



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**PROYECTO EN MONITOREO DE CONDICIONES PARA
MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE PALAS ELECTROMECAÑICAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA**

MARCEL ALBERTO RIQUELME HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:

ALFREDO MUÑOZ RAMOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JORGE LOPEZ HIDALGO

HECTOR AGUSTO ALEGRÍA

SANTIAGO DE CHILE

JUNIO 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA.
POR: MARCEL RIQUELME HERNÁNDEZ
FECHA: 11 DE JUNIO DE 2013
PROF. GUÍA: ALFREDO MUÑOZ R.

“PROYECTO EN MONITOREO DE CONDICIONES PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE PALAS ELECTROMECAÓNICAS”

El objetivo principal de este trabajo consiste, en idear y desarrollar un proyecto que mejore el actual monitoreo de condiciones de las palas electromecánicas de extracción de mineral de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y así aplicar una estrategia de mantenimiento predictivo en éstas.

Con este fin, primero se realiza una etapa de investigación sobre la importancia de este tipo de máquinas, sus características mecánicas y eléctricas y las principales fallas de éstas, además del estado del arte con respecto a las técnicas de análisis que permiten desarrollar planes de mantenimiento predictivo en estos equipos. En particular, se estudiará aquellos análisis relacionados con el objetivo principal del proyecto, es decir, el análisis de vibraciones mecánicas y el análisis de las corrientes de el o los motores eléctricos involucrados en el funcionamiento de las palas electromecánicas.

La segunda etapa del trabajo consiste en la definición de cada etapa del proyecto hasta el comienzo de su implementación. Para esto, primero se realiza un análisis de la situación actual del monitoreo con que se cuenta, su funcionamiento y los problemas que posee y que conllevan al mejoramiento de éste. Esto permite determinar los objetivos y características que se deben cumplir y desarrollar una metodología de trabajo del proyecto que se llevará a cabo para determinar las mejores soluciones en monitoreo de condiciones para la compañía.

Con la metodología implementada y las características que debe cumplir el proyecto, se analiza a continuación las ofertas existentes en el mercado, y se piden y estudian las propuestas de las empresas licitadas para determinar el mejor sistema a implementar en las palas existentes.

La opción más conveniente resulta ser la de la empresa CADETECH que, mediante un contrato por tres años, permite implementar el sistema SiamFlex basado en análisis de vibraciones mecánicas que mejoraría el mantenimiento predictivo de los equipos y permitiría el desarrollo futuro de un análisis conjunto de corrientes eléctricas y vibraciones mecánicas. Además cuenta con experiencia específica en monitoreo de condiciones de palas electromecánicas en otras faenas mineras chilenas.

Finalmente, se da inicio al proyecto y se obtienen los primeros datos en terreno de dos palas de la compañía en sus transmisiones más críticas, generándose conclusiones y recomendaciones preventivas y predictivas a la estrategia de mantenimiento.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES	1
1.3 ESTRUCTURA GENERAL.....	2
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DEL MONITOREO DE CONDICIONES ANORMALES EN PALAS ELECTROMECHANICAS	3
2.1 PALAS EN EL RUBRO MINERO CHILENO	3
2.1.1 PALAS DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INES DE COLLAHUASI.....	3
2.2 PALAS ELECTROMECHANICAS	4
2.2.1 ESPECIFICACIONES TECNICAS	5
2.2.2 FALLAS CRÍTICAS	12
2.3 ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	14
2.3.1 ESTADO DEL ARTE EN MONITOREO DE CONDICIONES	15
2.3.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES.....	16
2.3.3 ANÁLISIS DE CORRIENTES DE MOTOR.....	22
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	24
3.1 MONITOREO REALIZADO POR PERSONAL EXTERNO	24
3.2 PÉRDIDAS ECONÓMICAS ASOCIADAS AL SISTEMA ACTUAL.....	25
3.3 ESPECIFICACIONES DEL NUEVO SISTEMA.....	26
3.4 PROPUESTAS ESTUDIADAS	26
3.4.1 SKF.....	26
3.4.2 EMPRESA CADETECH	30
3.5 MATRIZ COMPARATIVA.....	36
3.6 CASO DE NEGOCIO DEL PROYECTO.....	36
3.7 CARTA GANTT DEL PROYECTO	39
3.8 SUGERENCIAS AL ANÁLISIS DE CORRIENTES	40
CAPÍTULO 4. PRIMEROS ANÁLISIS DE VIBRACIONES	42
4.1 PUNTOS DE MEDICIÓN.....	42
4.2 TECNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	43
4.3 VIBRACIONES EN EL PUNTO 4H DEL REDUCTOR DE PALA 8 Y 10	43

4.3.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL REDUCTOR DE LA PALA 8, PUNTO 4H	45
4.3.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL REDUCTOR DE LA PALA 10, PUNTO 4H	47
4.4 VIBRACIONES EN EL PUNTO 8H DEL TAMBOR DE PALA 8 Y PALA 10	50
4.4.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL TAMBOR DE LA PALA 8, PUNTO 8H....	51
4.4.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL TAMBOR DE LA PALA 10, PUNTO 8H..	53
4.5 VIBRACIONES EN EL PUNTO 1H DEL MOTOR DE PALA 8 Y 10	56
4.5.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL MOTOR DE LA PALA 8, PUNTO 1H	57
4.5.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL MOTOR DE LA PALA 10, PUNTO 8H	60
4.6 ANÁLISIS DE VIBRACIONES DEL CONJUNTO HOIST-REVOLVING FRAME	62
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	70
5.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS	70
5.1.1 PALA 8	70
5.1.2 PALA 10	71
5.2 RECOMENDACIONES.....	71
5.3 CONCLUSIONES ACERCA DEL PROYECTO	72
REFERENCIAS	73
ANEXO 1	75
ANEXO 2	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Distribución porcentual de palas en Chile.....	3
Ilustración 2: Bucyrus 495HR.....	4
Ilustración 3: Vista lateral Bucyrus 495HR.....	5
Ilustración 4: Máquina inferior Bucyrus 495HR.....	6
Ilustración 5: Maquinaria de propulsión.....	6
Ilustración 6: Plataforma rotatoria Bucyrus 495HR.....	7
Ilustración 7: Maquinaria de giro.....	8
Ilustración 8: Maquinaria de empuje.....	9
Ilustración 9: Maquinaria de levante.....	10
Ilustración 10: Dimensiones Bucyrus 495HR asociadas a Tabla 1.....	10
Ilustración 11: Diagrama de bloque eléctrico de la pala.....	12
Ilustración 12: Diagrama eléctrico de la pala.....	12
Ilustración 13: Detalle maquinaria de levante.....	13
Ilustración 14: Anillos colectores.....	14
Ilustración 15: Sistema de Monitoreo.....	16
Ilustración 16: Acelerómetro piezoeléctrico.....	18
Ilustración 17: Comparación de las unidades utilizadas según la frecuencia.....	18
Ilustración 18: Problemas de desbalanceo.....	19
Ilustración 19: Problemas de desalineamiento.....	20
Ilustración 20: Tipos de soldaduras.....	20
Ilustración 21: Problemas de soldadura.....	20
Ilustración 22: Problemas por deformación de carcasa.....	21
Ilustración 23: Problemas por fallas en transmisión por correas.....	21
Ilustración 24: Problemas por fallas en rodamientos.....	21
Ilustración 25: Problemas por fallas en engranajes.....	22
Ilustración 26: Velocidades para distintos ciclos de trabajo.....	25
Ilustración 27: Acelerómetro SKF CMPT 2310T.....	27
Ilustración 28: Modulo de registro de datos IMx-S 16 y 32.....	27
Ilustración 29: Análisis de frecuencia en @plitude analyst.....	28
Ilustración 30: Diagrama del sistema propuesto.....	28
Ilustración 31: Esquema del sistema de monitoreo e interfaz SiamFlex.....	31
Ilustración 32: Acelerómetro CTC-AC104.....	31
Ilustración 33: Chasis CompactDAQ y módulo NI9237.....	32
Ilustración 34: Equipo CompactRIO con módulos incluidos.....	32
Ilustración 35: Arquitectura de comunicación entre módulos SiamFlex.....	33
Ilustración 36: Proceso de Transformación a un espectro en órdenes de una señal.....	34
Ilustración 37: Carta Gantt del proyecto.....	40
Ilustración 38: Fluke 435.....	41
Ilustración 39: Aceleración 4H de las palas 8 durante 3 ciclos de carga del balde.....	43
Ilustración 40: Aceleración 4H de las palas 10 durante 3 ciclos de carga del balde.....	44

Ilustración 41: Ampliación de la Ilustración 39 para mostrar un solo ciclo de carga	44
Ilustración 42: Espectro aceleración 4h de pala 8 con balde bajando	45
Ilustración 43: Espectro aceleración 4h de pala 8 con balde bajando hasta 100.000 CPM.....	45
Ilustración 44: Espectro aceleración 4h de pala 8 con balde subiendo	46
Ilustración 45: Forma de onda aceleración 4h en cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 8	46
Ilustración 46: Forma de onda de la aceleración vibratoria en el punto 4h de la pala 10 durante la bajada del balde	47
Ilustración 47: Espectro aceleración 4h de pala 10 con balde bajando	47
Ilustración 48: Forma de onda aceleración 4h de pala 10 con balde subiendo	48
Ilustración 49: Expansión de la forma de onda aceleración de la Ilust. 48	48
Ilustración 50: Espectro aceleración 4h de pala 10 con balde subiendo	49
Ilustración 51: Forma de onda aceleración 4h en 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga pala 10	49
Ilustración 52: Aceleración 8H de las palas 8 durante 3 ciclos de carga.....	50
Ilustración 53: Aceleración 8H de las palas 8 durante 3 ciclos de carga.....	50
Ilustración 54: Forma de onda aceleración 8h de pala 8 con balde bajando	51
Ilustración 55: Espectro aceleración 8h de pala 8 con balde bajando	51
Ilustración 56: Forma de onda aceleración 8h de pala 8 con balde subiendo	52
Ilustración 57: Forma de onda aceleración 8h en cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 8	53
Ilustración 58: Forma de onda de la aceleración vibratoria en el punto 8h de la pala 10 durante la bajada del balde	53
Ilustración 59: Ampliación de uno de los transientes de la Ilust. 58.....	54
Ilustración 60: Espectro de la vibración de la Ilust. 58	54
Ilustración 61: Forma de onda aceleración 8h de pala 10 con balde subiendo	55
Ilustración 62: Expansión de la forma de onda aceleración de la Ilust. 61	55
Ilustración 63: Forma de onda aceleración 8h en 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 10.....	56
Ilustración 64: Aceleración 1H de la pala 8 durante 3 ciclos de carga.....	56
Ilustración 65: Aceleración 1H de las palas 10 durante 2 ciclos de carga	57
Ilustración 66: Espectro aceleración 1h de pala 8 con balde bajando	57
Ilustración 67: Expansión de la forma de onda en torno a los 432,23 s en 1H de pala 8.....	58
Ilustración 68: Expansión espectro de la Ilustración 66 a bajas frecuencias.....	58
Ilustración 69: Forma de onda en 1H de pala 8.....	59
Ilustración 70: Espectro envolvente en 1H de pala 8	59
Ilustración 71: Forma de onda aceleración 1h en cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 8	60
Ilustración 72: Espectro aceleración vibratoria en el punto 1H de la pala 10 durante la bajada del balde	60
Ilustración 73: Ampliación del espectro a bajas frecuencias.....	61

Ilustración 74: Forma de onda aceleración 1H en 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 10.....	62
Ilustración 75: Puntos de medición Hoist-Revolving Frame.....	62
Ilustración 76: Espectros Pala 10 subiendo	63
Ilustración 77: Espectros Pala 10 bajando.....	64
Ilustración 78: Espectros Pala 8 subiendo	65
Ilustración 79: Espectros Pala 8 bajando.....	66
Ilustración 80: Forma de onda aceleración en 7V de pala 10 subiendo	67
Ilustración 81: Forma de onda aceleración en P6 de pala 10 subiendo.....	67
Ilustración 82: Forma de onda aceleración en P5 de pala 10 subiendo.....	67
Ilustración 83: Ensayo de golpe en P6 y medición de vibración en P5 de pala 10	68
Ilustración 84: Ensayo de golpe en P6 y medición de vibración en P5 de pala 8	69
Ilustración 85: Ilust. 39 repetida, forma de onda aceleración 4H en tres ciclos de carga de pala 8	70
Ilustración 86: Puntos de medición carcasa.....	75
Ilustración 87: Puntos de medición plataforma	76
Ilustración 88: Ubicación de Engranés.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones y rangos Maquina Bucyrus 495HR	11
Tabla 2: Pesos soportados por Bucyrus 495HR	11
Tabla 3: Especificaciones eléctricas Bucyrus 495HR	11
Tabla 4: Rangos de frecuencia para las unidades de medición	18
Tabla 5: Tabla para estimar fallas en el rotor	23
Tabla 6: Cotización del Prototipo SKF	30
Tabla 7: Cotización del sistema SiamFlex por CADETECH.....	35
Tabla 8: Matriz Comparativa de las propuestas	36
Tabla 9: Cantidad de material extraído el año 2011	36
Tabla 10: Total de horas anuales perdidas en monitoreo de vibraciones	37
Tabla 11: Caso de negocio sistema SiamFlex a tres años	38
Tabla 14: Especificaciones Fluke 435	41
Tabla 15: Puntos de medición	42
Tabla 16: Códigos Puntos de Medición.....	75
Tabla 17: Valor de Frecuencias de Engrane.....	77

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Para el desarrollo y la explotación de minas a cielo abierto es necesaria una gran maquinaria de extracción y movimiento de tierra. Este conjunto de máquinas se puede clasificar en cuatro importantes grupos: camiones, palas, perforadoras y equipos auxiliares. Las más importantes en la cadena de producción son las palas ya que de éstas dependen unos diez a quince camiones que llevan el material estéril o el mineral dependiendo del caso. Es por este motivo que una falla inesperada que ocurra en una pala impacta mucho más a la producción que si fallara un camión, una perforadora u otro equipo auxiliar.

De lo anterior, se concluye que resulta de vital importancia un correcto mantenimiento de las palas de extracción de mineral por lo que se debe contar con una buena estrategia que debe contar con planes reactivos, preventivos y predictivos. Las técnicas de mantenimiento reactivo se han aplicado durante las últimas décadas aumentando la disponibilidad pero no son de mucha utilidad cuando se tienen fallas inesperadas que resultan ser críticas y/o crónicas en estos equipos. Es por este motivo que el monitorear las condiciones físicas de una pala genera la capacidad de adelantarse a una falla de este tipo lo cual es la base de lo que se conoce como mantenimiento predictivo. En realidad lo que se monitorea es la aparición de condiciones anormales de funcionamiento.

Al año 2012 en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, este monitoreo de condiciones se realiza en terreno por personal técnico de mantención causando la detención de la pala a medir, lo que conlleva a un gasto de horas hombre y pérdidas en la producción considerables. Además, estas mediciones y análisis no están aportando a predecir las fallas más críticas de una pala por lo cual la plan de mantenimiento predictivo es pésimo.

Este proyecto apunta a implementar un nuevo sistema de monitoreo, continuo y en línea, orientados a la medición de vibraciones y corrientes de el o los motores lo cual busca, entre otros aspectos:

- a) Generar correctos planes de mantenimiento predictivo,
- b) Aumentar la disponibilidad de las palas,
- c) Disminuir las fallas imprevistas,
- d) Aumentar las horas efectivas de trabajo eliminando las horas de monitoreo en terreno y
- e) Eliminar el riesgo de accidente para el personal que realiza el monitoreo en terreno.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES

El principal objetivo que persigue este trabajo de título es implementar un sistema de monitoreo continuo y en línea de las vibraciones y corrientes de motor de las palas electromecánicas para

aumentar la disponibilidad y seguridad de éstas. Con el fin de lograr el objetivo principal, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Implementar un Sistema de Monitoreo en Línea que:
 - Aumente la confiabilidad de las palas electromecánicas.
 - Aumente la producción de la compañía.
 - Disminuya a cero las horas de monitoreo programado.
 - Disminuya las fallas imprevistas.
 - Disminuya a cero el riesgo para los trabajadores que monitorean en terreno.
- Implementar un sistema basado en el análisis de las vibraciones de las transmisiones de:
 - Levante
 - Empuje
 - Giro
- Implementar un sistema basado en el análisis de las corrientes de los motores de:
 - Levante.
 - Empuje.
 - Giro.

1.3 ESTRUCTURA GENERAL

El trabajo se encuentra dividido en los capítulos que se explican a continuación:

- Capítulo 2: Se hace una presentación de todos los contenidos considerados relevantes para el entendimiento del trabajo y de las actividades que se realizarán en los capítulos posteriores. Se introducen las importancias de la palas y sus características mecánicas y eléctricas, además del estado del arte en monitoreo de condiciones orientados a mantenimiento predictivo y el detalle de los que se desarrollaran en el proyecto.
- Capítulo 3: En este capítulo se muestra todo el desarrollo del proyecto, definiendo las características del nuevo sistema, pasando por el estudio de las propuestas obtenidas hasta el comienzo de la implementación del sistema.
- Capítulo 4: Se realiza el primer análisis en la transmisión más crítica de dos de las palas de la compañía con el nuevo sistema de monitoreo y se presentan los resultados obtenidos.
- Capítulo 5: En base a los resultados del análisis anterior se extraen las primeras conclusiones y recomendaciones. Además se realiza un análisis de los objetivos cumplidos por el proyecto.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DEL MONITOREO DE CONDICIONES ANORMALES EN PALAS ELECTROMECHANICAS

2.1 PALAS EN EL RUBRO MINERO CHILENO

Dentro de las maquinarias mineras utilizadas para la extracción de material, unas de las más importantes, sin duda, son las palas de carguío las cuales extraen el mineral para llenar los camiones que envían el material para su producción. En Chile existen alrededor de 112 palas para la minería, mientras que Perú y Argentina en conjunto no superan las 60; esto según un catastro de equipamiento minero al 2011.⁽¹⁾

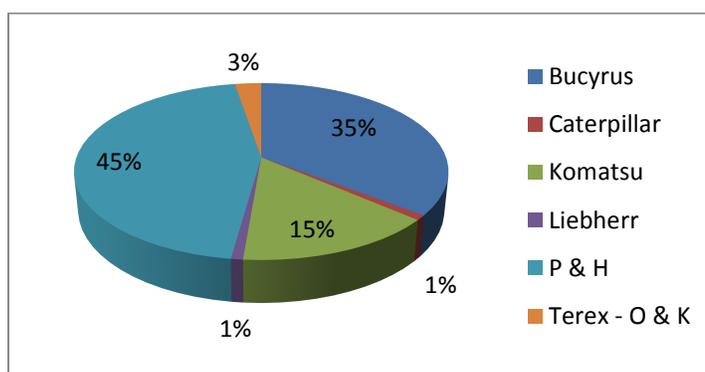


Ilustración 1: Distribución porcentual de palas en Chile

2.1.1 PALAS DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INES DE COLLAHUASI

La Superintendencia (SI) de Mantenimiento de Palas y Perforadoras de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) debe asegurar el buen funcionamiento de éstas y determinar eventos que pudiesen desencadenar fallas catastróficas para la empresa. La forma de evitar estas fallas es mediante un plan de mantenimientos programadas de acuerdo a las horas efectivas de uso, además de realizar un monitoreo de condiciones en terreno por parte de personal Bucyrus para poder pronosticar posibles problemas y así coordinar compras y cambios de repuestos a tiempo para maximizar la extracción de mineral.

Las palas electromecánicas que dependen de la mantención de la SI dentro de la mina son las tipo Bucyrus 495BI y 495 HR. Se poseen 5 unidades BI (palas PA01, PA02, PA03, PA04 y PA05) y 4 unidades HR (PA06, PA08, PA09 y PA10) trabajando en mina, éstas pueden cargar un camión en un tiempo de 5 minutos aproximadamente mediante 3 baldadas. De cada pala están a cargo, en promedio, aproximadamente 10 camiones por lo cual cualquier imprevisto es una gran pérdida para la compañía. Además, la compañía posee dos palas tipo P&H 4100XPC (PA11 y PA12) las cuales son mantenidas por un contrato externo.



Ilustración 2: Bucyrus 495HR

Una forma de medir la confiabilidad de un equipo es fijarse en su disponibilidad la cual en este tipo de máquinas se espera deba ser de un 90% aproximadamente. La disponibilidad esperada por Gerencia de Mina de la compañía es de un 88% lo cual en los últimos años no se ha cumplido llegando tan solo a un 85%. La actual baja confiabilidad de estos equipos es uno de los principales problemas en el no cumplimiento de las metas de extracción, razón por la cual se ha decidido internalizar el monitoreo de condiciones de las palas Bucyrus para lo cual se deberá generar un nuevo sistema y crear una nueva área con personal capacitado.

El principal problema de este tipo de palas son las altas vibraciones en sus transmisiones lo cual produce un desgaste mayor a los componentes y crea fallas inesperadas, las que provocan un tiempo considerable de retraso en la faena de extracción. Por eso se requiere monitorear principalmente las variables vibraciones mecánicas y la corriente eléctrica en los motores eléctricos para poder prevenir estas fallas y actuar de forma anticipada, y generar, en consecuencia, un plan de mantenimiento predictivo.

Actualmente se realiza monitoreo de vibraciones en terreno por personal externo realizando movimientos uniformes a velocidad constante en la pala lo cual no arroja los datos esperados para una prevención temprana ya que el movimiento natural de la pala es a velocidad variable y no uniforme. Además, cuando se toman los datos en terreno se debe detener la producción de la pala aproximadamente una hora y existe un gran riesgo de accidente para el personal que toma los datos.

2.2 PALAS ELECTROMECHANICAS

Estas palas electromecánicas están diseñadas especialmente para la minería lo cual proporcionan un eficiente servicio bajo las condiciones más severas. Las máquinas se construyeron con los estándares más altos posibles y proporcionan una operación libre de dificultades si son apropiadamente mantenidas. Para poder realizar los movimientos requeridos de cargar material desde los bancos y depositarlos en los camiones de extracción se utilizan distintas transmisiones.

Las principales transmisiones son:

- Levante: mueve el balde a través del banco, durante la fase de excavación y proporciona el levante y la bajada controlada del carguío durante otras fases de operación.
- Empuje: mueve el mango del balde hacia afuera o hacia dentro para controlar la profundidad de corte y posiciona el balde sobre el camión para vaciar la carga.
- Giro: Gira la pala entre las posiciones de excavación y vaciado. El sistema de giro utiliza dos transmisiones, una de 180° a la izquierda y la otra 180° a la derecha.
- Propulsión: mueve la pala de una posición de excavación a otra. Dos mecanismos impulsores independientes proporcionan el avance y retroceso o giro mediante una dirección diferencial.

2.2.1 ESPECIFICACIONES TECNICAS

Este tipo de palas se puede dividir en dos sistemas independientes: la maquina inferior y la plataforma superior. A continuación se resumen estas partes y las transmisiones más importantes de la pala 495HR muy similar al modelo BI y así dar a conocer cómo trabaja este tipo de máquinas:

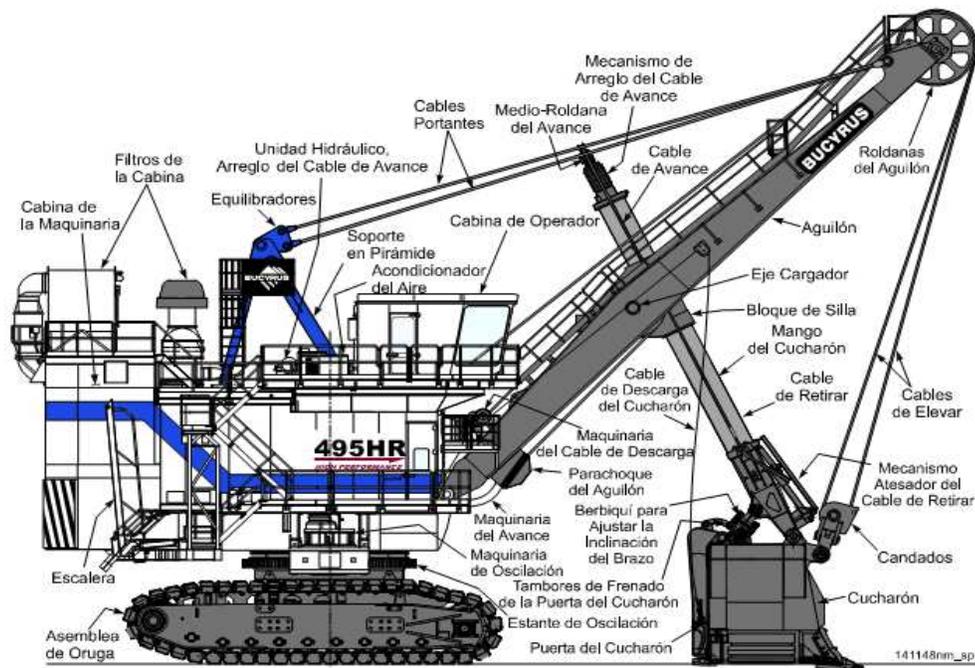


Ilustración 3: Vista lateral Bucyrus 495HR

- a) **Máquina inferior:** consta de la estructura de transporte, las estructuras de oruga derecha e izquierda, las cadenas de oruga, maquinaria de propulsión, cremallera de giro y el circuito de rodillos.

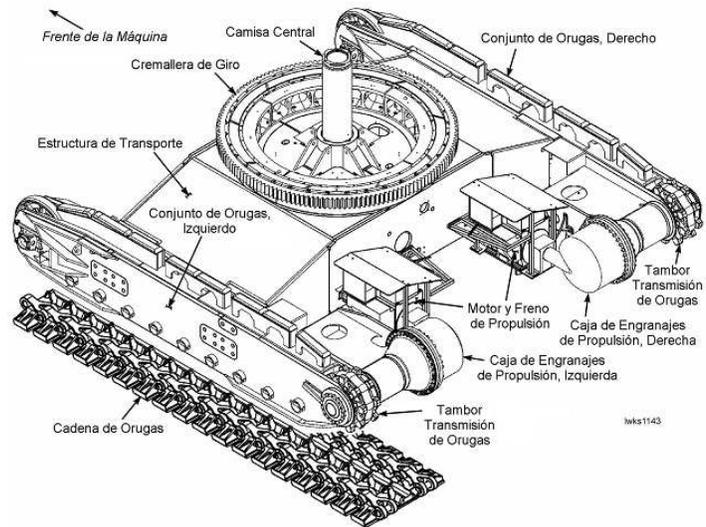


Ilustración 4: Máquina inferior Bucyrus 495HR

En la parte inferior se encuentra la maquinaria responsable de la transmisión de propulsión que está accionada por dos motores AC, cada uno montado horizontalmente a la estructura de orugas. Cada motor está acoplado en ángulo recto a una caja de engranajes planetarios, elevadas del piso para protegerlas contra daños por agua y rocas. Un freno de discos, accionado por resorte y aliviado por aire está montado a cada uno de los dos motores. La configuración planetaria dual con motores de accionamiento separados, permite propulsión recta adelante o atrás, tanto como direccionamientos en y contra sentido de reloj. A continuación se muestra un detalle de la maquinaria:

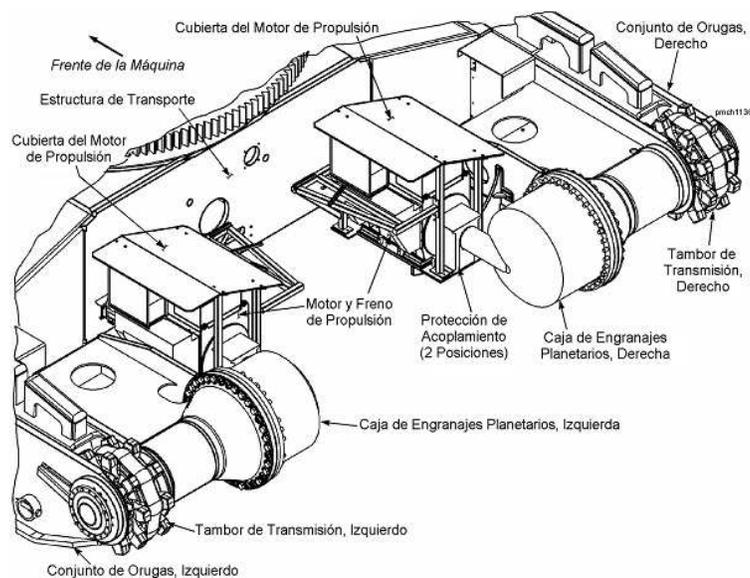


Ilustración 5: Maquinaria de propulsión

b) Plataforma rotatoria: consiste en la estructura giratoria, el eje central, plataformas de extensión derecha e izquierda, la cabina de los operadores y la sala de máquinas. También están incluidos los componentes del sistema eléctrico, los controles de operación, sistema de aire, junto a las unidades de las maquinarias de levante, giro y empuje.

