

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR-JOSÉ MIGUEL CARRERA

**PROPUESTA DE MONITOREO DE VARIABLES VIBRATORIAS EN
ESTACIÓN DE BOMBAS VERTICALES NO SUMERGIBLES.**

Trabajo de titulación para optar al título de
Ingeniero en mantenimiento Industrial.

Alumno:

Bastián Enrique Rebolledo Morales

Profesor guía:

Mg.Ing. Ricardo Ciudad Cartagena

RESUMEN

El presente documento aborda un tema relevante para la industria minera, específicamente en lo que se refiere al control de variables vibratorias en bombas verticales críticas. El objetivo general del documento es proponer una metodología basada en normas de control de variables vibratorias que permita mejorar la eficiencia del mantenimiento y reducir los costos a largo plazo. Para lograr esto, se desarrollan tres capítulos que profundizan en el contexto operacional, la metodología de control y el análisis de costos.

En el primer capítulo, se establece el contexto operacional de la faena minera y se analiza la criticidad de los equipos utilizando el método de AHP (Analytic Hierarchy Process). Este método es una herramienta de decisión multicriterio que permite la evaluación de alternativas en base a criterios de importancia relativa. Se describe también el comportamiento vibratorio específico de las bombas verticales y se presenta un modelo de espectro patrón. Este modelo permite establecer una referencia para las mediciones de vibración, lo que facilita la identificación de desviaciones en la condición de las bombas.

En el segundo capítulo, se presenta la metodología de control de variables vibratorias propuesta. Esta metodología se divide en cinco etapas: definición de la condición inicial, control y evaluación de tendencias de magnitudes, generación de gráficas, definición de valores límites de alarma y análisis de espectros vibratorios. En la etapa de definición de la condición inicial se establece un punto de partida para el monitoreo y control de las variables vibratorias, lo que permite identificar posibles desviaciones en el comportamiento de las bombas. En la etapa de control y evaluación de tendencias de magnitudes se establecen los valores límites de referencia para cada magnitud medida y se monitorean los valores actuales para detectar desviaciones. La generación de gráficas permite visualizar la evolución de las variables vibratorias y establecer tendencias. La definición de valores límites de alarma permite establecer un umbral para la activación de alarmas y el análisis de espectros vibratorios permite identificar las causas de las desviaciones en la condición de las bombas.

En el tercer capítulo, se realiza un análisis de costos del mantenimiento actual y se propone una evaluación de inversión para implementar la metodología de control de variables vibratorias. Se analizan los costos preventivos y correctivos del mantenimiento actual, los costos históricos de mantenimiento y se estiman los costos de mantenimiento a 2025 con el mantenimiento actual. Se presentan también los costos de implementación de sistemas y sensores para el control de variables vibratorias. Se realiza una proyección de costos de

mantenimiento a largo plazo y se evalúa la inversión en la implementación de la metodología propuesta.

ÍNDICE.

RESUMEN.....1

INTRODUCCIÓN 1

1.1. OBJETIVO GENERAL:.....3

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: 3

I. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y ESTACIÓN CRÍTICA. 1

1.1. CONTEXTO OPERACIONAL 2

1.1.1. Gerencia relave y agua 3

1.2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES 6

1.2.1. Tecnología a utilizada 7

1.3. CRITICIDAD DE EQUIPOS.....8

1.3.1. AHP 9

1.3.1.1. Definición de criterios 9

1.3.2. Conclusión de estaciones críticas 11

1.4. DISPONIBILIDAD DE ESTACIÓN CRÍTICA.....13

1.5. CONDICIÓN BASE DE BOMBAS ESTACIÓN CRÍTICA.....14

1.5.1. Modelo de bomba Vertical critico en faena. 14

1.5.2. Comportamientos vibratorios específicos en bombas verticales 15

1.5.3. Espectro patrón 17

1.5.3.1. Resumen de magnitudes y diagnóstico 21

II. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE CONTROL DE VARIABLES VIBRATORIAS 23

2.1. CONTROL DE VIBRACIONES 24

2.1.1. Norma ISO 10816-7 24

2.2. DEFINICIÓN DE CONDICIÓN INICIAL 25

2.2.1. Zonas de evaluación 26

2.3. VALORES LÍMITES DE ALARMA.....27

2.3.1. Configuración de ALARMAS.....28

2.3.2. Configuración de TRIPS (detención) 28

2.4. CONTROL Y EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE MAGNITUDES 29

2.4.1. Valores vibratorios.....30

2.4.1.1. Manejo de base de datos.....31

2.4.2. Generación de gráficas 32

2.5. ANÁLISIS DE ESPECTROS VIBRATORIOS 33

2.6. EJEMPLO DE ESPECTROS VIBRATORIOS EN BOMBAS VERTICALES 35

2.7.	PROPUESTAS DE MEJORA.....	38
III.	CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE PROPUESTA.	42
3.2.	COSTOS DE MANTENIMIENTO ACTUAL	43
3.2.1.	Costos preventivos	43
3.2.2.	Costos correctivos	44
3.2.3.	Costos históricos de mantenimiento	44
3.2.4.	Costos estimados a 2025 con mantenimiento actual.....	45
3.3.	COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	46
3.3.1.	Costos de implementación de sistemas y sensores.....	46
3.4.	PROYECCIÓN DE COSTOS DE MANTENCIÓN	48
3.5.	EVALUACIÓN DE INVERSIÓN.....	50
3.6.	FLUJO DE CAJA DE PROYECCIONES	51
3.6.1.	Valor presente	51
3.6.2.	Valor futuro	51
3.6.3.	Tasa de descuento e interés	51
3.6.4.	VAN	52
3.6.5.	IVAN	52
3.6.6.	PRI	52
3.6.7.	TIR	53
3.6.8.	Flujos de escenarios.....	53
3.7.	ESTIMACIONES EN MEJORA DE DISPONIBILIDAD SEGÚN ESCENARIOS	54
3.8.	CONCLUSIÓN.	57
3.9.	Bibliografía	59

