
3. Identificada la estrategia y los modos de falla se logró diseñar un plan de mantenimiento con tareas estratégicas enfocadas en eliminar los principales modos de falla que disminuyen la confiabilidad del equipo, las cuáles fueron aplicados desde la puesta en servicio de los equipos.
4. Por medio de la implementación de la estrategia de mantenimiento centrado en la confiabilidad se logró pasar de un MTBF inicial durante el primer trimestre de 41.37 a un promedio final de 78.1 horas, esto representa un incremento del 45.93% en confiabilidad operacional del equipo y un MTTR inicial durante el primer trimestre de 1.9 a 1.8, con dichos valores logramos obtener una disponibilidad promedio porcentual de 91.9% al cierre de octubre de 2021.
5. Se realizó el cálculo costo horario de operación de la Pala Eléctrica de Cable y se obtuvo que su valor oscila entre los 0.16 a 0.18 US\$/TM y un rendimiento promedio de 5200 TM/hr.
6. Finalmente, se pudo determinar que el costo por parada evitado debido a la aplicación del plan RCM asciende a 1'027,249 USD si el equipo hubiera cargado mineral y de 481,523.18 USD si hubiera cargado desmonte, lo cual justifica completamente la aplicación del plan.

6. RECOMENDACIONES

1. Debido a que estaremos frente a una situación en la cual se tendrá mucho personal técnico nuevo trabajando durante la puesta en servicio inicial del equipo, se debe de fortalecer la capacitación técnica constante al personal en técnicas RCM y funcionamiento del equipo por medio de talleres de capacitación y entrenamiento. De esta manera periodo de adaptación será lo más corto posible y se logrará obtener resultados favorables en menor tiempo.
2. Para el éxito de este plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad será muy importante el compromiso desde la gerencia de mantenimiento hasta los técnicos ejecutores de campo en cuanto a la importancia de la ejecución completa de las tareas descritas en las diversas cartillas de mantenimiento centrado en la confiabilidad.
3. Se recomienda revisar los puntos críticos de falla del equipo durante su periodo de ensamble, comisionado y *break-in* para de esta manera asegurar que no se tenga demasiadas fallas durante el periodo infantil de los equipos.
4. Se recomienda sostener reuniones técnicas de manera semanal involucrando al equipo de confiabilidad y ejecución para identificar y analizar los modos de falla para de esta manera generar planes de acción con el fin de incrementar y sostener buenos indicadores de confiabilidad en la flota
5. El departamento de logística debe de trabajar en conjunto con el equipo de planificación en la identificación de los repuestos críticos necesarios en la operación para de esta manera poder tener los recursos necesarios en el *site* debido a que los tiempos de atención en los repuestos y componentes de Palas son altos y su disponibilidad muchas veces se encuentra en el extranjero. Una buena planificación y control evitara generar sobrecostos en traslados por emergencia.

REFERENCIAS

- Anturi, J., & Villanova, M. (2018). *ELABORACIÓN DE UNA PROPUESTA DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) PARA EL EQUIPO KOMATSU PC8000-6E SERIE 12041*. Bucaramanga: Maestría en Gerencia del Mantenimiento y Confiabilidad - Universidad Pontificia Bolivariana.
- Cabrera, F. (2019). *DESARROLLO DE UNA ESTRATEGÍA DE CONFIABILIDAD EN PLANTA CHANCADO DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL – CODELCO CHILE*. Santiago de Chile: Maestría en Gestión y Dirección de Empresas - Universidad de Chile.
- Castro, J. (2020). *APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) PARA HOMOLOGAR PROCESOS DEL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA EPIMMEM*. Arequipa: Maestría en Ingeniería de Mantenimiento - UCSM.
- Caterpillar. (2013). *Manual de Servicio*. Caterpillar.
- Caterpillar. (2019). *Best Operating Practices Guide*. Caterpillar.
- Córdova, A. (2017). *PROPUESTA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS PALAS ELECTROMECAÑICAS TZ MODELO WK-12 EN LA MINERA SHOU GANG HIERRO PERÚ S.A.A*. Lima: Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica - Universidad Nacional del Callao.
- Duffaa, S., Raouf, A., & Dixon, C. (2006). *Sistemas de Mantenimiento: Planeación y control*. Ciudad de México: Limusa.
- Fernández, M. (2018). *IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) PARA EL ÁREA DE CHANCADO TERCARIO EN UNA PLANTA CONCENTRADORA*. 2018: Maestría en Ingeniería de Mantenimiento - UCSM.
- García Garrido, S. (2003). *Organización y Gestión Integral del Mantenimiento*. Madrid: Díaz de Santos S.A.
- Gonzales, F. (2004). *AUDITORÍA DEL MANTENIMIENTO E INDICADORES DE GESTIÓN*. Madrid: FC EDITORIAL.
- Gulati, R. (2009). *Maintenance and Reliability Best Practices*. New York: Industrial Press, Inc.
- Keith, R. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance, Second Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Linares, L. (2012). *Del Mantenimiento Correctivo al Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. Centro Azúcar*.
- Merma, J. (2018). *IMPLEMENTACION DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM2) EN LAS PALAS HIDRAULICAS PC4000-6 KOMATSU PARA EL INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD*. Arequipa: Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica - Universidad Nacional de San Agustín.

Moubray, J. (1997). *RCM II Reliability-centered Maintenance*, 2 ed. New York: Industrial Press Inc.

Nakajima, S. (1988). *TPM Nyumon*. Cambridge: Productivity Press Inc.

Nayhua, J. (2018). *DISEÑO DE UN PLAN MANTENIMIENTO CON LA METODOLOGÍA DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA PERFORADORAS ATLAS COPCO CT20 EN LA EMPRESA EXPLODRILLING*. Arequipa: Maestría en Ingeniería de Mantenimiento - UCSM.

Parra, C., & Crespo, A. (2012). Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicadas en el proceso de Gestión de Activos. *Ingeman*, 5-7.

Real Academia Española. (2021). *Real Academia Española*. Obtenido de [dle.rae.es](https://dle.rae.es/mantenimiento):
<https://dle.rae.es/mantenimiento>

Rodion, A. (2015). *Evaluation of Hydraulic Excavator and Rope Shovel Major Maintenance*. Alberta: Department of Civil and Environmental Engineering .

Sabino, C. (1992). *El proceso de investigación*. Caracas: Panapo.

SAE International. (1999). *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance - SAE JA1011*. SAE International.

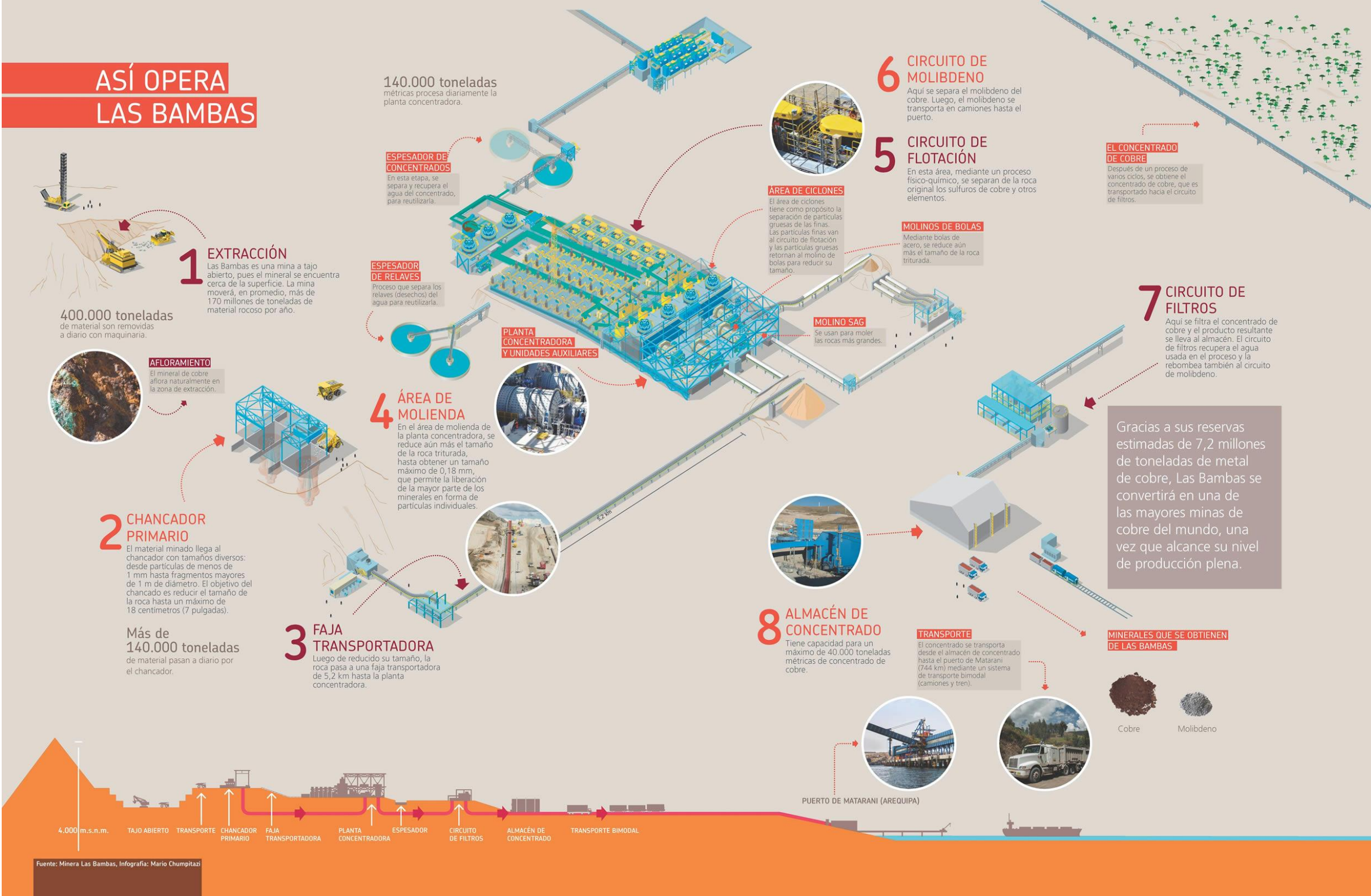
Stephens, M. (2010). *Productivity and Reliability-Based Maintenance Management*. Indiana: Purdue University Press.

ANEXOS

ANEXO 1: POOL DE EQUIPOS EN OPERACIONES MINA

Código	Equipo	Flota	Marca	Modelo
SH001	Pala Eléctrica	Carguío	Caterpillar	7495 <i>Hydracrowd</i>
SH002	Pala Eléctrica	Carguío	Caterpillar	7495 <i>Hydracrowd</i>
SH003	Pala Eléctrica	Carguío	Caterpillar	7495 <i>Hydracrowd</i>
SH006	Pala Hidráulica	Carguío	Caterpillar	6060BH
LD001	Cargador Frontal	Carguío	Caterpillar	994K
EX001	Pala Hidráulica	Carguío	Caterpillar	6015B
EX002	Pala Hidráulica	Carguío	Caterpillar	6015B
TD011	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	D65
TD012	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	D65
TD013	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	D65
TD001	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	PitViper 351
TD002	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	PitViper 351
TD003	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	PitViper 351
TD004	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	PitViper 351
TD005	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	PitViper 351
TD006	Perforadora Diesel	Perforación	Epiroc	PitViper 351
HT001 – HT0028	Camión Eléctrico	Acarreo	Caterpillar	794AC
HT051 – HT053	Camión Diesel	Acarreo	Caterpillar	777G
DZ001 – DZ004	Tractor Orugas	Flota Auxiliar	Caterpillar	D10T2
DZ010 – DZ013	Tractor Orugas	Flota Auxiliar	Caterpillar	D11
GR010	Motoniveladora	Flota Auxiliar	Caterpillar	16M3
GR001 – GR003	Motoniveladora	Flota Auxiliar	Caterpillar	24
RT001 – RT003	Tractor de ruedas	Flota Auxiliar	Caterpillar	834K
WT001 – WT003	Camión Aguatero	Flota Auxiliar	Caterpillar	777G
CR001 – CR002	Enrollador de cables	Flota Auxiliar	Caterpillar	988K

ANEXO 2: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE COBRE



Fuente: <http://www.lasbambas.com/excelencia-operativa#images> , 2019

ANEXO 3: ANÁLISIS DE MODO DE FALLA Y EFECTOS (AMFE)

Hoja de registro AMFE – Sistema Hydracrowd

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
1. SISTEMA HYDRACROWD													
1	Ser capaz de realizar movimientos de extensión y retracción en un rango de 120 a 130 ft/min	1.A	No realiza movimientos de extensión/retracción	1.A.1	No hay energía en el motor de empuje	Evidente: Si. Descripción del efecto: No hay energía en el motor de empuje, no permite el movimiento de las Bombas de Pistones Hidráulicos	1.A.1.1.	Se tiene daño en fusibles y varistores por sobre voltaje de alimentación.	Cada 12 meses	Inspección de fusibles y varistores. Cambio de componentes	Inspección y ajuste	500 hrs 6000 hrs	Soporte Eléctrico
							1.A.1.2.	Falla en tacómetro de Motor de Empuje	Cada 6 meses	Revisión de componentes eléctricos de tacómetro.	Alineamiento láser	3000 hrs	Soporte Eléctrico/Predictivo
				1.A.2	Sobrepresión a la salida del Manifold de control de Bombas	Evidente: Si. Descripción del efecto: La presión a la salida del Manifold de Control de Bombas supera los 3500 psi.	1.A.2.1.	Se tiene daño interno en una de las 4 válvulas PICV (daño en sellos o traba en Spool)	Cada 12 meses	Cambio de sellos internos de válvulas PICV.	Cambio de componente	6000 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.3	No hay suficiente flujo de salida en las 4 Bombas de pistones hidráulicos	Evidente: Si. Descripción del efecto: Hay pérdida de flujo por drenaje de carcasa superior a los 4 GPM en monitor de control PCDM	1.A.3.1.	Se tiene daño en una de las pantallas PCDM de control de drenaje de carcasa.	Cada 12 meses	Inspección de funcionamiento.	Inspección	500 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.3.2.	Se tiene daño por cavitación en una de las 4 Bombas Principales del Sistema Hydracrowd.	Cada 12 meses	Medición de presión de salida de Bombas Hydracrowd.	Metrología	500 hrs	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE - Sistema Hydracrowd (Continuación)