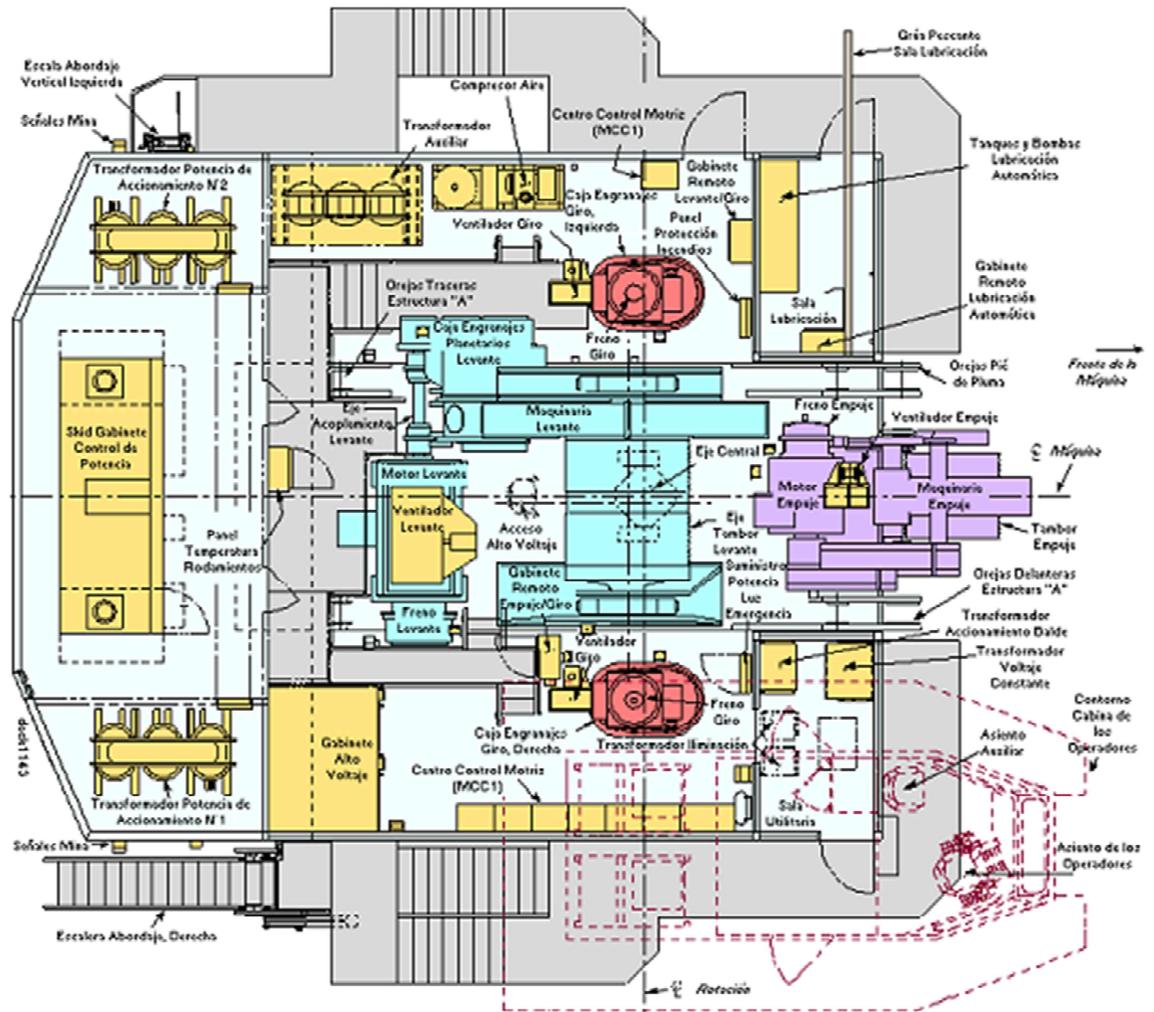


Ilustración 6: Plataforma rotatoria Bucyrus 495HR

En la plataforma rotatoria se encuentra la maquinaria de giro, a cada lado de esta estructura giratoria hay montadas dos cajas de engranajes, cada una accionada por un motor montado verticalmente. De cada caja salen dos ejes de potencia ranurados a piñones que engranan con la cremallera de giro. En cada uno de los motores hay montado un freno de discos planos, accionado por resorte aliviado por aire. Los componentes de la máquina en giro se muestran en la Ilustración 7:

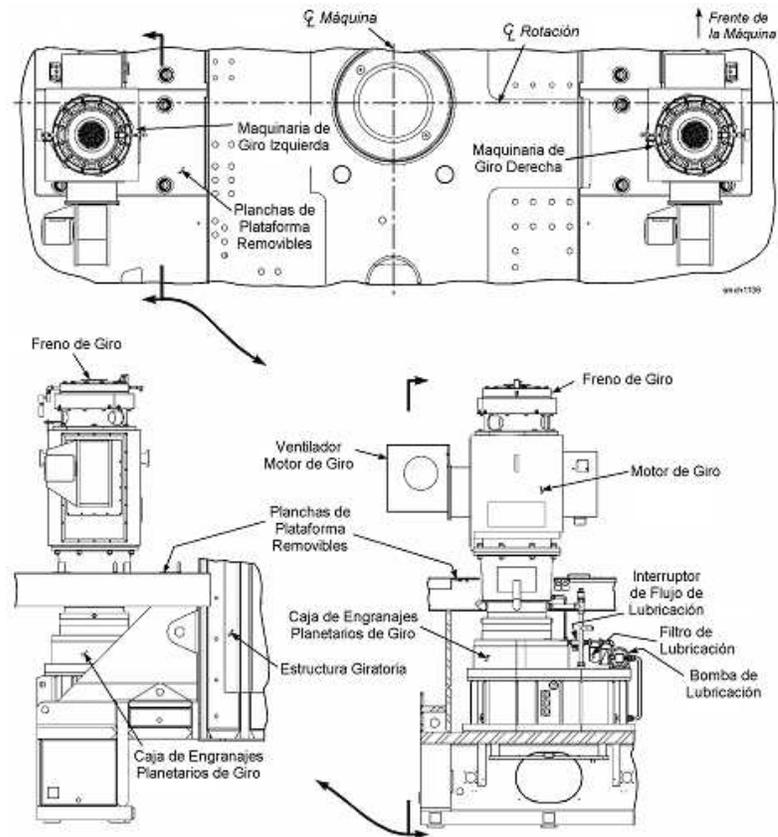


Ilustración 7: Maquinaria de giro

La maquinaria de empuje, ubicada al centro de la parte frontal de la estructura giratoria, consiste del motor, freno, tambor y engranajes. Un codificador giratorio previene el sobrecorrido del mango del balde. Al ubicar la maquinaria sobre la estructura giratoria en vez de hacerlo sobre la pluma, se reduce el peso del extremo frontal sustancialmente, resultando en una baja de inercia y esfuerzo de giro. El tambor acciona el sistema de cables de empuje y recoger. Los cables de empuje y recoger están fijados al tambor de anclajes casquillo-estrobo lo que simplifica enormemente los cambios de cable. El esquema completo de la maquinaria de empuje se muestra en la Ilustración 8.

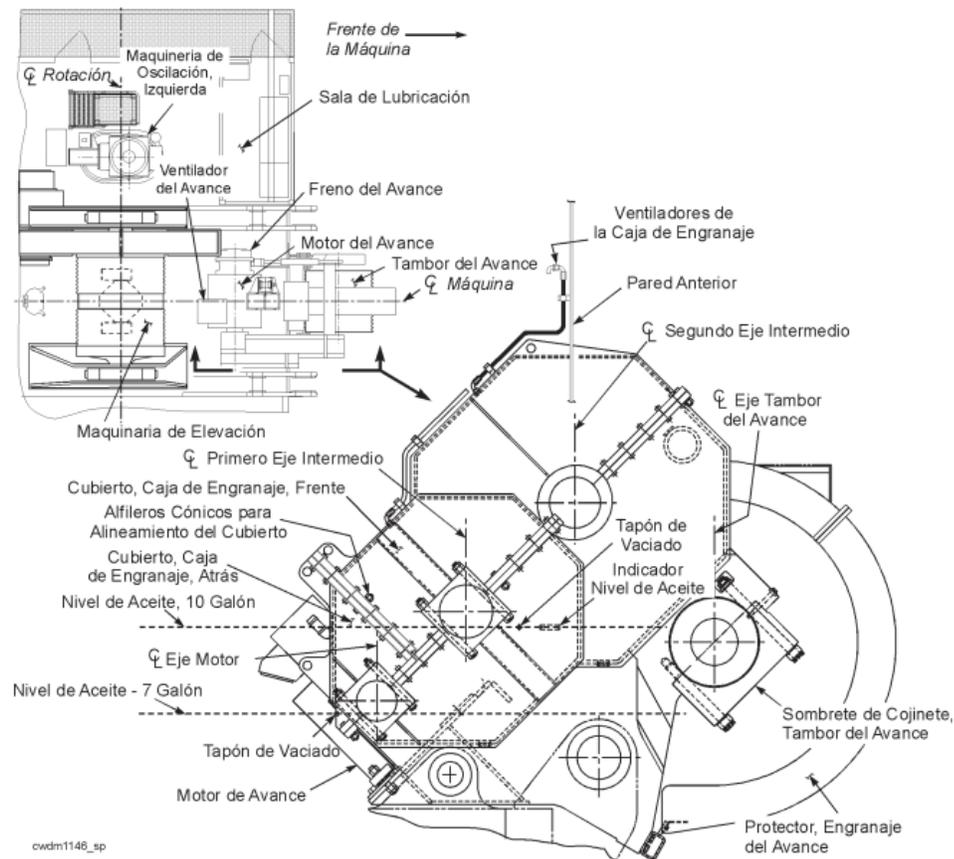


Ilustración 8: Maquinaria de empuje

Por último, la maquinaria de levante consiste de un motor acoplado a dos reducciones de engranaje las cuales accionan el tambor. Montado al motor hay un freno de discos planos, accionados por resortes y aliviados por aire y un codificador giratorio limita el recorrido. El motor está conectado al eje piñón motriz por un acoplamiento de engranajes dentados.

El conjunto de la primera reducción de engranajes está montado en una caja de engranajes totalmente cerrada, lubricada por aceite. La segunda reducción de engranajes esta lubricada por goteo con OGL desde el sistema automático de lubricación. Todos los ejes giran en rodamientos antifricción. El engranaje principal de levante está apernado a una cruceta al lado izquierdo del tambor.

El tambor de levante se fabrica con ranuras maquinadas y endurecidas a fuego, para los cables. Los muñones de los ejes de las crucetas del tambor giran sobre rodamientos antifricción, soportados por estructuras laterales las cuales están apernadas a la plataforma giratoria. La Ilustración 9 presenta una vista de la maquinaria de levante:

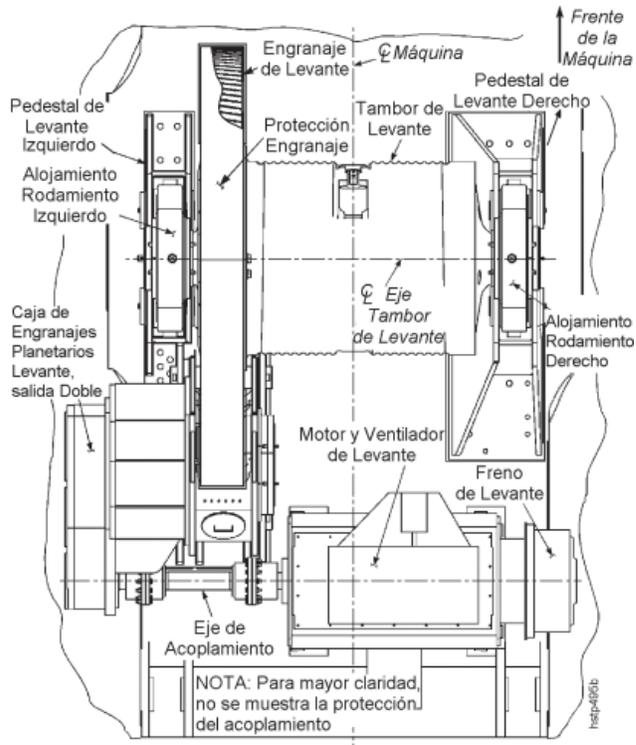


Ilustración 9: Maquinaria de levante

Es importante saber las dimensiones y rangos de trabajo de estos equipos así como las capacidades de peso y volumen de carguío. Para esto se presentan la Tabla 1 que está asociada a la Ilustración 10 que muestra las enormes dimensiones de la pala y la Tabla 2 que da cuenta de los pesos de ésta:

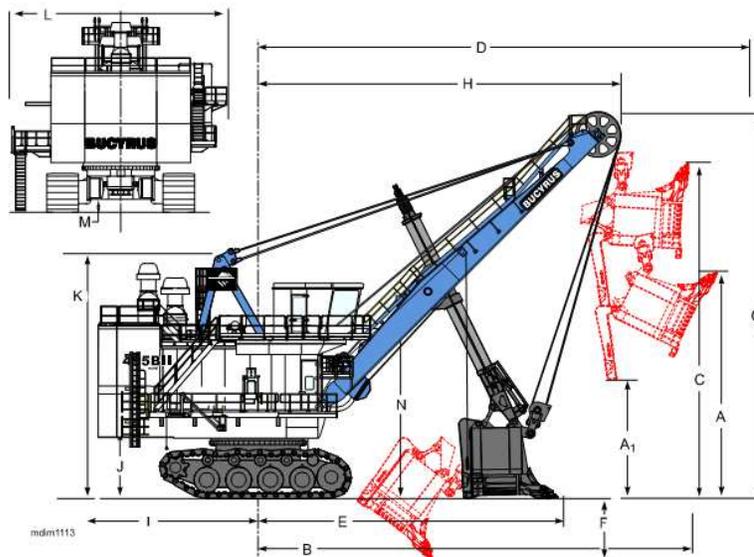


Ilustración 10: Dimensiones Bucyrus 495HR asociadas a Tabla 1

Dimensiones y Rangos de Trabajo

	US	Métrico
Capacidad Balde (nominal).....	60 yd ³	46 m ³
Capacidades de Baldes (rango).....	40-80 yd ³	30.6-61.2 m ³
Longitud de la Pluma.....	67'	20.4 m
Ángulo de la Pluma.....		45°
Longitud Efectiva del Mango del Balde.....	35'-10"	10.9 m
Longitud Total del Mango del Balde.....	47'	14.3 m
A: Altura de Descarga.....	34'-10"	10.6 m
A: Altura de Descarga a Radio Máximo.....	28'-3"	8.61 m
B: Radio de Descarga - Máximo.....	66'-9"	20.34 m
C: Altura de Corte - Máximo.....	59'-3"	18.1 m
D: Radio de Corte - Máximo.....	78'-2"	23.83 m
E: Radio a Nivel del Suelo.....	56'-1"	17.1 m
F: Profundidad Bajo Nivel del Suelo - Máxima.....	10'-6"	3.20 m
G: Altura Libre @ Poleas Punta Pluma.....	68'-6"	20.9 m
H: Radio Libre @ Poleas Punta Pluma.....	63'-1"	19.02 m
I: Radio Libre @ Estructura Giratoria.....	29'-7"	9.02 m
J: Altura Libre - Estructura Giratoria al Suelo.....	10'-10"	3.3 m
K: Altura de la Estructura "A".....	44'-4"	13.51 m
L: Ancho Total de la Máquina.....	42'-8"	13.01 m
M: Altura al Suelo (Punto Inferior Estructura Transporte).....	22'	0.67 m
N: Nivel Visual desde Cabina del Operador.....	29'-0"	8.84 m

Tabla 1: Dimensiones y rangos Maquina Bucyrus 495HR

	Pesos	
	(libras)	(kilogramos)
Peso de Trabajo (c/Balde)	2,688,000	1,219,300
Balde (60 yd ³ , 46 m ³)	138,000	62,600
Contrapeso	700,000	318,200
Peso Neto, menos Contrapeso y Balde	1,850,000	839,200

Tabla 2: Pesos soportados por Bucyrus 495HR

Por último, en la Tabla 3 se adjuntan las características eléctricas de la máquina:

POWER REQUIREMENTS		MAIN ELECTRICAL SYSTEMS	
Voltage	3 Phase, 50/60 Hz, 7200v	System voltage (nominal)	50/60 Hz, 7200v
Avg. 15 min. demand	929-1,300 kw	Trail cable (furnished by customer)	SHD-3-#1/0 @ 7,200v
Peak Power	3,715 kw	Transformer, auxiliary	250 kva 7200v primary
Other voltage requirements available to suit customer requirements.		Lighting	25 kva 480v secondary 480v primary 120/240v secondary
DISTRIBUTION SYSTEM REQUIREMENTS		ELECTRICAL EQUIPMENT – AC Variable Frequency Control	
Machine on separate system	4,000 kva		
Machine on large system	2,050 kva		

Tabla 3: Especificaciones eléctricas Bucyrus 495HR

Las palas Bucyrus se alimentan de una red de alta tensión trifásica de 7200 V AC, luego pasa por un transformador delta-estrella que reduce el voltaje a 900 V AC los cuales van a un sistema colector de anillos que distribuye la energía a cuatro rectificadores que alimentan una barra de 1800 V DC para luego pasar por cuatro inversores (DC-AC) que alimentan entre 0 y 1400 V AC y 0 a 68 Hz() los motores de inducción jaula de ardilla, de las distintas transmisiones mediante una serie de interruptores semiconductores operados electrónicamente. Un esquema simple se muestra en la Ilustración 11.

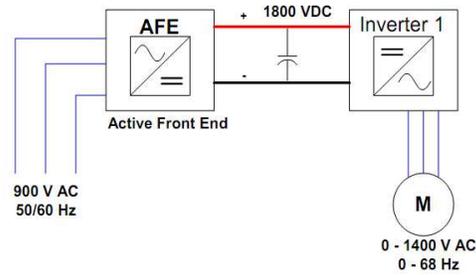


Ilustración 11: Diagrama de bloque eléctrico de la pala

Cabe mencionar que las palas 495BI, por ser más antiguas, ocupan transistores BJT mientras que las palas 495HR ocupan tecnología IGBT para la electrónica de potencia. En la Ilustración 12 se presenta un esquema más detallado del sistema eléctrico el cual cuenta con un sistema de precarga, protecciones de sobre voltaje e interruptores que hacen la conmutación de los inversores y sus respectivos motores:

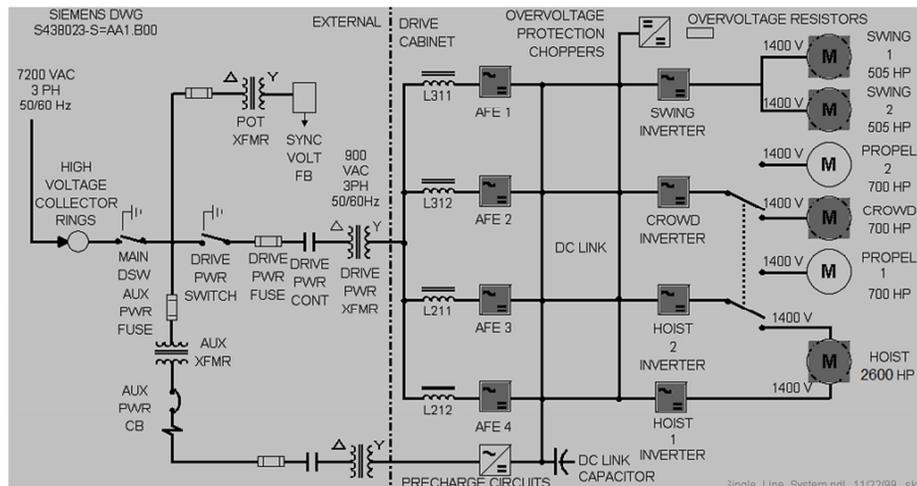


Ilustración 12: Diagrama eléctrico de la pala

También, existe un transformador que rebaja los 7200 V AC a 480 V AC para efectos de la red auxiliar y una nueva rebaja a 110/220 V AC para efecto de iluminación.

2.2.2 FALLAS CRÍTICAS

La falla más crítica y que se ha vuelto recurrente en estas palas ocurre en la maquinaria de levante la cual consta de:

- Un tambor de levante de gran diámetro.
- Engranaje de levante integral simple-helicoidal.
- Caja de engranajes planetarios de doble salida.
- Conjunto del motor y freno de levante.

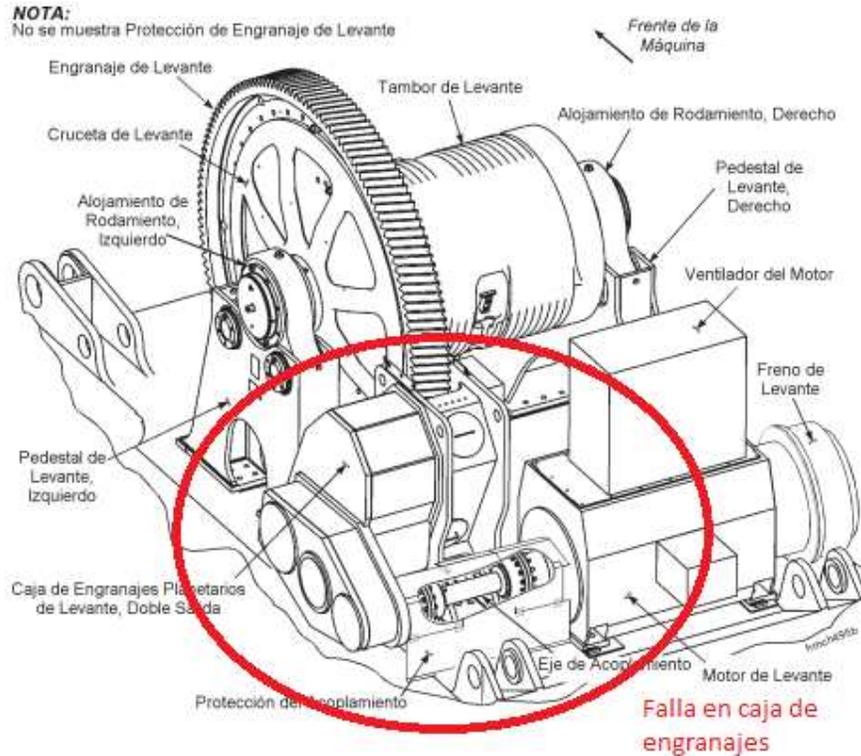


Ilustración 13: Detalle maquinaria de levante

La caja de engranajes de levante es una caja planetaria de potencia dividida. La potencia se transfiere desde el motor de levante por un eje de entrada a piñones doble helicoidales que engranan el engranaje principal de levante. Tres pasadores sujetan la caja al pedestal de levante izquierdo. La caja usa un sistema de aceite circulante para lubricar los componentes internos y para mantener el enfriamiento.

Las fuertes vibraciones que empiezan a ocurrir debido a desacoplamientos, desalineamientos, solturas, deformaciones o fallas en algún rodamiento o engranajes producen una falla catastrófica de la caja de transmisión lo cual no se puede predecir para gestionar a tiempo su reemplazo. El costo del componente es superior al \$1.000.000 USD a lo que se debe sumar, el costo de envío, la demora que tarda el componente en llegar a faena y el tiempo perdido en el cambio, la última falla de esta transmisión dejó inutilizada la pala PA10 durante 10 días. Por lo tanto, es de vital importancia conocer las distintas características de la caja de transmisión y sus componentes para poder determinar los puntos críticos donde se deben colocar los respectivos sensores capaces de pronosticar la ocurrencia de la falla.

También existen fallas menores asociadas a factores mecánicos y eléctricos como desacople de componentes o pérdidas de corriente a tierra en alguna de las fases lo cual genera un aumento en la corriente lo cual activa los fusibles del sistema de inversores o que pueden producirse en las

fases del motor lo cual provoca una anomalía en la frecuencia de estos. En la mayoría de los casos esta falla a tierra se produce en el sistema de anillos colectores (los que se muestran en la Ilustración 14) ya que debido a la rotación de la máquina, se genera un desgaste en la aislación de los cables los cuales crean la tierra o diversos desbalances en los motores de inducción trifásicos de las diversas transmisiones.

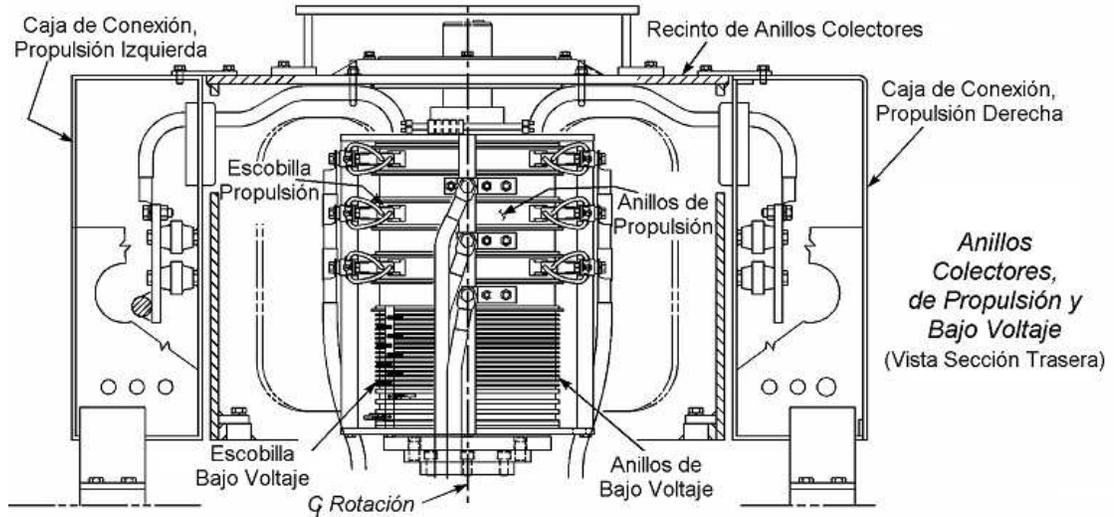


Ilustración 14: Anillos colectores

2.3 ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

Los tipos o estrategias de mantenimiento se clasifican, generalmente, en tres categorías:

- **Mantenimiento reactivo o de funcionamiento hasta la falla (MR).** En esta estrategia se le permite a la máquina operar hasta que falle, o hasta que soporte. Sólo en ese instante se realiza la reparación o reemplazo de ella. A este tipo de mantenimiento también a veces se le llama correctivo. Es el más fácil de implementar, sin embargo, presenta una serie de desventajas como el permitir que la falla de un componente puede causar daño a otros y consecuentemente los costos pueden ser muy altos, que la falla pueda ocurrir a una hora inconveniente, o que no esté disponible ni el personal ni los repuestos necesarios para su reparación.
- **Mantenimiento preventivo basado en tiempo (MP).** Consiste en reparar o cambiar componentes de una máquina a intervalos de tiempo fijos, aun cuando dicha máquina esté operando satisfactoriamente. Es un avance comparado con el mantenimiento reactivo respecto a la prevención de fallas inesperadas. Sin embargo, no es el método óptimo para obtener una máximo seguridad y confiabilidad de un equipo ya que algunas fallas inesperadas de todas formas ocurrirán entre los intervalos de reparación. También, durante la detención muchos componentes en buenas condiciones se desmontarán, se inspeccionarán, o se cambiarán innecesariamente, y si se comete algún error en el re ensamble, la condición final con que queda la máquina puede ser peor que antes de

realizar la intervención. Además, como en una reparación general se requiere examinar gran número de elementos, ello puede tomar un tiempo considerable y puede resultar en una gran pérdida de producción.

- Mantenimiento predictivo (MPD). Consiste en determinar en todo instante la condición mecánica real de la máquina mientras ella se encuentra operando, a través de un programa sistemático de mediciones de algunos parámetros o síntomas lo que se denomina control y seguimiento de la condición, o monitoreo de la condición. El principio de mantenimiento predictivo es que la intervención de la máquina se realiza únicamente cuando las mediciones indican que es necesario lo que se alinea con el recelo que la mayoría de los ingenieros tiene en intervenir las máquinas que cuando funcionan bien.

2.3.1 ESTADO DEL ARTE EN MONITOREO DE CONDICIONES

En los últimos años se han desarrollado diversas técnicas predictivas las que se pueden clasificar en:

- Técnicas que monitorean el comportamiento dinámico de la máquina: que se basan en las fallas de elementos situados dentro o fuera de la máquina, especialmente sus elementos móviles, que generan nuevas fuerzas dinámicas que afectan los niveles de algunas magnitudes dinámicas en puntos a los cuales se tiene acceso de medición del exterior. Las magnitudes dinámicas más frecuentemente controladas son: vibraciones, ruidos, corrientes y emisiones acústicas.
- Técnicas que monitorean el flujo lubricante y/o refrigerante y sus residuos: que se basan en el resultado del deterioro de un elemento que tenga contacto con un fluido, generalmente aceite o refrigerante que transportan los residuos de desgaste generados. Los análisis más frecuentemente realizados son: análisis de propiedades del aceite, análisis espectrométrico, ferrografía.
- Técnicas que monitorean la performance y las variables de operación de la máquina: estas técnicas controlan directamente la forma en que equipos o componentes de ellos están realizando la función que les fue asignada. Por ejemplo, evaluando el rendimiento de una máquina y tolerancia de fabricación exitosa de piezas

En general, cualquier sistema de monitoreo consta de cuatro etapas. La primera es la Etapa Transductora donde el sensor o transductor la magnitud física a medir (desplazamiento, velocidad, aceleración, ruido, presión, etc.) en una señal eléctrica proporcional a la magnitud medida. La segunda etapa es la Etapa de Acondicionamiento de la señal eléctrica ya que hay señales entregadas por algunos sensores que no pueden ser analizadas directamente. Una vez que la señal está acondicionada se pasa a la Etapa de Procesamiento la cual consiste en sacar el máximo de información posible de la ésta. Finalmente se tiene la Etapa de Registro y Análisis, la cual puede realizarse a través de un computador o en gráficos obtenidos mediante un software adecuado.



Ilustración 15: Sistema de Monitoreo

Al comienzo del proyecto, en Collahuasi, ya se cuenta con un monitoreo para realizar análisis de aceites, termografía y ultrasonido trabajando bien, por lo que se busca mejorar el análisis de vibraciones por uno más eficaz e implementar un análisis de corrientes que sirva de apoyo para monitorear la calidad eléctrica del motor y su implicancia en las vibraciones. El hecho de realizar un monitoreo continuo y en línea generara datos más realistas de los que se obtienen actualmente realizando pruebas en terreno y permiten mejorar la estrategia predictiva.

2.3.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El movimiento de una máquina rotatoria, normalmente genera una señal vibratoria. Se puede entender como vibración a un movimiento oscilatorio (de un lado hacia otro) producido por una fuerza que varía en el tiempo. Estas vibraciones pueden clasificarse en movimientos armónicos o aleatorios

- **Movimiento Armónico.** Es la forma más simple de vibración caracterizada por una senoide o alguna versión distorsionada de ella, dependiendo de su contenido armónico. Todo movimiento armónico es periódico, lo que significa que se repite en el tiempo. En un sistema en línea, el balanceo inadecuado de un equipo rotatorio puede generar un movimiento armónico. Sin embargo, bajo algunas condiciones tales como problemas de engranajes, solturas, defectos en los rodamientos o problemas de alineamientos; las frecuencias de sus sinusoides muy difíciles de encontrar.
- **Movimiento aleatorio.** Ocurre de manera errática y contiene todas las frecuencias en una banda particular de frecuencias. Es, por lo tanto, cualquier movimiento que no se repite. El movimiento aleatorio, también se denomina ruido y generalmente es producido por solturas severas.

Puesto que ni la frecuencia ni la amplitud de la vibración pueden ser medidas por medio de la vista o del tacto, es necesario disponer de un medio que permita convertir la vibración en una magnitud aprovechable que pueda ser medida y analizada. Para esto, la mejor solución es convertir esta señal mecánica en una electrónica, lo que es posible realizar mediante transductores construidos con este propósito. La frecuencia refleja qué es anormal en la máquina y la amplitud refleja la severidad relativa del problema. Los transductores de vibración son empleados para medir la velocidad lineal, desplazamiento, proximidad, y también la aceleración de sistemas sometidos a vibración.

Al momento de seleccionar transductores de vibración es necesario considerar cinco características principales: el rango de medición, el rango de frecuencia, la precisión, la sensibilidad transversal y las condiciones ambientales. El rango de medición puede ser en unidades “[g]” para la aceleración, en [in/s] para velocidad lineal u otras distancias en el tiempo y pulgadas u otras distancias para desplazamiento y proximidad. La frecuencia es medida en [Hz] y la precisión es comúnmente representada como un porcentaje del error permisible sobre el rango completo de medición del dispositivo. La sensibilidad transversal se refiere al efecto que una fuerza ortogonal puede ejercer sobre la fuerza que se está midiendo, esta sensibilidad también se representa como un porcentaje del fondo escala de la interferencia permisible. Para las condiciones ambientales, se deben considerar variables tales como la temperatura de operación y la máxima fuerza de vibración y choque, que el transductor será capaz de manejar.

Típicamente hay 4 tipos de sensores o transductores de vibraciones:

- Sensor de desplazamiento relativo sin contacto.
- Sensor de desplazamiento relativo con contacto.
- Sensor de velocidad o velocímetro.
- Sensor de aceleración o acelerómetro.