Figuras

Figura 1-1: Diagrama operacional de recursos hídricos 3

Figura 1-2: Diagrama de recuperación de agua arenas finas 4

Figura 1-3: Fotografía general del tranque de relave 4

Figura 1-4: Diagrama de recuperación de agua fresca.....5

Figura 1-5: Medición de vibraciones 7

Figura 1-6: Analizador de vibraciones Adash.....8

Figura 1-7: Plano de sentina y psicina 12

Figura 1-8: Bomba vertical 15

Figura 1-9: Largo de bombas verticales.....16

Figura 1-10: Sentinas 16

Figura 1-11: Ejes de medición 18

Figura 1-12: Medición axil - Buje bomba.....18

Figura 1-13: Medición vertical – Buje Bomba 19

Figura 1-14: Medición horizontal – Buje Bomba 19

Figura 1-15: Medición axil – Rodamiento lado machón motor.....20

Figura 1-16: Medición vertical – Rodamiento lado machón motor.....20

Figura 1-17: Medición Horizontal - Rodamiento lado machón motor 21

Figura 2-1: extracto de base de datos.....30

Figura 2-2: Puntos de medición de bombas verticales.....31

Figura 2-3: Pantalla de registro de datos.....32

Figura 2-4: Pantalla gráficas 33

Figura 2-5: Desgaste producidos en centradores 34

Figura 2-6: Espectro de bomba vertical 35

Figura 2-7: Impulsores con roturas 35

Figura 2-8: Espectro de bomba vertical 36

Figura 2-9: Espectro de bomba vertical 36

Figura 2-10: Espectro de bomba vertical 37

Figura 2-11: Impulsores desgastado 37

Figura 2-12: Propuesta de mejora 41

Figura 3-1: Panel y Sensor sistema de monitoreo Synertrex 48

Tablas

Tabla 1-1: Criterios de evaluación AHP 10

Tabla 1-2: Elaboración de AHP 10

Tabla 1-3: Resultados análisis AHP.....11

Tabla 1-4: Prueba de consistencia.....11

Tabla 1-5: Cálculo de disponibilidad 13

Tabla 1-6: Bombas Peerless en faena.....14

Tabla 1-7: Magnitudes de vibraciones 21

Tabla 2-1: Límites de zona para vibración.....26

Tabla 2-2: Criterios adicionales para límites de vibración.....27

Tabla 3-1: Costos de componentes preventivos.....43

Tabla 3-2: Costos de componentes correctivos.....44

Tabla 3-3: Costos históricos de reparaciones.....45

Tabla 3-4: cantidad estimada de mantenimientos 46

Tabla 3-5: Costos proyectados de mantenimiento a 2025 46

Tabla 3-6: Costos de Sistema de monitoreo Weir minerals.....47

Tabla 3-7: Costos de Sistema de monitoreo SKF 47

Tabla 3-8: Tabla general de posibles escenarios.....50

Tabla 3-9: Evaluación de inversión.....50

Tabla 3-10: Flujos de cajas.....53

Tabla 3-11 Disponibilidad de bombas por escenarios 54

Tabla 3-12 Formulas de disponibilidad de bombas por escenarios 55

Tabla 3-13 Formulas de disponibilidad de bombas por escenarios 56

Gráficos

Gráfico 2-1: Gráficos históricos de bombas 29

Gráfico 2-2: Comportamiento de equipo 39

Gráfico 3-1: Número de mantenciones por escenarios 49

Gráfico 3-2: Disponibilidades según escenarios 55

INTRODUCCIÓN

La industria minera requiere un gran número de activos para su operación, uno de los más importantes son las bombas que trasladan el agua utilizada en los distintos procesos, por lo que se requiere que estos equipos mantengan una buena disponibilidad y funcionamiento, en este caso se realizará un estudio de una estación de bombeo de una minera privada de nombre reservado la cual requiere mejorar su estrategia de mantenimiento respecto a sus estaciones de bombeo.

Actualmente, el mantenimiento en bombas verticales se realiza de manera preventiva basado en indicadores de funcionamiento históricos y se programan tiempos de operación para los equipos. Sin embargo, en algunos casos, este mantenimiento llega tarde para la reparación preventiva, lo que puede resultar en una falla total del equipo y afectar la disponibilidad y planificación del mantenimiento. En otros casos, los equipos se envían a mantención cuando no era necesario mecánicamente, lo que aumenta los costos de mantenimiento. Además, la falta de equipos back up para cambios inmediatos significa que la posición de la bomba queda inoperativa hasta que vuelve de mantenimiento, lo que condiciona la operación.

La gerencia de agua y relave cuenta con distintas estaciones y cada una debe evaluarse de manera individual, para el caso de estudio la estación crítica cuenta con 4 posiciones de bombas y 4 conjuntos de motor bomba por lo que mantiene equipos de repuesto, esto es debido a la configuración de diseño de la estación la cual indica que solo 3 bombas operan y una queda stand by. La estación cuenta con una sentina que es alimentada por decantación de canchas de relaves, el flujo no es uniforme y en la actualidad genera que los equipos trabajen de forma periódica y fuera de lo indicado por diseño, cuando la sentina se encuentra a cierto nivel opera una bomba, si la sentina aumenta opera una segunda, después de esto el nivel de la sentina comienza a bajar deteniendo un equipo, logrando solamente la operación de dos bombas, no tres como indica el diseño. Esto genera que la operación de los equipos no sea de un 100% desde que es montado por lo que se consideran 2 tiempos de buen funcionamiento, el primero cuanta las horas de operación del equipo y el otro cuenta las horas totales en las que el equipo estuvo disponible desde su montaje hasta su retiro, la diferencia de estos dos tiempos de llamará factor de ocupación, la operación va rotando los equipos disponibles para mantenerlos en funcionamiento constante y evitar fallas por trabamientos, una vez los equipos son retirados de sus posiciones para ser enviados a mantenimiento se obtiene un MTTR de 68,4 días lo que genera que la gran mayoría del tiempo la estación este con un equipo fuera o desmontado, teniendo disponible solo 3 equipos. Por diseño la operación debería

lograr mantenerse, pero ocurre que fallan otros equipos por motivos mecánicos y/o operacionales que no están cubiertos por el mantenimiento preventivo basado en tiempo, teniendo incluso la condición de no contar con ninguna bomba para la sentina por una incorrecta planificación de mantenimiento.

El cálculo de disponibilidad entrega que la estación se encuentra en un 82,3%, este cálculo se desarrolla más adelante y en resumen debido a la configuración del sistema se calcula como sistema fraccionado, considerando las 4 bombas, cabe destacar que esta estación debería tener disponibilidad del 100% para tener problemas ambientales o de requerimiento hídrico.

En la operación de agua, hay muchas variables en juego, como la concentración de partículas, tamaño de partículas, acidez del agua, turbulencia, temperatura, productos químicos que se agreguen al fluido, entre otros, por lo que no se puede depender solo de una variable lineal como lo es el tiempo en un proceso con tantas interferencias.

La variable vibratoria es una de las más representativas en lo que a la condición mecánica de un equipo rotatorio se refiere, por lo que se propone como solución utilizar la recolección de datos y el análisis de fallas presentes y pasadas para generar una nueva componente en la toma de decisiones para programar las futuras mantenciones. Esto permite mejorar la disponibilidad de los equipos y disminuir los costos de mantención. La operación y funcionamiento de los equipos entregará más información que alimentará la base de datos e historial de espectros, permitiendo entregar valores cada vez más confiables del estado de la bomba vertical.

Para cumplir con la solución se debe identificar porque es la estación más crítica del sistema completo, que variables son las que llevan a esto, recolectar información operacional e identificar la condición actual en busca de mejoras, todo esto debe ocuparse en la generación de una metodología aplicable que pueda ser manejada y controlada en terreno con ayuda de sensores y sistemas de gestión. Independiente de que se puedan detectar fallas en los equipos se debe evaluar si el sistema y el aporte de esta metodología en el plan de mantenimiento es relevante y rentable de realizar.

1.1. OBJETIVO GENERAL:

Objetivo General: Establecer metodología de análisis de vibraciones en bombas verticales de estación crítica para indicar el estado funcional, optimizando el tiempo de servicio de los equipos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1°Objetivo: Identificar estación crítica y condición actual de los equipos, con datos de minera e información técnica, con la finalidad de establecer una base de referencia.

2°Objetivo: Definir metodología de control de variables vibratorias con ayuda de norma vibratoria ISO 10816-7, planilla de seguimiento y análisis espectral, la cual obtenga un historial que permita la toma de decisiones.