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
1. SISTEMA HYDRACROWD													
1	Ser capaz de realizar movimientos de extensión y retracción en un rango de 120 a 130 ft/min	1.A	No realiza movimientos de extensión/retracción	1.A.4	No hay suficiente presión de salida en las Bombas de pistones hidráulico	Evidente: Si. Descripción del efecto: Hay lentitud en el movimiento del cilindro Hydracrowd debido a que la presión de salida de las Bombas es menor a 3700 psi.	1.A.4.1.	Se tiene daño interno en una de las 4 válvulas PUV (daño en sellos o traba en Spool)	Cada 6 meses	Cambio de sellos internos de válvulas PUV.	Cambio de componente	3000 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.4.2.	Se tiene daño en válvula reguladora de alivio de presión.	Cada 6 meses	Calibración de Bombas Principales	Calibración	3000 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.4.3.	Se tiene daño por cavitación en una de las 4 Bombas Principales.	Cada 24 meses	Medición de presión de salida de Bombas Hydracrowd	Metrología	500 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.5	No hay energía en el motor de accionamiento de la bomba de circulación.	Evidente: Si. Descripción del efecto: No hay energía en el motor de circulación.	1.A.5.1.	Se tiene daño en fusibles y varistores por sobre voltaje de alimentación.	Cada 12 meses	Inspección de fusibles y varistores. Cambio de componentes	Ajuste de fusibles y varistores	500 hrs 6000 hrs	Soporte Eléctrico
				1.A.6	No hay suficiente presión de salida en Bomba de Pilotaje	Evidente: Si. Descripción del efecto: Lentitud por baja presi	1.A.6.1.	Se tiene daño en válvula reguladora de alivio de presión piloto.	Cada 12 meses	Medición de presión de salida de Bomba Piloto.	Metrología	500 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.6.2.	Se tiene daño interno por contaminación en la Bomba de Pilotaje.	Cada 12 meses	Cambio de Bomba Piloto.	Cambio de componente	500 hrs 6000 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.7	Falla en referencia de la posición del cilindro Hydracrowd	Evidente: Si. Descripción del efecto: Hay daños internos y externos en el encoder de posición lineal del Mango del Balde.	1.A.7.1.	Daños en control electrónico de encoder de empuje por soldadura.	Cada 250 hrs	Inspección de control eléctrico.	Inspección	250 hrs	Soporte Eléctrico
							1.A.7.2.	Se tiene problemas en el mecanismo de enrollamiento del cable acerado del tambor.	Cada 250 hrs	Inspección y ajustes mecánicos de enconder.	Inspección y ajuste	250 hrs	Soporte Eléctrico
				1.A.8	Desalineamiento del motor de empuje	Evidente: Si. Descripción del efecto: Hay fractura en el acoplamiento mecánico entre el eje del motor y el eje del PDT	1.A.8.1.	Se tiene fractura en la masa del acoplamiento entre el eje del motor de empuje y PDT.	Cada 6000 hrs	Verificación del alineamiento láser entre eje del motor de empuje y PDT.	Alineamiento láser	3000 hrs	Soporte Predictivo.
							1.A.8.2.	Recalentamiento del acople mecánico entre eje de motor de empuje y PDT.	Cada 6000 hrs	Lubricación manual de acoplamiento mecánico	Lubricación	3000 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.8.3.	Fractura de pernos de unión de acople entre motor de empuje y PDT.	Cada 6000 hrs	Retorqueo de pernos de acople entre motor de empuje y PDT	Inspección y ajuste	3000 hrs	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE - Sistema Hydracrowd (Continuación)

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
1. SISTEMA HYDRACROWD													
1	Ser capaz de realizar movimientos de extensión y retracción en un rango de 120 a 130 ft/min	1.A	No realiza movimientos de extensión/retracción	1.A.9	Falla en rodamientos de transmisión de mando de Bombas (PDT)	Evidente: No. Descripción del efecto: Hay pérdida de lubricación en los rodamientos	1.A.9.1.	Daño en rodamientos internos de PDT por falta de lubricación	Cada 6000 hrs	Análisis vibracional de rodamientos	Análisis Vibracional	3000 hrs	Soporte Predictivo.
				1.A.10	Bajo nivel de aceite en PDT	Evidente: Si. Descripción del efecto: El nivel de aceite en el PDT por excesivo consumo.	1.A.10.1.	Fuga de aceite por tuberías y codos de transmisión de mando de bombas	Cada 6000 hrs	Ajuste de pernos de anclaje de PDT	Inspección y ajuste	3000 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.10.2.	Excesivo consumo por recalentamiento de aceite.	Cada 500 hrs	Análisis de partículas de desgaste interno de componente	Monitoreo de aceite	500 hrs	Soporte Predictivo.
							1.A.10.3.		Cada 1500 hrs	Sopleteo de enfriadores de aceite de transmisión de mando de Bombas (PDT)	Limpieza	500 hrs	Soporte Mecánico
		2.A	Realiza movimientos de extensión/retracción a una velocidad menor a los 120 ft/min	1.A.11	Perdida en la calibración de límites	Evidente: No. Descripción del efecto: Des calibración de límites por pérdida de energía en el equipo.	1.A.11.1	Perdida en los límites de calibración evita que el operador pueda realizar movimientos de levante, empuje y recoge.	Aleatorio	Capacitación al operador en calibración de límites de implemento.	Entrenamiento	Aleatorio	Soporte Eléctrico
				2.A.1	Fuga de aceite a través de válvulas y sensores de Manifold de Cilindro Hydracrowd	Evidente: Si. Descripción del efecto: La fuga de aceite a través de las válvulas de control direccional, alivio y sensores del Manifold del Cilindro Hydracrowd generar lentitud en el movimiento del cilindro.	2.A.1.1.	Ajuste inadecuado o perdida de ajuste por vibración en sensores y válvulas de control del Manifold del Cilindro Hydracrowd.	Cada 3 meses	Inspección de fugas en manifold.	Inspección	500 hrs	Soporte Mecánico
							2.A.1.2.	Temperatura de aceite por encima de los 80°C genera daños por erosión en los sellos de hermeticidad de las válvulas y sensores.	Cada 3 meses	Sopleteo de enfriadores de aceite hidráulico.	Limpieza	250 hrs	Soporte Mecánico
				2.A.2	Fuga de aceite por tapón de purga de Cilindro Hydracrowd	Evidente: Si. Descripción del efecto: La fuga de aceite a través del tapón de purga del Cilindro Hydracrowd	2.A.2.1.	Ajuste inadecuado o perdida de ajuste por vibración en tapón de purga lado vástago de Cilindro Hydracrowd.	Cada 6 meses	Inspección de fugas por tapón de purga. Soldeo de tapón de purga cuando se instala el Cilindro	Inspección	500 hrs	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE - Sistema Hydracrowd (Continuación)

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
1. SISTEMA HYDRACROWD													
1	Ser capaz de realizar movimientos de extensión y retracción en un rango de 120 a 130 ft/min	2.A	Realiza movimientos de extensión/retracción a una velocidad menor a los 120 ft/min	2.A.3	Contaminación de aceite hidráulico.	Evidente: No. Descripción del efecto: El desgaste interno de componentes del sistema Hydracrowd genera saturación en el filtro de recirculación de aceite hidráulico.	2.A.3.1.	Saturación de filtro de recirculación por desgaste interno de componentes de todo el sistema hidráulico y/o contaminación externa de aceite hidráulico durante abastecimiento, este no cumple con código de contaminación adecuado.	Cada 3 meses	Cambio de filtro de recirculación.	Cambio de componente	1500 hrs	Soporte Mecánico
				2.A.4	Calentamiento de aceite hidráulico	Evidente: No. Descripción del efecto: La temperatura de trabajo del aceite hidráulico supera los 80°C	2.A.4.1.	El valor del flujo de aceite que va hacia el enfriador es menor a los 17 GPM	Cada 12 meses	Verificación del flujo de enfriador.	Inspección	250 hrs	Soporte Mecánico
							2.A.4.2.	El ventilador de aceite hidráulico no gira a las RPM necesarias para enfriar la temperatura del aceite hidráulico.	Cada 6 meses	Medición de las RPM de ventiladores de enfriador de aceite	Metrología	3000 hrs	Soporte Mecánico
							2.A.4.3.	Los enfriadores de aceite hidráulico se encuentran saturados con polvo, lo cuál impide la transferencia correcta de calor.	Cada 250 hrs	Sopleteo de enfriadores de aceite hidráulico.	Limpieza	250 hrs	Soporte Mecánico
				2.A.5	Baja presión en Bombas Principales Hydracrowd	Evidente: No. Descripción del efecto: La presión de alivio de las Bombas Hydracrowd no alcanzan los 3700 psi .	2.A.5.1.	Daño interno en Bombas Principales Hydracrowd por cavitación.	Cada 24 meses	Medición de presión de salida de Bombas Hydracrowd	Metrología	500 hrs	Soporte Mecánico
							2.A.5.2.	Daño interno en sellos de válvulas PUV genera pérdida de flujo de aceite hidráulico hacia el cilindro hidráulico.	Cada 6 meses	Cambio de sellos intenos de válvula PUV.	Cambio de componente	3000 hrs	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE - Sistema Hydracrowd (Continuación)

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
1. SISTEMA HYDRACROWD													
1	Ser capaz de realizar movimientos de extensión y retracción en un rango de 120 a 130 ft/min	2.A	Realiza movimientos de extensión/retracción a una velocidad menor a los 120 ft/min	2.A.6	Corrimiento de Cilindro Hydracrowd	Evidente: Si. Descripción del efecto: El daño interno del sello del pistón del cilindro genera un <i>bypass</i> de aceite hidráulico entre la cámara del émbolo y vástago, generando corrimiento del cilindro en vacío y con carga.	2.A.6.1.	Daño interno en sello de pistón por efecto <i>dieseling</i> o daños por elementos contaminantes en el aceite hidráulico.	Cada 24 meses	Cambio de cilindro Hydracrowd.	Cambio de componente	12000 hrs	Soporte Mecánico
				2.A.7	Daño interno en acumuladores de nitrógeno RECV y CECV	Evidente: No. Descripción del efecto: Debido a la pérdida interna de nitrógeno en los acumuladores, los movimientos de extensión y retracción del cilindro se hacen lentos.	2.A.7.1.	Descarga de nitrógeno en acumuladores por tiempo de uso.	Cada 3 meses	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico
							2.A.7.2.	Daños en <i>bladder</i> interno de acumuladores tipo vejiga por sobrepresión de aceite en lado émbolo y lado vástago.	Cada 3 meses	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 1 Hoja de registro AMFE – Sistema implementos

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
2. IMPLEMENTOS													
1	Ser capaz de realizar la apertura y cierre de la compuerta de Dipper	1.A	No realiza correctamente la apertura o cierre de la compuerta de Dipper	1.A.1	Desgaste de inserto de barretón	Evidente: Si. Descripción del efecto: Daños considerables en Barretón por desgaste excesivo.	1.A.1.1.	Desgaste excesivo en inserto de Barretón	500 hrs	Inspección y cambio por estrategia	Inspección y cambio de componente	Rotación cada 250 hrs Cambio cada 500 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.1.2.	Defectos en material de fabricación de inserto de Barretón	Aleatorio	Aplicación de mejora Latch Free	Service Letter	-	Soporte Mecánico
				1.A.2	Rotura de inserto de barretón	Evidente: Si. Descripción del efecto: Rotura total o parcial del inserto de barretón por mala calidad	1.A.2.1.	Defectos en el material de fabricación del inserto de barretón	125 hrs	Aplicación de mejora Latch Free	Service Letter	-	Soporte Mecánico
										Adquisición de elemento de desgaste con mejora en material de fabricación	Cambio de componente	Cambio cada 500 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.3	Rotura de guidores inferiores y superiores de barretón	Evidente: Si. Descripción del efecto: Atascamiento de barretón por desprendimiento o de guidores inferiores y/o superiores	1.A.3.1.	Desprendimiento de guidores inferiores y superiores	Aleatorio	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico
										Soldadura de guidores inferiores y superiores en instalación.	Cambio de componente	Cambio cada 1500 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.4	Sobrecalentamiento de Motor Dipper Trip	Evidente: Si. Descripción del efecto: Tripeo de Motor por sobrecalentamiento	1.A.4.1.	Sobrexigencia del Motor de apertura de compuerta	Aleatorio	Entrenamiento en correctos modos de operación	Entrenamiento	Constante	Entrenamiento Mina

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE – Sistema implementos

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
2. IMPLEMENTOS													
1	Ser capaz de realizar la apertura y cierre de la compuerta de Dipper	1.A	No realiza la apertura de compuerta de Dipper	1.A.5	Rotura de espada de apertura de compuerta	Evidente: Si. Descripción del efecto: Rotura de espada de apertura de compuerta.	1.A.5.1.	Rotura de espada de compuerta por sobrexigencia para la apertura de compuerta	1500 hrs	Aplicación de mejora Latch Free	Service Letter	-	Soporte Mecánico
				1.A.6	Soltura de seguros de cable de apertura de compuerta	Evidente: Si. Descripción del efecto: Soltura de grilletes de cable de apertura de compuerta	1.A.6.1.	Vibración en tuercas de sujeción de grilletes de apertura de compuerta genera soltura.	250 hrs	Inspección y cambio por estrategia	Cambio de componente	Cambio cada 1500 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.7	Daño en el sistema de frenado de compuerta	Evidente: Si. Descripción del efecto: El sistema de frenado de apertura de compuerta pierde regulación,	1.A.7.1.	Perdida de ajuste en tuerca de regulación de sistema de freno de compuerta.	500 hrs	Soldadura de tuercas en seguros de compuerta	Cambio de componente	Cambio cada 1500 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.8	Rotura en cable de apertura de compuerta	Evidente: Si. Descripción del efecto: Rotura de Cable Dipper Trip por rozamiento con compuerta	1.A.8.1.	Rozamiento de cable de compuerta con estructura de compuerta	500 hrs	Aplicación de mejora Wet Disk Snubber	Service Letter	-	Soporte Mecánico
2	Ser capaz de penetrar el banco para el carguío de 120 toneladas de material por pase.	2.A.	Caída o desgaste excesivo de GETS	2.A.1.	Caída de GETS	Evidente: Si. Descripción del efecto: Caída de GETS por soltura en el seguro del adaptador	2.A.1.1.	Vibración genera soltura en pernos de seguros de adaptadores de GETS	Aleatorio	Aplicación de mejora en sistema de apertura de compuerta.	Cambio de componente	Cambio cada 1500 hrs	Soporte Mecánico
										Retorqueo de seguros de adaptadores	Ajuste	Cambio cada 250 hrs Retorqueo cada 125 hrs	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 2 Hoja de registro AMFE – Sistema aire