El transductor de desplazamiento sin contacto mide el movimiento relativo a través del flujo magnético. El flujo magnético es generado por un excitador demodulador. El transductor de desplazamiento con contacto mide el desplazamiento dinámico usando campos magnéticos. El extremo del sensor es una pequeña bobina que mide el cambio en el flujo magnético cuando el extremo del sensor está cerca de un material ferromagnético. El transductor de velocidad mide la vibración usando un imán permanente fijo y una bobina de alambre montada sobre un resorte. Cuando el transductor se instala sobre una superficie vibrante, la bobina se mueve sobre el imán, produciendo una señal.

Un acelerómetro mide la vibración generada usando cristales piezoeléctricos. Su funcionamiento se basa en una masa sísmica que está sujeta a la base con un perno axial que se apoya en un resorte circular. El elemento piezoeléctrico está ajustado entre la base y la masa, y cuando éste sujeta a una fuerza, se genera una carga eléctrica entre sus superficies. Hay muchas materias de este tipo siendo el cuarzo el más usado aunque también hay materiales piezoeléctricos sintéticos que funcionan igual de bien y en algunos casos son capaces de funcionar a temperaturas más altas que el cuarzo. Si se incrementa la temperatura de un material piezoeléctrico, se va llegar al llamado "punto Curie" o "temperatura Curie" y se pierde la propiedad piezoeléctrica y cuando esto pasa, el transductor está defectuoso y no se puede reparar. Cuando se mueve el acelerómetro en la dirección arriba abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica esta soportada por el elemento activo. Según la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración por la masa, así la fuerza sobre el cristal produce la señal de salida, que es proporcional a la aceleración del transductor. Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, lo que quiere decir que tienen un rango dinámico muy largo.

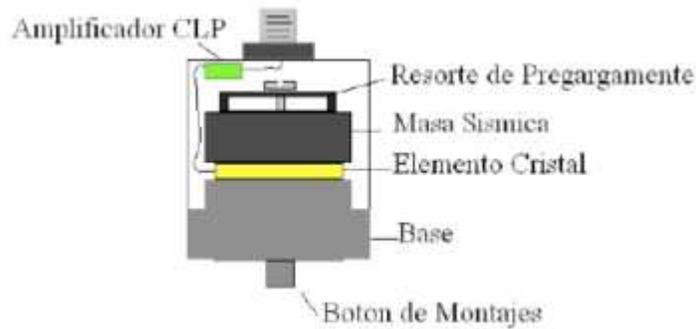


Ilustración 16: Acelerómetro piezoeléctrico

Según los transductores anteriormente mostrados, se sabe que es posible medir y analizar una señal de vibración, a través de desplazamiento, velocidad o aceleración. Además, la velocidad a cualquier frecuencia es proporcional al desplazamiento multiplicado por la frecuencia y análogamente, la aceleración es proporcional a la velocidad multiplicada por la frecuencia. De acuerdo a esto, el parámetro de desplazamiento de vibración da mayor énfasis a las frecuencias bajas, mientras que en la mayoría de las máquinas rotativas medianas se utiliza el parámetro de velocidad dejando la aceleración como parámetro para frecuencias altas. Esto se aprecia gráficamente en la Ilustración 17 y la Tabla 4.

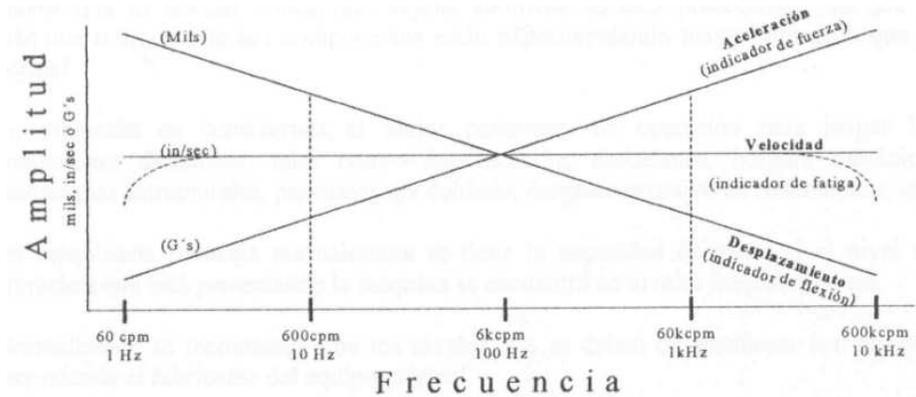


Ilustración 17: Comparación de las unidades utilizadas según la frecuencia

	Parámetros a medir	Rango de frecuencias [Hz]	Rango de frecuencias [cpm]
Desplazamiento	D_{RMS}	$f < 10$	$f < 600$
Velocidad	V_{RMS}	$10 < f < 1000$	$600 < f < 60000$
Aceleración	A_{RMS}	$f > 1000$	$f > 60000$

Tabla 4: Rangos de frecuencia para las unidades de medición

Los sensores de aceleración o acelerómetro de piezoeléctrico son los más usados, ya que, comparados con otros tipos de transductores, los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Un rango de medición bastante elevado y bajo ruido de salida.
- Excelente linealidad en todo su rango dinámico.
- Amplio rango de frecuencias.
- Tamaño Compacto.
- No lleva partes móviles, lo que lo hace menos frágil.
- Auto-generación. Es decir, no se requiere alimentación externa.
- Más baratos.
- Es posible obtener los valores de velocidad y de desplazamiento con sólo integrar, las veces respectivas, la forma de onda que entrega.

Luego de convertir las magnitudes físicas en eléctricas se debe contar con equipo de procesamiento y recolección de datos además de un analizador de señales. Este analizador también debe poseer filtros pasa altos y pasa bajos con el objetivo de eliminar vibraciones de altas y bajas frecuencias que estén fuera de su rango de frecuencias de medición. También debe tener la capacidad de integrar la señal que llega del sensor así, si éste es un velocímetro pueda entregar la velocidad y desplazamiento o si se le conecta un acelerómetro pueda entregar aceleración, velocidad y desplazamiento. Además debe poseer una memoria interna que permita registrar y analizar los datos de los niveles de vibración y como éstos van cambiando de a través del tiempo.

Para lograr un diagnóstico lo más exacto de los problemas existentes en una máquina rotatoria, es necesario poder realizar un exhaustivo análisis de la señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Una vez obtenida la forma de onda y el espectro, es posible detectar una serie de problemas típicos en máquinas rotatorias. Estos problemas pueden ser:

- Desbalanceo: presenta, normalmente en el espectro, una componente predominante a una vez la velocidad de rotación del motor o 1xRPM (1x). Las no-linealidades generan, además, pequeñas componentes a 2x, 3x (bajo el 5% del 1x), excepto para altos valores de 1x en que estas componentes pueden tener mayores valores. La forma de onda del desplazamiento vibratorio es sinusoidal con amplitud de la vibración, aproximadamente constante.

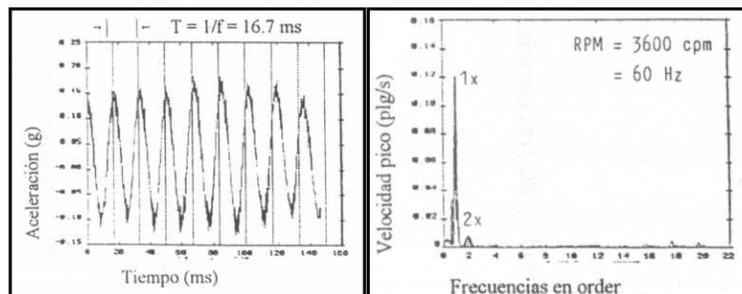


Ilustración 18: Problemas de desbalanceo

- Desalineamiento: presenta tres armónicos de la velocidad de rotación predominantes. Si el desalineamiento es severo, genera más cantidad de armónicos, 4x, 5x, o mayores. A veces el número de conexiones del acoplamiento puede presentarse multiplicado por las RPM. La forma de onda es repetitiva en cada periodo de rotación.

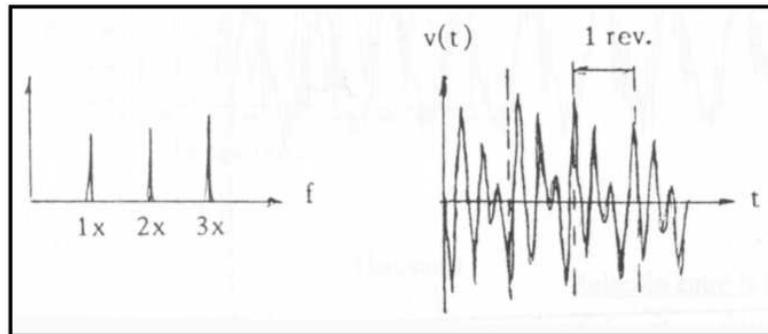


Ilustración 19: Problemas de desalineamiento

- Solturas: se presentan gran cantidad de armónicos de RPM o RPM/2. A mayor grado de solturas, mayor cantidad de armónicos. Un espectro de banda ancha es característico de una soltura con impacto. La forma de onda es variable, debido a que la amplitud relativa de los armónicos va cambiando.

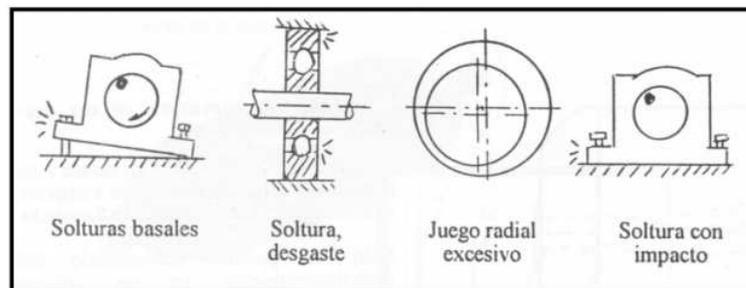


Ilustración 20: Tipos de solturas

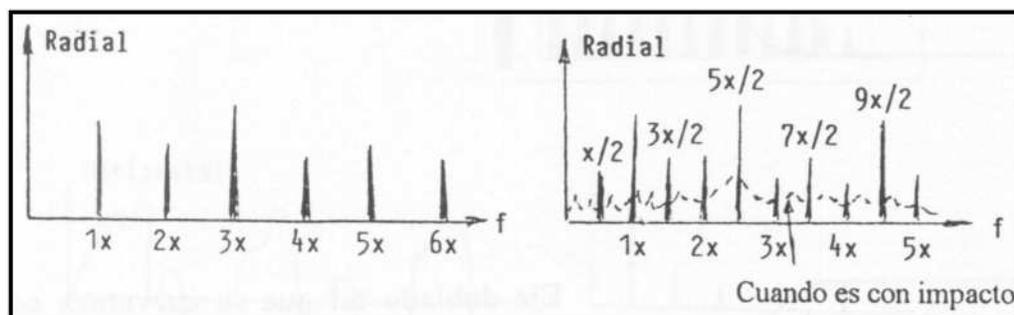


Ilustración 21: Problemas de soltura

- Deformación de carcaza: similar al desalineamiento y presenta, predominantemente, los 3 primeros armónicos de la velocidad de rotación, siendo generalmente la mayor la 1x.

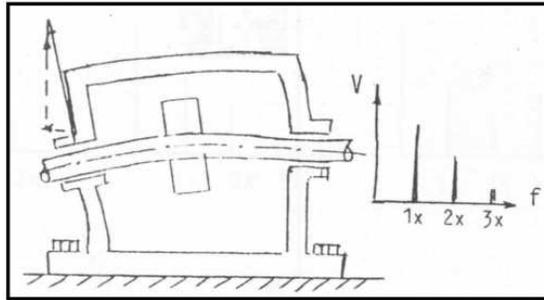


Ilustración 22: Problemas por deformación de carcasa

- Fallas en transmisión por correas: pueden producirse por correas sueltas, desgastadas, dañadas, por poleas excéntricas, por correas o poleas desalineadas y/o por resonancia de correas. Cada falla tiene distintos tipos de espectros. El espectro típico, esperado, muestra armónicos de las RPM de la correa y las velocidades de giro de cada polea (conductora y conducida).

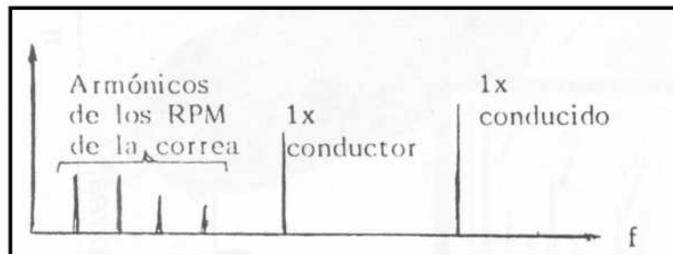


Ilustración 23: Problemas por fallas en transmisión por correas

- Fallas en rodamientos: son generalmente producidos por grietas, hendiduras, rebordes, resaltes, picaduras y descascaramiento. El más común de todos es la picadura de las pistas o de los elementos rodantes. Se verán 4 tipos de frecuencias, BPFI (frecuencia de falla en la pista interna), BPFO (frecuencia de falla en la pista externa), FTF (frecuencia de falla en el canastillo) BSF (frecuencia de falla en los elementos rodantes), cuando exista alguna falla, de lo contrario no deberían haber signos de estas.

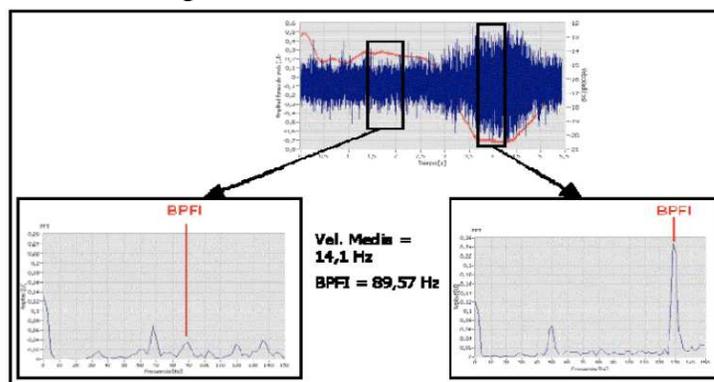


Ilustración 24: Problemas por fallas en rodamientos

- Fallas en engranajes: una componente vibratoria importante e inherente al funcionamiento de las cajas de engranajes es la que se produce a múltiplos de la frecuencia de engrane, fe , es decir, cada vez que los dientes entran en contacto. Esta componente que es normal al funcionamiento del engrane, se debe a la desviación en el perfil del diente respecto a su forma de involuta. Las fuentes que no se pueden evitar, y por lo tanto estarán presentes desde que el engranaje empieza a trabajar, son, la deflexión del diente bajo carga y los errores geométricos del perfil mismo debido al proceso de maquinado.

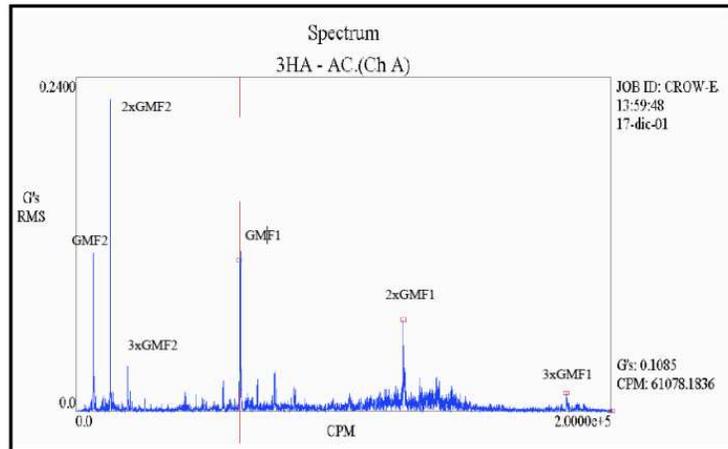


Ilustración 25: Problemas por fallas en engranajes

2.3.3 ANÁLISIS DE CORRIENTES DE MOTOR

Hoy en día el análisis de corriente de motores eléctricos sirve como una poderosa herramienta de apoyo al análisis vibratorio en la evaluación de condiciones. El análisis se basa en el espectro de frecuencia de las fases de corriente del motor y la aparición de armónicos en estas. Las principales fuentes de armónicos en la alimentación de un motor de inducción son:

- Rotura de Barras
- Cortocircuito en las bobinas del estator
- Excentricidad del motor
- Desgaste de Rodamientos
- Variaciones propias de la red
- Desalineamiento del eje

La experiencia muestra que problemas puramente mecánicos pueden hacer parecer a un motor teniendo significativos problemas eléctricos, por lo que una de las reglas básicas es analizar el espectro de frecuencias de corriente y voltaje de las respectivas fases y *si los picos que se muestran en la señal de corriente, también se muestran en la señal de voltaje, la falla es de naturaleza eléctrica, sino son de naturaleza mecánica*, además de complementarse con un análisis vibracional.

El análisis de los espectros se realiza buscando dos objetivos:

- Detectar si la corriente esta balanceada entre las tres fases: consiste en comparar la amplitud de la corriente eléctrica en cada una de las tres fases. En general, la corriente en cada fase no debería diferir entre ellas en más de un 3%. Esto puede deberse a un mal alambrado en estator, espiras del estator en corto, laminaciones del estator en corto, juntas de alta resistencia en el estator o una perdida a tierra.
- Detectar bandas laterales alrededor de la frecuencia de la línea: consiste en medir la diferencia de amplitudes en decibeles entre la frecuencia de línea y la frecuencia de banda lateral izquierda que estará separada por la frecuencia de paso de los polos. Esta diferencia ayudara a identificar barras de rotor rotas o agrietadas, anillos extremos del rotor rotos, problemas de alambrado en el rotor o juntas de alta resistencia en el rotor. Dependiendo de la carga nominal a la que actúa el motor la diferencia que se ocupa para determinar cada caso varia, pero tomando un mínimo de 75% de carga nominal se estima que:

Diferencia de amplitud entre frecuencia fundamental y banda lateral (dB).	Diagnostico
	Estado del motor
< = 49	Motor sano
46-49	Bueno
44-46	Probablemente tenga barras rotas
39-44	El motor tiene barras rotas
35-39	Motor con barras rotas y probablemente con otra fuente
< 35	Varias barras rotas daño severo

Tabla 5: Tabla para estimar fallas en el rotor

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 MONITOREO REALIZADO POR PERSONAL EXTERNO

Desde hace un buen tiempo el monitoreo y análisis de vibraciones viene siendo realizado en terreno por personal externo de mismo fabricante, Bucyrus. Este análisis es basado en situaciones que no son reales, sino que son ajustadas para tener una lectura simplificada de lo que sucede en realidad. Para aclarar esto, se debe reconocer el funcionamiento de una pala es muy particular, debido a la forma en que trabaja. Una pala trabaja con ciclos cortos, con velocidad de rotación baja y variable, además de una carga variable. Bajo estas condiciones de funcionamiento transientes, es difícil de analizar las mediciones de vibraciones. Los ciclos cortos de trabajo son debido a lo simple del proceso, ya que se llena el balde y se carga en el camión. Los movimientos son por ejemplo, subir y bajar el balde, o mover para adelante o para atrás la pluma. Esto demora tan solo algunos segundos. La velocidad de rotación es baja, debido a las grandes masas que se trasladan. Para una mayor velocidad se necesitarían motores con mucha más potencia. Además, el movimiento de traslación de la pala es muy lento. En las palas hay ejes que giran apenas con 5 a 9 cpm. Esto trae consigo problemas de limitaciones de rango de frecuencia de los sensores, aceleración en bajas frecuencias, donde las componentes se esconden en el ruido por ser muy pequeñas. Esta es una característica de la aceleración de los sistemas mecánicos.

Además, la velocidad de rotación es variable, debido a lo corto del trabajo. La pala está programada para trabajar a una velocidad de rotación determinada, es decir, la pala acelera con un determinado valor y no alcanza a llegar a su velocidad cuando ya tiene que parar, debido a lo corto del ciclo. Esto tiene la desventaja de no tener una velocidad de giro constante lo que dificulta el análisis frecuencial. La carga es variable, debido al porte del material que levanta. Cuando son rocas pequeñas, levanta más carga, ya que llena más el balde que una gran roca. Por ese motivo, cada palada tiene una masa diferente de material. El problema de esta condición, es que a diferentes cargas, las deformaciones en los dientes de los engranajes son mayores y se pierde más el perfil de evolvente de ellos. Esto trae consigo el aumento de las amplitudes de las vibraciones.

Para poder realizar mediciones en las palas, se crean condiciones que aseguren que las mediciones se acercan a las correctas. Estas condiciones se refieren en general a la corrección de la variabilidad de la velocidad y la carga. Una forma de solucionar el problema de velocidad variable es realizar las mediciones con velocidad constante. Para esto se debe bajar la velocidad de rotación programada de la pala. Así, se obtiene un tramo de velocidad más o menos constante, pero esto trae consigo que la aceleración y parada de los ciclos sean más bruscos. La otra condición de medición, es la carga de trabajo. Para poder realizar mediciones a igual carga, se debe medir con el balde vacío. Esto no es muy real, pero si resulta ser práctico.

En la Ilustración 26 se muestra una comparación de cómo es una curva de velocidad de un ciclo de trabajo real y uno modificado:

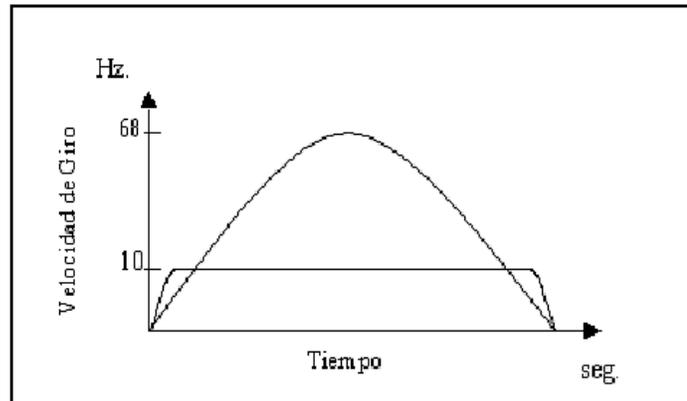


Ilustración 26: Velocidades para distintos ciclos de trabajo

Por estas características de su funcionamiento, el análisis de datos en una pala es difícil, y hace que el mantenimiento predictivo no proporcione los resultados esperados, a menos que se usen las técnicas apropiadas, lo que actualmente no sucede.

3.2 PÉRDIDAS ECONÓMICAS ASOCIADAS AL SISTEMA ACTUAL

Las principales pérdidas económicas vinculadas con el sistema de detección de fallas que realiza Bucyrus en las palas, son las asociadas con el tiempo debido a la detención de la pala para la toma de datos ya que al tener que simular casos ideales, balde vacío y velocidad constante, ésta no puede continuar trabajando y estas horas resultan perdidas. Actualmente, se realizan mediciones en terreno que demoran en promedio 2 horas, una vez a la semana para palas HR y cada 2 semanas para BI. Además, una empresa externa encargada de las palas P&H también realiza monitoreos de vibraciones mensualmente que toman aproximadamente 4 horas. El otro costo en tiempo es asociado a las fallas inesperadas que ocurren y que el análisis actual no pronostica. Este costo se debe a que, al no estar planificado el cambio del componente, puede que su repuesto no esté en bodega por lo que se debe encargarse de manera urgente lo que tiene una demora variable y además se puede no contar con la cantidad necesaria de personal técnico para realizar la reparación ya que estos pueden encontrarse realizando otras mantenciones programadas.

También se debe tomar en consideración el costo asociado al repuesto en sí, y al posible traslado a la faena. Un ejemplo de esto ocurrió el año 2011 con una falla inesperada y catastrófica de la transmisión de levante en la pala PA10 la cual se tenía que cambiar por completo. La solución fue conseguir una transmisión en la faena minera vecina Cerro Blanco, la cual llegó a costar aproximadamente U\$1.300.000 y se demoró cerca de diez días su cambio lo que implica una pérdida de producción de 170 horas aproximadamente.

Otro costo importante es la seguridad del personal que realiza las mediciones ya que debe acudir a terreno y tomar los datos con la pala energizada lo cual resulta muy peligroso y puede ocasionar un accidente con consecuencias muy graves.

3.3 ESPECIFICACIONES DEL NUEVO SISTEMA

El nuevo sistema de análisis de vibraciones debe poseer las siguientes características generales:

- Ser un sistema de monitoreo en línea: lo que implica una mayor cantidad de datos para realizar un mejor análisis y que estos sean reales, además de eliminar el riesgo de accidentes que podrían tener los trabajadores al momento de realizar la adquisición de datos en terreno.
- Ser un sistema que pueda hacer análisis a velocidad variable: así realizar un análisis correcto de los datos reales recolectados.
- Tener un software indicado: para realizar los distintos tipos de análisis en tiempo y frecuencia.
- Ser un sistema que soporte análisis de corriente de motor: para realizar correlaciones con un análisis de vibraciones.
- Que la empresa que implemente el sistema realice capacitaciones a trabajadores CMDIC y entregue apoyo técnico en el análisis de casos especiales.

3.4 PROPUESTAS ESTUDIADAS

Se pidió a diferentes empresas, que realizan monitoreo de condiciones, si contaban un sistema que satisficiera las características vistas anteriormente. De las cuales solo se encontraron las siguientes empresas:

3.4.1 SKF

Se tuvo contacto en el mes de Junio con el área de monitoreo de condiciones de SKF pidiendo algún tipo de sistema, de este primer contacto se concertaron una serie de reuniones para explicar las características deseadas al personal de SKF y definir un sistema prototipo que efectúe un correcto monitoreo en una pala a definir, ya que la empresa cuenta con experiencia en el área de monitoreo de condiciones pero no en el análisis de vibraciones de una pala que tiene ciclos diferentes de trabajo.

La propuesta hecha por SKF cuenta con la instalación de los siguientes componentes:

- 8 sensores de vibración.
- 4 sensores de vibración y temperatura.
- 1 unidad de monitoreo de datos en-línea (IMx-16).
- Software de Registro y Análisis de Mediciones

Para analizar la calidad del sistema se pidió las características técnicas de los equipos a usar los cuales se detallan a continuación:

- Acelerómetros SKF CMPT 2310T: estos son de tipo piezoeléctrico, de alta precisión, excelente estabilidad térmica y perfecta para maquinaria que trabaja en condiciones extremas. Además, cuenta con un sensor de temperatura de $100 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ en un rango de 0° a 120° C . Los transductores están sellados herméticamente en una estructura de acero inoxidable y aislado de la tierra de la maquinaria. Poseen un cable cubierto de acero inoxidable trenzado que es doblemente aislado, altamente resistente a la abrasión y el desgaste. El acelerómetro posee una sensibilidad de 100 mV/g con una precisión de un 10%, en un rango de salida de 70 g con un límite de choque de 5000 g.



Ilustración 27: Acelerómetro SKF CMPT 2310T

- SKF Multilog On-Line System IMx-S: es una unidad de registro y análisis de datos muy potente, posee dos versiones una con 16 entradas análogas y 8 entradas digitales; y otra versión con 32 entradas análogas y 16 digitales. Cada entrada puede estar configurada para diversos tipos de sensores acelerómetros, velocímetros o de desplazamiento. Además, se pueden conectar amperímetros para realizar análisis de corriente de motor fácilmente. Se pueden ajustar niveles de alerta para los datos que se están midiendo e incluso posee un auto diagnóstico que revisa el estado de los cables, sensores y electrónica por si fallara alguno. Se puede conectar a una red en línea y si ocurre alguna falla en la conexión puede guardar los datos en una memoria flash hasta que se restablezca la conexión. También puede procesar la información en el dominio del tiempo y la frecuencia mediante FFT, posee filtros y ventanas de Hanning y uniforme; y realiza integración y derivación de la señal en el dominio de la frecuencia.



Ilustración 28: Modulo de registro de datos IMx-S 16 y 32

- SKF @ptitude Analyst: es el software que realiza el análisis de la señal enviada por el módulo IMx-S mediante una conexión online. Posee una amigable interface humana, en la cual se pueden realizar análisis en frecuencia, tiempo y transientes. Además, posee un gestor de informes periódicos, un gestor de alarmas que define, muestra y registra los distintos tipos de alarmas que se deseen en el sistema. Tiene una gran cantidad de visión de gráficos entre ellos tiempo, frecuencia, diagramas de Bode, Nyquist; además de poder generar combinaciones de estos; generar bases de datos y exportar estos a archivos XML. Por último, puede realizar analizar variables tales como: aceleración, velocidad, temperatura, frecuencia, corriente, voltaje, presión, flujo, entre otros.

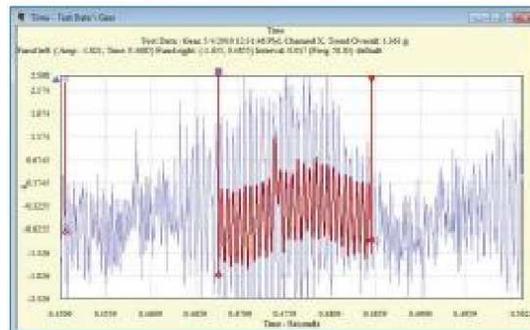


Ilustración 29: Análisis de frecuencia en @ptitude analyst

El sistema de monitoreo en línea consiste en el registro de las señales de los sensores de vibración en distintos puntos de la pala, estos sensores son capaces de tomar datos de vibración y temperatura, en el caso de la medición de vibración es posible capturar datos de velocidad de vibración en mm/seg, aceleración en G, envolvente de aceleración en gE, desplazamiento, etc. La unidad de monitoreo IMx procesa esta información en línea y la envían a través de su conexión TCP/IP (red intranet de CMDIC) y la descarga directamente a un servidor de Base de datos para su visualización y análisis.



Ilustración 30: Diagrama del sistema propuesto

La duración del sistema prototipo será de un mes efectivo, previo periodo de instalación no mayor a 2 semanas y la compra del sistema para el resto de las palas estará sujeta a los resultados obtenidos en el proyecto los cuales SKF facturará en su totalidad si se cumplen los siguientes objetivos:

1. Implementación de Sistema de Monitoreo de Vibraciones en línea SKF aplicable al funcionamiento operativo de la Pala y a cualquier otro similar, de manera que se pueda entregar y/o generar la información que permita desarrollar un plan de mantenimiento predictivo.
2. Determinar la factibilidad técnica del monitoreo en línea de la Pala en forma remota a través de una red inalámbrica a las oficinas del área mina.
3. Determinar mediante vibraciones, en el conjunto de transmisión del sistema Hoist (sin considerar el monitoreo de componentes internos en el planetario), el estado de la condición mecánica actual.
4. Diagnosticar las frecuencias características del funcionamiento del sistema Hoist, tales como frecuencias de engrane; y detectar anticipadamente posibles fallas relacionadas a la operación y a los componentes, tales como los rodamientos.
5. Generar una base de datos de mediciones de vibración de los activos monitoreados, que permita identificar, analizar el comportamiento en el tiempo.