3° Objetivo: Evaluar impacto económico y operacional de propuesta con estimaciones futuras, para lograr definir la viabilidad de implementación.

I. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y ESTACIÓN CRÍTICA.

1.1.CONTEXTO OPERACIONAL

La industria minera requiere gran cantidad de agua para su operación es por esto que los procesos de recolección y recuperación de agua son fundamentales y no podrían existir sin la utilización de bombas de impulsión, siendo equipos fundamentales y transversales en el área minera. Se utilizarán los valores y procesos de una minera y de una empresa reparadora de bombas las cuales serán confidenciales dentro del desarrollo del documento. Por lo general los datos de la minería son reservados. En el año 2021 la minería en su conjunto general tanto privada como estatal ocupaba en promedio entre el 3% y 4% de consumo total de agua fresca de país, esto es debido a que entre el 72% y 82% se recupera, volviendo al proceso de recuperación de agua fundamental para cualquier minera del país. En el caso de la minera evaluada se utiliza tanto agua fresca como agua recuperada.

Agua fresca: proveniente de la recaudación de aguas subterráneas mediante pozos profundos con bombas verticales, esta agua es tomada desde pozos fuera de faena y por medio de estaciones de bombeo se impulsa hasta los 3700 metros de altura aproximadamente donde es utilizada en el proceso.

Agua recuperada: en el caso del agua recuperada los métodos de recolección son variados, se utilizan bombas sumergibles de pozos profundos en los alrededores de fuentes de contención de relaves, recolectando filtraciones de las mismas; se utilizan bombas verticales en balsas en piscinas de contención, de deposición de relaves y de emergencias; se recupera el agua de los espesadores de relave y de concentrado los cuales caen en piscinas y posteriormente son bombeados nuevamente al proceso mediante bombas verticales ubicadas en sentinas que rodean las piscinas anteriormente mencionadas.

Los equipos evaluados por la empresa reparadora de bombas verticales se encuentran en la imagen 1-1 la cual es un diagrama simplificado en el que se destaca en círculos rojos las estaciones que cuentan con estos activos.

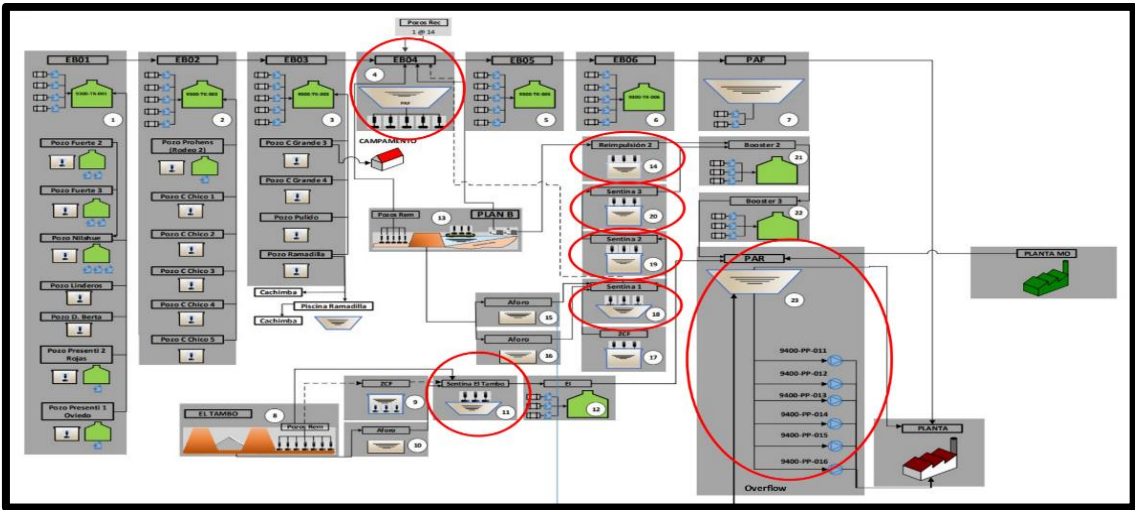


Figura 1-1: Diagrama operacional de recursos hídricos

Información proporcionada por compañía

1.1.1. Gerencia relave y agua

La gerencia de relave y aguas se compone del área de operaciones y el área de mantención, cumplen el fin de mantener el recurso hídrico necesario para una operación continua de procesado de material, dentro de sus principales activos mecánicos están las bombas de impulsión de agua, estas se clasifican según su estructura (vertical o horizontal) y según el tipo de agua que impulsan dentro del proceso, la que puede ser, agua recuperada del proceso de o agua fresca proveniente de napas no contaminadas.

Actualmente los valores en la minera tienen una relación Agua fresca/ agua recuperada= 0,32, en algunos casos la operación se ha mantenido completamente con agua recuperada sin condicionar la operación, siendo una de las mineras con mayor recuperación, esto es debido a su doble proceso de tratado de relaves, separando las arenas entre finas y gruesas utilizando procesos distintos de recuperación para cada una.

La separación de arenas es realizada por hidrociclones, la arena fina, esta pasa a canchas de deposición de arenas y por decantamiento el agua se drena y llega a una sentina la cual vuelve a impulsar al sistema, se puede observar el proceso en la figura 1-2. El proceso de recuperación de arenas finas alcanza por diseño hasta los 906 m3/h.

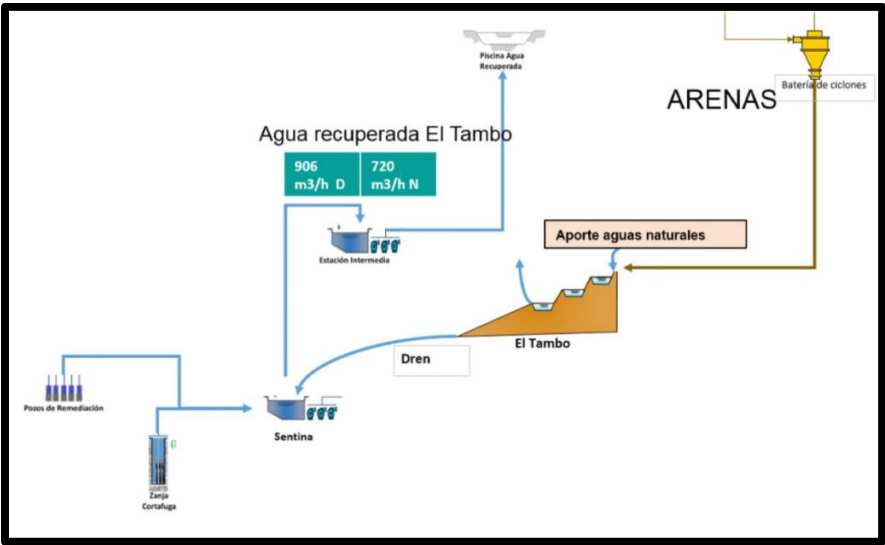


Figura 1-2: Diagrama de recuperación de agua arenas finas

Información proporcionada por compañía

Las arenas gruesas pasan a espesadores donde se separa el agua de la arena, el agua pasa a la piscina de agua recuperada y la arena al tranque de relaves, en el tranque la arena decanta y el agua se acopia en la superficie siendo captada por bombas de verticales en balsas. Este proceso alcanza hasta 1200 m3/h, se puede observar la figura 1-3 una fotografía general del tranque de relave, con las estaciones asociadas.