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia Modo de Falla	Actividad de mantenimiento	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
3. SISTEMA AIRE													
1	Ser capaz de suministrar aire comprimido a razón de no menos de 110 psi.	1.A	Baja presión de aire en el sistema.	1.A.1	Fuga de aire comprimido por líneas de abastecimiento.	Evidente: Si. Descripción del efecto: La presión de aire en el sistema no es capaz de alcanzar su valor requerido puesto que se tiene una fuga por algún punto del equipo.	1.A.1.1.	Líneas de aire con excesivo rozamiento	Aleatorio	Tarea a condición	Inspección	500 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.1.2.	Líneas de aire resacas por excesivo tiempo de vida	6000 hrs	Cambio por estrategia	Cambio de componente	Cambio cada 6000 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.2.	Baja presión de aire para liberación de frenos	Evidente: Si. Descripción del efecto: El aire necesario para la liberación del paquete de freno de los motores eléctricos no es la suficiente.	1.A.2.1.	Daño en válvula de bloqueo de aire de Frenos	12000 hrs	Cambio por estrategia	Cambio de componente	Cambio cada 12000 hrs	Soporte Mecánico
							1.A.2.2.	Rotura de sellos de hermeticidad de Frenos	12000 hrs	Tarea a condición	Cambio de componente	Cambio cada 6000 hrs	Soporte Mecánico
				1.A.3	Rotura de fajas de compresor de aire	Evidente: Si. Descripción del efecto: Las fajas en "V" encargadas de transferir movimiento entre la polea del motor eléctrico y la polea del compresor se rompen.	1.A.3.1.	Desalineamiento entre poleas	1500 hrs	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico
							1.A.3.2.	Tipo o cantidad de poleas utilizadas inadecuada	Aleatorio	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico
							1.A.3.3.	Desgaste excesivo en fajas de compresor de aire	1500 hrs	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE – Sistema de aire

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
3. SISTEMA AIRE													
1	Ser capaz de suministrar aire comprimido a razón de no menos de 110 psi.	1.A	Baja presión de aire en el sistema.	1.A.4.	Falla en válvula reguladora de aire del sistema	Evidente: Si. Descripción del efecto: La válvula reguladora de presión de aire sufre daños internos en el resorte lo que impide que la presión de aire se incremente.	1.A.4.1.	Daño interno en el resorte de válvula reguladora de presión de aire.	1500 hrs	Aplicación de mejora	Service Letter	-	Soporte Mecánico
				1.A.5.	Falla en sensor de presión de aire	Evidente: No. Descripción del efecto: El PLC identifica una presión baja de aire a pesar de que el compresor se encuentra funcionando.	1.A.5.1.	Daño en el sensor principal de presión de aire.	6000 hrs	Tarea a condición	Cambio de componente	Cambio cada 6000 hrs	Soporte Eléctrico
				1.A.6.	Bajo nivel en tanque de grasa	Evidente: No. Descripción del efecto: El bajo nivel de grasa en el tanque genera que las bombas neumáticas trabajen en vacío, consumiendo todo el aire comprimido del sistema en poco tiempo.	1.A.6.1.	Bajo nivel de grasa en los tanques de abastecimiento de lubricante del equipo.	Diario	Tarea a condición	Inspección visual	Diario (Operador del equipo)	Soporte Mecánico / Operador del equipo

Fuente: Elaboración propia

Hoja de registro AMFE – Sistema de aire

#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efectos de Falla	#	Causa Potencial	Frecuencia de ocurrencia del Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Personal
3. SISTEMA AIRE													
1	Ser capaz de suministrar aire comprimido a razón de no menos de 110 psi.	2.A.	Compresor de aire no enciende	2.A.1	Falla en el control electrónico del compresor	Evidente: No. Descripción del efecto: El compresor de aire no es capaz de arrancar puesto que se tiene una falla en el tablero de control electrónico o en la alimentación eléctrica.	2.A.1.1.	Falla en contactores principales y auxiliares	Aleatorio	Tarea a condición	Cambio de componente	Cambio cada 6000 hrs	Soporte Eléctrico
							2.A.1.2.	Falla en master switch de arranque	Aleatorio	Tarea a condición	Inspección	Cada 500 hrs	Soporte Eléctrico
				2.A.2.	Sobrevoltaje en la alimentación de compresor	Evidente: No. Descripción del efecto: Un sobre voltaje en el sistema eléctrico de alimentación del compresor genera daños.	2.A.2.1.	Daño en fusibles y varistores de protección del compresor de aire	Aleatorio	Tarea a condición	Cambio de componente	Cambio cada 6000 hrs	Soporte Eléctrico
				2.A.3.	Nivel bajo de aceite en compresor	Evidente: Si. Descripción del efecto: El sistema de protección del equipo no permite arrancar el compresor de aire cuando se detecta bajos niveles de lubricante en su interior	2.A.3.1.	Fuga de aceite de compresor	Diario	Tarea a condición	Inspección	Diario (Operador del equipo)	Soporte Mecánico / Operador del equipo
							2.A.3.2.	Bajo nivel de aceite por consumo	Diario	Tarea a condición	Inspección	Diario (Operador del equipo)	Soporte Mecánico / Operador del equipo

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4: HORÓMETRO DE HISTORIAL DE FALLA

Tabla 10 - Historial de fallas Sistema Implementos - SH001

Sistema	IMPLEMENTOS				
Sub Sistema	APERTURA DE COMPUERTA				
Equipo	Item	Horómetro de Falla [Hrs]	F(t)	X Ln(t)	Y Ln(-Ln(1-F(t)))
SH001	1	11851	0.01	9.38	-5.14
SH001	2	12010	0.01	9.39	-4.24
SH001	3	12099	0.02	9.40	-3.78
SH001	4	12300	0.03	9.42	-3.46
SH001	5	12372	0.04	9.42	-3.21
SH001	6	12712	0.05	9.45	-3.02
SH001	7	12950	0.06	9.47	-2.85
SH001	8	13053	0.06	9.48	-2.71
SH001	9	13110	0.07	9.48	-2.58
SH001	10	13139	0.08	9.48	-2.47
SH001	11	13184	0.09	9.49	-2.37
SH001	12	13330	0.10	9.50	-2.27
SH001	13	13342	0.11	9.50	-2.19
SH001	14	13646	0.11	9.52	-2.10
SH001	15	13665	0.12	9.52	-2.03
SH001	16	13709	0.13	9.53	-1.96
SH001	17	13751	0.14	9.53	-1.89
SH001	18	14216	0.15	9.56	-1.83
SH001	19	14274	0.16	9.57	-1.77
SH001	20	14380	0.16	9.57	-1.71
SH001	21	14532	0.17	9.58	-1.66
SH001	22	14660	0.18	9.59	-1.61
SH001	23	14678	0.19	9.59	-1.56
SH001	24	14826	0.20	9.60	-1.51
SH001	25	15012	0.21	9.62	-1.46
SH001	26	15023	0.22	9.62	-1.42
SH001	27	15368	0.22	9.64	-1.37
SH001	28	15530	0.23	9.65	-1.33
SH001	29	15682	0.24	9.66	-1.29
SH001	30	15970	0.25	9.68	-1.25
SH001	31	16106	0.26	9.69	-1.21
SH001	32	16389	0.27	9.70	-1.18
SH001	33	16742	0.27	9.73	-1.14
SH001	34	17175	0.28	9.75	-1.10
SH001	35	17286	0.29	9.76	-1.07
SH001	36	17452	0.30	9.77	-1.03
SH001	37	17462	0.31	9.77	-1.00
SH001	38	17477	0.32	9.77	-0.97
SH001	39	17484	0.32	9.77	-0.94
SH001	40	17603	0.33	9.78	-0.91
SH001	41	17633	0.34	9.78	-0.88
SH001	42	18102	0.35	9.80	-0.84
SH001	43	18438	0.36	9.82	-0.82
SH001	44	18444	0.37	9.82	-0.79
SH001	45	18664	0.37	9.83	-0.76
SH001	46	18896	0.38	9.85	-0.73
SH001	47	19371	0.39	9.87	-0.70
SH001	48	19616	0.40	9.88	-0.67
SH001	49	19766	0.41	9.89	-0.65
SH001	50	19880	0.42	9.90	-0.62
SH001	51	20315	0.42	9.92	-0.59
SH001	52	20453	0.43	9.93	-0.57
SH001	53	20565	0.44	9.93	-0.54
SH001	54	20625	0.45	9.93	-0.52

SH001	55	20781	0.46	9.94	-0.49
SH001	56	20783	0.47	9.94	-0.46
SH001	57	21126	0.47	9.96	-0.44
SH001	58	21135	0.48	9.96	-0.42
SH001	59	21187	0.49	9.96	-0.39
SH001	60	21386	0.50	9.97	-0.37
SH001	61	21494	0.51	9.98	-0.34
SH001	62	22268	0.52	10.01	-0.32
SH001	63	22392	0.53	10.02	-0.29
SH001	64	22540	0.53	10.02	-0.27
SH001	65	22577	0.54	10.02	-0.25
SH001	66	23423	0.55	10.06	-0.22
SH001	67	24153	0.56	10.09	-0.20
SH001	68	24164	0.57	10.09	-0.18
SH001	69	24749	0.58	10.12	-0.15
SH001	70	24966	0.58	10.13	-0.13
SH001	71	24976	0.59	10.13	-0.11
SH001	72	25324	0.60	10.14	-0.09
SH001	73	25671	0.61	10.15	-0.06
SH001	74	25771	0.62	10.16	-0.04
SH001	75	25782	0.63	10.16	-0.02
SH001	76	26402	0.63	10.18	0.01
SH001	77	27210	0.64	10.21	0.03
SH001	78	27278	0.65	10.21	0.05
SH001	79	27486	0.66	10.22	0.07
SH001	80	28010	0.67	10.24	0.10
SH001	81	28435	0.68	10.26	0.12
SH001	82	28600	0.68	10.26	0.14
SH001	83	28822	0.69	10.27	0.17
SH001	84	28834	0.70	10.27	0.19
SH001	85	28857	0.71	10.27	0.21
SH001	86	29086	0.72	10.28	0.24
SH001	87	29447	0.73	10.29	0.26
SH001	88	30160	0.73	10.31	0.28
SH001	89	30330	0.74	10.32	0.31
SH001	90	30533	0.75	10.33	0.33
SH001	91	31292	0.76	10.35	0.35
SH001	92	31545	0.77	10.36	0.38
SH001	93	31625	0.78	10.36	0.40
SH001	94	31636	0.78	10.36	0.43
SH001	95	31690	0.79	10.36	0.45
SH001	96	31832	0.80	10.37	0.48
SH001	97	32007	0.81	10.37	0.51
SH001	98	32262	0.82	10.38	0.53
SH001	99	32552	0.83	10.39	0.56
SH001	100	32653	0.84	10.39	0.59
SH001	101	32664	0.84	10.39	0.62
SH001	102	32665	0.85	10.39	0.65
SH001	103	32962	0.86	10.40	0.68
SH001	104	34166	0.87	10.44	0.71
SH001	105	34554	0.88	10.45	0.74
SH001	106	34735	0.89	10.46	0.77
SH001	107	34874	0.89	10.46	0.81
SH001	108	35280	0.90	10.47	0.84
SH001	109	36594	0.91	10.51	0.88
SH001	110	36867	0.92	10.52	0.92
SH001	111	37130	0.93	10.52	0.96
SH001	112	37325	0.94	10.53	1.01
SH001	113	37485	0.94	10.53	1.06
SH001	114	37932	0.95	10.54	1.11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 - Historial de fallas Sistema Implementos - SH002