SKF cuenta con una vasta experiencia en proyectos mineros en Chile sobre todo en Monitoreo de Condiciones, desde los más simples a monitoreos on-line con análisis espectrales, aunque cabe mencionar que no posee experiencia en monitoreo en palas precisamente. Algunos clientes importantes son:

- Codelco Teniente (Equipos portátiles y Software; On-line en implementación).
- Manto Verde (Equipos portátiles y Software).
- Minera Zaldivar (Equipos portátiles y Software).
- Minera Candelaria (Sistemas On-line; Equipos portátiles y Software).
- Minera Los Pelambres (Sistemas On-line; Equipos portátiles y Software)

El costo del proyecto es el siguiente:

Ítem	Qty	Descripción	Precio Unitario	Total
1	1	CMON 2002-16 Unidad de monitoreo IMx de 16 Canales	22.500	22.500
2	1	CMSW 7700-SC-SL Software @plitude Analyst para modulo On-Line monousuario.	36.800	36.800
3	4	CMPT 2310Tx15 Sensor de vibraciones y temperatura	820	3.280
4	8	CMPT 2310x15 Sensor de vibraciones	790	6.320
5	2	CMCP-240 Sensor de velocidad de eje (rpm)	480	960
			Total	69.860 USD +IVA
6	1	Servicio de Configuración y Análisis de las Mediciones y Diagnostico Remoto	7.340	7.340
7	1	Servicio de Asesoría en Instalación (Supervisión del Montaje)	30.052	30.052
			Total	107.252 USD +IVA

Tabla 6: Cotización del Prototipo SKF

Donde CMDIC tendrá que costear un valor inicial correspondiente a la puesta en marcha del prototipo relacionado a los Servicios de configuración y asesoría (ítem 6 y 7), suma que asciende a USD \$37.392.-, con un compromiso de compra por el total si se cumplen los objetivos mencionados anteriormente. Además, CMDIC deberá proporcionar personal para la instalación de los instrumentos de medición. Luego de conocer la propuesta, se pidió una nueva cotización contemplando la aprobación del proyecto, la instalación en las once palas de CMDIC y que el personal de instalación sea costeado por SKF. Al término de la evaluación del proyecto, en el mes de Octubre, tal presupuesto no fue recibido.

3.4.2 EMPRESA CADETECH

Se tuvo contacto en el mes de Mayo con la empresa pidiendo una propuesta de un sistema de monitoreo, de este primer contacto se concertaron una serie de reuniones para explicar las características deseadas y definir un sistema que cumpla con los requerimientos de la empresa. En este caso, por tener experiencia en análisis de vibraciones demostrables en palas de otras faenas, se pidió un presupuesto que contempla un periodo de tres años, el que considera: puesta en marcha; capacitación; instalación e informes mensuales entre otros.

El contrato consta con una etapa de inicio en el cual se suministrarán:

- Un equipo portátil SIAMFlex CompactDAQ más 8 sensores de vibraciones.
- El software SIAMFlex para servidor con cinco licencias para personal CMDIC.
- Capacitación en análisis de vibraciones y uso de los equipos por parte del personal de CADETECH.
- Un primer análisis por parte de CADETECH de la situación vibratoria de las palas y generar las primeras recomendaciones al respecto.

Y también una etapa luego de iniciado el contrato:

- Toma de datos mensualmente por personal CMDIC y carga de datos en servidor SIAMFlex. Sincronización automática de datos entre servidor en faena y equipo en oficinas de CADETECH.
- Elaboración de informes y visita mensual por dos ingenieros especialistas de CADETECH exponiendo y generando las recomendaciones respectivas.
- Se coordinara conjuntamente con personal de planificación de mantenencias la instalación del sistema de monitoreo continuo SIAMFlex basado en CompactRIO más 24 sensores de vibración. El personal de instalación y puesta en marcha será costeado por CADETECH.

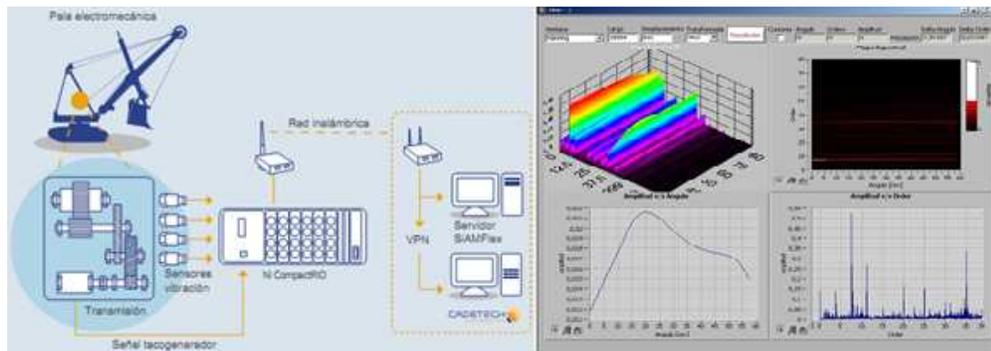


Ilustración 31: Esquema del sistema de monitoreo e interfaz SiamFlex

Las características técnicas de los equipos a instalar se detallan a continuación:

- Acelerómetros CTC-AC104: son de tipo piezoeléctrico cerámico, con una sensibilidad de 100 mV/g y una precisión de un 10%. Son ideales para climas extremos ya que soportan temperaturas entre los -50 y 121°C. Son recubiertos por una carcasa de acero inoxidable y soportan impactos de hasta 5000 g con un rango dinámico de 50 g.



Ilustración 32: Acelerómetro CTC-AC104

- SIAMFlex CompactDAQ: es un equipo USB para el uso con laptop para adquisición de datos en terreno. Este equipo se compone de un chasis NI cDAQ-9172 de 8 ranuras, un módulo NI9422 el cual posee un canal doble para la señal de tacogenerador y dos módulos NI9237 posee 4 canales para acelerómetros piezoeléctricos de adquisición simultánea de datos mediante un A/D de 24 bits por canal.



Ilustración 33: Chasis CompactDAQ y módulo NI9237

- SIAMFlex CompactRIO: equipo para la adquisición de datos en tiempo real con un chasis NI9148 de 8 ranuras, 6 módulos NI9237 de 4 canales cada uno para sensores de vibración y un módulo NI9422 de doble canal para tacogeneradores. Además posee un controlador NI cRIO-9024 con una memoria interna de 4 GB, 512 RAM y una temperatura de operación entre los -20 a 55 °C. Se agrega una fuente de 24VDC y un estabilizador de voltaje de 120VA y un switch Ethernet para la conexión inalámbrica mediante conexión TCP/IP (red intranet de CMDIC).



Ilustración 34: Equipo CompactRIO con módulos incluidos

- Software SIAMFlex: es un software orientado al análisis de los datos entregados por los módulos DAQ o RIO. Posee los módulos:
 - Monitor: el cual automáticamente y en forma continua administra la operación del equipo, crea alarmas cuando se sobrepasen valores de vibración determinado y guarda periódicamente datos de forma de onda.
 - Enlace: el cual sirve de interfase para los usuarios desde un laptop o de un PC y así poder descargar los datos, verificar y configuración el módulo Monitor.
 - Manager: que administra la forma en que se procesan los datos, los usuarios, las redes y mantención de la base de datos.
 - Bot: que realiza todas las tareas de manejo de información que necesiten ser automáticas y continuas.
 - Analista: el cual sirve para que el personal especializado pueda realizar el análisis de los datos de onda y genere informes.

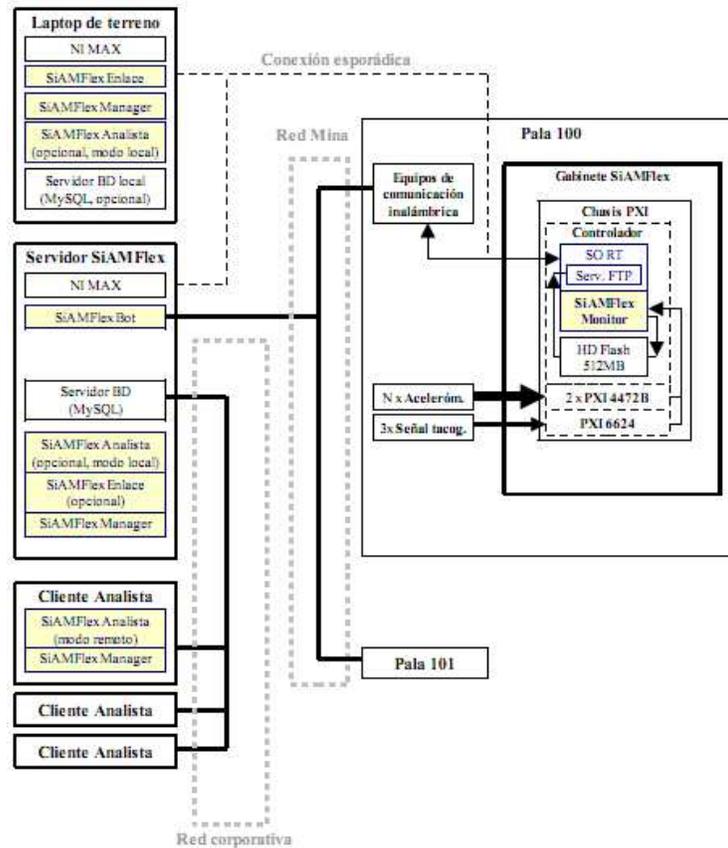


Ilustración 35: Arquitectura de comunicación entre módulos SiamFlex

Lo más destacable de este software es que puede procesar los datos de onda de las siguientes formas:

- Forma de velocidad a partir de la posición
- Posición angular a partir de taco análogo
- Escalamiento de la forma de onda
- Función de coherencia entre señales causa y respuesta
- Valor escalar de forma de onda general
- Valor escalar de espectro general
- FFT simple
- Order Tracking a partir de forma de onda y tacómetro

Es esta última forma de procesamiento marca la diferencia y hace que este software este dedicado a máquinas de velocidad variable como lo son las palas electromecánicas. Como ya se mencionó, dada la condición de régimen transiente de trabajo de la pala, con grandes cambios de velocidad y carga en cortos intervalos de tiempo, los equipos comerciales convencionales existentes previamente son inadecuados para obtener los espectros vibratorios “limpios” que se necesitan

para comenzar un diagnóstico. Este problema se ataca mediante el uso esta técnica especial de análisis de señales vibratorias. La técnica consta de los siguientes pasos:

- Adquisición de la forma de onda o señal vibratoria (x) a Δt constante, simultáneamente con el registro de la velocidad y sentido de giro del eje motor de la transmisión.
- Interpolación de la posición angular del eje motor (θ) para cada punto de forma de onda adquirido.
- Combinación de cada punto de la forma de onda con el ángulo de giro (θ) correspondiente. Interpolación para obtener $\Delta\theta$ constante.
- Aplicación de la FFT, obteniendo el espectro en órdenes.

No obstante el proceso descrito, SiAMFlex adquiere las señales de velocidad y posición angular como muestras sincronizadas de las señales vibratorias, con lo cual el segundo paso se hace innecesario. Esto reduce en gran medida el gasto computacional en la aplicación del algoritmo, simplifica el proceso de adquisición de datos, reduce el hardware necesario para la adquisición de las señales de los tacogeneradores de la pala y elimina el exceso de información en las señales almacenadas en disco. Adicionalmente las señales de velocidad – posición son adquiridas en combinación modo X4, es decir, para señales de 720 pulsos por revolución la precisión que se puede obtener es de 2880 pulsos por revolución.

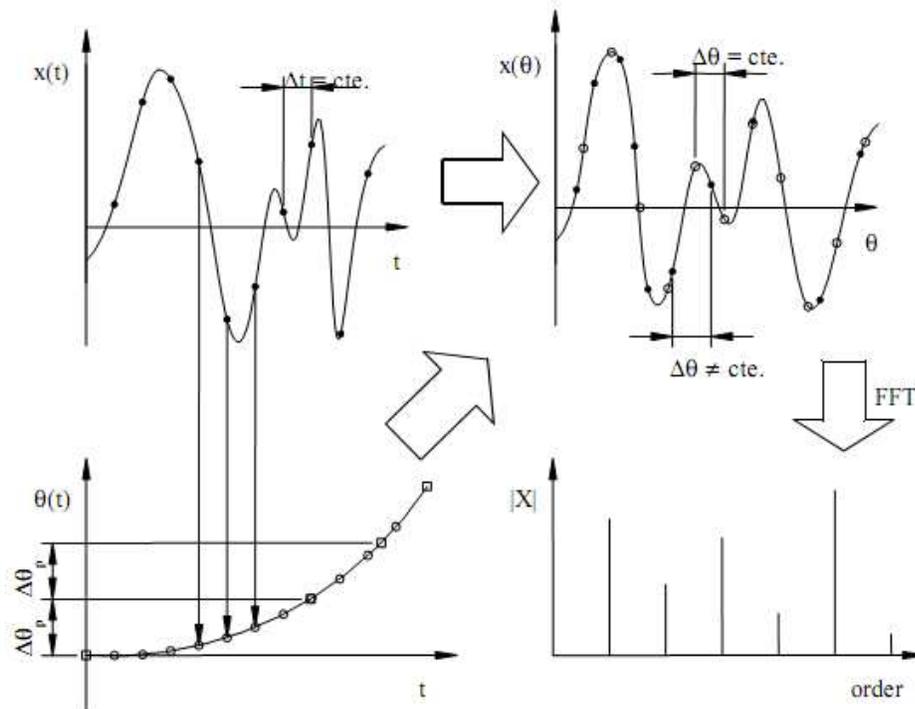


Ilustración 36: Proceso de Transformación a un espectro en órdenes de una señal

Este sistema especializado en vibraciones de palas electromecánicas ha sido probado con éxito en las siguientes faenas:

- Minera Escondida
- División Codelco Norte
- División Codelco Radomiro Tomic
- Anglo American, División Los Bronces
- CM Maricúnga

El costo total del proyecto, en US dólares, por tres años es el siguiente:

Ítem	Descripción	Valor Unitario	Cantidad por Unidad	Unidad	Subtotal por unidad	Unidades a 3 años	Subtotal en contrato
1	Gastos Iniciales						
1.1	Equipo CompactDAQ	\$26.332	1	Contrato	\$26.332	1	\$26.332
1.2	Set 8 acelerómetros	\$6.577	1	Contrato	\$6.577	1	\$6.577
1.3	Software Siamflex Enlace	\$29.209	1	Contrato	\$29.209	1	\$29.209
1.4	Software Siamflex Analista	\$9.736	5	Contrato	\$48.681	1	\$48.681
1.5	Capacitación análisis de vibraciones	\$5.129	1	Contrato	\$5.129	1	\$5.129
1.6	Capacitación uso de equipos	\$4.240	1	Contrato	\$4.240	1	\$4.240
1.7	Informes pre eliminares de cada equipo	\$5.741	1	Flota	\$5.741	3	\$17.224
A	Subtotal gastos iniciales						\$137.391
2	Gastos Mensuales						
2.1	Informe análisis de transmisiones	\$2.636	11	Mensual	\$28.999	36	\$1.043.971
2.2	Informe seguimiento de una transmisión	\$879		A pedido	-		
2.3	Visita Técnica HH	\$5.130	1	Mensual	\$5.130	36	\$184.683
2.4	Visita Técnica Gastos de viaje	\$3.154	1	Mensual	\$3.154	36	\$113.539
B	Subtotal gastos mensuales						\$1.342.193
3	Sistema monitoreo continuo						
3.1	Ingeniería e instalación	\$20.645	1	Flota	\$20.645	3	\$61.934
3.2	Software Siamflex Monitor	\$29.209	1	Pala	\$29.209	11	\$321.294
3.3	Kit hardware de 24 sensores	\$82.295	1	Pala	\$82.295	11	\$905.245
3.4	Kit encoders incrementales	\$9.443	1	Pala	\$9.443	2	\$18.885
3.5	Instalación y puesta en marcha sistema	\$47.741	1	Pala	\$47.741	11	\$525.149
C	Subtotal monitoreo continuo						\$1.832.507
D	Total contrato a 3 años (A+B+C)					USD	\$3.312.090

Tabla 7: Cotización del sistema SiamFlex por CADETECH

Además, CMDIC debe facilitar la información técnica de los equipos así como análisis termográficos, de aceite u otros. También el suministro de equipos computacionales, laptop, red VPN, capacitaciones de prevención de riesgos, alojamiento y viajes.

3.5 MATRIZ COMPARATIVA

Luego de presentadas las propuestas de ambas empresas se decidió comparar las ofertas hechas por SKF y CADETECH versus el sistema actual de monitoreo de condiciones, analizando las características que debe tener el sistema a implementar y si cumple o no con lo que se requiere, la siguiente tabla muestra una matriz comparativa de las propuestas:

Características	SKF	CADETECH	BUCYRUS
Sistema sirve para análisis de vibraciones con velocidad variable	SI	SI	NO
Sistema sirva para análisis de corrientes de motor	SI	SI	NO
Sistema posee experiencia en el mercado	Poca	SI	SI
Existen casos de éxito donde el sistema funcione en palas	NO	SI	Regular
Sistema ha evitado fallas catastróficas en palas	NO	SI	NO
Empresa realiza capacitación a trabajadores CMDIC	SI	SI	NO
Posee monitoreo en línea	SI	SI	NO
Disponibilidad de empezar trabajos de implementación	Mediano Plazo	Corto Plazo	Actual

Tabla 8: Matriz Comparativa de las propuestas

Como se puede apreciar la mejor opción en el cumplimiento de las características del sistema es la propuesta hecha por CADETECH y así también lo tomó en consideración la Gerencia Mina, por lo que se realizó un caso de negocio del proyecto para los siguientes 3 años.

3.6 CASO DE NEGOCIO DEL PROYECTO

Para realizar el caso de negocio se hizo un aproximado de los ingresos que generaría el implementar el monitoreo de vibraciones continuo, este ingreso extra se debería principalmente al ahorro de horas en la realización del monitoreo de condiciones en terreno para lo cual se debe detener la producción de la pala. Para estimar la ganancia en la producción por estas horas recuperadas se ocupó el año 2011 como referencia para obtener la relación entre las toneladas de material extraído y las horas efectivas trabajadas por equipo

Material Extraído	
Ton/Hrs Efectivas	Ton extraídas
5.364,50	57.124.039
6.939,10	94.385.361
7.704,50	38.808.799
Total Ton	190.318.199

Tabla 9: Cantidad de material extraído el año 2011

Luego se estudió el tiempo perdido en realizar un monitoreo en terreno de datos vibracionales el cual resultó ser distinto para las diferentes flotas de palas y así poder realizar una extrapolación de las horas necesarias anualmente.

Equipo	Horas de monitoreo	N° Palas	Frecuencia	Horas en el año
Bucyrus 495 BI	2	5	1 cada 2 semanas	208
Bucyrus 495 HR	2	4	1 cada 2 semanas	208
P&H 4100XPC	4	2	1 en el mes	96
Total Hrs				824

Tabla 10: Total de horas anuales perdidas en monitoreo de vibraciones

Mediante información de los historiales de la Compañía se sabe que la relación promedio entre las toneladas de material extraído y las toneladas de cobre producidas son de aproximadamente un 0,19% lo cual se basa en un promedio de la ley del rajo y otros factores. También, mediante la investigación realizada se encontró que las utilidades marginales que recibe CMDIC debido al gran volumen de producción son cercanas al 13% del precio promedio del cobre que a la fecha resulta ser de \$975 USD por tonelada de Cu⁽²⁰⁾.

Con estos datos se realizó una evaluación de la entrada progresiva del nuevo monitoreo como se espera ocurra según la Carta Gantt presentada en la siguiente sección y tomando todos estos datos se realizó un caso de negocio a una tasa del 20% como se muestra en la Tabla 11.

El resultado es de un VAN de \$6.448.731 USD.- con una TIR de un 158% y un retorno de la inversión inicial en un plazo no mayor a 1 año, lo cual resulta ser un caso muy favorable para la Compañía.

Año	Año 0					Año 1												Año 2		Año 3
	Fecha	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may-13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13	oct-13	nov-13	dic-13	2014	2015			
Costos del proyecto																				
Costo Fijos	-1,900,032																			
Costo Variables				9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669			
Total Costos	-1,900,032			9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669			
Ingresos																				
Entrada oper para						1 HR	2 HR	3 HR	4 HR	1 BI	2 BI	3 BI	4 BI	5 BI						
Horas gan HR						4	8			16	16	16	16	16						
Horas gan BI										4	8	12	16	20						
Horas gan P&H															48	48				
Ton/HH efec HR	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939	6,939			
Ton/HH efec BI	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365	5,365			
Ton/HH efec P&H	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705	7,705			
Aumento Extrac HR						27,756	55,513	83,269	111,026	111,026	111,026	111,026	111,026	111,026	111,026	1,443,333	1,443,333			
Aumento Extrac BI										27,756	55,513	83,269	111,026	138,782	1,443,333	1,443,333				
Aumento Extrac P&H															333,077	333,077				
Extracción Total [Ton]						27,756	55,513	83,269	111,026	138,782	166,538	194,295	222,051	249,808	3,219,742	3,219,742				
% Ex-Prod	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%			
Aumento Total Cu [Ton]						52,74	105,47	158,21	210,95	263,69	316,42	369,16	421,90	474,63	6,117,51	6,117,51				
Ingreso a 975US/Ton [US]						51,419	102,837	154,256	205,675	257,094	308,512	359,931	411,350	462,769	5,964,573	5,964,573				
flujo	-1,900,032			9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669	9,669			
VA	-1,900,032			8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058	8,058			
Tasa	20%																			
VAN	6,448,731																			
TIR	158%																			
Periodo Recuperación	1 Año																			

Tabla 11: Caso de negocio sistema SiamFlex a tres años

Cabe mencionar que existen otras limitantes al hacer un estimado como la disponibilidad de los camiones o los otros equipos, además de la necesidad de un mayor número de operarios, etc. por lo cual este cálculo es un indicador básico de la influencia de un monitoreo continuo y en línea, y como se aprecia en el caso de negocio las ganancias que dejarían la implementación de este sistema serían muy beneficiosas para la compañía aun si se considera un caso desfavorable.

3.7 CARTA GANTT DEL PROYECTO

La realización del proyecto contempla 4 etapas:

- Etapa inicial: consta de la recopilación de los datos técnicos de los diferentes equipos así como número de dientes de los engranes, datos de placa de los motores, estado actual de los componentes, etc. Además en esta etapa se contemplan las capacitaciones al personal CMDIC y un análisis preliminar de las transmisiones realizando monitoreo de vibraciones en terreno con el equipo CompactDAQ y el software SiamFlex. Esta etapa comienza en noviembre 2012.
- Etapa de instalación en palas 495HR: se comenzara instalando el sistema de monitoreo continuo en estos equipos ya que son los que reportan mayores índices de vibraciones en las transmisiones. La implementación se hará durante las mantenciones programadas de cada pala por lo que se deberá trabajar en conjunto con el personal de planificación para coordinar la instalación. Mientras dura este proceso de instalación se irán monitoreando en terreno los demás equipos para así mantener controladas las vibraciones en las distintas transmisiones. Se contempla la instalación durante el primer semestre de 2013.
- Etapa de instalación en palas 495BI: la implementación en estas palas está por definir ya que por tu antigüedad existe la posibilidad de dar de baja un par de palas de esta serie. De cualquier manera, se contempla la instalación del sistema en toda la flota durante el segundo semestre de 2013.
- Etapa de instalación en palas 4100XPC: para aprovechar la centralización del monitoreo vibraciones que ofrece el sistema SiamFlex se instalaran también en este tipo de palas aunque su disponibilidad es responsabilidad de una empresa externa. Se espera la compra de dos palas más de este tipo para reemplazar a las 495BI dadas de baja las cuales también se espera instalar el sistema SiamFlex. Se estima la instalación a principios de 2014.

El resumen de estas etapas se presenta en la siguiente carta Gantt:

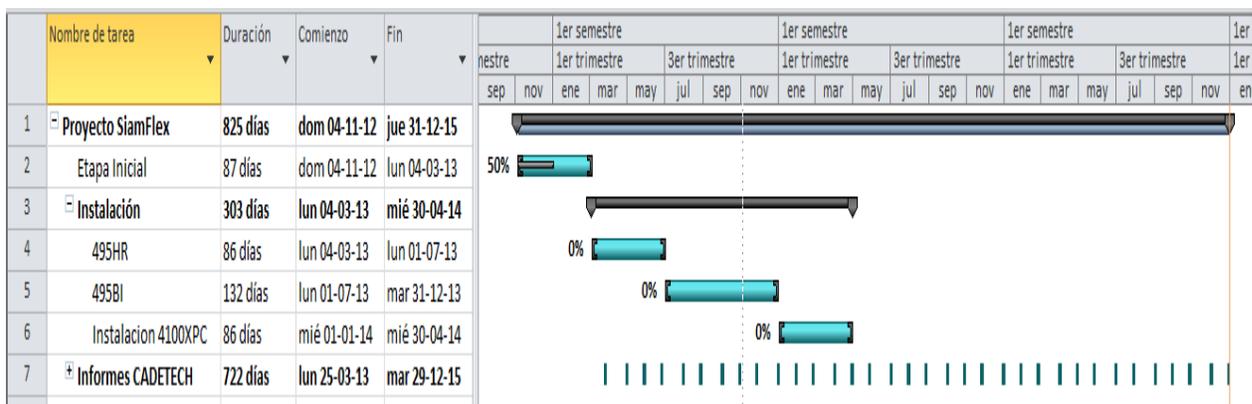


Ilustración 37: Carta Gantt del proyecto

3.8 SUGERENCIAS AL ANÁLISIS DE CORRIENTES

Se estudió la posibilidad de sumar un monitoreo de análisis de corrientes de motor al proyecto actual, para lo cual se conversó con el Jefe del área de mantención eléctrica la importancia de un análisis de este tipo y se llegó a la conclusión de que aunque puede ser una buena herramienta para realizar mantenimiento predictivo no es prioridad en la estrategia de mantención actual como si lo es el análisis de vibraciones debido a que no existe experiencia en palas de algún caso de éxito en monitoreo de corrientes por lo que la compañía no está dispuesta a impulsar dicha innovación por el momento. De todas maneras se encargó un estudio de las posibilidades de que un futuro poder implementar este tipo de monitoreo y poder alinearlos con el sistema SiamFlex y así poder centralizar los datos para mejorar el mantenimiento predictivo del área.

En conversaciones con los Ingenieros especialistas CADETECH se corroboró la posibilidad de intercambiar un par de módulos de vibraciones del chasis RIO y/o DAQ por otros orientados a voltajes y corrientes, además de la posibilidad de analizar estos datos con el software SiamFlex ya que está ambientado en LabView y se podrían incorporar nuevos módulos sin mayores.

Se analizaron los posibles módulos y las posibles aplicaciones de éstos según National Instruments así como también se estudió la factibilidad de por lo menos tener una herramienta que permita realizar mantenimiento predictivo en terreno. Tomando en consideración lo anterior se recomienda:

- Indispensablemente la compra de, a lo menos, un Fluke 435 que permite realizar mantenimiento predictivo de la calidad eléctrica de los motores u otros componentes como transformadores. Este dispositivo se recomienda encarecidamente debido a sus grandes prestaciones y capacidad de solucionar problemas eléctricos. Puede realizar mediciones de tres fases de desbalance de voltaje, distorsión de armónicos, incremento en las corrientes y caídas de voltaje, además posee una gran capacidad de recolección de datos y puede generar informes. Los datos técnicos de este se presenta en la siguiente Tabla 12.



Ilustración 38: Fluke 435

Fluke 435 Logging Power Quality Analyzer			
Applications		Features	
1-Phase / 3-Phase	3-Phase	Display	Color Graphical
Frontline troubleshooting	•	Voltage channels	4
Predictive maintenance	•	Current channels	4
Load study/PQ survey	•	Included current probes	3000 A Flexis
Quality of service compliance (EN50160)	•	Dust/water resistance	IP51
Long-term analysis	•	Safety rating	600 V CAT IV
Recording capability		Software	Fluke Power Log
Typical recording period	1 month	Battery Operation /UPS	7 hours
Memory	16 Mb	Analysis capability	
Min/Max/Avg logging	•	Statistical analysis (including EN50160)	•
Event capture	•	Report generator	•
Waveform capture	•	Root cause analysis	–
User defined logging	•		
Full-disclosure	–		
Powered off of measured signals	–		
Sample rate	10 kHz		
High-speed capture rate	200 kHz		
Peak voltage	6 kV		

Tabla 12: Especificaciones Fluke 435

- La implementación de los módulos orientados a la medición de voltajes y corrientes de tipo NI 9225 y NI 9239 respectivamente que sumados al software Electrical Power Measurements para LabView de National Instruments permiten realizar:
 - Calculo de Fasor de Voltaje and Corriente (Valor RMS cortado con el ángulo de fase).
 - Diagrama de Fasor.
 - Registro de datos Power Data.vi
 - Potencia Real (Watts).
 - Potencia Aparente (VA).
 - Potencia Reactiva (VAR).
 - Factor de Potencia

CAPÍTULO 4. PRIMEROS ANÁLISIS DE VIBRACIONES

En diciembre de 2012 se realizaron los primeros análisis de las palas PA8 y PA10 de la flota Bucyrus 495HR las cuales se eligieron por ser las de menor y mayor índice de vibraciones respectivamente y así obtener parámetros de comparación entre ellas. El estudio estuvo basado netamente a la transmisión Hoist o de levante por ser la transmisión más crítica y se realizaron mediciones repitiendo ensayos bajo tres condiciones:

- Ensayos de golpes: con Pala detenida, se efectuaron golpes en la transmisión, protección y estructura de manera de determinar frecuencias naturales y modos de vibrar.
- Operación en vacío: Pala con el balde vacío, movimiento de subida y bajada de balde (condición en la que históricamente se ha medido la transmisión).
- Operación normal: Pala cargando camiones y moviendo mineral.

4.1 PUNTOS DE MEDICIÓN

Los puntos de medición se distribuyeron en:

- la carcasa de la transmisión en posiciones cercanas a los rodamientos de los ejes.
- la estructura de protección de la corona del tambor o “elefante”.
- la plataforma sobre la cual está apoyada la transmisión.

La nomenclatura utilizada en los puntos de medición se indica en la Tabla 13 mientras que en el Anexo 1 se muestra esquemáticamente y con fotos la ubicación de los puntos de medición.