Figura 1-3: Fotografía general del tranque de relave

Información proporcionada por compañía

El agua fresca utilizada en la minera es recolectada por pozos que se encuentran al exterior de la faena logrando una capacidad máxima de impulsión por diseño de 565 L/s, lo cual no siempre es utilizada al 100%, todo depende de la operación, Ver figura 1-4.

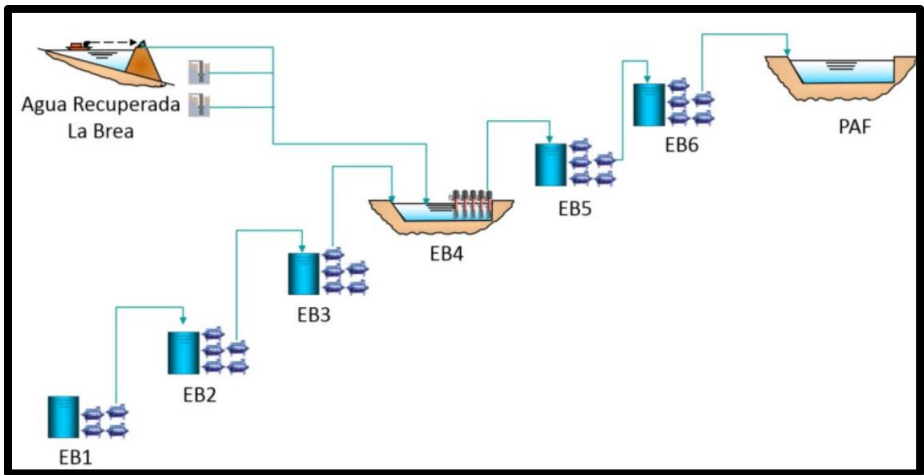


Figura 1-4: Diagrama de recuperación de agua fresca

Información proporcionada por compañía

El mantenimiento realizado en las estaciones de bombeo en general hasta finales del año 2020 se basaron en una metodología correctiva, si bien hay estaciones que tienen equipos completos de repuesto para cambios inmediatos no es el caso de todas las estaciones y cuando un equipo fallaba enviaba a alguna empresa contratista sin tiempos estimados de reparación y sin estimar los repuestos que se utilizarían en el proceso, esto generaba el inconveniente que no se podía predecir disponibilidad de los equipos y estaciones.

Todas de las estaciones de bombas verticales están diseñadas sobre sentinas de concreto, con bombas en sistema paralelo con una bomba extra al requerimiento de operación, esto quiere decir que si la estación necesita tener operando 2 equipos para lograr los flujos necesarios se cuenta con un tercero en caso de falla.

Dependiendo de la criticidad de la estación, algunas bombas cuentan con un segundo equipo back up a piso para realizar cambios de manera inmediata una vez se presente una falla, aumentando la disponibilidad de equipos.

A comienzos del año 2021 se incorporaron los contratos de mantenimiento de bombas diferenciados en la clasificación de estas, por un lado, una empresa contratista se adjudicó el mantenimiento de las bombas horizontales y otra empresa se adjudicó el mantenimiento de las bombas verticales tipo turbina.

La finalidad de ambos contratos es pasar desde un mantenimiento correctivo a un mantenimiento predictivo y por condición, para esto, se está generando un historial con

las fallas y los tiempos de operación y mantención para que a futuro se logre tener una planificación preventiva sólida con argumentos históricos de la operación específica de los equipos.

Debido al método de mantenimiento anteriormente usado y al no contar con los suficientes datos históricos, gran parte del mantenimiento programado a sido basado en las condiciones mecánicas que los equipos presentan, evaluando variables como flujo, corriente y vibraciones.

Una mala planificación en el mantenimiento de los equipos puede generar incluso detenciones completas de la planta de molienda, por lo que es fundamental lograr mejorar el método de mantenimiento y entregar una alta disponibilidad de los equipos de bombeo al proceso minero.

Debido a la metodología de mantenimiento utilizada anteriormente la información de falla de equipos es escasa y no se logra identificar tendencias ni conocer qué modo de falla es el más común por lo que parte de este trabajo es generar dicha información faltante.

1.2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

En la minería, el agua utilizada es un recurso crítico, y el mantenimiento de las estaciones de bombeo que permiten su suministro es de vital importancia. En este sentido, el mantenimiento basado en la condición de los equipos, especialmente de las bombas verticales utilizadas para el suministro de agua fresca y recuperada, se ha vuelto cada vez más relevante, incorporando variables mecánicas.

Una de las técnicas de mantenimiento preventivo más relevante en los equipos mecánicos rotatorios es el análisis de vibraciones, siendo la técnica más popular según la empresa Festo. La vibración en los equipos puede generarse por desgaste prematuro, desbalanceo, desalineamiento, entre otras fallas, y la no detección conlleva a una disminución en la disponibilidad de los equipos y, por ende, un impacto negativo en la producción.

La vibración se puede describir como movimiento repetitivo en el tiempo. En equipos mecánicos esta se presenta alrededor de una posición en reposo. Por lo general en terreno se toma la medición en carcasa de equipo y pedestal de este, según norma 10816.

El movimiento repetitivo se grafica a través del tiempo formando formas sinusoidales de las cuales podemos detectar frecuencias, valor pico, valores pico a pico, etc. Por lo general, estas frecuencias se miden en Hertz. En una medición real se presentan distintas frecuencias de movimiento al mismo momento por lo que la onda sinusoidal deja de ser simple y fácil de identificar y se requieren mayores análisis.

Del movimiento repetitivo se puede desprender distintas variables estas son desplazamiento, velocidad y aceleración, el comportamiento de estas tres variables y otras involucradas en la operación, permiten identificar los modos de falla los que definen las bases de un mantenimiento basado en condición de equipos mecánicos rotatorios.

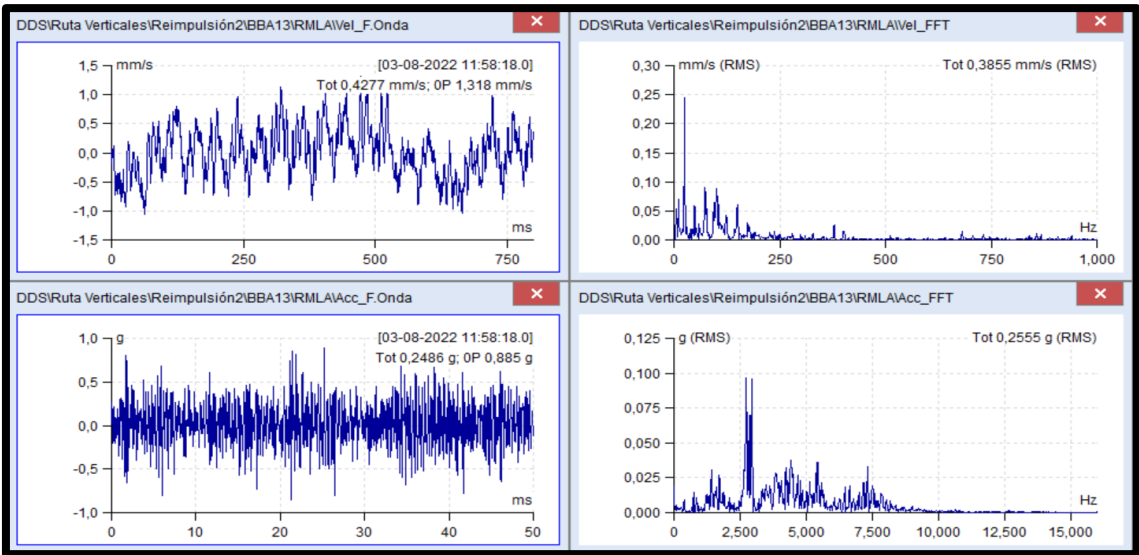


Figura 1-5: Medición de vibraciones

Recolección propia en software ADASH

1.2.1. Tecnología a utilizada

Para medir vibraciones mecánicas se utiliza un acelerómetro el cual es un transductor o sensor electrónico que mide el movimiento repetitivo y lo transforma en una señal eléctrica proporcional a la magnitud, para seleccionar el transductor y el equipo auxiliar para la toma de mediciones vibratorias adecuado a las maquinas que se busca medir se recomienda utilizar las normas IEC 181 e IEC 222.