Sistema	IMPLEMENTOS				
Sub Sistema	APERTURA DE COMPUERTA				
Equipo	Item	Horómetro de Falla [Hrs]	F(t)	X Ln(t)	Y Ln(-Ln(1-F(t)))
SH002	1	10401	0.01	9.25	-4.85
SH002	2	10435	0.02	9.25	-3.95
SH002	3	10447	0.03	9.25	-3.48
SH002	4	10458	0.04	9.26	-3.16
SH002	5	10822	0.05	9.29	-2.92
SH002	6	10902	0.06	9.30	-2.72
SH002	7	10976	0.07	9.30	-2.55
SH002	8	11735	0.09	9.37	-2.41
SH002	9	11849	0.10	9.38	-2.28
SH002	10	11858	0.11	9.38	-2.16
SH002	11	12002	0.12	9.39	-2.06
SH002	12	12053	0.13	9.40	-1.96
SH002	13	12140	0.14	9.40	-1.88
SH002	14	12927	0.15	9.47	-1.79
SH002	15	13118	0.16	9.48	-1.72
SH002	16	13254	0.18	9.49	-1.64
SH002	17	13276	0.19	9.49	-1.58
SH002	18	13521	0.20	9.51	-1.51
SH002	19	13605	0.21	9.52	-1.45
SH002	20	13626	0.22	9.52	-1.39
SH002	21	14110	0.23	9.55	-1.33
SH002	22	14130	0.24	9.56	-1.28
SH002	23	15914	0.25	9.67	-1.23
SH002	24	15958	0.27	9.68	-1.18
SH002	25	16270	0.28	9.70	-1.13
SH002	26	16276	0.29	9.70	-1.08
SH002	27	16871	0.30	9.73	-1.04
SH002	28	16972	0.31	9.74	-0.99
SH002	29	17034	0.32	9.74	-0.95
SH002	30	17741	0.33	9.78	-0.91
SH002	31	18006	0.34	9.80	-0.87
SH002	32	18394	0.35	9.82	-0.83
SH002	33	18398	0.37	9.82	-0.79
SH002	34	18897	0.38	9.85	-0.75
SH002	35	19680	0.39	9.89	-0.71
SH002	36	19943	0.40	9.90	-0.67
SH002	37	20272	0.41	9.92	-0.64
SH002	38	20658	0.42	9.94	-0.60
SH002	39	21990	0.43	10.00	-0.57
SH002	40	23746	0.44	10.08	-0.53
SH002	41	24666	0.46	10.11	-0.50
SH002	42	25764	0.47	10.16	-0.46
SH002	43	26498	0.48	10.18	-0.43
SH002	44	26898	0.49	10.20	-0.40
SH002	45	26945	0.50	10.20	-0.37
SH002	46	26966	0.51	10.20	-0.33
SH002	47	27474	0.52	10.22	-0.30
SH002	48	27780	0.53	10.23	-0.27
SH002	49	28056	0.54	10.24	-0.24
SH002	50	28685	0.56	10.26	-0.21
SH002	51	28774	0.57	10.27	-0.18
SH002	52	28861	0.58	10.27	-0.15
SH002	53	29677	0.59	10.30	-0.12
SH002	54	30322	0.60	10.32	-0.09
SH002	55	30817	0.61	10.34	-0.06
SH002	56	30828	0.62	10.34	-0.02

SH002	57	30839	0.63	10.34	0.01
SH002	58	30841	0.65	10.34	0.04
SH002	59	31008	0.66	10.34	0.07
SH002	60	31527	0.67	10.36	0.10
SH002	61	31616	0.68	10.36	0.13
SH002	62	31950	0.69	10.37	0.16
SH002	63	32036	0.70	10.37	0.19
SH002	64	32505	0.71	10.39	0.22
SH002	65	32516	0.72	10.39	0.25
SH002	66	32548	0.73	10.39	0.28
SH002	67	32612	0.75	10.39	0.32
SH002	68	32678	0.76	10.39	0.35
SH002	69	32769	0.77	10.40	0.38
SH002	70	32901	0.78	10.40	0.41
SH002	71	32967	0.79	10.40	0.45
SH002	72	32987	0.80	10.40	0.48
SH002	73	33400	0.81	10.42	0.52
SH002	74	33468	0.82	10.42	0.55
SH002	75	33551	0.84	10.42	0.59
SH002	76	33898	0.85	10.43	0.63
SH002	77	34109	0.86	10.44	0.67
SH002	78	34272	0.87	10.44	0.71
SH002	79	34700	0.88	10.45	0.75
SH002	80	35485	0.89	10.48	0.80
SH002	81	35565	0.90	10.48	0.85
SH002	82	35914	0.91	10.49	0.90
SH002	83	36050	0.93	10.49	0.95
SH002	84	36372	0.94	10.50	1.01
SH002	85	36452	0.95	10.50	1.08
SH002	86	36625	0.96	10.51	1.16
SH002	87	36745	0.97	10.51	1.25
SH002	88	37027	0.98	10.52	1.38
SH002	89	37590	0.99	10.53	1.58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 - Historial de fallas Sistema Hydracrowd - SH001

Sistema	HYDRACROWD				
Sub Sistema	EMPUJE HIDRÁULICO				
Equipo	Item	Horómetro de Falla [Hrs]	F(t)	X Ln(t)	Y Ln(-Ln(1-F(t)))
SH001	1	11665	0.01	9.36	-4.71
SH001	2	11944	0.02	9.39	-3.82
SH001	3	12274	0.03	9.42	-3.35
SH001	4	13300	0.05	9.50	-3.03
SH001	5	13688	0.06	9.52	-2.78
SH001	6	13820	0.07	9.53	-2.58
SH001	7	13853	0.09	9.54	-2.42
SH001	8	13864	0.10	9.54	-2.27
SH001	9	13887	0.11	9.54	-2.14
SH001	10	13907	0.12	9.54	-2.02
SH001	11	14470	0.14	9.58	-1.92
SH001	12	16557	0.15	9.71	-1.82
SH001	13	16654	0.16	9.72	-1.73
SH001	14	16897	0.17	9.73	-1.65
SH001	15	17064	0.19	9.74	-1.57
SH001	16	17688	0.20	9.78	-1.50
SH001	17	18529	0.21	9.83	-1.43
SH001	18	18658	0.23	9.83	-1.36
SH001	19	18664	0.24	9.83	-1.30
SH001	20	18671	0.25	9.83	-1.24
SH001	21	18674	0.26	9.83	-1.18
SH001	22	18680	0.28	9.84	-1.13
SH001	23	18864	0.29	9.85	-1.07
SH001	24	18865	0.30	9.85	-1.02
SH001	25	18889	0.32	9.85	-0.97
SH001	26	20374	0.33	9.92	-0.92
SH001	27	21606	0.34	9.98	-0.88
SH001	28	21703	0.35	9.99	-0.83
SH001	29	21819	0.37	9.99	-0.79
SH001	30	22715	0.38	10.03	-0.74
SH001	31	22749	0.39	10.03	-0.70
SH001	32	22759	0.40	10.03	-0.66
SH001	33	22779	0.42	10.03	-0.62
SH001	34	22898	0.43	10.04	-0.58
SH001	35	22904	0.44	10.04	-0.54
SH001	36	23097	0.46	10.05	-0.50
SH001	37	23118	0.47	10.05	-0.46
SH001	38	23552	0.48	10.07	-0.42
SH001	39	23697	0.49	10.07	-0.38
SH001	40	23707	0.51	10.07	-0.35
SH001	41	24296	0.52	10.10	-0.31
SH001	42	24308	0.53	10.10	-0.28
SH001	43	24317	0.54	10.10	-0.24
SH001	44	24319	0.56	10.10	-0.20
SH001	45	24603	0.57	10.11	-0.17
SH001	46	24702	0.58	10.11	-0.13
SH001	47	24708	0.60	10.11	-0.10
SH001	48	30454	0.61	10.32	-0.06
SH001	49	35710	0.62	10.48	-0.03
SH001	50	35734	0.63	10.48	0.00
SH001	51	35842	0.65	10.49	0.04
SH001	52	35864	0.66	10.49	0.07
SH001	53	35963	0.67	10.49	0.11
SH001	54	35986	0.68	10.49	0.14
SH001	55	35997	0.70	10.49	0.18
SH001	56	36060	0.71	10.49	0.21

SH001	57	36122	0.72	10.49	0.25
SH001	58	36206	0.74	10.50	0.29
SH001	59	36262	0.75	10.50	0.32
SH001	60	36262	0.76	10.50	0.36
SH001	61	36513	0.77	10.51	0.40
SH001	62	36534	0.79	10.51	0.44
SH001	63	37366	0.80	10.53	0.48
SH001	64	37495	0.81	10.53	0.52
SH001	65	37527	0.83	10.53	0.56
SH001	66	37571	0.84	10.53	0.60
SH001	67	37583	0.85	10.53	0.64
SH001	68	37613	0.86	10.54	0.69
SH001	69	37615	0.88	10.54	0.74
SH001	70	37819	0.89	10.54	0.79
SH001	71	38120	0.90	10.55	0.84
SH001	72	39074	0.91	10.57	0.90
SH001	73	39241	0.93	10.58	0.96
SH001	74	39331	0.94	10.58	1.03
SH001	75	39443	0.95	10.58	1.12
SH001	76	39458	0.97	10.58	1.21
SH001	77	39470	0.98	10.58	1.34
SH001	78	39491	0.99	10.58	1.55

Fuente: Elaboración propia

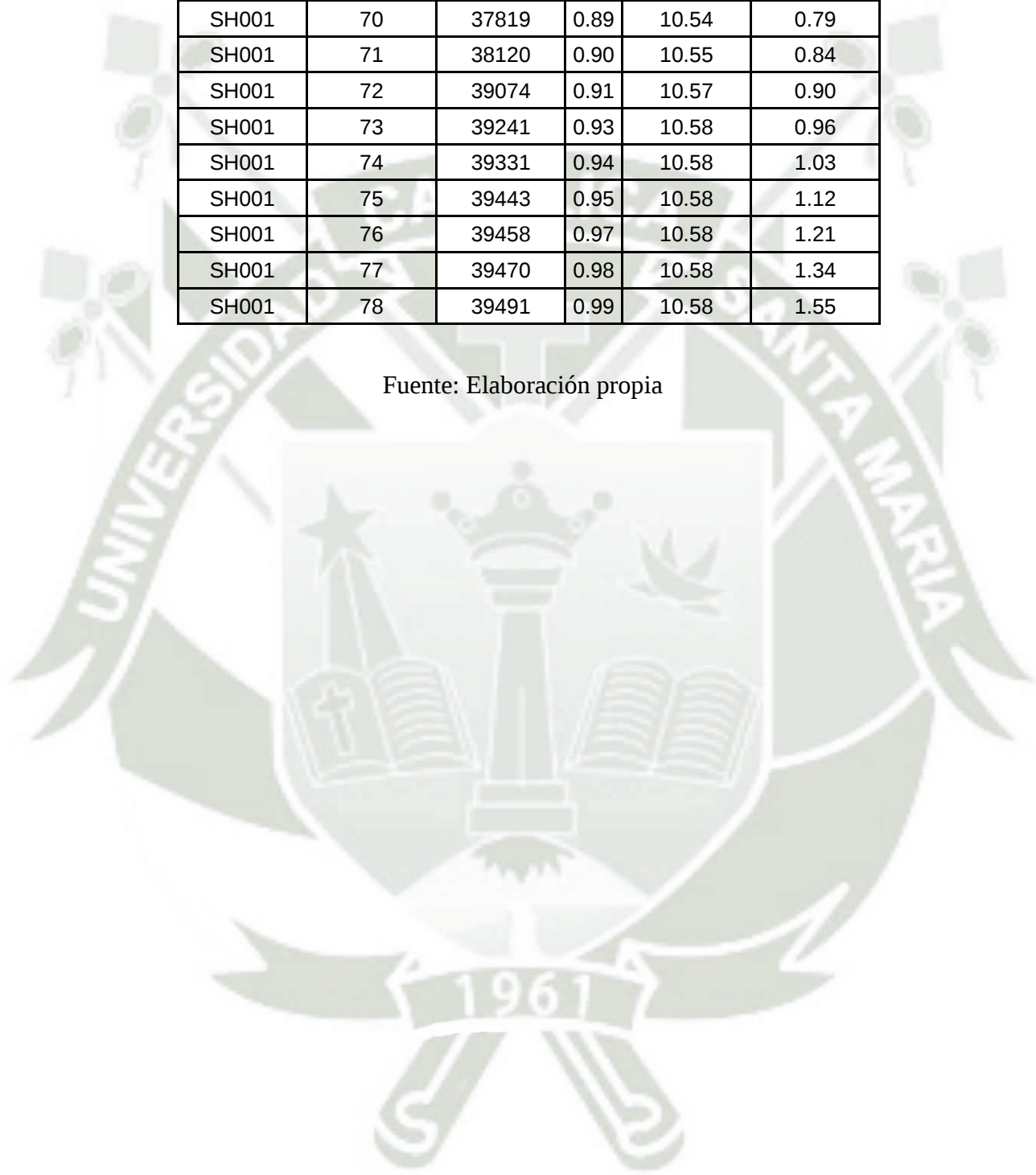


Tabla 13 - Historial de fallas Sistema Hydracrowd - SH002

Sistema	HYDRACROWD				
Sub Sistema	CILINDRO HYDRACROWD				
Equipo	Item	Horómetro de Falla [Hrs]	F(t)	X Ln(t)	Y Ln(-Ln(1-F(t)))
SH002	1	10065	0.01	9.22	-4.35
SH002	2	11130	0.03	9.32	-3.45
SH002	3	16456	0.05	9.71	-2.98
SH002	4	16468	0.07	9.71	-2.65
SH002	5	16480	0.09	9.71	-2.40
SH002	6	16491	0.10	9.71	-2.20
SH002	7	16509	0.12	9.71	-2.03
SH002	8	17162	0.14	9.75	-1.88
SH002	9	17198	0.16	9.75	-1.75
SH002	10	17359	0.18	9.76	-1.63
SH002	11	17410	0.20	9.76	-1.52
SH002	12	17446	0.22	9.77	-1.42
SH002	13	17613	0.23	9.78	-1.32
SH002	14	17702	0.25	9.78	-1.24
SH002	15	17756	0.27	9.78	-1.16
SH002	16	18029	0.29	9.80	-1.08
SH002	17	18032	0.31	9.80	-1.00
SH002	18	18141	0.33	9.81	-0.93
SH002	19	18420	0.34	9.82	-0.86
SH002	20	18588	0.36	9.83	-0.80
SH002	21	18823	0.38	9.84	-0.74
SH002	22	18974	0.40	9.85	-0.68
SH002	23	19028	0.42	9.85	-0.62
SH002	24	19045	0.44	9.85	-0.56
SH002	25	19504	0.45	9.88	-0.50
SH002	26	19535	0.47	9.88	-0.45
SH002	27	20175	0.49	9.91	-0.39
SH002	28	20232	0.51	9.92	-0.34
SH002	29	20876	0.53	9.95	-0.29
SH002	30	21141	0.55	9.96	-0.24
SH002	31	21662	0.56	9.98	-0.19
SH002	32	22640	0.58	10.03	-0.13
SH002	33	22777	0.60	10.03	-0.08
SH002	34	26543	0.62	10.19	-0.03
SH002	35	26733	0.64	10.19	0.02
SH002	36	28590	0.66	10.26	0.07
SH002	37	28806	0.67	10.27	0.12
SH002	38	28861	0.69	10.27	0.17
SH002	39	28902	0.71	10.27	0.22
SH002	40	29341	0.73	10.29	0.27
SH002	41	31663	0.75	10.36	0.32
SH002	42	31675	0.77	10.36	0.37
SH002	43	31695	0.78	10.36	0.43
SH002	44	34265	0.80	10.44	0.49
SH002	45	34425	0.82	10.45	0.54
SH002	46	34572	0.84	10.45	0.61
SH002	47	34888	0.86	10.46	0.67
SH002	48	35640	0.88	10.48	0.74
SH002	49	35661	0.90	10.48	0.81
SH002	50	35680	0.91	10.48	0.90
SH002	51	36667	0.93	10.51	0.99
SH002	52	37128	0.95	10.52	1.10
SH002	53	37224	0.97	10.52	1.24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 - Historial de fallas Sistema Aire - SH001