Punto de medición	Descripción		
1H	Motor, lado acoplamiento, horizontal	8V	Corona, vertical
1V	Motor, lado acoplamiento, vertical	9H	Tambor, horizontal
2HV	Entrada transmisión, inclinado	9V	Tambor, vertical
3H	Eje intermedio transmisión, horizontal	E1	Elefante 1
3V	Eje intermedio transmisión, vertical	E2	Elefante 2
4H	Planetario, horizontal	P1	Pata lado libre motor
4V	Planetario, vertical	P2	Pata trasera tambor
5V	Eje piñón, vertical	P3	Pata delantera tambor
6H	Piñón planetario, horizontal	P4	Pata lado acoplamiento motor
6V	Piñón planetario, vertical	P5	Pata trasera locking assembly
7H	Piñón, horizontal	P6	Pata delantera locking assembly
7V	Piñón, vertical	P7	Entrada a transmisión
8H	Corona, horizontal	P8	Pata trasera corona
		P9	Pata delantera corona

Tabla 13: Puntos de medición

4.2 TECNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

Las técnicas de procesamiento y análisis utilizadas en las mediciones de vibraciones realizadas fueron:

- Análisis de espectros.
- Análisis de espectros con seguimiento de órdenes (Order Tracking Spectral Análisis, OTSA).
- Análisis de la forma de onda extendida.
- Análisis de la forma de onda por ciclos de trabajo.
- Análisis de la envolvente.
- Análisis de golpe (Bump Test).
- Análisis de la forma de vibrar en operación de las máquinas y estructuras soportes (Análisis ODS, Operating Deflection Shape).
- Análisis de cambios en la velocidad de rotación y de la aceleración angular de rotación.
- Análisis de la corriente eléctrica

Solo se presentan en detalle los resultados de las mediciones realizadas en los puntos:

- 1H: Punto de medición en dirección horizontal en descanso del motor lado acoplamiento.
- 4H: Punto de medición en dirección horizontal en descanso del eje de entrada al planetario lado libre.
- 8H: Punto de medición en dirección horizontal en descanso del tambor lado corona.

Las mediciones realizadas en los otros puntos que se midieron no son mostradas, pues son similares a los puntos 1H, 4H y 8H. Mientras que las frecuencias fundamentales de cada componente de la transmisión de muestra en el Anexo 2.

4.3 VIBRACIONES EN EL PUNTO 4H DEL REDUCTOR DE PALA 8 Y 10

La Ilustración 39 y 40 muestran la forma de onda de la aceleración vibratoria (línea de color negro) y el ángulo de giro del motor (línea de color rojo) medida en el punto 4H en la Pala 8 y en la Pala 10 durante 3 ciclos de carga del balde, respectivamente.

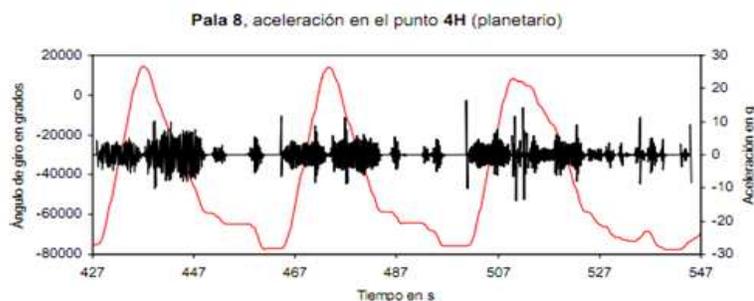


Ilustración 39: Aceleración 4H de las palas 8 durante 3 ciclos de carga del balde

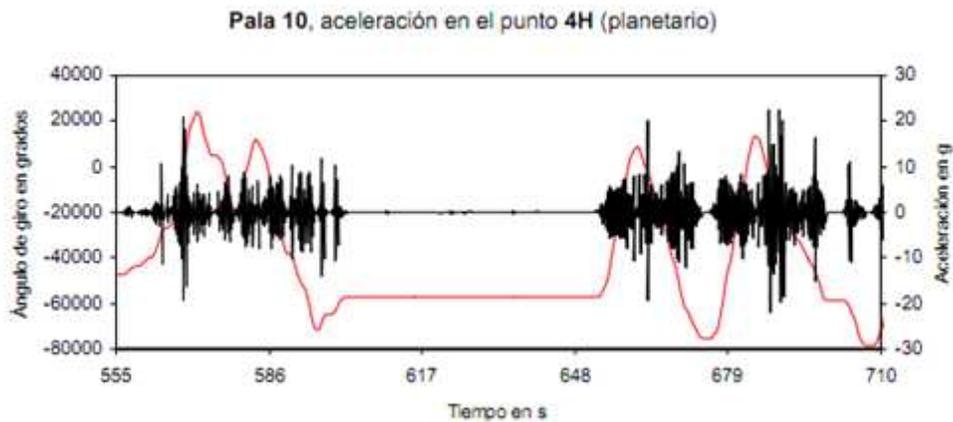


Ilustración 40: Aceleración 4H de las palas 10 durante 3 ciclos de carga del balde

La Ilustración 41 es una ampliación de la Ilust. 39 para mostrar solo un ciclo de carga. En esta Ilustración se han marcado las siguientes zonas:

- A. Durante este tiempo, la pala está cargando material a través de movimientos de las transmisiones de levante y empuje.
- B. El revolving frame y el balde giran para posicionar el balde sobre el camión.
- C. La puerta del balde se abre y el material empieza a ser descargado en el camión. Esta operación se facilita con pequeños movimientos ascendentes del balde.
- D. El revolving frame y el balde giran para sacar el balde encima del camión.
- E. El balde desciende a nivel de suelo y toma la posición para un nuevo ciclo de carga. Este movimiento se compone de tres partes:
 - i) El balde acelera rápidamente para alcanzar su velocidad máxima.
 - ii) Luego mantiene esta velocidad relativamente constante.
 - iii) Desacelera rápidamente hasta quedar detenido.

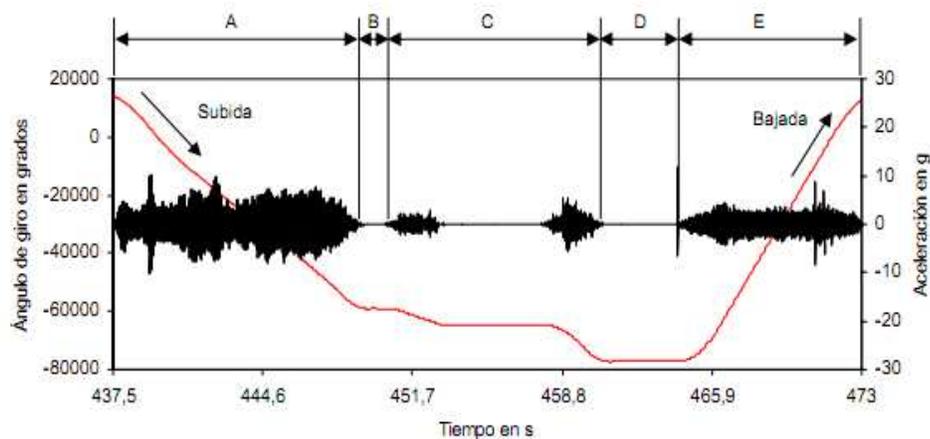


Ilustración 41: Ampliación de la Ilustración 39 para mostrar un solo ciclo de carga

4.3.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL REDUCTOR DE LA PALA 8, PUNTO 4H

1) Análisis de las vibraciones durante la bajada del balde

La Ilustración 42 muestra el espectro vibratorio en el punto 4H de la Pala 8 realizado en el tramo de bajada entre 431 y 433 s de la Ilust. 42. La Ilustración 46 es una ampliación del espectro anterior a las bajas frecuencias. En el espectro de la Ilust. 45 se han etiquetado la componente de engrane fe_1 y la componente de engrane fe_3 junto a sus armónicos. En el espectro de la Ilust. 46 se han etiquetado las componentes múltiplos de la frecuencia de engrane fe_6 , la cual es la de mayor valor en el espectro. Todas estas componentes son normales en este tipo de unidad.

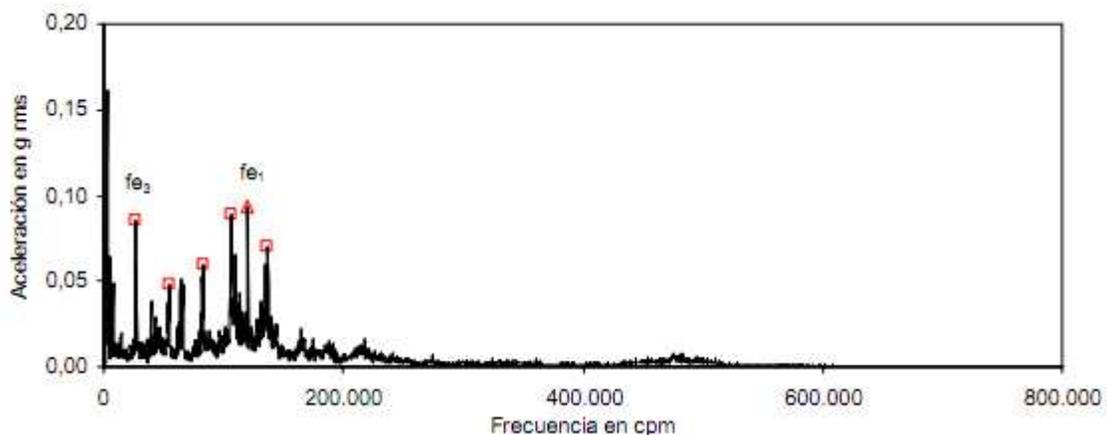


Ilustración 42: Espectro aceleración 4h de pala 8 con balde bajando

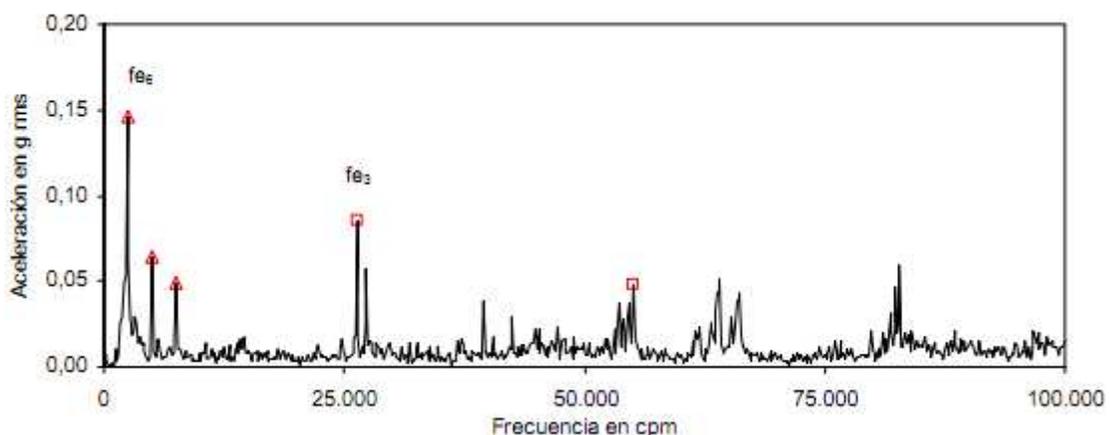


Ilustración 43: Espectro aceleración 4h de pala 8 con balde bajando hasta 100.000 CPM

2) Análisis de las vibraciones durante la subida del balde

La Ilustración 44 muestra el espectro vibratorio en el punto 4H de la Pala 8 realizado en el tramo de subida entre 440 y 444 s de la Ilust. 42. En el espectro de la Ilust. 47 se ha etiquetado la componente a la frecuencia de engrane fe_1 . Se puede observar que debido a los cambios de la

velocidad de rotación ocurridos durante el tiempo de medición, la componente se ha desparramado en el espectro. Para evitar que las componentes se desparramen en el espectro cuando ocurren cambios significativos de la velocidad de rotación durante el tiempo de medición, es necesario utilizar una técnica llamada Order Tracking Spectral Análisis, la cual corrobora que la componente a la frecuencia de engrane $fe_1 = 59$ order, no se ha desparramado.

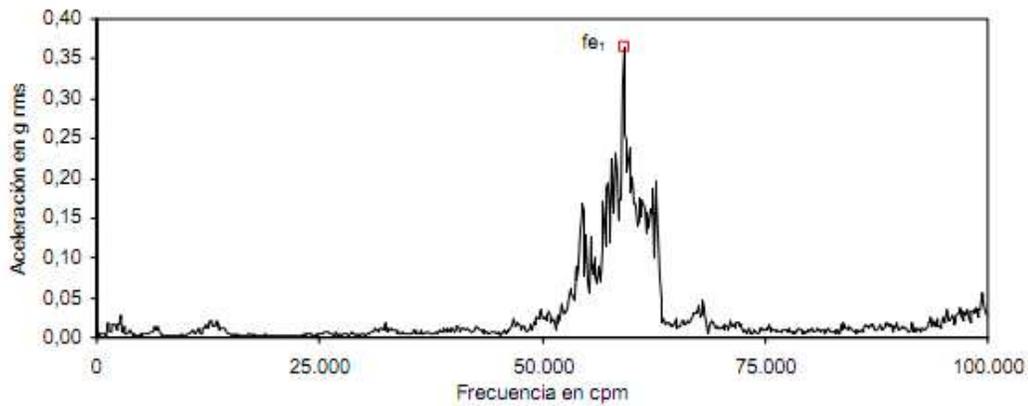


Ilustración 44: Espectro aceleración 4h de pala 8 con balde subiendo

3) Análisis de las vibraciones durante la subida y bajada del balde sin carga

La Ilustración 45 muestra la forma de la aceleración de cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga. Del análisis detallado de estas vibraciones se concluye:

- Se observa en la Ilust. 48, una forma de onda repetitiva y uniforme en cada ciclo.
- Las formas de onda de la aceleración con y sin carga en el balde son similares. Solo que sin carga sus valores son aproximadamente la mitad de los valores con el balde con carga y no están presentes los tramos de giro B, C, y D indicados en Ilust. 44.
- Un análisis de los espectros de la vibración (no mostrados), en distintos tramos de tiempos muestran que el contenido frecuencial de los espectros es similar al de los espectros medidos con el balde con carga.

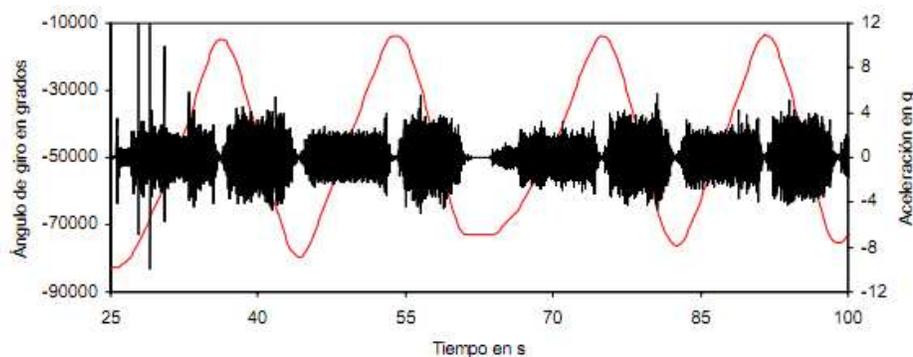


Ilustración 45: Forma de onda aceleración 4h en cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 8

4.3.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL REDUCTOR DE LA PALA 10, PUNTO 4H

1) Análisis de las vibraciones durante la bajada del balde

Las Ilustraciones 46 y 47 muestran la forma de onda y el espectro de la aceleración vibratoria medida en el punto 4H de la Pala 10 en el movimiento de bajada del balde en el tramo entre 568 y 570 s de la forma de onda mostrada en la Ilust. 40.

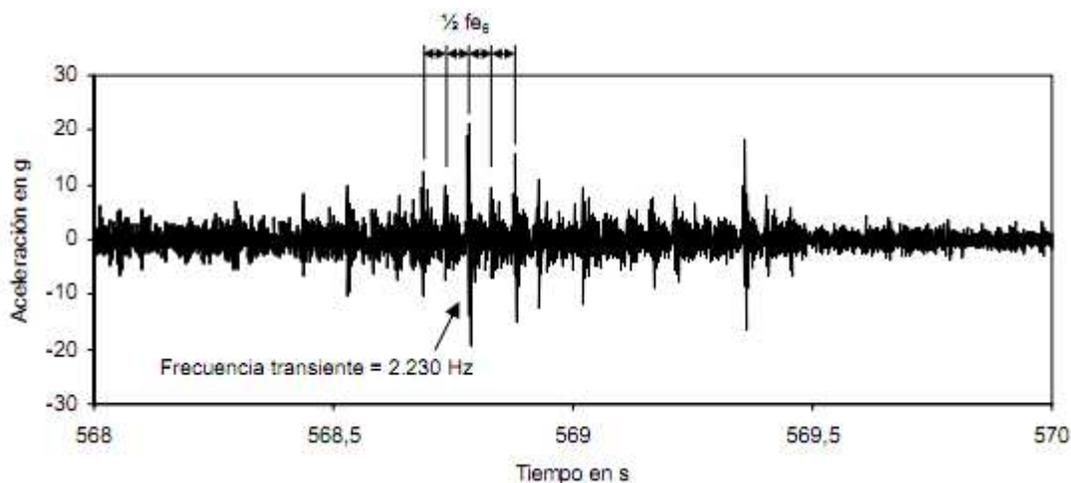


Ilustración 46: Forma de onda de la aceleración vibratoria en el punto 4h de la pala 10 durante la bajada del balde

La Ilustración 46 muestra una forma de onda de la aceleración vibratoria con la presencia de transientes de gran amplitud en algunos tramos de ella. La frecuencia con que ocurren estos transientes es $\frac{1}{2} fe_6$ y la frecuencia de dichos transientes es 2.230 Hz. Ilustración 47 muestra el espectro de la forma de onda de la Ilust. 46 en un rango de frecuencias de 0 a 100.000 cpm. Se observa que las componentes predominantes en el espectro son a múltiplos de la frecuencia $\frac{1}{2} fe_6$.

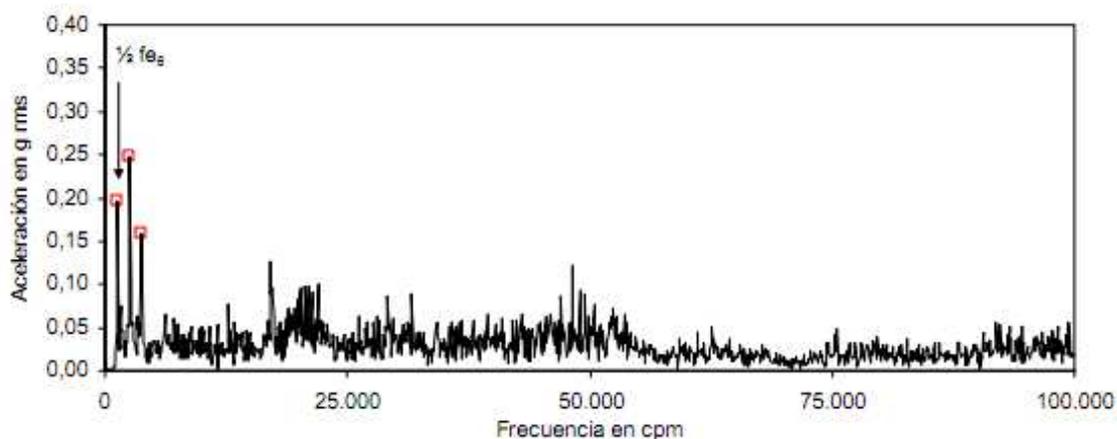


Ilustración 47: Espectro aceleración 4h de pala 10 con balde bajando

2) Análisis de las vibraciones durante la subida del balde

La Ilustración 48 muestra la forma de onda medida en el punto 4H de la Pala 10 en el movimiento de subida del balde en el tramo entre 1072 y 1074 s de la forma de onda mostrada en la Ilust. 40.

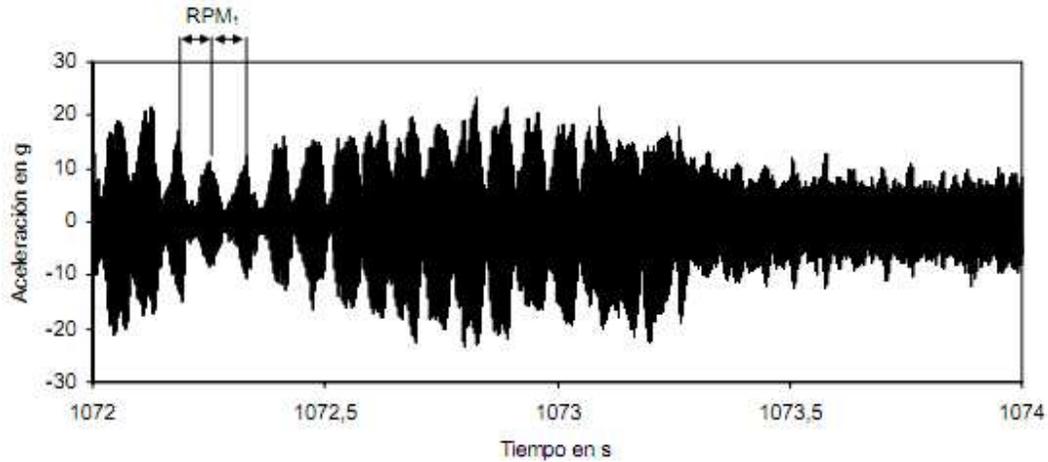


Ilustración 48: Forma de onda aceleración 4h de pala 10 con balde subiendo

La Ilustración 49 muestra una expansión de la forma de onda de la Ilust. 48. Se observa que la componente a la frecuencia de engrane fe_1 es predominante en la vibración y que ella está modulada en amplitud con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de rotación del eje motor.

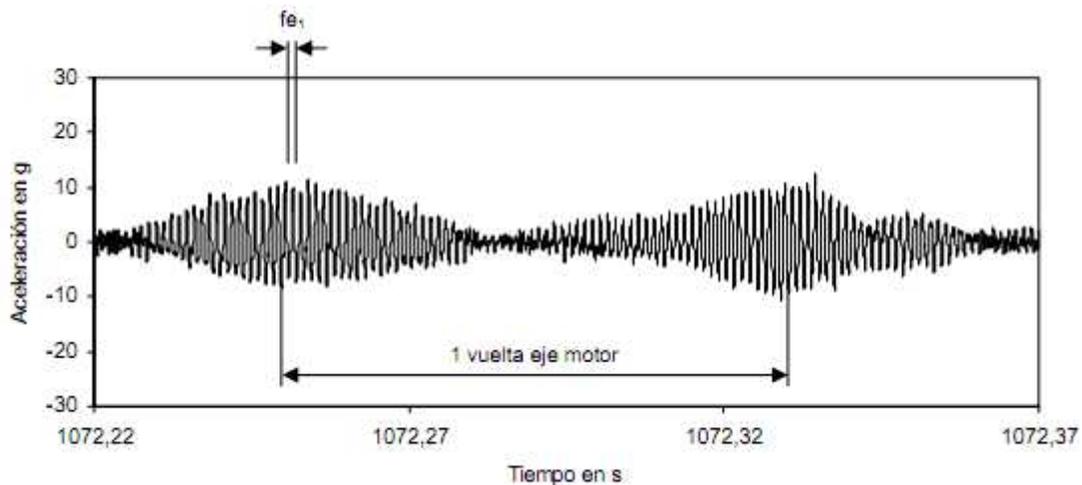


Ilustración 49: Expansión de la forma de onda aceleración de la Ilust. 48

Ilustración 50 muestra el espectro de la forma de onda de la Ilust. 48. Se observa que las componentes predominantes en el espectro son componentes múltiplos de la frecuencia de engrane fe_1 .

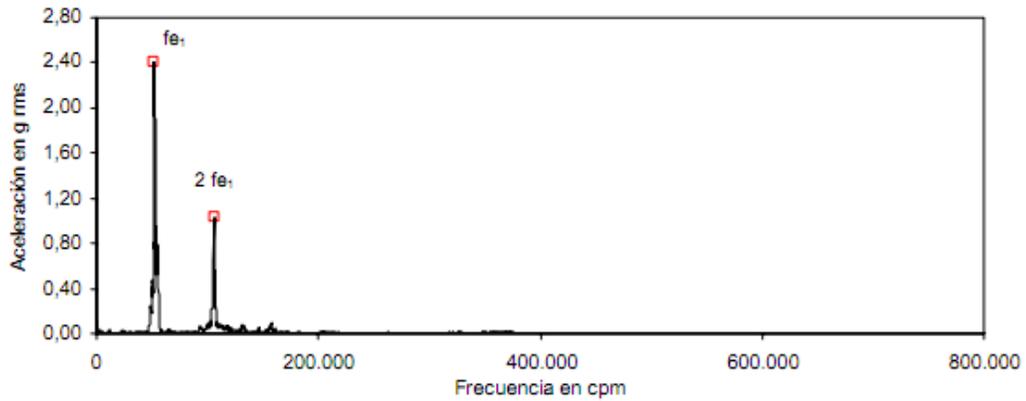


Ilustración 50: Espectro aceleración 4h de pala 10 con balde subiendo

3) Análisis de las vibraciones durante la subida y bajada del balde sin carga

La Ilustración 51 muestra la forma de la aceleración de 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga. Del análisis detallado de estas vibraciones se concluye:

- Se observa en Ilust. 51, una forma de onda repetitiva y uniforme en cada ciclo.
- Las formas de onda de la aceleración con y sin carga en el balde son muy diferentes (comparar Figs. 40 y 51). La forma de onda con carga tiene muchos transientes. Sin embargo, las zonas con el balde cargado donde no están presentes los transientes son de menor valor que para el caso sin carga, a diferencia de la Pala 8 donde los valores sin carga son aproximadamente la mitad de los valores con el balde con carga.
- Un análisis de los espectros de la vibración (no mostrados), en distintos tramos de tiempos muestran que el contenido frecuencial de los espectros tanto en bajada como en subida del balde son componentes múltiplos de $\frac{1}{2} fe_6$ y de fe_1 .

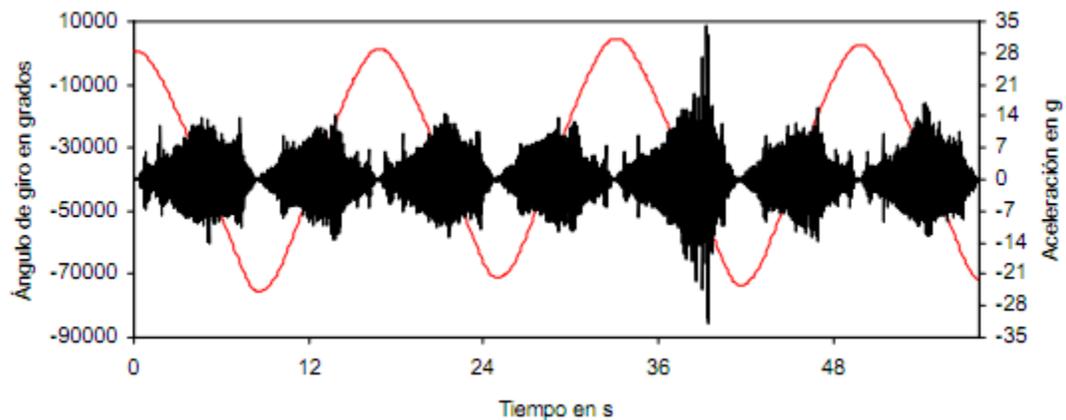


Ilustración 51: Forma de onda aceleración 4h en 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga pala 10

4.4 VIBRACIONES EN EL PUNTO 8H DEL TAMBOR DE PALA 8 Y PALA 10

Las Ilustraciones 52 y 53 muestran la forma de onda de la aceleración vibratoria (línea de color negro) y el ángulo de giro del motor (línea de color rojo) medida en el punto 8H de la Pala 8 y de la Pala 10 durante 3 ciclos de carga del balde respectivamente.

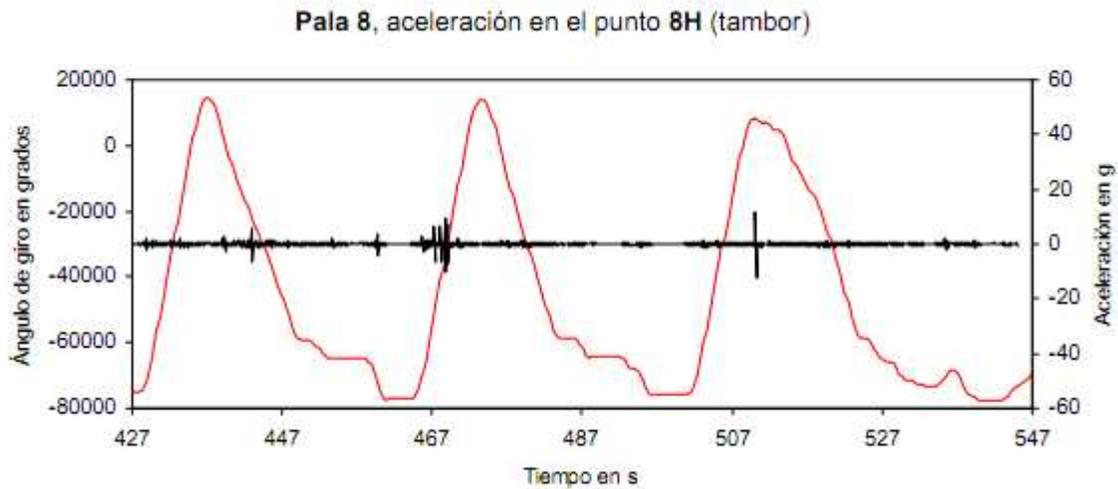


Ilustración 52: Aceleración 8H de las palas 8 durante 3 ciclos de carga

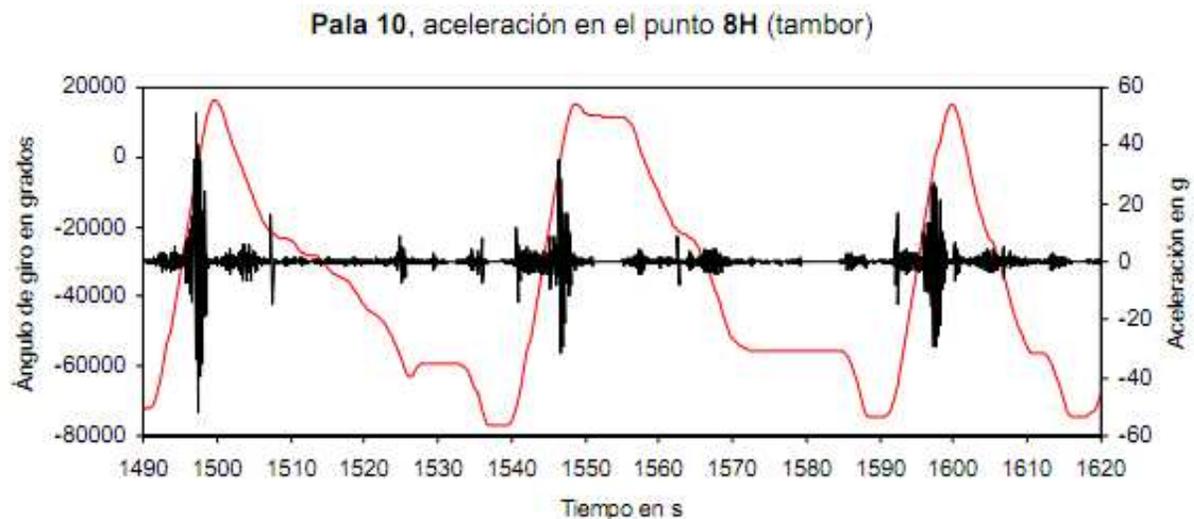


Ilustración 53: Aceleración 8H de las palas 8 durante 3 ciclos de carga

Del análisis de la Ilust. 52 se concluye que en el punto 8H, las vibraciones en la Pala 10 son significativamente mayores que las vibraciones de la Pala 8, sobre todo en el movimiento de descenso del balde.