Una correcta medición depende principalmente del acelerómetro, su sensibilidad, rango de frecuencia y tipo, que va a depender de los equipos que se busca medir y las magnitudes que estos presenten. Además, hay consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de realizar una medición como lo puede ser la velocidad de funcionamiento, carga del equipo, entre otras esto va a depender de cada equipo y hay normas que lo estipulan, en general la mayoría de los equipos son abarcados por la norma 10816.

Una vez obtenida la medición por parte del acelerómetro se lleva al analizador de vibraciones el cual grafica estas señales, permite principalmente realizar una transformada de Fourier y realizar configuraciones como agregar filtros para eliminar las vibraciones que para el analista no son significativas, definir ventanas de medición, configurar rutas, llevar historial de los equipos, etc.



Figura 1-6: Analizador de vibraciones Adash

www.adash.com

1.3. CRITICIDAD DE EQUIPOS

Actualmente el contrato de bombas verticales tiene un acotado historial de equipos, el contrato tiene fecha de inicio en el mes de mayo del 2021, desde esa fecha se han recolectado datos de funcionamiento y fallas, es por esto que el personal de la compañía aún no toma como valores aceptables los cálculos de confiabilidad de equipos debido a que varían considerablemente con todos los eventos que ocurren por la poca densidad de datos.

Para obtener de mejor manera catálogos de fallas y acertar en los diagnósticos, el análisis se realizará solo en una estación, puntualmente en la estación más crítica de la gerencia y para lograr identificarla sin tener valores numéricos comparativos útiles se incorporarán variables cualitativas comprables utilizando el método AHP (Proceso analítico jerárquico).

1.3.1. AHP

El sistema AHP (Proceso analítico jerárquico), busca tomar una decisión objetiva aplicando criterios a todas las alternativas a evaluar, este trabajo se debe realizar con un equipo multidisciplinario que entregue distintos puntos de vista a la solución. Este método fue creado por Thomas L. Saaty.

Para la realización del sistema el equipo se conformó por personal mecánico, jefes de turnos, operación y control de repuestos y reparables.

1.3.1.1. Definición de criterios

El comité Selecciono y evaluó los criterios. A cada estación se le entregará una posición en un ranking de 1 a 8 siendo la posición 1 la mejor evaluada por el criterio y la 8 la más afectada por el criterio, la posición en el ranking será el puntaje que se entrega a las tablas para análisis.

Riesgos medio ambientales

Se evalúa bajo experiencia de personal mandante e información técnica de sistema hídrico que estaciones tienen más riegos de generar una contaminación ambiental, ordenando de la más riesgosa a la menos riesgosa.

Costos de reparación

Se ordena desde la estación en la cual el promedio de costos de reparación de sus equipos es más elevado hasta la estación donde las reparaciones son menos costosas.

Cantidad de fallas por año

Se orden las estaciones desde la que más fallas presenta por posición hasta la que menos fallas presenta.

Disponibilidad del total de equipos

Este criterio entrega una nota dependiendo de la disponibilidad promedio de las estaciones, calcula los tiempos en que todas las posiciones de bombas de la estación estuvieron disponibles para operación.

El orden jerárquico obtenido que evalúa las estaciones según los criterios es el siguiente:

Alternativas	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
	Riesgos medio ambientales	Costos de reparación	Cantidad de fallas	Disponibilidad del total de equipos
El Tambo	8	3	7	8
PAR	7	6	8	2
Plan B	6	2	5	5
Reimpulsión 2	5	5	3	3
Eb04	4	7	2	1
Sentina 3	3	1	1	4
Sentina 2	2	4	6	6
Sentina 1	1	8	4	7

Tabla 1-1: Criterios de evaluación AHP

Elaboración por equipo de evaluación AHP

Una vez evaluadas las estaciones según los distintos criterios se realiza una comparación entre criterios para definir cuál es más importante que otro según el comité, de esta manera se da distintos pesos a cada criterio según su relevancia en el análisis, cabe destacar que esta evaluación es totalmente subjetiva y se busca llegar a un consenso entre el comité evaluador dependiendo se sus perspectivas.

	Riesgos medio ambientales	Costos de reparación	Cantidad de fallas	Disponibilidad del total de equipos	Media geometrica	w Peso
Riesgos medio ambientales	1,00	3,00	2,00	2,00	1,817120593	44%
Costos de reparación	0,33	1,00	1,00	1,00	0,693361274	17%
Cantidad de fallas	0,50	1,00	1,00	1,00	0,793700526	19%
Disponibilidad del total de equipos	0,50	1,00	1,00	1,00	0,793700526	19%
Total					4,097882919	

	C1/SUM(C1)	C2/SUM(C2)	C3/SUM(C3)	C4/SUM(C4)
El Tambo	22%	8%	19%	22%
PAR	19%	17%	22%	6%
Plan B	17%	6%	14%	14%
Reimpulsión 2	14%	14%	8%	8%
Eb04	11%	19%	6%	3%
Sentina 3	8%	3%	3%	11%
Sentina 2	6%	11%	17%	17%
Sentina 1	3%	22%	11%	19%

Tabla 1-2: Elaboración de AHP

Elaboración por equipo de evaluación AHP

Los resultados obtenidos son los siguientes:

	Riesgos medio ambientales	Costos de reparación	Cantidad de fallas	Disponibilidad del total de equipos	
	0,443429114	0,169199874	0,193685506	0,193685506	
El Tambo	10%	1%	4%	4%	19,3%
PAR	9%	3%	4%	1%	16,8%
Plan B	7%	1%	3%	3%	13,7%
Reimpulsión 2	6%	2%	2%	2%	11,7%
Eb04	5%	3%	1%	1%	9,8%
Sentina 3	4%	0%	1%	2%	6,9%
Sentina 2	2%	2%	3%	3%	10,8%
Sentina 1	1%	4%	2%	4%	10,9%

Tabla 1-3: Resultados análisis AHP

Elaboración por equipo de evaluación AHP

Se realiza prueba de consistencia de datos para asegurar que la decisión tomada tiene un respaldo matemático.