Sistema	AIRE				
Sub Sistema	COMPRESOR				
Equipo	Item	Horómetro de Falla [Hrs]	F(t)	X Ln(t)	Y Ln(-Ln(1-F(t)))
SH001	1	12409	0.01	9.43	-4.63
SH001	2	13907	0.02	9.54	-3.74
SH001	3	14149	0.04	9.56	-3.27
SH001	4	14183	0.05	9.56	-2.95
SH001	5	14195	0.06	9.56	-2.70
SH001	6	14448	0.08	9.58	-2.50
SH001	7	14729	0.09	9.60	-2.33
SH001	8	14730	0.11	9.60	-2.19
SH001	9	14735	0.12	9.60	-2.06
SH001	10	14737	0.13	9.60	-1.94
SH001	11	14750	0.15	9.60	-1.83
SH001	12	14762	0.16	9.60	-1.74
SH001	13	14770	0.18	9.60	-1.65
SH001	14	14773	0.19	9.60	-1.56
SH001	15	14780	0.20	9.60	-1.48
SH001	16	14783	0.22	9.60	-1.41
SH001	17	15450	0.23	9.65	-1.34
SH001	18	16929	0.24	9.74	-1.27
SH001	19	17044	0.26	9.74	-1.21
SH001	20	18727	0.27	9.84	-1.15
SH001	21	19057	0.29	9.86	-1.09
SH001	22	20676	0.30	9.94	-1.03
SH001	23	21725	0.31	9.99	-0.98
SH001	24	21858	0.33	9.99	-0.93
SH001	25	21969	0.34	10.00	-0.87
SH001	26	22517	0.35	10.02	-0.82
SH001	27	23274	0.37	10.06	-0.78
SH001	28	23290	0.38	10.06	-0.73
SH001	29	23697	0.40	10.07	-0.68
SH001	30	23707	0.41	10.07	-0.64
SH001	31	24067	0.42	10.09	-0.59
SH001	32	24817	0.44	10.12	-0.55
SH001	33	25530	0.45	10.15	-0.51
SH001	34	27099	0.47	10.21	-0.47
SH001	35	29650	0.48	10.30	-0.43
SH001	36	29650	0.49	10.30	-0.39
SH001	37	29686	0.51	10.30	-0.35
SH001	38	30205	0.52	10.32	-0.31
SH001	39	30694	0.53	10.33	-0.27
SH001	40	30911	0.55	10.34	-0.23
SH001	41	30923	0.56	10.34	-0.19
SH001	42	31230	0.58	10.35	-0.15
SH001	43	31272	0.59	10.35	-0.12
SH001	44	31501	0.60	10.36	-0.08
SH001	45	32160	0.62	10.38	-0.04
SH001	46	32178	0.63	10.38	0.00
SH001	47	32187	0.65	10.38	0.04
SH001	48	32572	0.66	10.39	0.07
SH001	49	32753	0.67	10.40	0.11
SH001	50	32794	0.69	10.40	0.15
SH001	51	32880	0.70	10.40	0.19
SH001	52	32892	0.71	10.40	0.22
SH001	53	32893	0.73	10.40	0.26
SH001	54	32894	0.74	10.40	0.30
SH001	55	32941	0.76	10.40	0.34

SH001	56	32952	0.77	10.40	0.38
SH001	57	33069	0.78	10.41	0.42
SH001	58	33653	0.80	10.42	0.47
SH001	59	34181	0.81	10.44	0.51
SH001	60	34200	0.82	10.44	0.55
SH001	61	34443	0.84	10.45	0.60
SH001	62	36156	0.85	10.50	0.65
SH001	63	36163	0.87	10.50	0.70
SH001	64	36292	0.88	10.50	0.75
SH001	65	36584	0.89	10.51	0.81
SH001	66	36610	0.91	10.51	0.87
SH001	67	36632	0.92	10.51	0.93
SH001	68	36687	0.94	10.51	1.01

Fuente: Elaboración propia



Tabla 15 - Historial de fallas Sistema Aire - SH002

Sistema	AIRE				
Sub Sistema	COMPRESOR				
Equipo	Item	Horómetro de Falla [Hrs]	F(t)	X Ln(t)	Y Ln(-Ln(1-F(t)))
SH002	1	10049	0.01	9.22	-4.62
SH002	2	10054	0.02	9.22	-3.73
SH002	3	10152	0.04	9.23	-3.26
SH002	4	10163	0.05	9.23	-2.93
SH002	5	10508	0.07	9.26	-2.69
SH002	6	11288	0.08	9.33	-2.49
SH002	7	11317	0.09	9.33	-2.32
SH002	8	11628	0.11	9.36	-2.17
SH002	9	11940	0.12	9.39	-2.04
SH002	10	11970	0.14	9.39	-1.92
SH002	11	11981	0.15	9.39	-1.82
SH002	12	12075	0.16	9.40	-1.72
SH002	13	13540	0.18	9.51	-1.63
SH002	14	13615	0.19	9.52	-1.55
SH002	15	13706	0.21	9.53	-1.47
SH002	16	13888	0.22	9.54	-1.39
SH002	17	13949	0.23	9.54	-1.32
SH002	18	15782	0.25	9.67	-1.26
SH002	19	15794	0.26	9.67	-1.19
SH002	20	15991	0.28	9.68	-1.13
SH002	21	16048	0.29	9.68	-1.07
SH002	22	16362	0.30	9.70	-1.02
SH002	23	16724	0.32	9.72	-0.96
SH002	24	17802	0.33	9.79	-0.91
SH002	25	19964	0.35	9.90	-0.86
SH002	26	20866	0.36	9.95	-0.81
SH002	27	21077	0.37	9.96	-0.76
SH002	28	21183	0.39	9.96	-0.71
SH002	29	22777	0.40	10.03	-0.67
SH002	30	23738	0.42	10.07	-0.62
SH002	31	24016	0.43	10.09	-0.58
SH002	32	24061	0.44	10.09	-0.53
SH002	33	24106	0.46	10.09	-0.49
SH002	34	25482	0.47	10.15	-0.45
SH002	35	25997	0.49	10.17	-0.41
SH002	36	26042	0.50	10.17	-0.37
SH002	37	26261	0.51	10.18	-0.33
SH002	38	28171	0.53	10.25	-0.29
SH002	39	29688	0.54	10.30	-0.25
SH002	40	29699	0.56	10.30	-0.21
SH002	41	29976	0.57	10.31	-0.17
SH002	42	30060	0.58	10.31	-0.13
SH002	43	30105	0.60	10.31	-0.09
SH002	44	30173	0.61	10.31	-0.05
SH002	45	30196	0.63	10.32	-0.02
SH002	46	33421	0.64	10.42	0.02
SH002	47	33579	0.65	10.42	0.06
SH002	48	33600	0.67	10.42	0.10
SH002	49	33634	0.68	10.42	0.14
SH002	50	33640	0.70	10.42	0.17
SH002	51	33648	0.71	10.42	0.21
SH002	52	33722	0.72	10.43	0.25
SH002	53	33825	0.74	10.43	0.29
SH002	54	33846	0.75	10.43	0.33
SH002	55	33865	0.77	10.43	0.37

SH002	56	33872	0.78	10.43	0.42
SH002	57	34283	0.79	10.44	0.46
SH002	58	34394	0.81	10.45	0.50
SH002	59	34617	0.82	10.45	0.55
SH002	60	34636	0.84	10.45	0.59
SH002	61	34657	0.85	10.45	0.64
SH002	62	34788	0.86	10.46	0.69
SH002	63	34798	0.88	10.46	0.74
SH002	64	34808	0.89	10.46	0.80
SH002	65	35462	0.91	10.48	0.86
SH002	66	35509	0.92	10.48	0.93
SH002	67	35878	0.93	10.49	1.00
SH002	68	35890	0.95	10.49	1.09

Fuente: Elaboración propia



ANEXO 5: PLAN DE MANTENIMIENTO PROACTIVO

e personas: 6		Duración PM: 24	Total H/H: 144	Intervalo: 6000 HRS.	Fecha de inicio / /	Hora de inicio: :	Horómetro:	Código de equipo:
e personas:		Duración Real:	Total H/H Real:	Supervisor Día:	Supervisor Noche:		Operador:	
Turno Día		Turno Noche		ID	Turno Día		Turno Noche	
ID					ID			
Técnico 1:		/		T1	Técnico 7:		/	
T1					Técnico 8:		/	
T2					Técnico 9:		/	
T3					Técnico 10:		/	
T4					Técnico 11:		/	
T5					Técnico 12:		/	
T6								
ubicación:				Activo: Pala Eléctrica 7495 Hydracrowd				
PROPÓSITO								
el PM 6000 horas								
ALCANCE								
ca 7495 Hydracrowd								
I	LISTA DE MATERIALES							
Item	Descripción					Cantidad	Unidad	Nº Parte
Insumos								
1	Paños de limpieza (Towels)					4	UND	267-6532
2	Aceite de Lubricadores FRL (SAE 10)					2	LTRS	-
3	Manguera de muestreo					1	UND	1U-8757
4	Frascos de muestreo					12	UND	169-7372
5	Etiqueta de muestreo					12	UND	ETISMA
6	Bolsas para residuos					10	UND	Compra Local
Sistema inferior								
Sistema de propulsión (Propel)								
7	Filtro respiradero Tx. Propel					2	UND	490-9107
8	Aceite de Tx Propel RH & LH					156	GLN	ISO VG320
Revolving Frame & Truck Frame								
9	Anclaje del Girder a la estructura del Revolving Frame - Bolt - Perno					8	UND	6V-7977
10	Anclaje del Girder a la estructura del Revolving Frame - Hard Washer					16	UND	341-2646
11	Anclaje del Girder a la estructura del Revolving Frame - Heavy Hex Nut - Tuerca					8	UND	7X-0452
Sistema de giro (swing)								
12	Filtro de aceite de transmisión de giro					2	UND	459-7148
13	Filtro respiradero Tx. Swing					2	UND	459-7105
14	Aceite de Tx Swing RH & LH					172	GLN	ISO VG320
Sala de maquinas								
Sistema de levante (hoist)								
15	Filtro de Aceite de alta presión de Transmisión de Hoist					1	UND	470-6370
16	Sellos de filtro de aceite de alta presión de Tx. De hoist					1	UND	222-5792
17	Filtro de Succión de aceite de Transmisión de Hoist					1	UND	470-6354
18	Filtro Respirador de Transmisión de Hoist					1	UND	460-1908
19	Aceite de Tx Hoist					115	GLN	ISO VG320
20	Freno de Levante Assembly					1	UND	461-9585
21	Freno de Levante: Cover					1	UND	439-9481
22	Freno de Levante: Screw Hex					4	UND	5S-7349
23	Freno de Levante: Washer Flat					4	UND	5P-4115
24	Freno de Levante: Nut Hex					12	UND	516-4693
25	Freno de Levante: Screw Socket					12	UND	531-0705
26	Freno de Levante: Grease Teflon					2	UND	Compra Local
27	Aceite de Winche Auxiliar RH & LH					30	GLN	ISO VG320
Sistema neumático								
28	Filtro de Aceite de compresor					2	UND	417-6347
29	Filtro de Aire de compresor					2	UND	482-5509
30	Filtro Separador de aire-aceite de compresor					2	UND	482-5580
31	Filtro Regulador lubricante en salida de compresor					1	UND	441-1925
32	Aceite de Compresor de aire, Grado ISO VG-46 / 5 GAL					10	GLN	-
33	Kit Filtro Separador aceite (FRL) ELEMENT					1	UND	500-2937
34	Kit Filtro Separador aceite - Seal					1	UND	547-1991
35	Kit Filtro Separador aceite - Washer					1	UND	547-1992
36	Kit Filtro Separador aceite - Drain					1	UND	547-1994
37	Kit Filtro Separador aceite - Seal					1	UND	547-1995
38	Kit Filtro de Aire (FRL) - ELEMENT					1	UND	507-0726
39	Kit Filtro de Aire (FRL) - Seal					1	UND	547-1991
40	Kit Filtro de Aire (FRL) - Washer					1	UND	547-1992
41	Kit Filtro de Aire (FRL) - Drain					1	UND	547-1994
42	Kit Filtro de Aire (FRL) - Seal					1	UND	547-1995
Cabina de operador (operator cab) - HVA (Aire acondicionado)								
43	Filtro de Aire comprimido HVAC					1	UND	474-1334
44	Filtro de Unidad de compresor HVAC					1	UND	474-1338
45	Filtro de Aire, Condensador/Evaporador					1	UND	481-3542