4.4.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL TAMBOR DE LA PALA 8, PUNTO 8H

1) Análisis de las vibraciones durante la bajada del balde

Las Ilustraciones 54 y 55 muestran la forma de onda y el espectro de la aceleración vibratoria medida en el punto 8H de la Pala 8, en el movimiento de bajada del balde en el tramo entre 431,7 y 432,7 s de la forma de onda mostrada en la Ilust. 52.

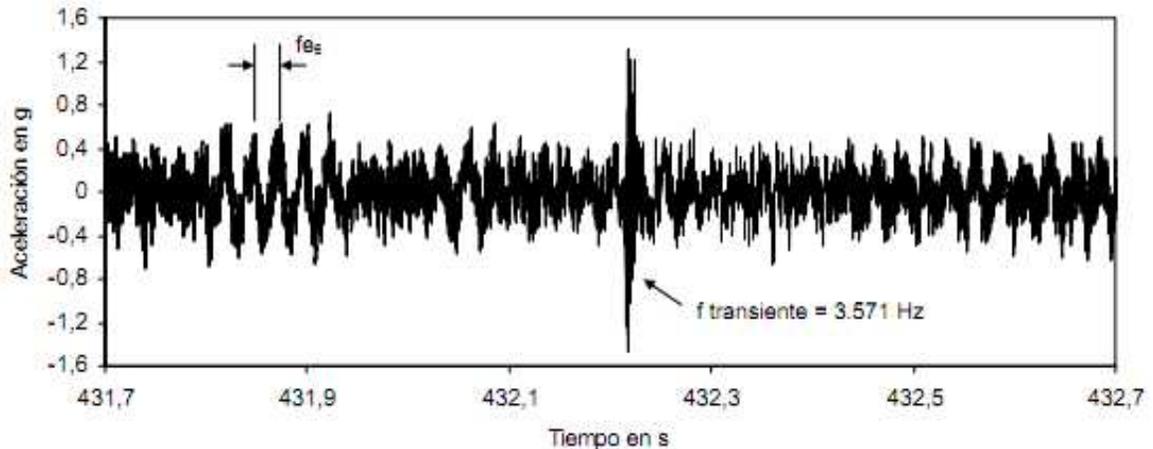


Ilustración 54: Forma de onda aceleración 8h de pala 8 con balde bajando

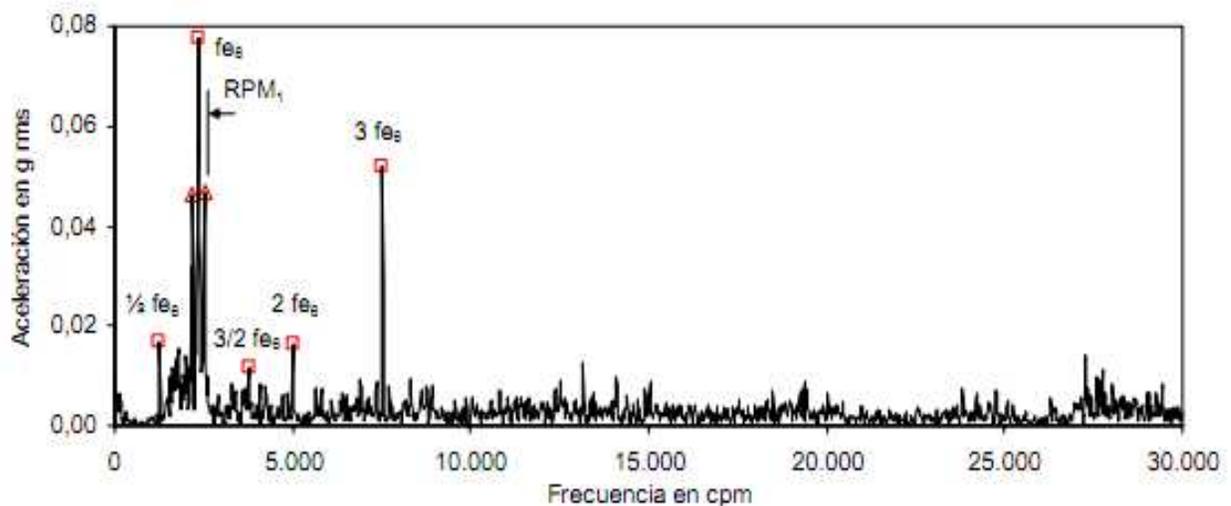


Ilustración 55: Espectro aceleración 8h de pala 8 con balde bajando

Se observa de estas ilustraciones que los múltiplos de la componente a la frecuencia de engrane f_{e_6} son predominantes en la vibración. Se han etiquetado además pequeñas componentes múltiplos de $1/2 f_{e_6}$. En la Ilust. 54 también se ha etiquetado la frecuencia de un transiente de alta frecuencia, 3.571 Hz.

2) Análisis de las vibraciones durante la subida del balde

La Ilustración 56 muestra la forma de onda de la aceleración vibratoria medida en el punto 8H de la Pala 8 en el movimiento de subida del balde en el tramo entre 438 y 440 s de la forma de onda mostrada en la Ilust. 52.

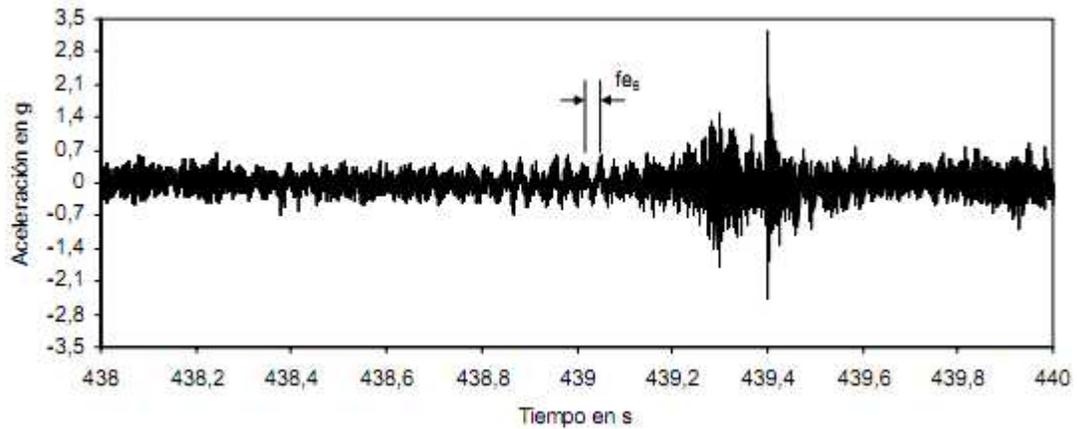


Ilustración 56: Forma de onda aceleración 8h de pala 8 con balde subiendo

Se observa de la Ilust. 56 que la componente a la frecuencia de engrane f_{e_6} es predominante en la vibración, de forma similar a lo que sucede en movimiento de bajada del balde. Igualmente se observa un transiente de alta frecuencia.

3) Análisis de las vibraciones durante la subida y bajada del balde sin carga

La Ilustración 57 muestra la forma de la aceleración de cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga. Del análisis detallado de estas vibraciones se concluye:

- Se observa en la Ilust. 57, una forma de onda repetitiva y uniforme en cada ciclo.
- Las formas de onda de la aceleración con y sin carga en el balde son similares en forma y en valores. Solo que sin carga no están presentes los tramos de giro B, C, y D indicados en la Ilust. 41.
- Un análisis de los espectros de la vibración (no mostrados), en distintos tramos de tiempos muestran que el contenido frecuencial de los espectros es similar al de los espectros medidos con el balde con carga, es decir, que los múltiplos de la componente a la frecuencia de engrane f_e son predominantes en la vibración, tanto en la subida como en la bajada del balde.

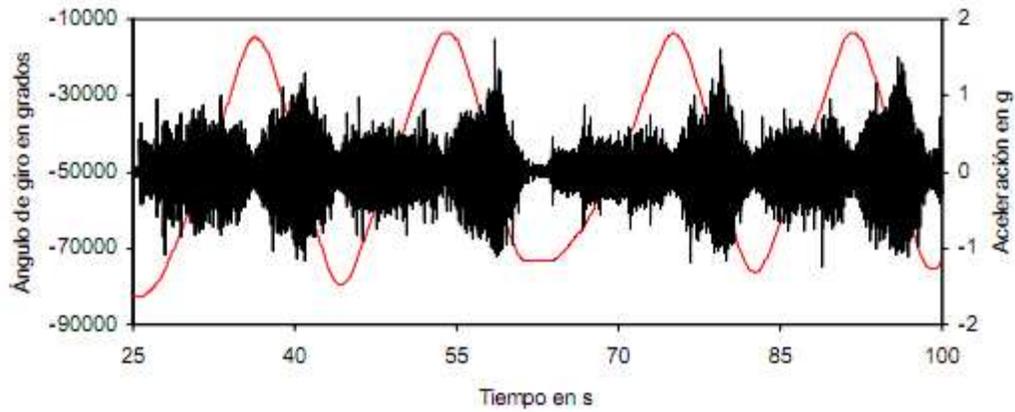


Ilustración 57: Forma de onda aceleración 8h en cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 8

4.4.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL TAMBOR DE LA PALA 10, PUNTO 8H

1) Análisis de las vibraciones durante la bajada del balde

Del análisis de la Ilust. 53 se observa una gran diferencia en los valores de la vibración entre el movimiento de bajada y subida del balde en la Pala 10. Los valores en la bajada del balde son varias veces mayores que en la subida del balde. Sin embargo, en las mediciones con el balde vacío estos valores son similares (ver Ilust. 63). La Ilustración 58 muestra la forma de onda de la aceleración vibratoria en el punto 8H de la Pala 10 realizado en el tramo de bajada entre 568 y 570 s.

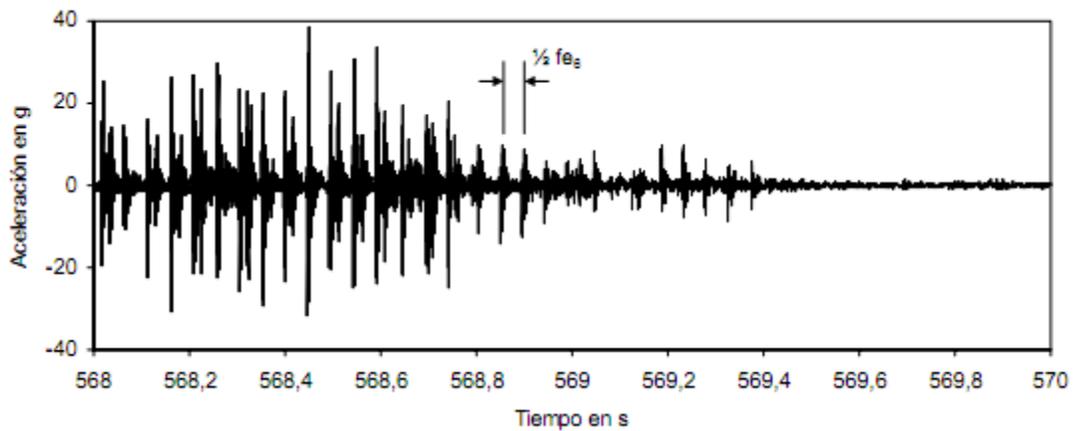


Ilustración 58: Forma de onda de la aceleración vibratoria en el punto 8h de la pala 10 durante la bajada del balde

La Ilustración 59 es una ampliación de los impactos mostrados en la Ilust. 58. En esta Ilustración se ha etiquetado que la frecuencia de ellos es a aproximadamente 2.900 Hz. Del análisis de las Figs. 58 y 59 se concluye que las altas vibraciones generadas en el tramo de bajada del balde se

deben a transientes generados con una frecuencia correspondiente a $\frac{1}{2} fe_6$, por lo que en el espectro son predominantes los múltiplos de $\frac{1}{2} fe_6$, como se puede apreciar en la Ilust. 60.

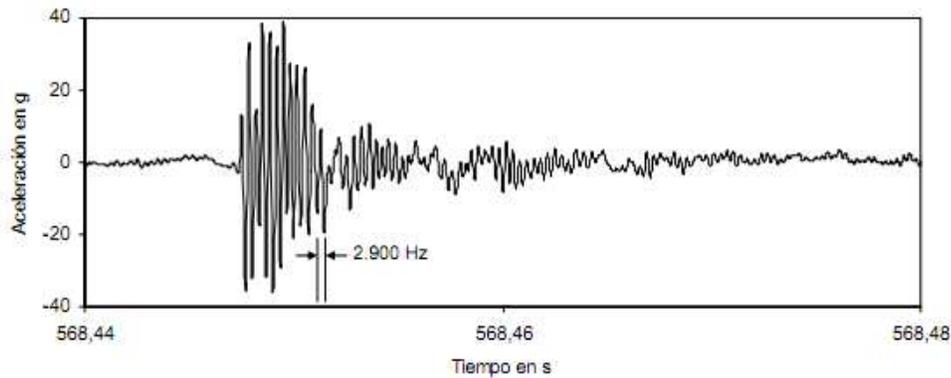


Ilustración 59: Ampliación de uno de los transientes de la Ilust. 58

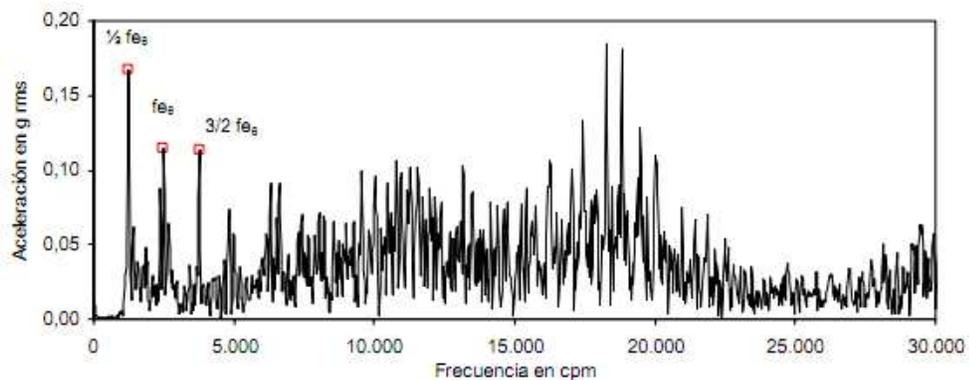


Ilustración 60: Espectro de la vibración de la Ilust. 58

2) Análisis de las vibraciones durante la subida del balde

Las vibraciones medidas en este punto 8H, tanto en la subida como en la bajada del balde, no son repetitivas para los diferentes ciclos de carga, y por lo tanto presentan formas de espectros diferentes, con transientes excitados también a frecuencias diferentes. Ilustración 61 ilustra lo anterior. Esta Ilustración muestra la forma de onda de la aceleración vibratoria en el punto 8H de Pala 10 realizado en el tramo de subida del balde entre 1072 y 1074 s de Ilust. 53. Se observa una forma de onda muy variable en amplitud.

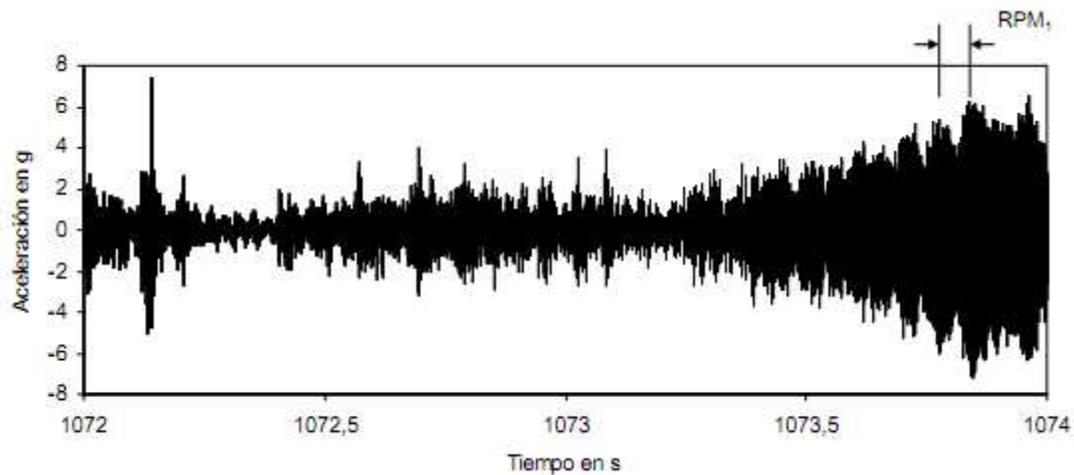


Ilustración 61: Forma de onda aceleración 8h de pala 10 con balde subiendo

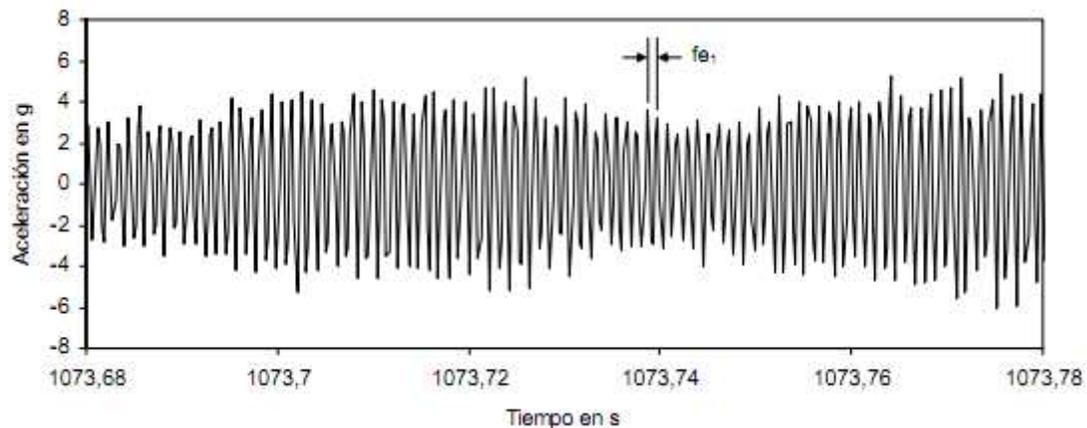


Ilustración 62: Expansión de la forma de onda aceleración de la Ilust. 61

Ilustración 62 es la expansión de la forma de onda mostrada en la Ilust. 61 en el tramo de 1073,68 a 1073,78 s. Para este tramo de vibración, se ha etiquetado que la vibración predominante es la componente a la frecuencia de engrane fe_1 con pequeñas modulaciones en amplitud a RPM1.

3) Análisis de las vibraciones durante la subida y bajada del balde sin carga

La Ilustración 63 muestra la forma de la aceleración de 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga. Del análisis detallado de estas vibraciones se concluye:

- Se observa en la Ilust. 63, que para el balde sin carga, se obtiene una forma de onda de la aceleración repetitiva y uniforme en cada ciclo.
- Las formas de onda de la aceleración con y sin carga para el caso del balde, bajando son muy diferentes (comparar Figs. 53 y 63), no así en la subida del balde en la que son similares. La forma de onda con el balde bajando en operación normal tiene vibraciones moduladas en amplitud de muy alto valor.

- c) Un análisis de los espectros de la vibración (no mostrados), en distintos tramos de tiempos muestran que el contenido frecuencial de los espectros tanto en bajada como en subida del balde son componentes múltiplos de $\frac{1}{2} fe_6$ y de fe_1 .

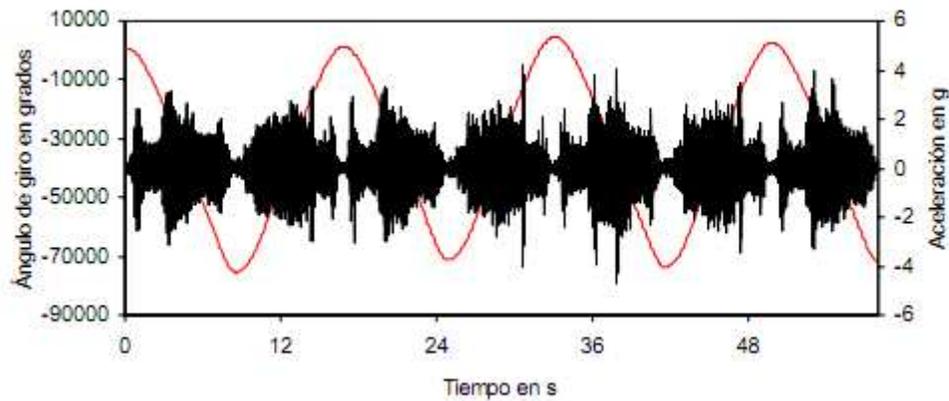


Ilustración 63: Forma de onda aceleración 8h en 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 10

4.5 VIBRACIONES EN EL PUNTO 1H DEL MOTOR DE PALA 8 Y 10

Las Ilustraciones 64 y 65 muestran la forma de onda de la aceleración vibratoria (línea de color negro) y el ángulo de giro del motor (línea de color rojo) medida en el punto 1H en la Pala 8 y en la Pala 10 durante 3 ciclos de carga del balde.

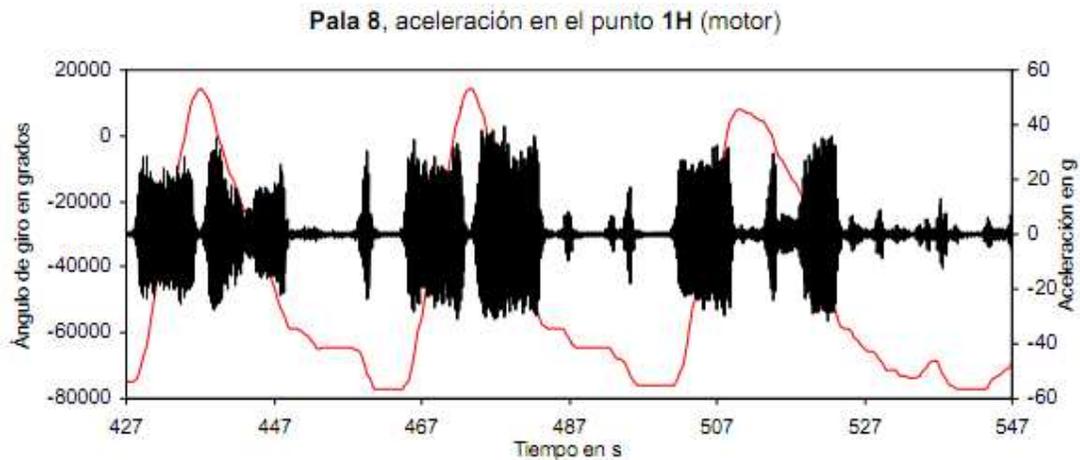


Ilustración 64: Aceleración 1H de la pala 8 durante 3 ciclos de carga

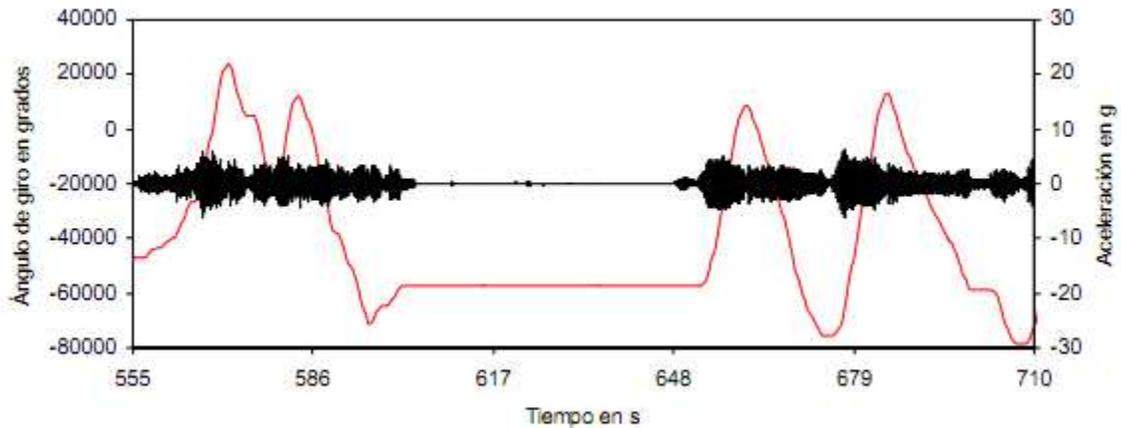


Ilustración 65: Aceleración 1H de las palas 10 durante 2 ciclos de carga

Del análisis de la Ilust. 64 se concluye que en el punto 1H, las aceleraciones vibratorias en la Pala 8 son significativamente mayores que las aceleraciones vibratorias de la Pala 10, tanto en el movimiento de subida como de descenso del balde.

4.5.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL MOTOR DE LA PALA 8, PUNTO 1H

1) Análisis de las vibraciones durante la bajada del balde

La Ilustración 66 muestra el espectro de la aceleración vibratoria en el punto 1H de la Pala 8 realizado en el tramo de bajada entre 431 y 433 s de Ilust. 64.

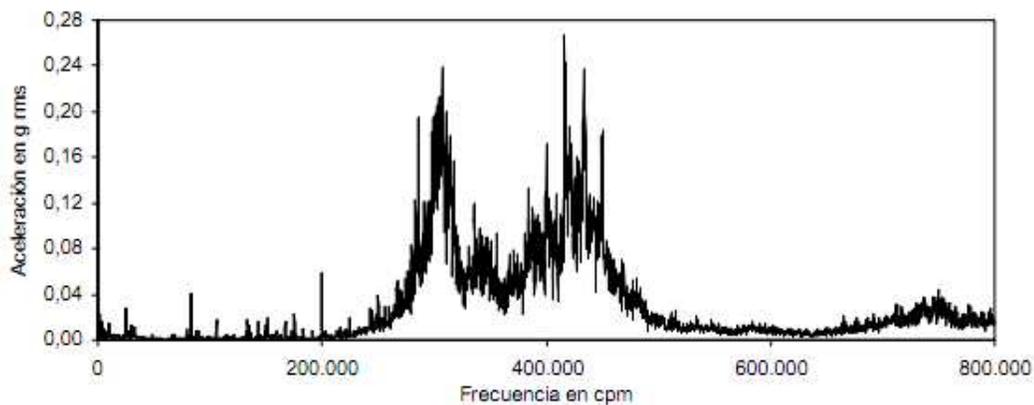


Ilustración 66: Espectro aceleración 1h de pala 8 con balde bajando

De la Ilust. 64, se observa una forma de onda de la aceleración vibratoria uniforme, pero de alto valor. En el espectro de la Ilust. 66 se observa que el alto valor se debe a componentes espectrales que se encuentran en zonas resonantes en el rango de frecuencias, de aproximadamente entre 300.000 y 450.000 cpm. En la expansión de la forma de onda mostrada en la Ilust. 67 se muestra un transiente de frecuencia aproximadamente a 5.000 Hz (300.000 cpm). La Ilustración 68

muestra una expansión del espectro de la Ilust. 66 a las bajas frecuencias. Se observan componentes múltiples de la velocidad de rotación del motor y de la f_{e6} de pequeños valores. Para determinar la causa que excita zonas resonantes en el espectro se utiliza las técnicas de análisis de envolvente y análisis de “peak-vue”. Para ello se debe aislar la zona resonante a través de un filtro pasa banda. En este trabajo se utilizaron diferentes filtros pasa banda. El analizador utilizado permite definir un filtro en cualquier banda de frecuencias. Los resultados obtenidos en las diferentes bandas de frecuencias fueron similares.

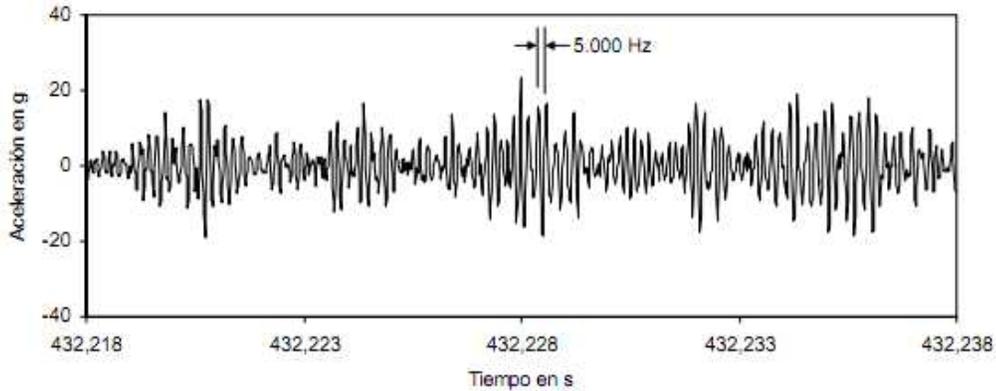


Ilustración 67: Expansión de la forma de onda en torno a los 432,23 s en 1H de pala 8

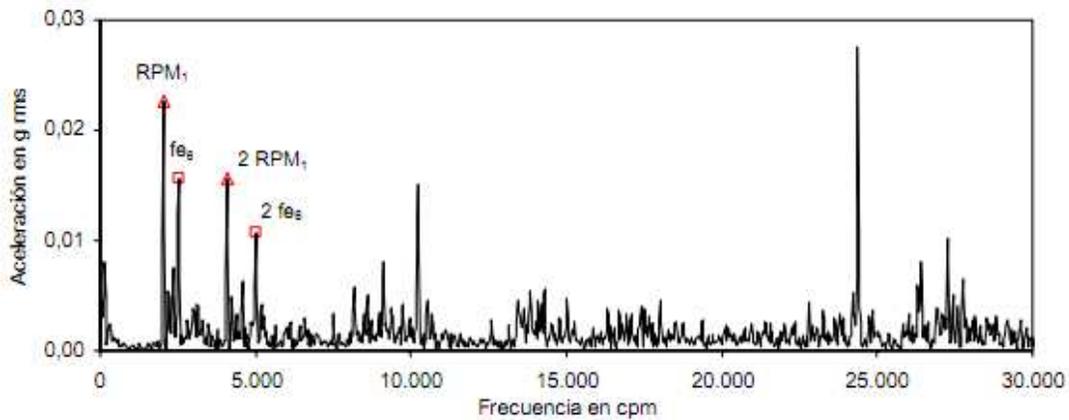


Ilustración 68: Expansión espectro de la Ilustración 66 a bajas frecuencias

Las Ilustraciones 60 y 70 muestran los resultados de utilizar el análisis de envolvente con un filtro pasa banda entre 370.000 y 485.000 cpm. La Ilustración 69 muestra la forma de onda de la envolvente y la Ilust. 70 muestra el espectro de la envolvente. En ambas figuras no es posible detectar periodicidades, por lo que se concluye que la causa que excita la zona resonante es de causa aleatoria (genera un espectro de “pasta”). En todo caso, las aceleraciones a altas frecuencias son normales que sean de alto valor. Los valores pico máximos en el espectro de la aceleración mostrado en la Ilust. 66 no superan los 0,3 g, lo que en velocidad corresponde aproximadamente a 0,1 mm/s.