λ	4,09788	
$Det (A - \lambda I)$	5,36978268	
CI	0,03	<i>Indice de consistencia</i>
RI	0,9	
CR	4%	<i>Radio de consistencia < 10</i>

Tabla 1-4: Prueba de consistencia

Elaboración por equipo de evaluación AHP

1.3.2. Conclusión de estaciones críticas

Luego del análisis AHP el resultado de la estación más crítica es El Tambo, el equipo desarrollador del análisis está de acuerdo con el resultado.

La estación cuenta con cuatro posiciones de montaje disponibles y solo cuatro bombas, el diseño indica que para cumplir el flujo requerido deben operar 3 quedando una como back up, la estación recupera agua de las filtraciones de acumulación de arenas de relave, este flujo es constante y depende de la depositación y los deshielos que se generen en caso de nieve en invierno, este flujo no tiene la opción de ser redireccionado o de generar un by pass en la estación y mucho menos es posible detenerlo, ver figura 1-4.

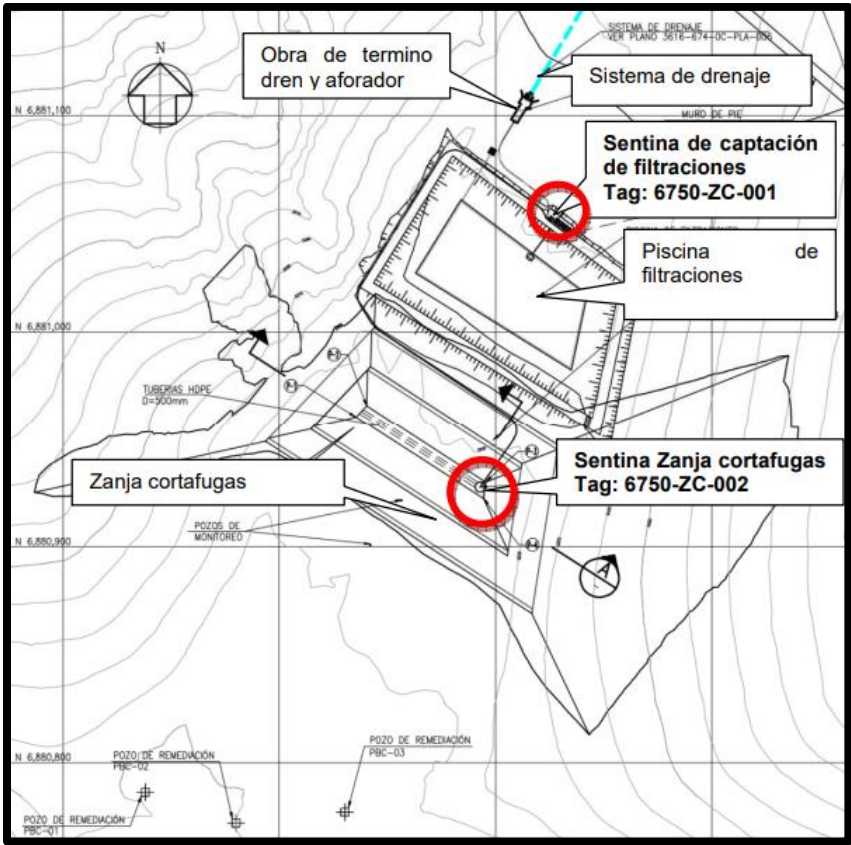


Figura 1-7: Plano de sentina y piscina

Información proporcionada por compañía

En el momento de evaluación de criterios personal de la compañía indica que a lo largo de los años la estación debido a las reiteradas fallas incluso ha tenido que operar con solo 2 equipos montados a la vez, condicionando la producción, siendo la única estación que ha presentado estas condiciones, esto se puede generar debido a las condiciones de operación: el sólido que llega a la sentina, acidez del agua, problemas mecánicos, etc. En el caso puntual, la estación sufrió desplazamiento de arenas lo cual obstruyó la succión de las bombas generando daños mecánicos por lo que se debió retirar los equipos.

En ocasiones el flujo que ingresa a la sentina es mayor al que pueden impulsar las bombas y avanza hacia una piscina de contención que se puede observar en la figura 1-7, esta piscina no puede rebalsar o generaría una contaminación ambiental la cual puede condicionar la continuidad de la operación generando valiosas pérdidas.

Cabe destacar que los valores vibratorios de las bombas del tambo son los más elevados respecto a otras estaciones, pero no se considera la vibración como criterio de evaluación en el diagrama AHP debido a que no es una problemática, más bien es un método de detección de fallas el cual evaluara la condición de la estación más crítica independiente de si esta es o no la que presenta los valores más elevados.

Debido a que la estación trabaja con agua recuperada de arenas presenta un nivel de solidos el cual no es aceptable por diseño de bomba lo que a mediano plazo se refleja en acelerado deterioro de componentes, aumentando el número de mantenciones, los costos de mantención y disminuyendo la disponibilidad de la estación. Estos antecedentes vuelven a la estación el tambo la más crítica de sistema por lo que es fundamental lograr un correcto mantenimiento a los equipos aumentando sus beneficios.

1.4. DISPONIBILIDAD DE ESTACIÓN CRITICA

Para el cálculo de disponibilidad se consideran los 4 equipos como parte de la sentina, evaluándose de forma fraccionada siendo el caudal de diseño 948 m3/h y la capacidad esperada de cada bomba 316 m3/h, la fórmula utilizada se puede observar al final del párrafo. La disponibilidad de cada equipo es calculada con los últimos registros de operación obtenidos. Los resultaos se pueden ver la tabla 1-5, siendo la disponibilidad total de la estación 82,3%.

$$Rs(t) = \sum_{i=1}^n Ri(t) * I_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n I_i\right) * \prod_{i=1}^n Ri(t)$$

Q entrante (m3/h) Actuales:	948	Aprox
-----------------------------	-----	-------

	Capacidad (m3/h)	A	(1-A)	Utilización
Bomba 1	316	73%	27%	40%
Bomba 2	316	63%	37%	43%
Bomba 3	316	54%	46%	35%
Bomba 4	316	57%	43%	43%

ESCENARIOS						
N°	Eq1	Eq2	Eq3	Eq4	Prob. Ocurrencia	Capacidad Posible
1	1	1	1	1	14,106%	1264
2	1	1	1	0	10,729%	948
3	0	1	1	1	5,217%	948
4	1	0	1	1	8,285%	948
5	1	1	0	1	12,016%	948
6	1	1	0	0	9,139%	632
7	0	1	1	0	3,968%	632
8	0	0	1	1	3,064%	632
9	1	0	0	1	7,057%	632
10	1	0	1	0	6,301%	632
11	0	1	0	1	4,444%	632
12	1	0	0	0	5,367%	316
13	0	1	0	0	3,380%	316
14	0	0	1	0	2,330%	316
15	0	0	0	1	2,610%	316
16	0	0	0	0	1,985%	0

A sistema =	82,3%
-------------	-------

Tabla 1-5: Cálculo de disponibilidad

Elaboración con datos operacionales

1.5. CONDICIÓN BASE DE BOMBAS ESTACIÓN CRÍTICA

Para un posterior análisis es necesario definir la condición base de la estación, es el punto de referencia para posteriores mejoras.