	Sala de lubricación							
46	Respirador de Tanque Grasa		3	UND	430-0939			
47	Pump Assembly AS		6	UND	536-0532			
48	Pump Assembly - COVER		6	UND	441-1807			
49	Pump Assembly - VENT VALVE ASSY		6	UND	8X-2320			
50	Pump Assembly - SAFETY VALVE		6	UND	8X-2323			
51	Pump Assembly - BUSHING BUNG		6	UND	441-1823			
52	Pump Assembly - BOLT		24	UND	8T-9364			
	Escalera							
53	Filtro Hidraulico del modulo de Escalera		1	UND	480-0308			
54	Respirador del Modulo de Escalera		1	UND	480-0309			
55	Aceite de Escalera principal (15W40)		5	GLN	-			
	Sistema de Mando de Bombas (PDT)							
56	Filtros Puremax de Sala Siemens		36	UND	430-1731			
57	Filtro Respirador de caja de bombas PDT		1	UND	459-2543			
58	Aceite de PDT.		10	GLN	ISO VG 320			
	Hydracrowd							
59	Filtro de Presion Hidráulico Auxiliar (6 micras)		1	UND	482-5500			
60	Filtro de Retorno Hidráulico Auxiliar (10 micras)		1	UND	9U-6983			
61	Aceite Hidraulico Tanque Principal y Tanque Auxiliar (ISO VG 46)		1120	GLN	-			
62	Filtro de Retorno de tanque superior hidráulico		4	UND	479-8159			
63	O-ring de tapa de filtro de retorno		4	UND	213-9833			
64	Filtro de Pre-llenado (Pre-Fill Filtros) (10 micras)		1	UND	9U-6983			
65	Filtro de Recirculación de aceite		1	UND	417-6261			
66	Filtro Piloto del sistema ACS Sello		1	UND	389-1088			
67	Filtro Piloto		1	UND	095-1671			
68	Válvula de venteo de los aisladores del tanque superior		1	UND	482-4964			
69	Molybdenum disulfide (Lubricar Orkot)		1	UND	452-5999			
	Pluma y mango							
70	Polea Dipper Trip: BEARING CARRIER		2	UND	439-9166			
71	Polea Dipper Trip: RING		2	UND	440-6992			
72	Polea Dipper Trip: RING		2	UND	440-6993			
73	Polea Dipper Trip: SHEAVE DEFLECTOR		2	UND	467-0600			
74	Polea Dipper Trip: BEARING		4	UND	469-1378			
75	Polea Dipper Trip: BOLT HEX-HEAD 1-8"		1	UND	183-7218			
76	Polea Dipper Trip: BOLT 1-8"		1	UND	7X-0443			
77	Polea Dipper Trip: WASHER HARD		16	UND	8T-5361			
78	Polea Dipper Trip: LOCK-NUT 1-8"		8	UND	3E-9864			
	Balde							
79	Aceite de Snubber Wet Disk RH / LH ATF-HD2		10	GLN	-			
II LISTA DE HERRAMIENTAS Y FACILIDADES								
Item	Descripción	Cantidad	Unidad	N° Parte				
1	Camión Lubricador	1	UND					
2	Manómetros para medir presion de bomba principal (#1,#2,#3 y #4)	4	UND					
3	Calibrador Digital 30cm	2	UND					
4	Feeler gauge de 15 cm (Desgaste de Liners Saddleblock)	1	UND					
5	Compresor de Aire	1	UND					
6	Camión Grua de 30 Toneladas	1	UND					
7	Grua de 60 TN	1	UND					
8	Camión de Soldadura	1	UND					
9	Manlift (Desgaste de Liners Saddleblock)	1	UND					
10	Montacarga	1	UND					
11	Trineo para cambio de cables	2	UND					
12	Equipo de alineamiento Laser	1	UND	482-5575				
13	Escalera tijera de 1.80 M.	1	UND	Pañol				
14	Pirómetro	1	UND					
15	Comm-Adapter + computador portatil con ET	1	UND					
16	Torquimetro de 250 Lb-ft	1	UND					
17	Bandeja para contención de aceite	3	UND					
III ACTIVIDADES CON MAQUINA ENCENDIDA (PRUEBAS)								
Item	Descripción	Tiempo	N° Tec.		✓	X	Observaciones	
1.0	Posicionar el equipo y delimitar área de trabajo.	30	3					
	Pruebas operacionales							
	Pruebas mecánicas			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
	Propel			Max. Permissible				
1.1	Verificar accionamiento, fugas y medicion de desgaste de Freno Propel	15	1	0.32"				
1.2	Verficar la presion de aire (pantalla de operador)	5	1	110 psi				
1.3	Verificar temperatura de eje de entrada de la Tx. Propel	10	1					
1.4	Verificar Temp. de rodamientos de eje de propel Tx. Propel	10	1					
1.5	Verificar ruidos extraños y fuga de aceite en la Tx. Propel	5	1					
1.6	Verificar funcionamiento e Insp. visual de Blower Propel	5	1					
1.7	Verficar pines, seguros, pasadores y estado de zapatas LH/RH	20	2					
1.8	Verificar el tensado de la cadena	10	2					
	Hoist					✓		
2.1	Verificar accionamiento, fugas y medicion de desgaste de Freno Hoist	30	2	0.400"				
2.2	Verificar Temp. de Tx. de Hoist	5	1					
2.3	Verificar temperatura de rodamientos de Tx. Hoist	10	1					
2.4	Verificar ruido extraños en la Tx. Hoist	10	1					
2.5	Inspección visual de los cables de Levante	15	1					
2.6	Inspección visual de movimiento de la polea punta pluma	15	1					
2.7	Inspección visual de fugas en transmisión de hoist	10	1					

	Swing					✓		
3.1	Verificar accionamiento, fugas y medicion de desgaste de Frenos Swir	15	1	0.200"				
3.2	Verificar temperatura de la Tx. Swing	10	1					
3.3	Verificar temperatura de rodamientos de piñones Swing	15	1					
3.4	Verificar ruido extraños en ambas Tx. Swing	15	1					
3.5	Verficar funcionamiento de 4 aspersores del Swing Rack	15	2					
3.6	Verificar ruido extraños en los rodillos de circulo de giro	10	1					
	Hydracrowd					✓		
4.1	Medir desgaste de Bushing Guide	10	2	1/2 " (Max)				Cilindro Horizontal
4.2	Medir presión a Bombas principales Hydracrowd 1,2,3 y 4	15	2	3700 ± 50 PSI				
4.3	Registrar el valor de drenaje carcaza bombas hydracrowd (PCDM 1,2,3	15	2	1~4gpm				
4.4	Verificar presión de salida, bomba piloto Sist. Hydracrowd	15	1	610 ± 30 PSI				
4.5	Insp. monitor de contaminación ISOCODE Sist.Hidráulico	5	1	ISO (16/14/12)				
4.6	Velocidad de Extensión Cilindro Hydracrowd	15	1	122 a 134 ft/min				Cilindro Horizontal
4.7	Velocidad de Retracción Cilindro Hydracrowd	15	1	110 a 122 ft/min				Cilindro Horizontal
4.8	Prueba de sello de piston de Cilindro hidracrowd	15	1	2 ft/min				Cilindro Vertical
4.9	Med. de Temp. De Valv. de control piloto ACS	10	1					Cilindro Horizontal
4.10	Insp. bombas de circulación de aceite por daños o fugas.	10	1					
4.11	Torqueo de pernos del Mounting Plate	15	2					Cilindro Horizontal
4.12	Tomar presión de aceite del PDT (Pantalla operador)	10	1					
4.13	Verificar carga de acumulador piloto, en sala lubricación	20	1	125±20 psi (70°F)				
4.14	Limpieza e inspeccion general de Encoder de Crowd Optico	30	2					Cilindro Horizontal
4.15	Inspeccion visual Clamps (tubo alimentación de rod end)	15	1					Cilindro Horizontal
	Dipper					✓		
4.16	Colocar herramienta (candado) a compuerta	15	2					
4.17	Posicionamiento de dipper en el suelo	15	2					
IV DESCRIPCION DE TAREAS POR ACTIVIDADES								
A	Actividades predictivas	Tiempo	Nº Tec.	Descripción	Cantidad	✓	X	Anexos / Obs.
	Propel							
A1	Revisar nivel de aceite - transmision de propel LH/RH	10	1	ISO VG 320				
A2	Obtener muestra de aceite de Tx. De propel LH/RH	15	1					
A3	Obtener muestra de tapones magneticos de Tx.de propel	30	2					
	Hoist	min.				✓		
A4	Revisar nivel de aceite - transmision de levante	5	1	ISO VG 320				
A5	Inspeccion de filtros respirador de Tx. de levante Sup./Inf.	10	1					
A6	Obtener muestra de aceite de transmision de levante	15	1					
A8	Verificar nivel de aceite - winches auxiliares	20	1					
	Swing					✓		
A9	Revisar nivel de aceite - transmision de giro LH/RH	15	2	ISO VG 320				
A10	Obtener muestra de aceite de transmisión de giro LH/RH	15	2					
A11	Inspeccionar corte filtro de aceite Tx. swing LH/RH (Post-PM)	60	1					
	Air compressor					✓		
A12	Rellenar aceite a lubricadores FRL (SAE10)	20	1					
A14	Obtener muestra de aceite del compresor	10	1					
A15	Inspeccionar corte filtros de aceite de compresor(PosPM)	60	1					
	PDT					✓		
A16	Revisar nivel de aceite PDT	10	1	ISO VG 320				
A17	Obtener muestra de aceite de PDT	15	1					
	Hydracrowd					✓		
A18	Revisar nivel aceite hidráulico tanque principal y auxiliar	10	1	ISO VG 46				
A19	Obtener muestra de filtros magneticos de filtro retorno tanque hidráulico	60	2					
A20	Obtener muestra de aceite hidráulico	15	1					
	Sala de lubricación					✓		
A21	Verificar correcta operacion de Sist. A1,A2,B1,B2,C1,C2	30	2	2500 psi				
A22	Verificar nivel grasa OGL y/o rellenar, sistema A1, A2, B2	60	2					
A23	Verificar nivel de grasa MPG y/o rellenar, sistema C1, C2	60	2					
A24	Verificar nivel de grasa OGL y/o rellenar, sistema B1	60	2					
	Snubber					✓		
A25	Verificar nivel de aceite de wel disk snubber - Rellenar	30	2	ATF-HD2	5 Glns.			
B	Actividades de lubricación (cambio de aceites y filtros)	Tiempo	Nº Tec.	Descripción	Cantidad	✓	X	Anexos / Obs.
	Propel							
B1	Lubricar coupling motor-transmisión de propel LH / RH	45	2	1.08	Libras			
B2	Cambio de respirador de transmisión de propel RH / LH	30	1	490-9107	2 Und.			
B3	Cambio de aceite de transmision de propel LH/RH	90	2	ISO VG 320	78 Glns. c/u			
	Hoist	min.				✓		
B4	Cambio de filtro de aceite de alta presión de Tx.de levante	20	1	470-6370	1 Und.			
B5	Cambio de filtro de succión de aceite de Tx. de levante	20	1	470-6354	1 Und.			
B6	Cambio de filtro respirador de transmisión de levante	15	1	460-1908	1 Und.			
B7	Cambio de aceite de transmision de levante	90	2	ISO VG 320	115 Glns.			
B8	Lubricar coupling de transmisión de levante	45	2	1.6	Libras			
B9	Cambio de aceite de winches auxiliares	60	2	ISO VG 320	15 Glns.			
	Swing					✓		
B10	Cambio de filtro de aceite de transmisión de giro LH &RH	45	1	459-7148	2 Und.			
B11	Cambio de aceite de transmision de giro LH/RH	90	1	ISO VG 320	86 Glns. c/u			
B12	Cambio de filtro respirador de la Tx. de giro LH / RH	30	1	459-7105	2 Und.			
B13	Lubricar coupling de transmisión de giro LH/RH	45	2	0.54	Libras			
	Air compressor					✓		
B14	Cambio de aceite de compresor duales	60	1	CORENA S4 R32	5 Glns. c/u			
B15	Cambio de filtro de aire de compresor Superior / Inferior	30	1	482-5509	2 Und.			
B16	Cambio de filtro de aceite de compresor Superior / Inferior	30	1	417-6347	2 Und.			
B17	Cambio de filtro separador de aire-aceite de compresor	30	1	482-5580	2 Und.			
B18	Cambio de filtro separador de aceite FRL con sus sellos	30	1	500-2937	1 Und.			
B19	Cambio de filtro de aire FRL con sus sellos	20	1	507-0726	1 Und.			
B20	Cambio de filtro regulador lubricante a salida de compresor	30	1	441-1925	1 Und.			