Envolvente (filtro pasa banda entre 370 kCPM y 485 kCPM)

Forma de onda:

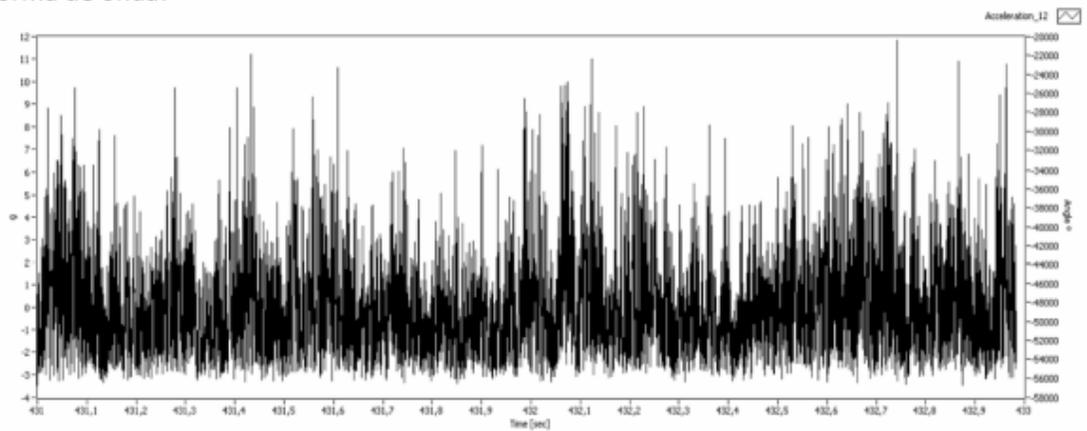


Ilustración 69: Forma de onda en 1H de pala 8

Espectro:

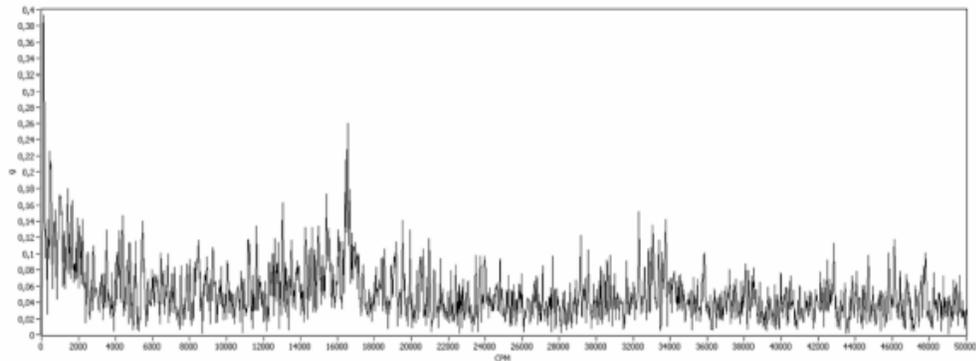


Ilustración 70: Espectro envolvente en 1H de pala 8

2) Análisis de las vibraciones durante la subida del balde

Las vibraciones registradas en la subida del balde son similares a las registradas durante la bajada del balde vistas en el punto anterior.

3) Análisis de las vibraciones durante la subida y bajada del balde sin carga

La Ilustración 71 muestra la forma de la aceleración de 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga. Del análisis detallado de estas vibraciones se observa en la Ilust. 71, una forma de onda relativamente repetitiva y uniforme en cada ciclo y de forma similar a la obtenida con el balde con carga, pero de un valor de aproximadamente un 40% menor.

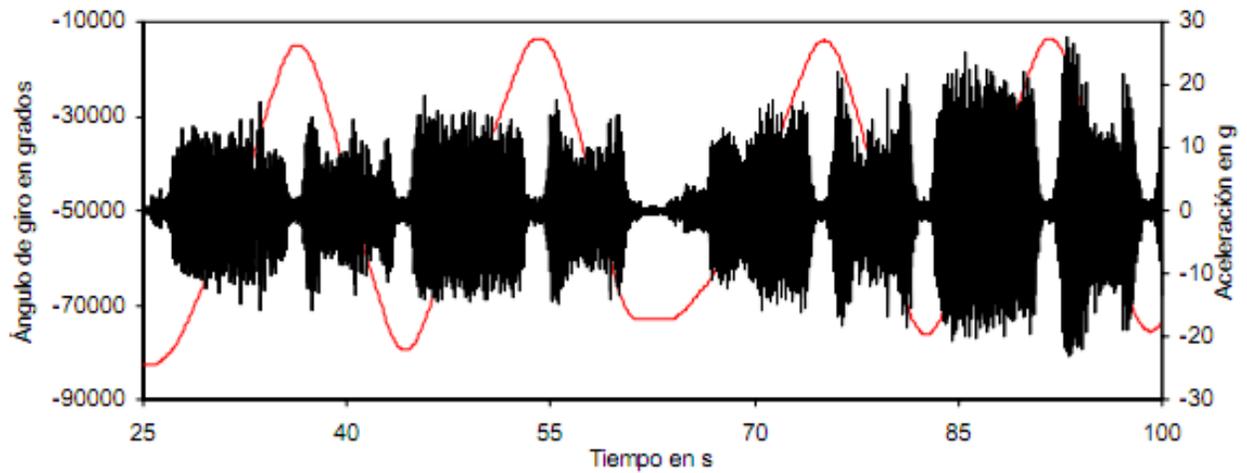


Ilustración 71: Forma de onda aceleración 1h en cuatro ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 8

4.5.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL MOTOR DE LA PALA 10, PUNTO 8H

1) Análisis de las vibraciones durante la bajada del balde

La Ilustración 72 muestra el espectro de la aceleración vibratoria en el punto 1H de Pala 10 realizado en el tramo de bajada entre 568 y 570 s de la Ilust. 65. La Ilustración 73 muestra una ampliación de espectro de Ilust. 72 a las bajas frecuencias.

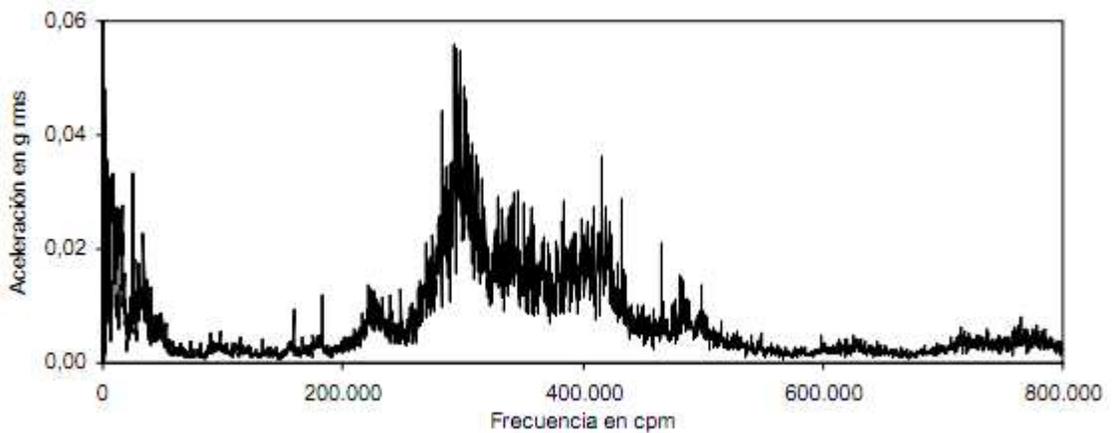


Ilustración 72: Espectro aceleración vibratoria en el punto 1H de la pala 10 durante la bajada del balde

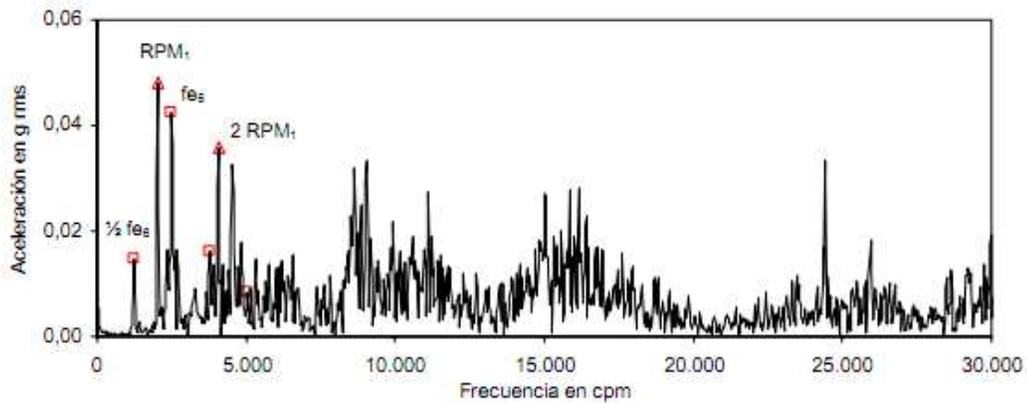


Ilustración 73: Ampliación del espectro a bajas frecuencias

Del análisis de estos espectros se concluye que el contenido frecuencial de los espectros en la Pala 10 es similar a los obtenidos para la Pala 8. Las diferencias solo están en los valores de las componentes espectrales:

- a) Las componentes en la zona resonante para la Pala 8 alcanzan un valor máximo aproximadamente de 0,3 g (ver Ilust. 64), mientras que para la pala 10 alcanzan un valor máximo aproximadamente de 0,055 g (ver Ilust. 72).
- b) En la Pala 8 están presentes solo múltiplos enteros de RPM_1 y fe_6 , mientras que en la Pala 10 también se observan componentes espectrales a múltiplos de $\frac{1}{2} fe_6$.
- c) Las componentes a las bajas frecuencias en la Pala 8 son de valor aproximadamente la mitad del valor de dichas componentes en la Pala 10 (comparar Figs. 68 y 73).

2) Análisis de las vibraciones durante la subida del balde

Las vibraciones registradas en la subida del balde son similares a las registradas durante la bajada del balde vistas en el punto anterior.

3) Análisis de las vibraciones durante la subida y bajada del balde sin carga

La Ilustración 74 muestra la forma de la aceleración de 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga. Del análisis detallado de estas vibraciones se observa una forma de onda relativamente repetitiva y uniforme en cada ciclo y de forma similar a la obtenida con el balde con carga, pero de un valor de aproximadamente un 30% menor. Los espectros (no mostrados) presentan un contenido frecuencial similar a los obtenidos con el balde con carga.

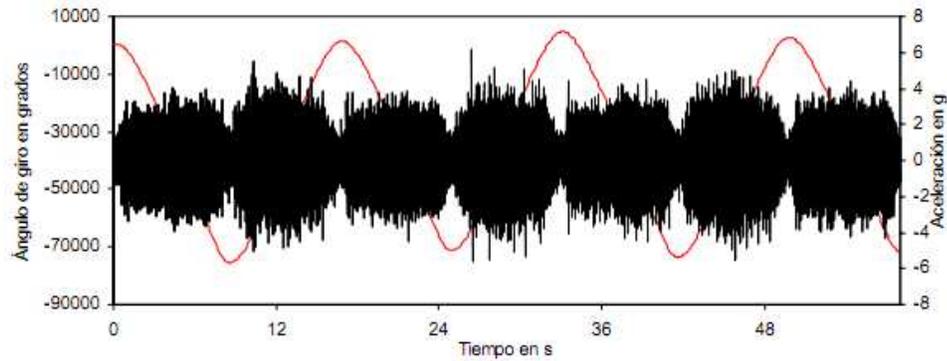


Ilustración 74: Forma de onda aceleración 1H en 3,5 ciclos de subida y bajada del balde sin carga en pala 10

4.6 ANÁLISIS DE VIBRACIONES DEL CONJUNTO HOIST-REVOLVING FRAME

- 1) A continuación se analiza la forma de vibrar del revolving frame en donde está instalada la transmisión hoist. Los puntos de medición sobre esta plataforma se pueden apreciar en el Anexo. Las Ilustraciones 76 y 77 muestran para la Pala 10 los espectros vibratorios en orders en los diferentes puntos de medición cuando el balde va subiendo y cuando el balde va bajando respectivamente. Las Ilustraciones 78 y 79 muestran lo mismo pero para la Pala 8. Comparando los espectros medidos en ambas palas se puede concluir que el punto donde las vibraciones son mayores, es decir, el punto que tiene mayor movilidad mecánica, es claramente el punto P5.

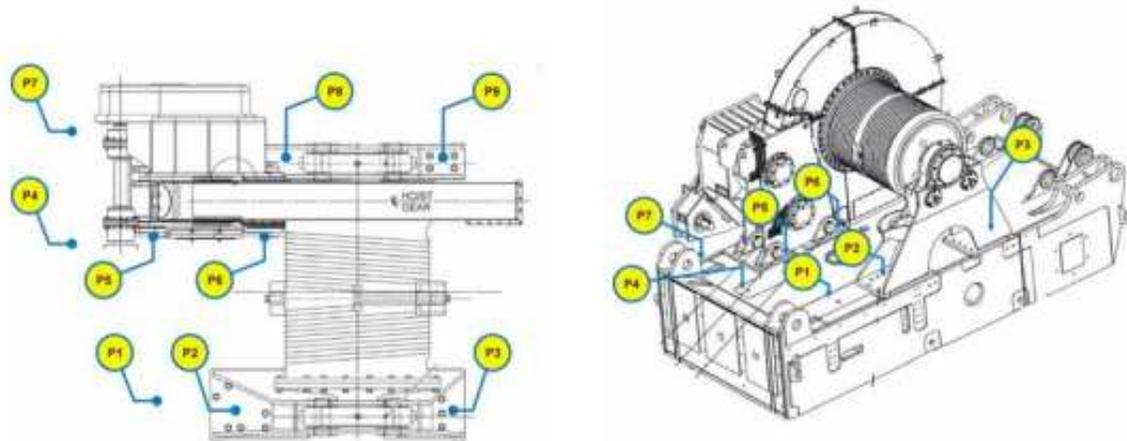


Ilustración 75: Puntos de medición Hoist-Revolving Frame

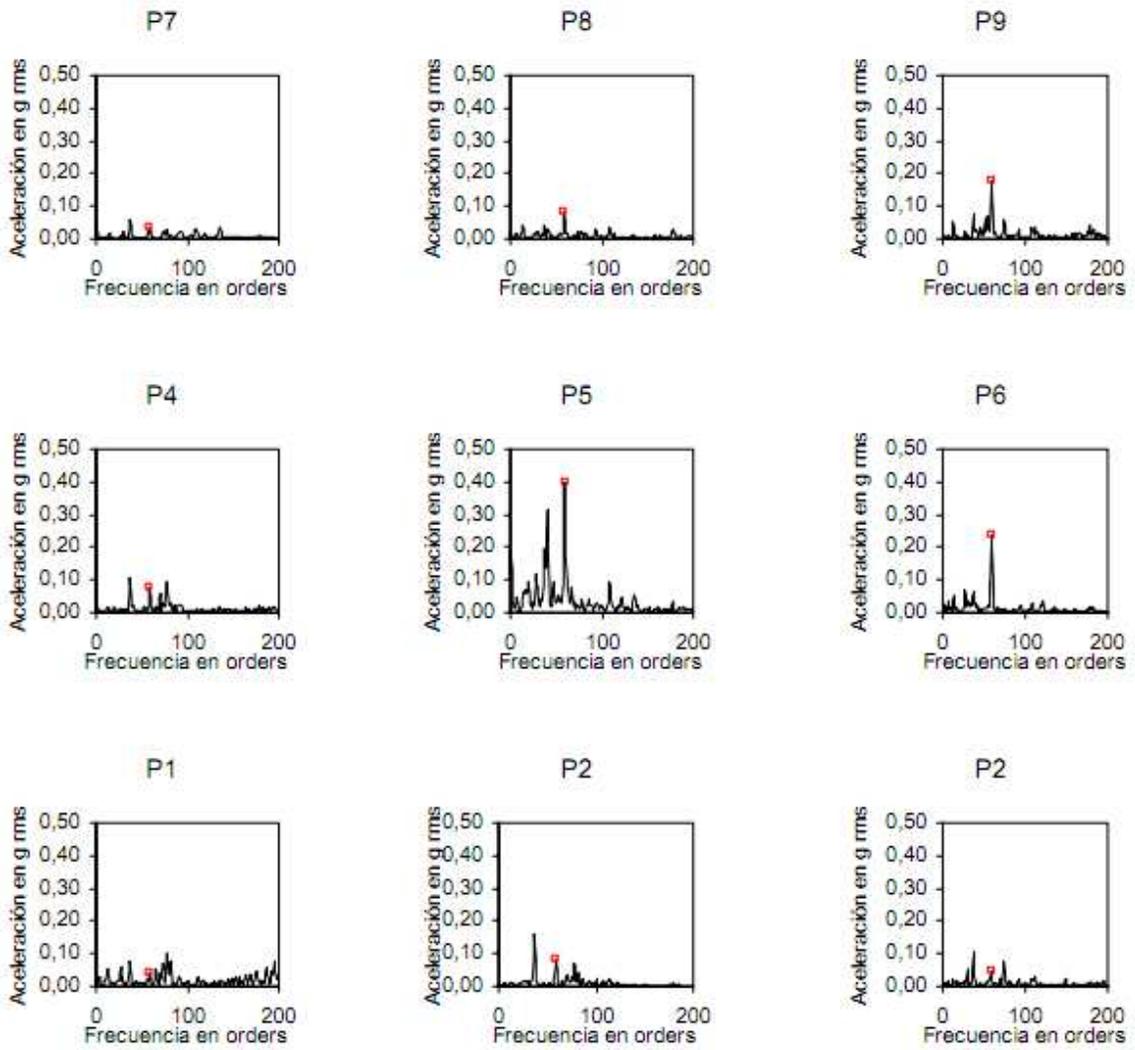


Ilustración 76: Espectros Pala 10 subiendo

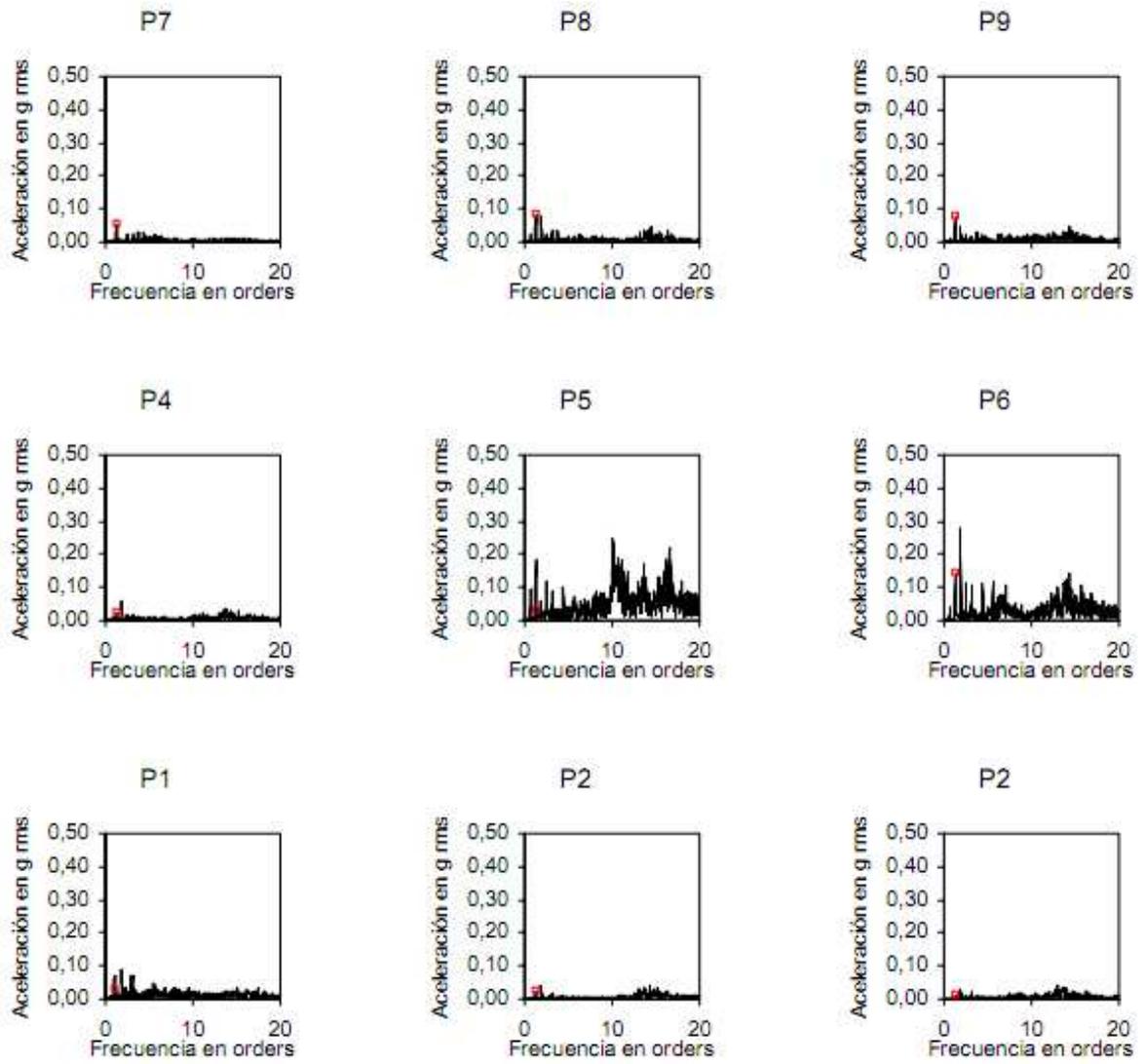


Ilustración 77: Espectros Pala 10 bajando

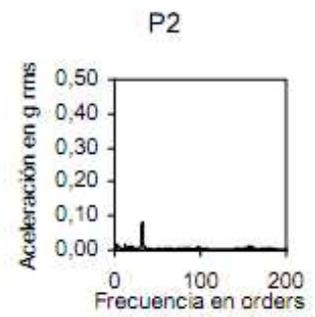
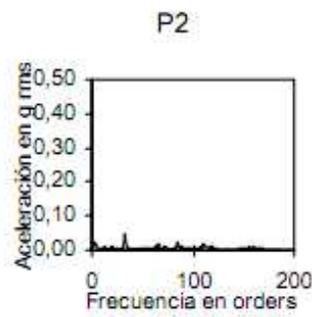
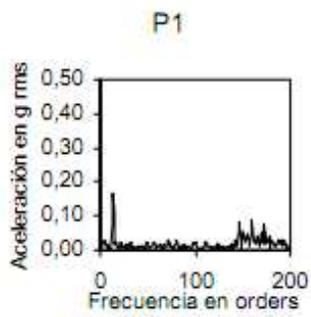
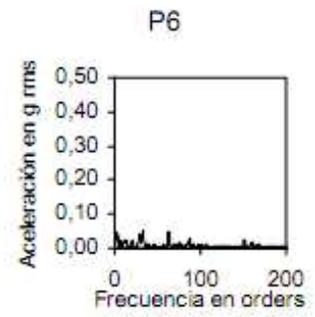
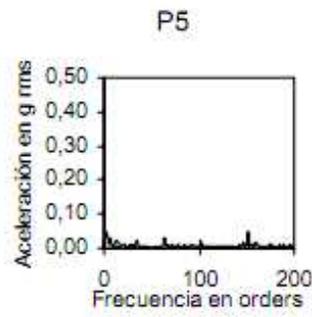
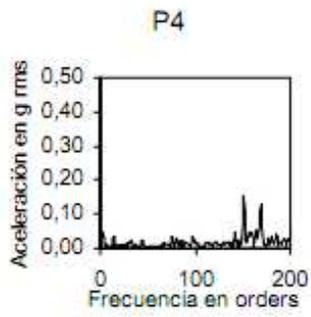
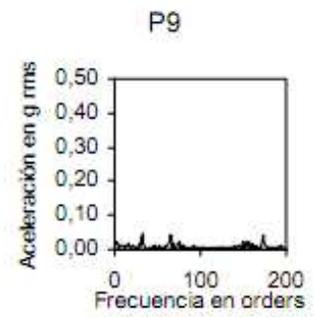
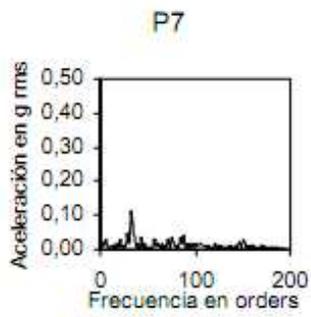


Ilustración 78: Espectros Pala 8 subiendo

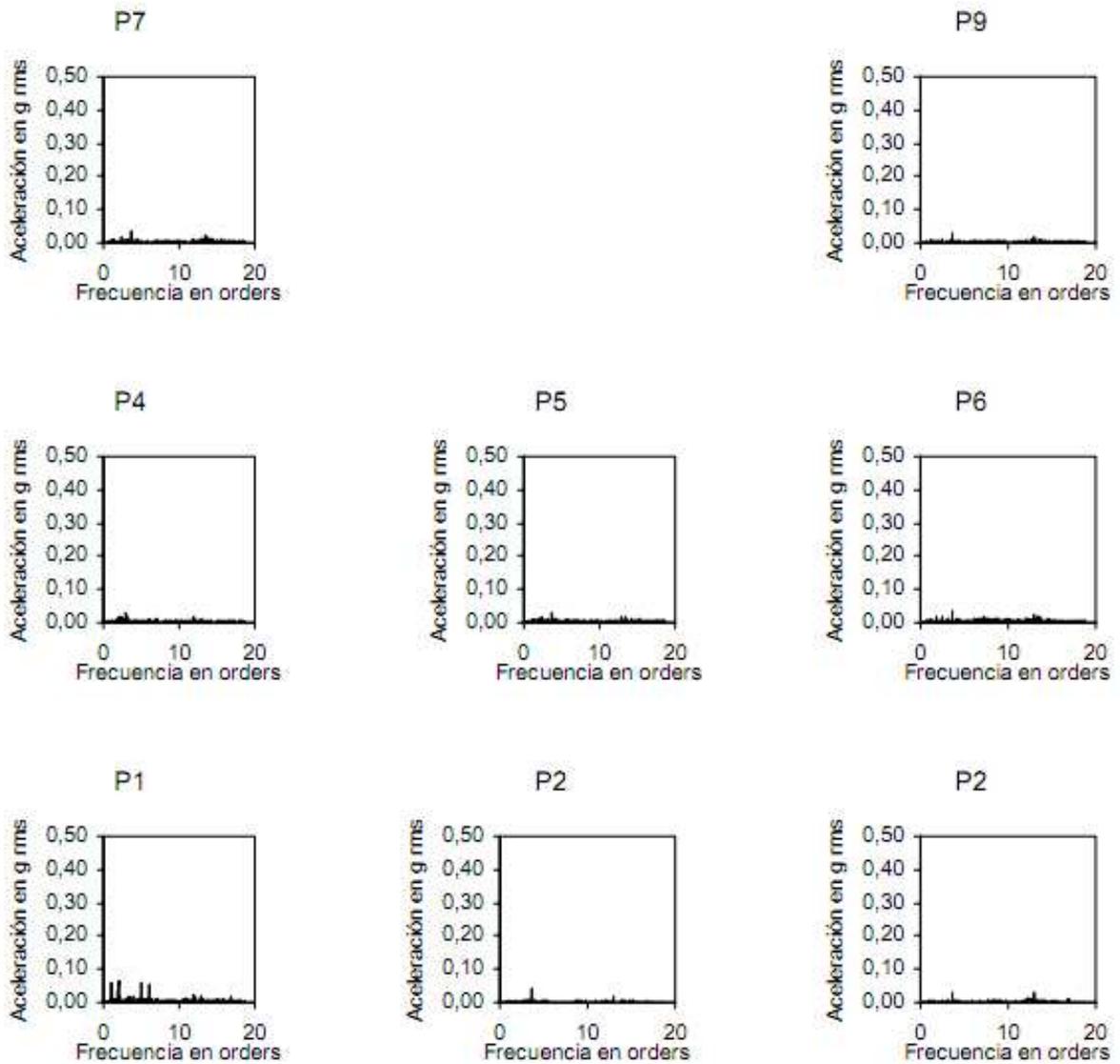


Ilustración 79: Espectros Pala 8 bajando

- 2) A continuación se analiza las vibraciones tomadas simultáneamente en los puntos 7V (descanso piñón superior), P6 (pata delantera locking assembly) y P5 (pata trasera locking assembly), cuando el balde va subiendo. Todas las mediciones han sido realizadas en la dirección vertical y simultáneamente. Las Ilustraciones 80, 81 y 82 muestran las formas de onda de la aceleración en los puntos 7V, P6 y P5.

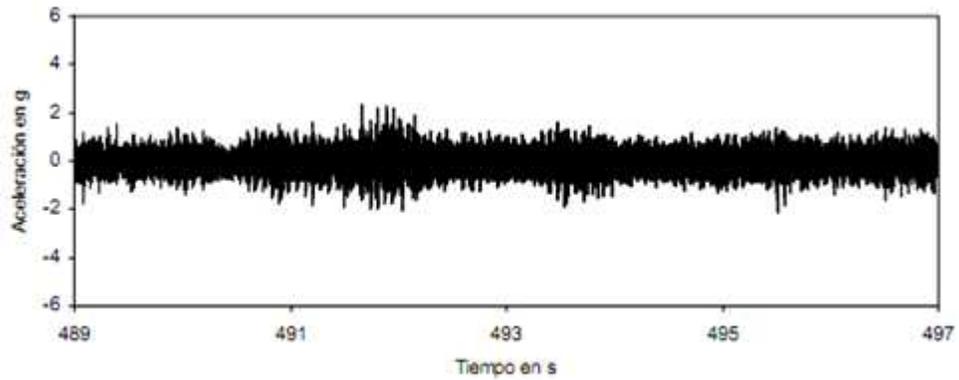


Ilustración 80: Forma de onda aceleración en 7V de pala 10 subiendo

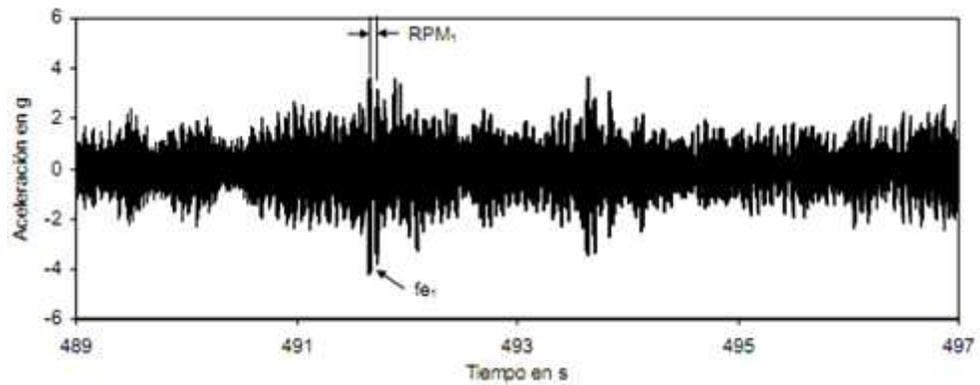


Ilustración 81: Forma de onda aceleración en P6 de pala 10 subiendo

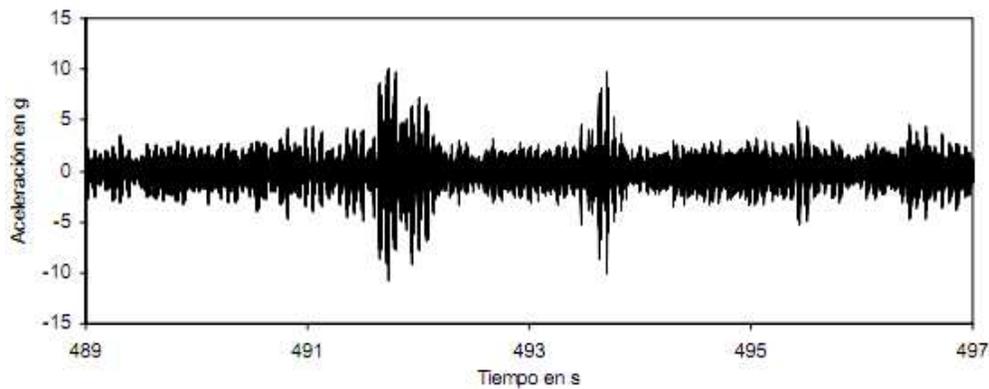


Ilustración 82: Forma de onda aceleración en P5 de pala 10 subiendo

Se observa que el valor de la vibración máxima en el punto P5 es aproximadamente 4 veces el valor que tiene en 7V y es aproximadamente 3 veces el valor que tiene en P6. Esto indica una anormal movilidad mecánica del punto P5 y en menor grado del punto P6, corroborando la conclusión obtenida en el punto 1 anterior.