1.5.1. Modelo de bomba Vertical critico en faena.

Modelo de bomba Vertical crítico en faena, Bombas Peerless M12LD (3 etapas, 6 etapas, 11 etapas) y M12LTD 3 etapas: Peerless es un fabricante de bombas con usos habituales en suministros de agua fresca, procesos municipales y servicios públicos, utilizadas en aplicaciones menores con líquidos como butano, líquidos calientes y corrosivos. Debido a los mercados en los que está enfocada la marca cuenta con rangos de operación de hasta 340 m3/h, cargas de hasta 700 metros y diseños de hasta 3700 KW. Cuentan con fabricación de módulos intercambiables entre las mismas bombas, de esta manera se pueden adaptar a las necesidades requeridas. En la minera se utilizan los modelos M12LTD con variantes de 3,6 y 11 etapas y el modelo M12LTD con 3 etapas, utilizados en sentinas 1, 2, 3 y el tambo, estos cuentan con distintos valores de operación y se pueden observar en la tabla 1-5. M12LD 3 etapas: Equipo utilizado en sentina EL Tambo la cual recupera agua de filtraciones de depósito de arenas (agua recuperada), la bomba cuenta con 3 etapas, caudal entregado de 318 (m3/h), altura de 195 (m), potencia de 286.4 (hp), velocidad de giro de 2950 RPM.

	Caudal (M3/h)	Altura (m)	Potencia (Hp)	RPM
M12LD 3 Etapas	318	195	286,4	2950
M12LD 6 Etapas	189	86,4	75	1475
M12LD 11 Etapas	189	162,9	140,8	1475
M12LDT 3 Etapas	189	198,6	201,1	2950

Tabla 1-6: Bombas Peerless en faena

Elaboración propia con información de bombas de faena

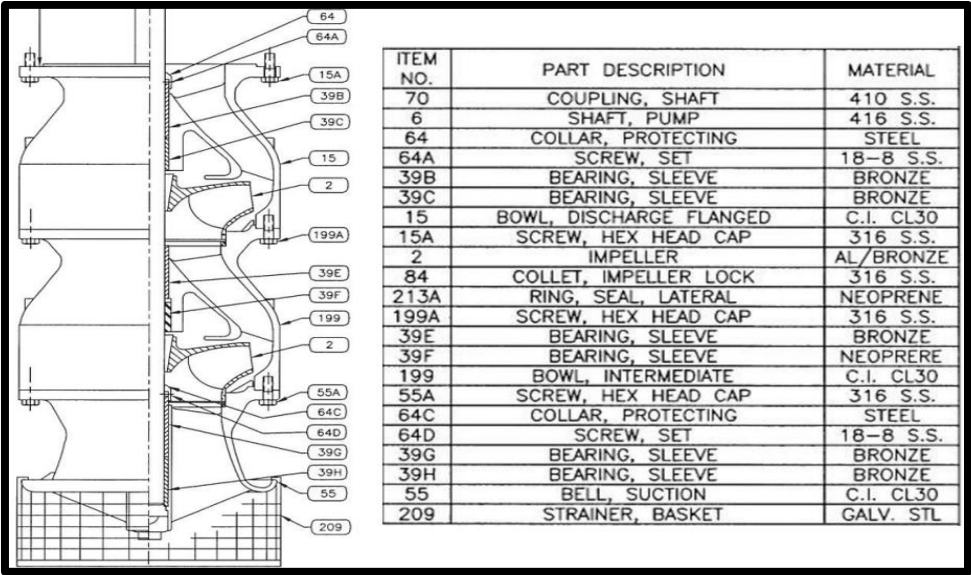


Figura 1-8: Bomba vertical

Manual de operación bombas Peerles

1.5.2. Comportamientos vibratorios específicos en bombas verticales

Las Bombas Verticales al igual que otros equipos mecánicos dependen de condiciones operacionales externas al conjunto mecánico, las cuales afectan directamente a las vibraciones y los valores que se pueden generar.

Las variables diferenciadoras más relevantes respecto a otras bombas centrífugas son:

-Largo de equipos: Las bombas verticales tienen largos mucho mayores a otros equipos, esto dependerá de los requerimientos de la operación, al final del equipo se encuentra la succión en conjunto con las etapas con sus respectivos impulsores. El hecho de tener los componentes húmedos bajo el agua y a distancias considerables de la carcasa disminuye el control de su comportamiento y desgaste.



Figura 1-9: Largo de bombas verticales

Fotografía propia en terreno

-Nivel de sentinas o piscinas: Las bombas verticales necesitan un nivel mínimo de agua para poder operar, sobre ese nivel mínimo el valor varía dependiendo del flujo que ingresa y el flujo que sale, esta variación afecta directamente en las vibraciones debido a cambios hidráulicos que se generan al interior de la bomba.

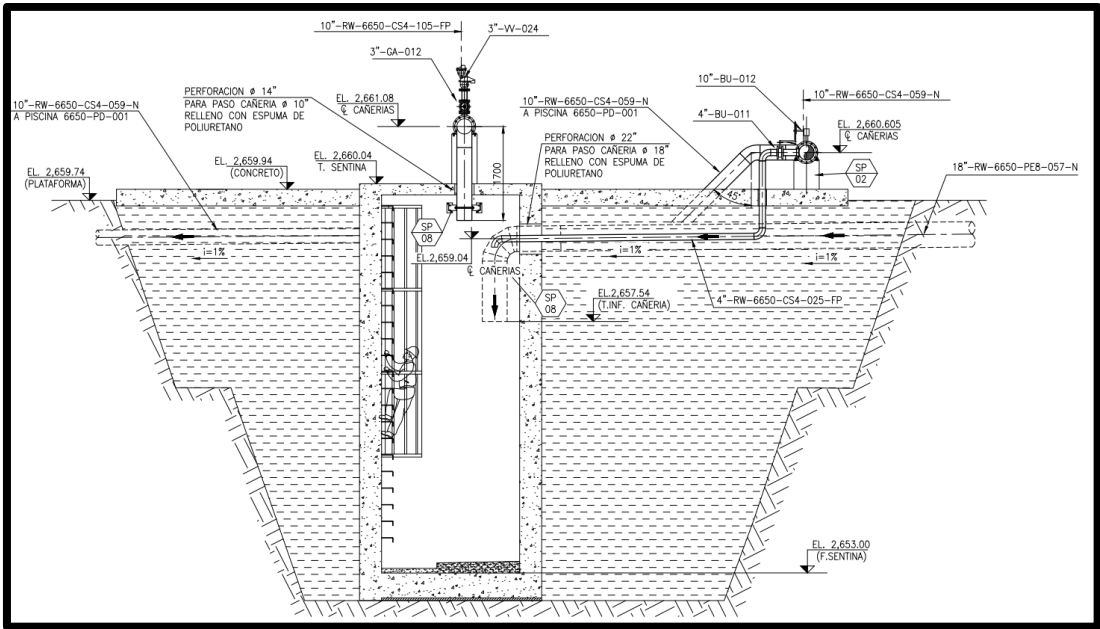


Figura 1-10: Sentinas

Plano proporcionada por personal mandante

1.5.3. Espectro patrón

Las bombas verticales en algunos casos trabajan a vibraciones que en comparación a otros equipos podrían sonar elevadas, esto es debido a su estructura, a la operación y las condiciones que suelen presentarse como es la acumulación de sedimento en las sentinas, generación de algas, solidos desconocidos, etc. Debido a esto los valores base de las bombas verticales pueden ser muy distintos, aun siendo el mismo modelo, es por esto, que cada estación debe evaluarse de manera distinta.