	PDT					✓		
B21	Cambio de Aceite de PDT	60	1	ISO VG 320	10 Glns.			
B22	Cambio de Filtro Respirador de Caja de Bombas PDT	20	1	459-2543	1 Und.			
	Hydracrowd					✓		
B23	Lubricar el orkot guide bushing (Molybdenum disulfide)	90	2	452-5999	1 Und.			
B24	Lubricar acoplamiento motor de crowd-PDT (Grasa MPG)	45	2	1.6	Libras			
B25	Cambio de filtros de retorno de tanque superior hidráulico.	90	2	479-8159	4 Und.			
B26	Cambio de o-ring de tapa de filtro retorno de tanque Sup.	10	2	213-9833	4 Und.			
B27	Cambio válvula de venteo de aisladores de tanque superior	45	2	482-4964	1 Und.			
B28	Cambio de filtro de pre-llenado (pre-fill filtros)	20	1	9U-6983	1 Und.			
B29	Cambio de aceite hidraulico tanque principal y tanque auxiliar	540	2	ISO VG 46	1120 Glns. c/u			
B30	Cambio de filtro de recirculación de aceite	30	1	417-6261	1 Und.			
B31	Cambio de filtro piloto del sistema ACS y sello	30	1	389-1088	1 Und.			
B32	Cambio de filtro de retorno hidráulico auxiliar	30	1	9U-6983	1 Und.			
B33	Cambio de filtro de presion hidráulico auxiliar	30	1	482-5500	1 Und.			
	HVAC (Aire acondicionado)					✓		
B34	Cambio de filtro de unidad de compresor HVAC	30	1	474-1338	1 Und.			
B35	Cambio de filtro de aire comprimido HVAC	30	1	474-1334	1 Und.			
B36	Cambio de retorno de filtro aire,condensador/evaporador	30	1	481-3542	1 Und.			
	Sala de lubricación					✓		
B37	Revisar las líneas y conexiones, reparar fugas y/o daños	30	1					
B38	Cambiar respirador de tanque de grasa	15	1	430-0939	3 Und.			
B39	Cambio de bomba de Lubr. Sist. A1 y Verif. presión fin de linea	180	1	2500	PSI			
B40	Cambio de bomba de Lubr. Sist.A2 / Verif. corte a (A2)	180	1	2500	PSI			
B41	Cambio de bomba de Lubr. Sist. B1 y Verif. presión de linea	180	1	2500	PSI			
B42	Cambio de bomba de Lubr. Sist. B2 y Verif. presión de linea	180	1	2500	PSI			
B43	Cambio de bomba de Lubr. Sist. C1 y Verif. presión de linea	180	1	2500	PSI			
B44	Cambio de bomba de Lubr. Sist. C2 y Verif. corte a C2	180	1	2500	PSI			
	Escalera					✓		
B45	Cambio de aceite de escalera de acceso principal	30	1	ISO VG 10	3 Glns.			
B46	Cambio de filtro hidráulico del modulo de escalera	15	1	480-0308	1 Und.			
B47	Cambiar repirador de modulo de escalera	15	1	480-0309	1 Und.			
B48	Lubricar pasadores de brazos y cilindro hidráulico escalera	20	1					
	Sistema de Limpieza de Aire					✓		
B49	Cambio de filtros Puremax de Sala Skid Siemens	180	2	430-1731	36 Und.			
	Estructura					✓		
B50	Lubricar ferrules de cables de suspensión	30	2	MPG				
C	Actividades mecánicas	Tiempo	Nº Tec.	Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
	Inspección general	min.						
C1	Inspección mecánica PM	360	3					
C2	Inspección de líneas hidráulicas	180	2					
	Sistema inferior							
	Bastidores (Crawler Frame)			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C3	Limpieza general de los bastidores LH/RH	180	2					
C4	Insp. Visual de fuga de grasa en rodamiento Int. RH/LH	30	1					
C5	Insp. Visual de fuga de grasa en el rodamiento Ext.RH/LH	30	1					
C6	Medición de undercarriage	120	1					
C7	Ajustar Superbolt de bastidores y truck frame LH/RH	240	2					
C8	Verificar juego radial en bocina de rueda tensora LH/RH	90	2	1/2 " (Max.)				Abrir cadena
C9	Medición de desgaste de dientes del tumbler LH/RH	60	1					
C10	Corte deformación plástica excedente en sproket LH/RH	240	4					Abrir cadena(Tec.Sold.)
C11	Corte deformación plástica en pista rodado de zapatas.RH/LH	1200	4					Abrir cadena(Tec.Sold.)
	Sistema de propulsión (Propel)			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C12	Ajustar pernos del coupling de Motor-Tx de propel LH/RH	90	2	210 lb-ft				
C13	Verificar de alineamiento de motor-Tx. Propel LH/RH	480	2					Personal Predictivo
C14	Ajustar pernos anclaje de blower motor Tx. propel LH/RH	60	1	55 lb-ft				
C15	Ajustar pernos de anclaje base de motor a crawler frame	240	2	222±22 lb-ft/180°±10°				
C16	Ajustar pernos de anclaje a base de motor propel LH/RH	60	2	1360 lb-ft				
C17	Ajustar pernos de anclaje de la Tx. de propel LH/RH	240	2	6250 lb-ft				
	Revolving frame & truck frame			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C18	Verificar luz de la tuerca del pin central	120	2	0.030" a 0.107"				
	Sistema de giro (swing)			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C19	Inspección visual de dientes de los piñones d giro LH/RH	90	1					
C20	Inspección de luz de los rodillos del circulo de giro	480	2	0.12"				
C21	Insp. Visual de pernos de sujeción de rieles Inf. y Superior	360	2					
C22	Limpiar e Insp. Visual a dientes de corona(Circulo de Giro)	480	2					
C23	Limpiar e Insp. los dientes de los piñones giro LH/RH	120	2					
C24	Verificar ajuste de pernos portarodamiento Tx. Giro LH/RH	60	2	280 lb-ft				
C25	Medir caída de piñones de giro delantero y posterior RH/LH	60	2					
C26	Ajustar pernos de coupling de Motor-Tx. de giro LH/RH	90	2	125 lb-ft				
C27	Ajustar pernos de anclaje de Tx. de giro al Girder LH/RH	90	2	1950 lb-ft(seco)				
C28	Ajustar super bolt de Girger con estructura de revolving frame	120	2	183 ± 30 lb-ft				
C29	Cambiar pernos superiores de Girder-LH/RH une revolving frame	240	2	2360 lb-ft				
C30	Ajustar pernos de los pasadores de los rodillos	480	2	210 lb-ft				(Corte de energía)
C31	Ajustar pernos de sujeción de rieles inferiores y superiores	480	2	679 ± 74 lb-ft				(Corte de energía)
	Sala de maquinas							
	House machinery			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C39	Inspección visual de cables de suspensión y socket	30	1					
C40	Inspección visual de lineas de lubricacion y conexiones	60	1					
C41	Verificar correcta carga de extintores	10	1	6 Und.				

	Sistema de hoist			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C42	Insp. Visual de cuello de Tambor RH del tambor de hoist	15	1					
C43	Insp. Visual de cuello de Spider al tambor de levante	15	1					
C44	Ajustar pernos de los coupling de la Tx. de levante	90	2	235 lb-ft				
C45	Limpiar e Insp. desgaste adhesivo a dientes corona hoist	120	2					
C46	Limpiar e Insp. desgaste adhesivo en dientes de piñones	60	2					
C47	Sopletear e inspeccionar enfriadores de aceite Tx. Hoist	30	2					
C48	Insp. visual a canales del tambor de hoist	15	1					A cambio cables hoist
C49	Verificar de alineamiento de Motor-Transmision de hoist	360	2					Personal Predictivo
C50	Inspección visual rodamientos de tambor de hoist LH/RH	60	2					
C51	Ajustar Locking Assy de la Tx. de levante	180	2					
C52	Ajustar pernos super bolt de base de motor de hoist.	180	2					
C53	Ajustar pernos de base de blower de motor	60	1	55 lb-ft				
C54	Ajustar superbolt de pedestales y carcasa corona de hoist	180	2					
C55	Cambiar freno de Motor Hoist	240	2					
	Sistema neumático			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C56	Inspeccionar todos los manómetros de aire	15	1					
C57	Inspeccionar todos los tubos, conexiones y mangueras.	60	1					
C58	Drenar condensado en unidad FRL	5	1					
C59	Verificar corte a 90 psi de sensor de presión de aire.	5	1	90 psi				
C60	Inspeccionar todos los manómetros de aire (sala lubricación)	5	1	60 psi				
C61	Verificar presión de aire de compresor en manómetro	5	1	120 psi				
	Cabina de operador (operator cab)			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C62	Revisar hermeticidad de cabina	30	2					
	Hydracrowd							
	Módulo de potencia			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C63	Insp.visual fugas a líneas hidráulicas de módulo potencia	20	1					Anexo 10
C64	Verif. soldadura de tapas de 4 filtros retorno Tanq. hidráulico superior.	15	1					
C65	Insp. Visual de mangueras de tanque superior a bladders	15	1					Anexo 10
C66	Ajustar superbolt de anclaje de motor de crowd.	60	2	27 lb-ft				
C67	Ajustar pernos de base de blower de motor	30	1	274 lb-ft				
C68	Sopletear e Insp. de enfriadores aceite hidraulico y PDT	30	1					
C69	Cambiar válvula de vacío de bladders de los aisladores	30	2					
C70	Verificar alineamiento laser de motor de crowd - PDT	240	2					Tec. Predictivos
	Cilindro hidráulico			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C71	Inspección visual de mangueras de boom de hydracrowd	60	1					Anexo 10
C72	Ajustar pernos del mounting plate	60	2	74 lb-ft (100 N-m)				Cilindro horizontal
C73	Verificar ajuste pernos de tapa de pin retenedor superior	30	1	480 lb-ft				Cilindro horizontal
C74	Verif. ajuste pernos tapa pin retenedor Inf.cilindro y mango	45	1	480 lb-ft				Cilindro vertical
C75	Ajustar clamps (tubo de alimentación del ROD END)	120	1	258 lb-ft				Cilindro horizontal
	Sistema auxiliar			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C76	Comprobar funcionamiento botonera de relleno de aceite	15	1					
	Pluma y mango							
	Saddle block			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C78	Verificar torque a pernos de conexión Saddleblock-Sleeve	120	2	1360 Lb-ft				
C79	Inspección de los pernos de sujeción de Liners Saddleblock	15	1					
C80	Verificar regulación de inyectores de lubricación de Dipper Handle	15	1	4 hilos de apertura				
C81	Medir el desgaste de Liners Saddleblock	60	2	Max. Desg. 3/8 "				
	Boom			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C82	Verificar el desplazamiento de pin de pie de plumaRH/LH	15	1					
C83	Cambiar las 2 Poleas del dipper trip en la pluma	180	2					
	Dipper handle			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C84	Medición de desgaste de Dipper Handle	60	1	Ø 860 mm(Ext.)				
	Balde							
				Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C85	Medición de GETS y verificar ajuste	60	1					Anexo 32
C86	Inspección visual a estructura del balde y su blindaje	30	1					
C87	Inspección estructural de compuerta y su blindaje	30	1					
C88	Ajuste de pernos de anclaje de snubber LH/RH	120	2	1550 ± 184 Lb-ft				
C89	Insp. Estructura snubbers, frenos de compuerta del balde	30	1					
C90	Inspección visual pitch braces (ajustable)	30	1					
C91	Regulación de apertura de compuerta	15	2					
C92	Insp. Visual a estructura padlocks y pines de poleas LH/RH	15	1					
C93	Insp. Visual de orejas de balde y de compuerta	15	1					
C94	Insp.Vis. bocinas de orejas,pin,conexión y seguro de padlock - link	15	1					
	Latch Free System™							
				Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
C95	Verificar posición de cable en Trip Arm	15	1					
C96	Verificar estado de Bumper amortiguador de Trip Arm	30	1					
C97	Verificar conexión de Bloque en Y con Trip Arm	30	1					
C98	Verificar estado de rodillos de Leva	30	1					
C99	Verificar estado de pernos de la tapa de CamShaft	30	1					
C100	Verificar rodamientos del árbol de leva	15	1					
C101	Verificar estado de rodamientos externos e internos de leva	15	1					
C102	Torquear pernos de bocina excéntrica de leva	30	1					
C103	Verificar estado de pernos de protector anti-polvo	30	1					
C104	Verificar estado de Stop Blocks de eje	30	1					
C105	Medir espacio entre compuerta y balde	30	1	1.00 "				
C106	Verificación visual de estado de Link	15	1					
C107	Verificación visual de estado de Pin Link	30	1					

D	Actividades NDT - UT	Tiempo	Nº Tec.	Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
	Sistema inferior			Considerar para estos trabajos personal predictivo y certificado				
	Cadenas					✓		
D1	UT Pines de zapatas LH/RH	480	2					
	Revolving frame & truck frame					✓		
D2	NDT Orejas de revolving frame con A-Frame	60	2					
D3	NDT en cajones de truck frame	300	2					
D4	NDT en cajones de Revolving Frame y Alojamiento Pin Central	300	2					
D5	UT Pin Central	120	2					
	Sistema de giro (swing rack)					✓		
D6	NDT Union Soldadura del circulo de Giro / Truck Frame	480	2					
D7	NDT Dientes de Corona (Circulo de Giro) - Previa Limpieza	240	2					
	Sala de maquinas							
	A-frame			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
D8	UT Pines de patas delanteras y traseras en busca de fisuras	120	2					
D9	NDT Patas delanteras y traseras en busca de fisuras	60	2					
	Tambor de levante					✓		
D10	NDT a cuello Tambor RH de tambor hoist.Previa limpieza	60	2					
D11	NDT a cuello de Spider al tambor de levante.Previa Limp.	60	2					
D12	NDT de los pedestales LH/RH	90	2					
D13	NDT Housing del rodamiento del tambor de hoist LH/RH	60	2					
	Polea punta pluma					✓		
D14	NDT a radios polea punta pluma	120	2					
D15	UT a eje polea punta pluma	120	2					
	Hydracrowd							
	Saddle block			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
D16	NDT al Saddle Block	240	2					
	Pluma y mango							
	Boom			Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
D17	NDT conjunto de Amortiguador de pluma (Boom Bumper)	120	2					
D18	UT pin Pie de pluma LH/RH	120	2					
D19	NDT zona inferior de la pluma ("U") superior e inferior	240	2					
	Dipper handle							
D20	NDT estructura dipper handle(casting y cordones soldadura)	180	2					
D21	UT Pin que sujeta horquilla del bastago del cilindro	60	2					
	Balde							
				Valor nominal	Valor medido	✓	X	Anexos / Obs.
D22	NDT base de soporte snubbers, frenos compuerta de balde	180	2					Anexo 23
D23	NDT Pitch Braces (ajustable)	180	2					
D24	NDT de orejas de balde y orejas de compuerta	90	2					
D25	NDT-UT a estructura padlocks y pines poleas padlocks LH/RH	90	2					
V	ENTREGA DE EQUIPO							
	Pruebas finales (entrega de equipo a operaciones mina)	Tiempo	Nº Tec.			✓	X	Anexos / Obs.
5.1	Inspección final para entrega de equipo	30	1					
5.2	Realizar pruebas finales del equipo	15	1					
rios adicionales:								
Técnico Líder del Mantenimiento:								
Nombre:		Fecha final del PM:		Supervisor de Mantenimiento:				
		/ /		Nombre:				
Firma:		Hora final del PM:		Firma:				
		:						