- 3) Las Ilustraciones 83 y 84 muestran la forma de onda y el espectro de la aceleración vibratoria obtenida de ensayos de golpe realizados en la Pala 10 y en la Pala 8 respectivamente. El punto P6 es el punto donde se ha aplicado el impacto en dirección vertical para el ensayo de golpe en ambas palas. El punto de medición de la aceleración vibratoria en ambos casos es el punto P5. Analizando la Ilust. 83 se puede concluir que en el espectro de la aceleración en el punto P5 de la Pala 10, no existen componentes espectrales de alta frecuencia, ellas no llegaron al sensor. Las componentes en el espectro están bajo los 100.000 cpm. Sin embargo, analizando la Ilust. 84 se puede concluir que en el espectro de la aceleración vibratoria medida en el mismo punto P5 de Pala 8, si existen componentes espectrales de alta frecuencia. Se observan componentes hasta 700.000 cpm. Que no se puedan transmitir las altas frecuencias que generó el ensayo de golpe a la pata trasera locking assembly en Pala 10, y si lo hagan en la Pala 8, indica una rigidez de unión de la pata trasera locking assembly a su base (o de la base misma) menor en la Pala 10 que en la Pala 8. Esto es otra corroboración de las conclusiones obtenidas en los puntos 1 y 2 anteriores.

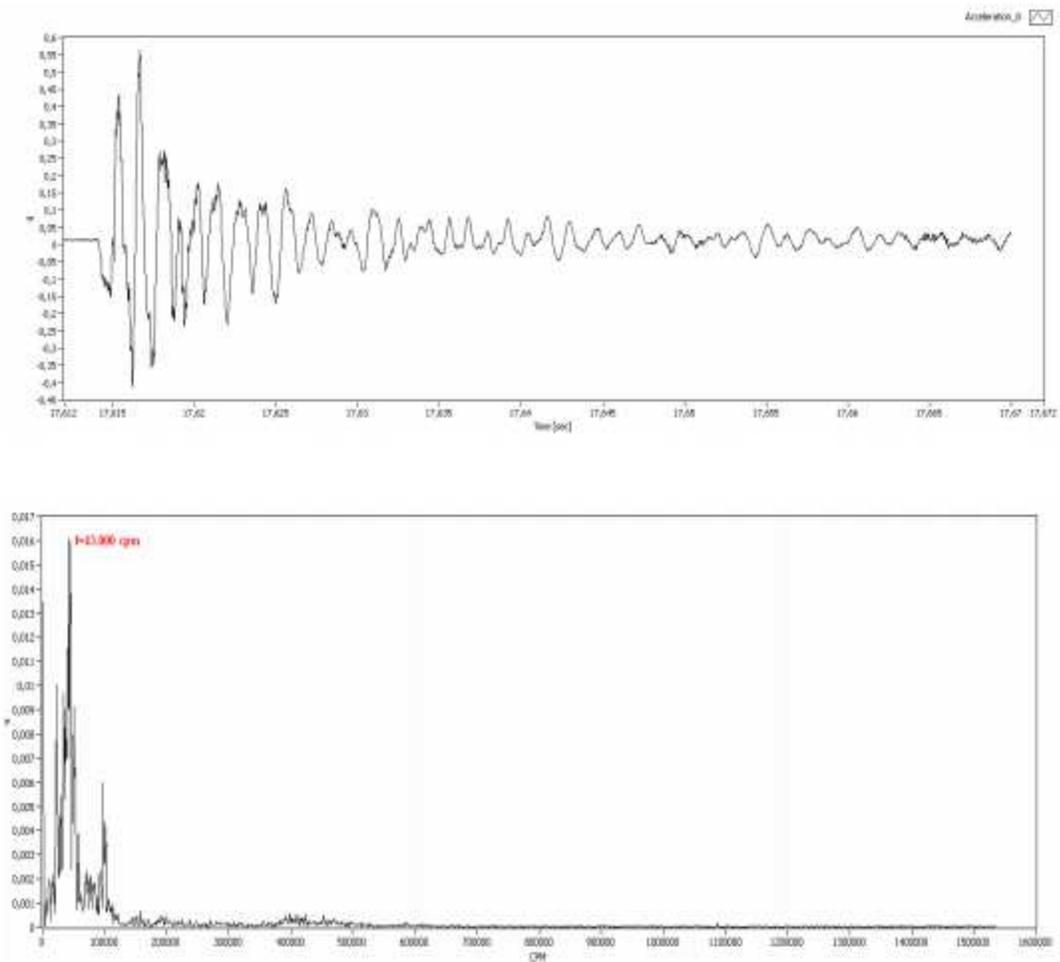


Ilustración 83: Ensayo de golpe en P6 y medición de vibración en P5 de pala 10

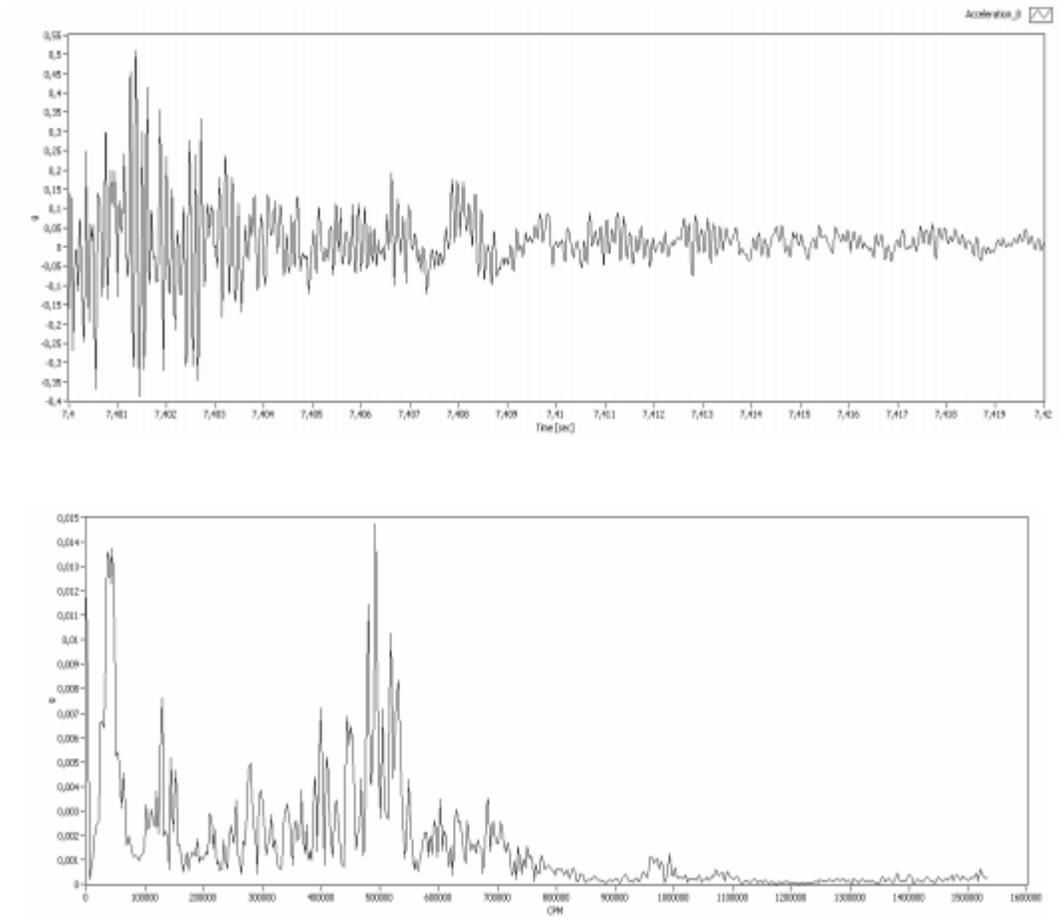


Ilustración 84: Ensayo de golpe en P6 y medición de vibración en P5 de pala 8

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

5.1.1 PALA 8

De los análisis realizados en el punto 3 se concluye que en la Pala 8, el reductor de la transmisión hoist, la unidad tambor y el motor eléctrico están en buenas condiciones mecánicas. Se observa un comportamiento vibratorio que es normal para este tipo de unidades. La Ilustración 85, Ilust. 39 repetida, ilustra una forma extendida de la aceleración en el punto 4H típica y normal en el reductor. Esta forma de onda puede servir de patrón para posteriores monitoreos. Se observa una forma de onda bastante uniforme y repetitiva en los dos primeros ciclos de carga.

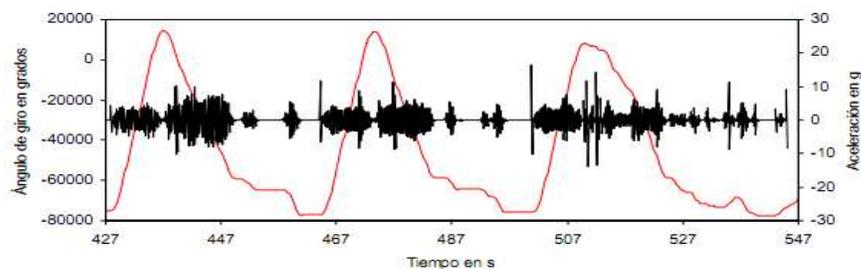


Ilustración 85: Ilust. 39 repetida, forma de onda aceleración 4H en tres ciclos de carga de pala 8

Las formas de ondas de la aceleración en las palas presentan típicamente los siguientes tipos de transientes:

- i. Transientes de alta frecuencia que pueden ser debido a señales inducidas en el sensor debido a los campos eléctrico-magnéticos circundantes en los alrededores del reductor debido a los cables de alta corriente o generados por el motor. También puede deberse a resonancias excitadas por elementos de alta rigidez y/o poca masa. En ambos casos no son preocupantes.
- ii. Transientes a las frecuencias de engrane, particularmente a fe_1 , los cuales son debido a cambios en la velocidad de rotación (aceleraciones o retardaciones), a cambios en el valor de la carga, cambios de movimientos en la transmisión crowd.

El motor, sin embargo, presenta un aviso del inicio de un problema incipiente (alto valor de las aceleraciones a altas frecuencias). Se observa unas zonas resonantes excitadas entre los 300.000 y 450.000 cpm. Las aceleraciones a tan alta frecuencias son normales que sean de alto valor. Procesando las mediciones con técnicas más avanzadas, como son el análisis de la envolvente y peak value, se determina que la vibración tiene un origen aleatorio (“pasta” en el espectro de la envolvente) que podría ser carencia de lubricación en este rodamiento o simplemente que el problema está tan poco desarrollado que no presenta síntomas distintivos. Habrá que seguir monitoreando su evolución.

5.1.2 PALA 10

La Pala 10 presenta vibraciones anormales de alto valor. En todos los puntos de medición en la transmisión de esta pala, las vibraciones que se generan en cada ciclo de carga / descarga no son repetitivas (muy diferentes de un ciclo a otro). Los mayores valores se presentan en el descanso del tambor durante el ciclo de bajada del balde con la pala operando normalmente. En este movimiento, los valores de la aceleración pico superan en más de 10 veces los medidos en la pala 8. Las altas vibraciones que se generan en parte del ciclo de bajada es debido a impactos los cuales tienen una frecuencia de repetición de $\frac{1}{2}$ de la frecuencia de engrane de los piñones con la corona. Basado en:

- i. Lo señalado anteriormente.
- ii. Las conclusiones obtenidas del análisis de la forma de vibrar (análisis ODS), ver sección 4.6.1 y 4.6.2
- iii. Las conclusiones del análisis de los ensayos de golpe, ver punto 4.6.3.

Se concluye que estas altas vibraciones anormales para la unidad se deben a una falta de rigidez en la sujeción del reductor al revolving frame (locking assembly), en especial en el punto P5 (pata trasera locking assembly). La falta de rigidez en esta sujeción se puede deber a un ajuste o montaje inadecuado de los locking assembly, o soltura de los pernos de sujeción al revolving frame, o incluso que la base de la pata de sujeción no esté completamente paralela o plana con la superficie del revolving frame donde se apoya.

5.2 RECOMENDACIONES

- Los piñones en ambas palas de acuerdo al análisis de las vibraciones realizado tienen 16 dientes. Se recomienda cambiar el número de dientes de los piñones que engranan con la corona de 16 a 17 dientes. Aunque esta no es la causa de las altas vibraciones, el tener un factor común 2 en el número de dientes piñón-corona, como sucede con los piñones de 16 dientes produce un desgaste acelerado en los dientes disminuyendo la vida útil de los engranajes. Esto toma más importancia en engranajes de baja calidad de fabricación como son los utilizados en la minería.
- Como fue mencionado, el análisis de vibraciones permitió concluir que existe una falta de rigidez en el montaje de la transmisión hoist de la Pala 10. En base a esto, se recomienda revisar el sistema de sujeción de la transmisión al revolving frame (sistema locking assembly). Además se recomienda revisar toda posibilidad de montaje inadecuado (o defectuoso) y/o soltura en el montaje de la transmisión. En general, se debe respetar y controlar los procedimientos de montaje que recomiendan los fabricantes. Se debe tener presente que las máquinas modernas, para ser competitivas en el mercado, son calculadas con factores de seguridad cada vez menores. Por esta razón, los efectos de las sobrecargas producidos por los errores de montaje son mayores.

- Actualizar el sistema de monitoreo utilizando de forma integrada diferentes técnicas (vibraciones, aceites, variables eléctricas). Es conveniente vigilar formas inadecuadas de operar la unidad (según los fabricantes es la principal razón de la baja disponibilidad de las palas). Esto contempla golpes contra el cerro, movimientos combinados de las transmisiones (no permitidos), impactos del balde sobre el suelo para desprender material que no se ha descargado.

5.3 CONCLUSIONES ACERCA DEL PROYECTO

En este trabajo de título se ha visto todo el desarrollo del proyecto comenzando por la definición y objetivos que debía cumplir el nuevo sistema hasta la implementación de éste y la obtención de los primeros resultados para poder hacer una evaluación pre eliminar.

En cuanto a los objetivos, se puede decir que se logró construir un proyecto sólido que lograra implementar un sistema exitoso de monitoreo de condiciones en los próximos tres años, ya que al término del periodo de memoria se comenzó con la etapa inicial del proyecto destinada a realizar los primeros análisis por el personal especialista de CADETECH y así de a poco crear una efectiva estrategia de mantenimiento predictivo, lo que se espera se refleje en el aumento de disponibilidad de la flota y así se puedan replicar los casos de éxitos que posee la empresa en otras faenas.

Por otro lado, la tan mala calidad de los antiguos reportes que entregaba personal de Bucyrus conlleva a que todos los esfuerzos económicos y de ingeniería del área apunten a mejorar el monitoreo de vibraciones, razón por la cual no se le dio prioridad al proyecto de análisis de corrientes que orientaba a apoyar el análisis de vibraciones en problemas relacionados con los motores eléctricos, aunque el personal eléctrico del área de mantención encontró de vital importancia la compra de un Fluke 435 para realizar pruebas de calidad eléctrica. De cualquier manera el proyecto eléctrico quedó en manos del Jefe del área para una futura implementación en conjunto con el software SiamFlex.

Se lamenta la poca cantidad de empresas que prestan este servicio de monitoreo pensando en que Chile es un país enfocado principalmente a la minería y la poca seriedad con que llevo a cabo SKF sus propuestas, tardando mucho tiempo en generar las propuestas y mostrando poco interés a pesar de que económicamente la adjudicación del proyecto era un buen contrato. Por el contrario, CADETECH siempre se mostró dispuesta responder cualquier duda y en trabajar conjuntamente en el sistema a implementar, por ejemplo apoyando también la implementación de un monitoreo de corrientes idea que venían desarrollando como empresa hace ya algún tiempo.

Para concluir, el proyecto fue bien recibido por la Gerencia de Mina ya que la calidad de informes presentados por CADETECH son infinitamente mejores a los entregados por personal Bucyrus y se espera una buena relación de trabajo conjunto en lo que monitoreo de condiciones.

REFERENCIAS

- (1) “Catastro de equipamiento minero 2009-2011”, Grupo Editorial Editec, 2011.
- (2) “495HR pala para minería. Manual de mantención y operación”, Bucyrus International, 2003.
- (3) Informes del Área de Monitoreo de Condiciones, Collahuasi, 2011-2012
- (4) ”Análisis de Vibraciones de Maquinas Categoría II, ISO 18436-2”, Ing. Pedro Saavedra González, Universidad de Concepción, 2012.
- (5) “Mantenimiento predictivo en palas electromecánicas de la minería”, Ing. Pedro Saavedra González, Universidad de Concepción, 2001.
- (6) “Accurate assessment of computed order tracking”, Ing. Pedro Saavedra González, Universidad de Concepción, 2004.
- (7) “Tutorial de Vibraciones para mantenimiento Mecánico”, A-MAQ S.A., [Online], www.a-maq.com
- (8) “Análisis de Vibraciones Nivel 2”, Ademinsa., [Online], www.ademinsa.com
- (9) “The Vibration Analysis handbook”, James Tylor, Primera Edición.
- (10) “Apuntes del curso Vibraciones Mecánicas”, Gonzalo Daza Hernández, Universidad Técnica Federico Santa María, 2007.
- (11) “Introducción al Análisis de Vibraciones”, Glen White, AzimaDLI, 2010.
- (12) “Implementación de un Sistema de Diagnostico de Fallas en máquinas eléctricas en base a mediciones de señales eléctrica”, Guerrero Granja R., Campos Delgado D.U., Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- (13) “Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis”, Neelam Mehala, Ratna Dahiya, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Volumen 2, Primera Edición, 2007.

- (14) “Motor Current Signature Analysis and Interpretation”, Howard W Penrose, Ph.D., ALL-TEST Pro.
- (15) National Instruments, [Online], www.ni.com
- (16) SKF Chile, [Online], http://www.skf.com/portal/skf_cl/home?lang=es
- (17) CADETECH, [Online], <http://www.cadetech.cl/>
- (18) “Apuntes Máquinas de Inducción Trifásicas”, Nelson Morales, Universidad de Chile
- (19) “Confiabilidad de Motores Eléctricos: análisis armónico, transformada Hilbert y aislamientos eléctricos”, Alfredo Muñoz Ramos, Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, Universidad de Chile, 2003.

ANEXO 1

CODIGO PUNTOS DE MEDICION

Punto de medición	Descripción
1H	Motor, lado acoplamiento, horizontal
1V	Motor, lado acoplamiento, vertical
2HV	Entrada transmisión, inclinado
3H	Eje intermedio transmisión, horizontal
3V	Eje intermedio transmisión, vertical
4H	Planetario, horizontal
4V	Planetario, vertical
5V	Eje piñón, vertical
6H	Piñón planetario, horizontal
6V	Piñón planetario, vertical
7H	Piñón, horizontal
7V	Piñón, vertical
8H	Corona, horizontal
8V	Corona, vertical
9H	Tambor, horizontal
9V	Tambor, vertical
E1	Elefante 1
E2	Elefante 2
P1	Pata lado libre motor
P2	Pata trasera tambor
P3	Pata delantera tambor
P4	Pata lado acoplamiento motor
P5	Pata trasera locking assembly
P6	Pata delantera locking assembly
P7	Entrada a transmisión
P8	Pata trasera corona
P9	Pata delantera corona

Tabla 14: Códigos Puntos de Medición

PUNTOS DE MEDICIÓN SOBRE LA CARCASA DE TRANSMISIÓN Y LA PROTECCIÓN DE LA CORONA

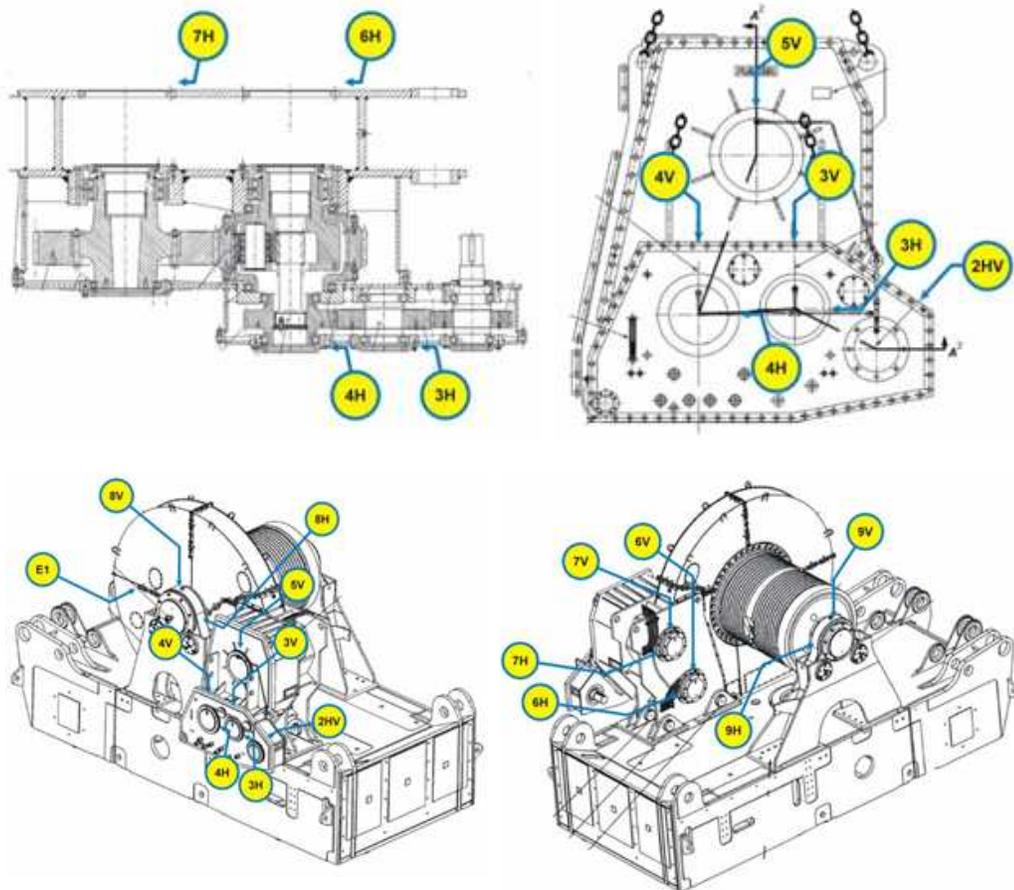


Ilustración 86: Puntos de medición carcasa

PUNTOS DE MEDICIÓN EN LA PLATAFORMA SOBRE LA QUE SE APOYA LA TRANSMISIÓN

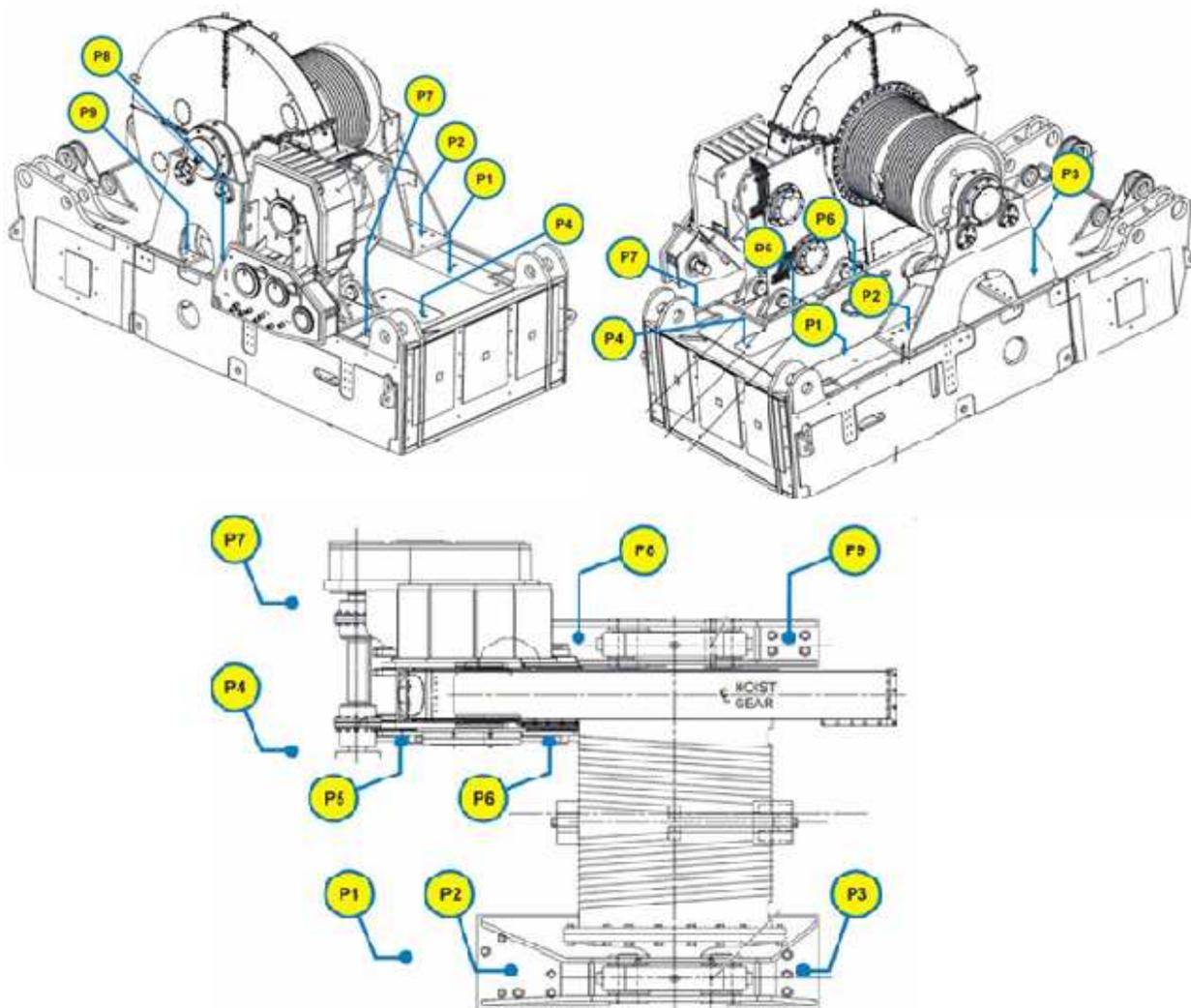


Ilustración 87: Puntos de medición plataforma

ANEXO 2

FRECUENCIAS DE ENGRANE

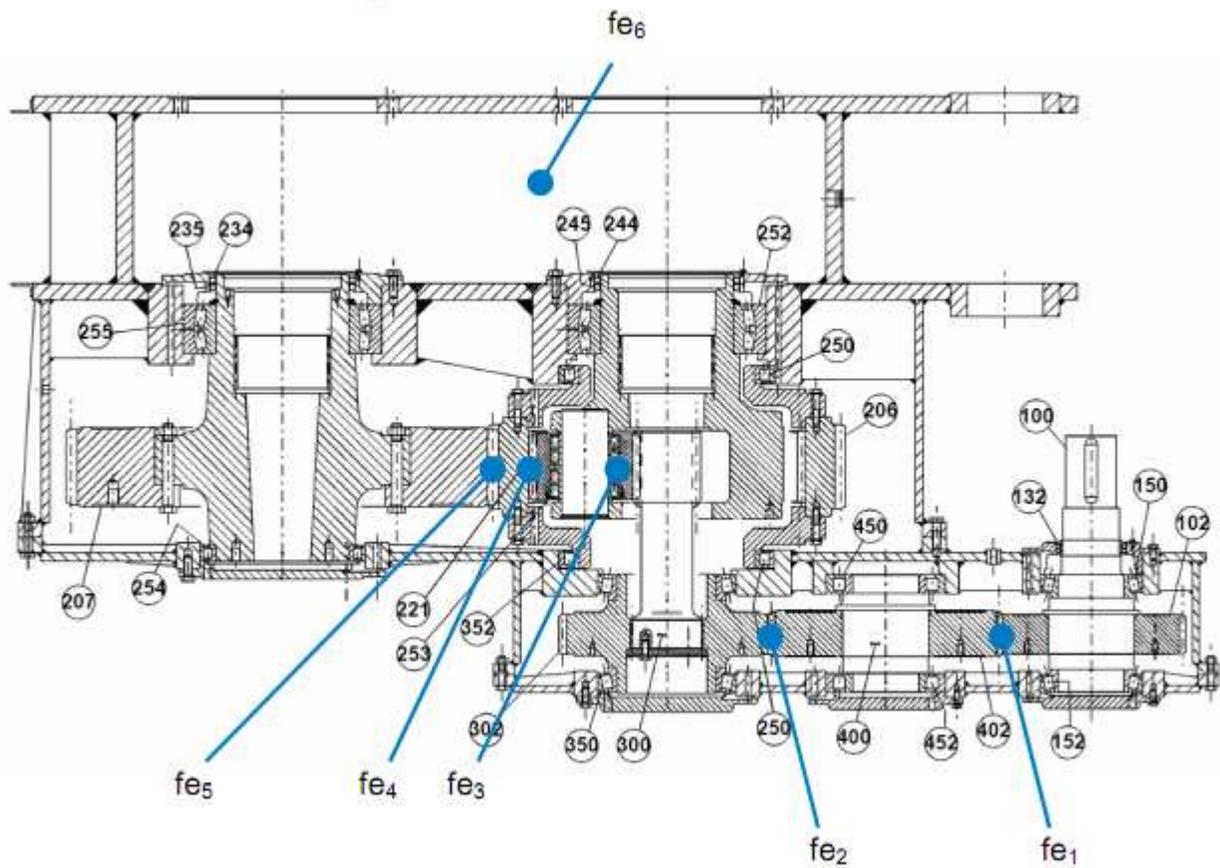


Ilustración 88: Ubicación de Engranes

Frecuencias de engrane	
fe ₁	59,0000 ord
fe ₂	59,0000 ord
fe ₃	13,4452 ord
fe ₄	13,4452 ord
fe ₅	6,4472 ord
fe ₆	1,3039 ord

Tabla 15: Valor de Frecuencias de Engrane