ANEXO 6: INDICADORES DE CONFIABILIDAD MTBF Y MTTR 2017-2020

Tabla 16 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2017

Fecha	Horas Disponible	Nro Fallas	Horas Falla	MTBF	Target MTBF	MTTR	Target MTTR
Enero	1061.4	34	43.9	31.22	36.00	1.29	2.00
Febrero	883.7	18	47.8	49.09	36.00	2.66	2.00
Marzo	986.5	31	60.8	31.82	36.00	1.96	2.00
Abril	943.8	35	39.2	26.97	36.00	1.12	2.00
Mayo	954.9	31	49.5	30.80	36.00	1.60	2.00
Junio	1011.7	30	49.3	33.72	36.00	1.64	2.00
Julio	1054.6	30	37.9	35.15	36.00	1.26	2.00
Agosto	872.2	21	39.3	41.53	36.00	1.87	2.00
Setiembre	865.8	39	95	22.20	36.00	2.44	2.00
Octubre	921.1	17	29.7	54.18	36.00	1.75	2.00
Noviembre	987.6	38	51.9	25.99	36.00	1.37	2.00
Diciembre	899.7	40	76.4	22.49	36.00	1.91	2.00
Total	11443	364	620.7	31.44	36.00	1.71	2.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2018

Fecha	Horas Disponible	Nro Fallas	Horas Falla	MTBF	T.MTBF	MTTR	T.MTTR
Enero	908.5	31	147.4	29.31	36.00	4.75	2.00
Febrero	941.1	35	51.4	26.89	36.00	1.47	2.00
Marzo	926.4	27	57.4	34.31	36.00	2.13	2.00
Abril	989.9	32	53.6	30.93	36.00	1.68	2.00
Mayo	1041.8	39	83.4	26.71	36.00	2.14	2.00
Junio	977.8	30	66	32.59	36.00	2.20	2.00
Julio	1057.1	32	43.9	33.03	36.00	1.37	2.00
Agosto	1091.8	24	27	45.49	36.00	1.13	2.00
Setiembre	1111.5	29	30.8	38.33	36.00	1.06	2.00
Octubre	1104.5	23	22	48.02	36.00	0.96	2.00
Noviembre	1122.5	18	51	62.36	36.00	2.83	2.00
Diciembre	1063.5	29	60.2	36.67	36.00	2.08	2.00
Total	12336.4	349	694.1	35.35	36.00	1.99	2.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2019

Fecha	Horas Disponible	Nro Fallas	Horas Falla	MTBF	T.MTBF	MTTR	T.MTTR
Enero	1336.2	9	19.9	148.47 **	36.00	2.21	2.00
Febrero	1237.5	8	21.1	154.69 **	36.00	2.64	2.00
Marzo	1361.5	21	38.7	64.83	36.00	1.84	2.00
Abril	852.3	9	10.8	94.70	36.00	1.20	2.00
Mayo	1345.1	23	48.4	58.48	36.00	2.10	2.00
Junio	1196.9	13	110.6	92.07	36.00	8.51	2.00
Julio	1368.1	21	33.5	65.15	36.00	1.60	2.00
Agosto	1324.3	23	46.2	57.58	36.00	2.01	2.00
Setiembre	1305.8	24	22.3	54.41	36.00	0.93	2.00
Octubre	961.9	22	24	43.72	36.00	1.09	2.00
Noviembre	1272.1	30	32.6	42.40	36.00	1.09	2.00
Diciembre	1380.5	31	35.7	44.53	36.00	1.15	2.00
Total	12368.5	217	402.8	57.00	36.00	1.86	2.00
** Estos valores no ingresan dentro de nuestro cálculo debido a que durante estos meses se desato un conflicto social que impidió la operación normal de los equipo.							

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 - Indicadores de confiabilidad – Periodo 2020

Fecha	Horas Disponible	Nro Fallas	Horas Falla	MTBF	T.MTBF	MTTR	T.MTTR
Enero	1352.3	29	47.1	46.63	36.00	1.62	2.00
Febrero	1211.1	19	30	63.74	36.00	1.58	2.00
Marzo	1308.6	25	66.6	52.34	36.00	2.66	2.00
Abril	1019.2	27	39.3	37.75	36.00	1.46	2.00
Mayo	1269.4	36	68.6	35.26	36.00	1.91	2.00
Junio	1207.4	38	92.4	31.77	36.00	2.43	2.00
Julio	1187	25	135.2	47.48	36.00	5.41	2.00
Agosto	892.6	26	145.7	34.33	36.00	5.60	2.00
Setiembre	1299.4	37	106.6	35.12	36.00	2.88	2.00
Octubre	1265.9	35	72.4	36.17	36.00	2.07	2.00
Noviembre	1226.4	23	39	53.32	36.00	1.70	2.00
Diciembre	1107.4	29	79.6	38.19	36.00	2.74	2.00
Total	14346.7	349	922.5	41.11	36.00	2.64	2.00

Fuente: Elaboración propia



ANEXO 7: CÁLCULO DEL COSTO POR HORA PALA ELÉCTRICA 7495

DATOS			
Tasa de interés efectiva anual (TEA)		12.00%	
Máquina		7495 Hydracrowd	
Valor de la máquina (Va)		21000000	US\$
Valor de rescate (10%) (Vr)		2100000	US\$
Precio base de la depreciación		18900000	US\$
Vida económica útil (VEU)		109500	Hrs
Vida útil (N)		15	años (N)
		2	Guardias/día
		10	Hrs efecti/guardia
Horas de operación por año		7300	Horas
Inversión media anual (IMA)		11200000	US\$/año

COSTO DE POSESIÓN						
Depreciación (D)	Va-Vr		18900000		172.60	US\$ / Hr
	VEU		109500			
Interes horario del Capital invertido (I)	IMA*TEA*N		20160000		184.11	US\$ / Hr
	VEU		109500			
			Costo Posesión por hora		356.71	US\$ / Hr

COSTO DE OPERACIÓN						
Consumo electrico	3778	kW	0.074	\$ kW/hr	279.57	
Consumibles por PM (Filtros+Aceite+Grasa)					31.21	
Mantenimiento y reparación (50%)					95.89	
Costo de operación por hora					406.67	US\$ / Hr
Mano de Obra (Salario+Beneficios Sociales + Bonos)					50.00	US\$ / Hr
Accesorios			Vida Útil (Hrs)	Precio US\$		
Reparación Balde			500	30000	60.00	US\$ / Hr
Costo de Cables			1500	33189	22.13	US\$ / Hr
Carrilería			30000	1879873	62.66	US\$ / Hr
Costo de accesorios					144.79	US\$ / Hr
Costo Operación por hora					601.46	US\$ / Hr
COSTO TOTAL HORARIO					958.17	US\$ / Hr

Palas Mineral			Palas Desmante		
Cc	62.7	m3	Cc	62.7	m3
E	0.92	%	E	0.92	%
F	0.9	%	F	0.9	%
H	1		H	1	
A	1.1		A	1.1	
%Esponj.	0.82	%	%Esponj.	0.82	%
Dens. Min	2.4	TM/m3	Dens. Min	0	TM/m3
Dens. Desm.	0	TM/m3	Dens. Desm.	2.7	TM/m3
TC	17	seg	TC	17	seg
	0.28	Min		0.28	Min
Rend	5205	TM/Hr	Rend	5856	TM/Hr
Costo Unit Var	2.88	\$/TM	Costo Unit Var	1.20	\$/TM
Costo Parada	14991.46	USD/Hr	Costo Parada	7027.25	USD/Hr

Costo Unitario Mineral	0.18	\$/TM
Costo Unitario Desmante	0.16	\$/TM

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 8: CÁLCULO CON SOFTWARE RELIABILITY & MAINTENANCE ANALYST

SH001_IMPLEMENTOS

FileEditTest DesignZero FailuresMaintenanceHelp

	Data Val...	Quantity	Censoring
1	11851		
2	12010		
3	12099		
4	12300		
5	12372		
6	12712		
7	12950		
8	13053		
9	13110		
10	13139		
11	13184		
12	13330		
13	13342		
14	13646		
15	13665		
16	13709		
17	13751		
18	14216		
19	14274		
20	14380		
21	14532		
22	14660		
23	14678		
24	14826		
25	15012		
26	15023		

Censored Identifier

Estimate Distribution Parameters

Confidence Level

Confidence Level

☒ One-Sided
☐ Two-Sided

Estimation

Distribution
Method

Location Parameter

☒ None
☐ Software Estimate
☐ User Entered

Charting Options

☒ Transform the axes to enable a linear plot
☐ Use standard axes
☐ Add CDF estimates to MLE or MM plot

☒ CDF
☐ PDF
☐ Hazard
☐ Histogram

Create Chart

Repeat Data Points

☒ Use Largest Point
☐ Use All Points

CDF Estimate

☒ Median Rank
☐ Benard's

Regression

☒ CDF on y-axis
☐ CDF on x-axis

☐ Bayesian Weibull

Shape Parameter Value

Weibull Probability Plot
Number of Censored Data Points: 0
Total Number of Data Points: 119

Shape Parameter: 3.305558
Scale Parameter: 26074.04
Location Parameter: 0

R-squared: 0.8945401

Mean: 23390.79
Standard Deviation: 7792.623

Repeat Data Points: Use Largest Point
CDF Estimate: Median Rank
Regression: CDF on y-axis

	X	Lower CL	Reliability	Upper CL
1				

	Reliability	Lower CL	X	Upper CL
1				

Window Name

SH001_IMPLEMENTOS

SH002_IMPLEMENTOS

File Edit Test Design Zero Failures Maintenance Help

	Data Val...	Quantity	Censoring
1	10401		
2	10435		
3	10447		
4	10458		
5	10822		
6	10902		
7	10976		
8	11735		
9	11849		
10	11858		
11	12002		
12	12053		
13	12140		
14	12927		
15	13118		
16	13254		
17	13276		
18	13521		
19	13605		
20	13626		
21	14110		
22	14130		
23	15914		
24	15958		
25	16270		
26	16276		

Censored Identifier

Estimate Distribution Parameters

Confidence Level

Confidence Level

☒ One-Sided
☐ Two-Sided

Estimation

Distribution

Method

Location Parameter

☒ None
☐ Software Estimate
☐ User Entered

Charting Options

☒ Transform the axes to enable a linear plot
☐ Use standard axes

☐ Add CDF estimates to MLE or MM plot

Create Chart

Repeat Data Points

☒ Use Largest Point
☐ Use All Points

CDF Estimate

☒ Median Rank
☐ Benard's

Regression

☒ CDF on y-axis
☐ CDF on x-axis

☐ Bayesian Weibull

Shape Parameter Value

Weibull Probability Plot

Number of Censored Data Points: 0
Total Number of Data Points: 89

Shape Parameter: 2.750784
Scale Parameter: 27530.33
Location Parameter: 0

R-squared: 0.891888

Mean: 24498.31
Standard Deviation: 9623.195

Repeat Data Points: Use Largest Point
CDF Estimate: Median Rank
Regression: CDF on y-axis

	X	Lower CL	Reliability	Upper CL
1				

	Reliability	Lower CL	X	Upper CL
1				

Window Name

SH002_IMPLEMENTOS

SH001_HYDRACROWD

FileEditTest DesignZero FailuresMaintenanceHelp

	Data Val...	Quantity	Censoring
1	11665.0		
2	11944		
3	12274		
4	13300		
5	13688		
6	13820		
7	13853		
8	13864		
9	13887		
10	13907		
11	14470		
12	16557		
13	16654		
14	16897		
15	17064		
16	17688		
17	18529		
18	18658		
19	18664		
20	18671		
21	18674		
22	18680		
23	18864		
24	18865		
25	18889		
26	20374		

Censored IdentifierC

Estimate Distribution Parameters

Confidence Level

Confidence Level90%

One-Sided

Two-Sided

Estimation

DistributionWeibull

MethodProbability Plot

Location Parameter

None

Software Estimate

User Entered0

Repeat Data Points

Use Largest Point

Use All Points

CDF Estimate

Median Rank

Benard's

Regression

CDF on y-axis

CDF on x-axis

Bayesian Weibull

Shape Parameter Value2

Charting Options

Transform the axes to enable a linear plot

Use standard axes

Add CDF estimates to MLE or MM plot

CDF

PDF

Hazard

Histogram

Create Chart

Window Name

SH001_HYDRACROWD

Weibull Probability Plot

Number of Censored Data Points: 0
Total Number of Data Points: 78

Shape Parameter: 3.127439
Scale Parameter: 29563.39
Location Parameter: 0

R-squared: 0.9013924

Mean: 26449.58
Standard Deviation: 9260.952

Repeat Data Points: Use Largest Point
CDF Estimate: Median Rank
Regression: CDF on y-axis

	X	Lower CL	Reliability	Upper CL
1				

	Reliability	Lower CL	X	Upper CL
1				

SH002_HYDRACROWD

FileEditTest DesignZero FailuresMaintenanceHelp

	Data Val...	Quantity	Censoring
1	10065		
2	11130		
3	16456		
4	16468		
5	16480		
6	16491		
7	16509		
8	17162		
9	17198		
10	17359		
11	17410		
12	17446		
13	17613		
14	17702		
15	17756		
16	18029		
17	18032		
18	18141		
19	18420		
20	18588		
21	18823		
22	18974		
23	19028		
24	19045		
25	19504		
26	19535		

Censored IdentifierC

Estimate Distribution Parameters

Confidence Level

Confidence Level90%

One-Sided

Two-Sided

Estimation

DistributionWeibull

MethodProbability Plot

Location Parameter

None

Software Estimate

User Entered0

Repeat Data Points

Use Largest Point

Use All Points

CDF Estimate

Median Rank

Benard's

Regression

CDF on y-axis

CDF on x-axis

Bayesian Weibull

Shape Parameter Value2

Charting Options

Transform the axes to enable a linear plot

Use standard axes

Add CDF estimates to MLE or MM plot

CDF

PDF

Hazard

Histogram

Create Chart

Window Name

SH002_HYDRACROWD

Weibull Probability Plot

Number of Censored Data Points: 0
Total Number of Data Points: 54

Shape Parameter: 3.497803
Scale Parameter: 26539.79
Location Parameter: 0

R-squared: 0.8664799

Mean: 23878.31
Standard Deviation: 7560.769

Repeat Data Points: Use Largest Point
CDF Estimate: Median Rank
Regression: CDF on y-axis

	X	Lower CL	Reliability	Upper CL
1				

	Reliability	Lower CL	X	Upper CL
1				

171