Para efecto de estudio se presenta un espectro vibratorio patrón de la bomba vertical de la estación crítica, la medición se realiza teniendo en cuenta la norma 10816 en su punto 1 la cual indica las consideraciones para tomar un espectro patrón y el punto 7 que indica donde se debe realizar la medición en bombas verticales, en este caso específicamente la medición se realizó en la carcasa de bomba punto más cercano al buje caja sello y rodamiento motor lado machón este último se considera debido que al tener un acoplamiento rígido los ejes de motor y de bomba trabajan de manera solidaria, logrando detectar fallas de bomba en dicho punto.

Las consideraciones para medir espectro patrón son:

- Equipo en operando a la velocidad nominal de operación con el flujo cercano al valor nominal (por lo general los equipos no logran el valor nominal de caudal y no cuentan con variadores de frecuencia).

- La carga del equipo es a su máxima capacidad por lo que se debe esperar a que el flujo impulsado llegue a destino, completando la columna de agua que debe impulsar.

Las mediciones están tomadas en 3 ejes (Ver figura 1-11) , vertical (eje Y) como la medida radial en el eje de la línea de descarga de bomba, horizontal (eje X) como la medida perpendicular al eje de la línea de descarga (90° de diferencia con medición vertical), y axial al eje (A).

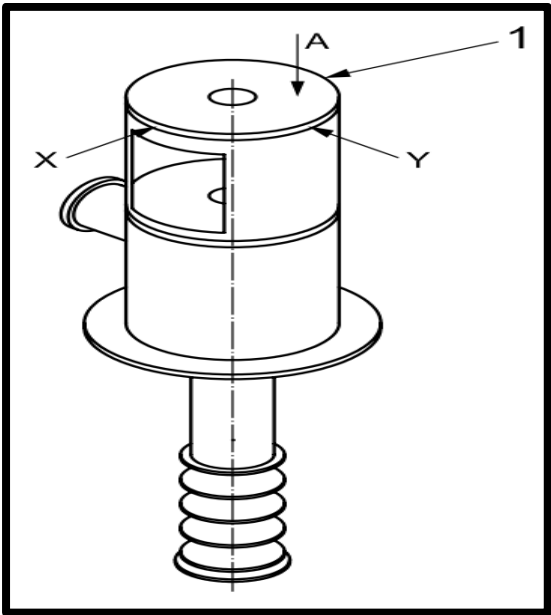


Figura 1-11: Ejes de medición

Norma ISO 10816-7

Con el fin de encontrar un espectro patrón a seguir se realizaron distintas pruebas a todos los equipos reparados y montados en la sentina, la recolección de espectros se realizaba 24 horas después de la puesta en marcha del equipo para evidenciar alguna falla por reparación, se determinó que el espectro patrón de la sentina es el que no presenta componentes anormales atribuibles a fallas mecánica y el que presenta menores magnitudes, debido a que siempre se debe buscar la mejor condición posible después de una reparación. Los espectros tomados son los siguientes:

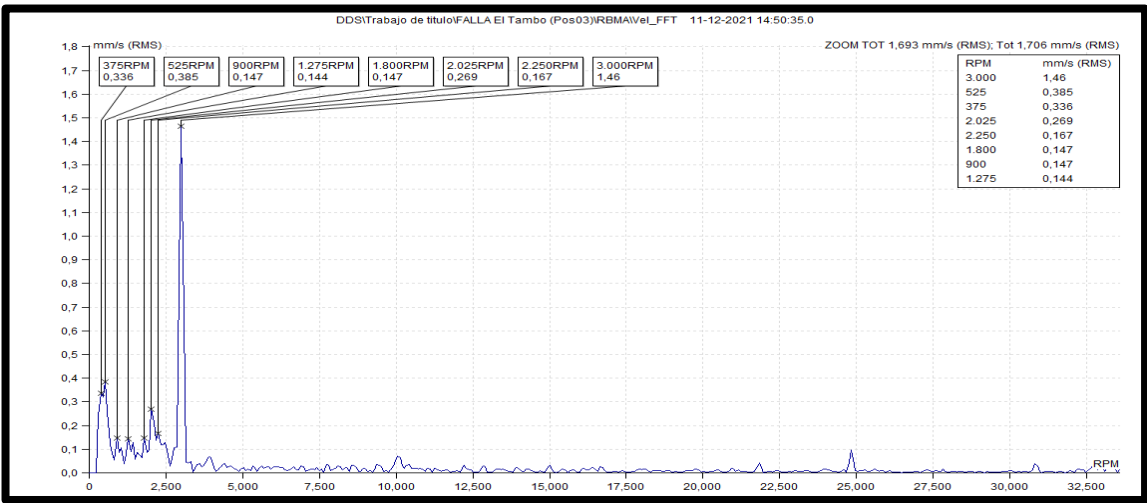


Figura 1-12: Medición axil - Buje bomba

Medición propia software Adash

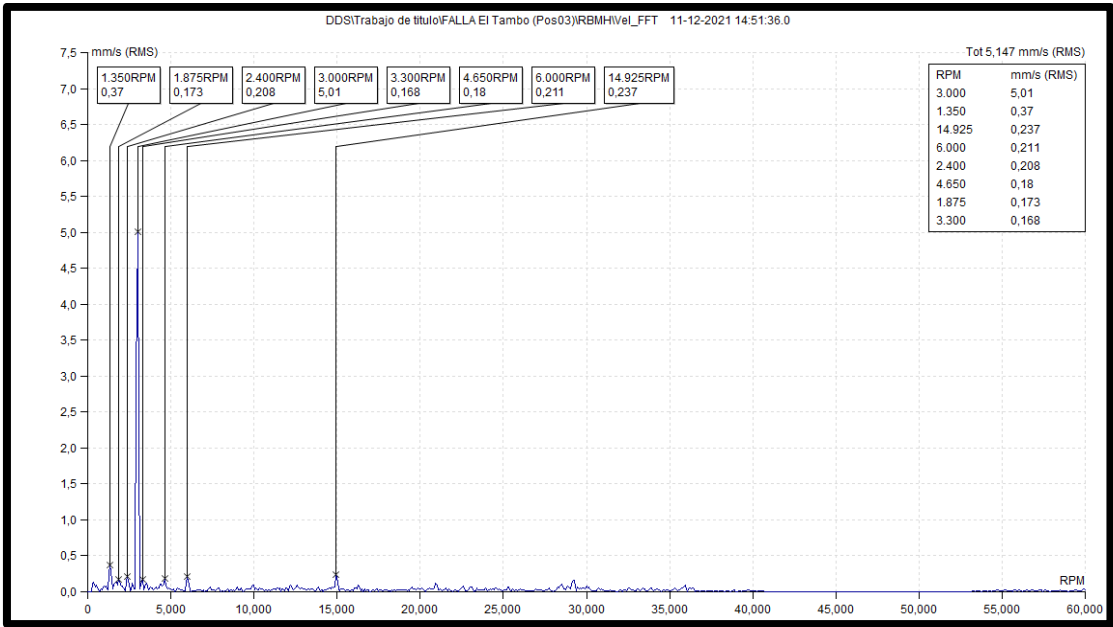


Figura 1-13: Medición vertical – Buje Bomba

Medición propia software Adash

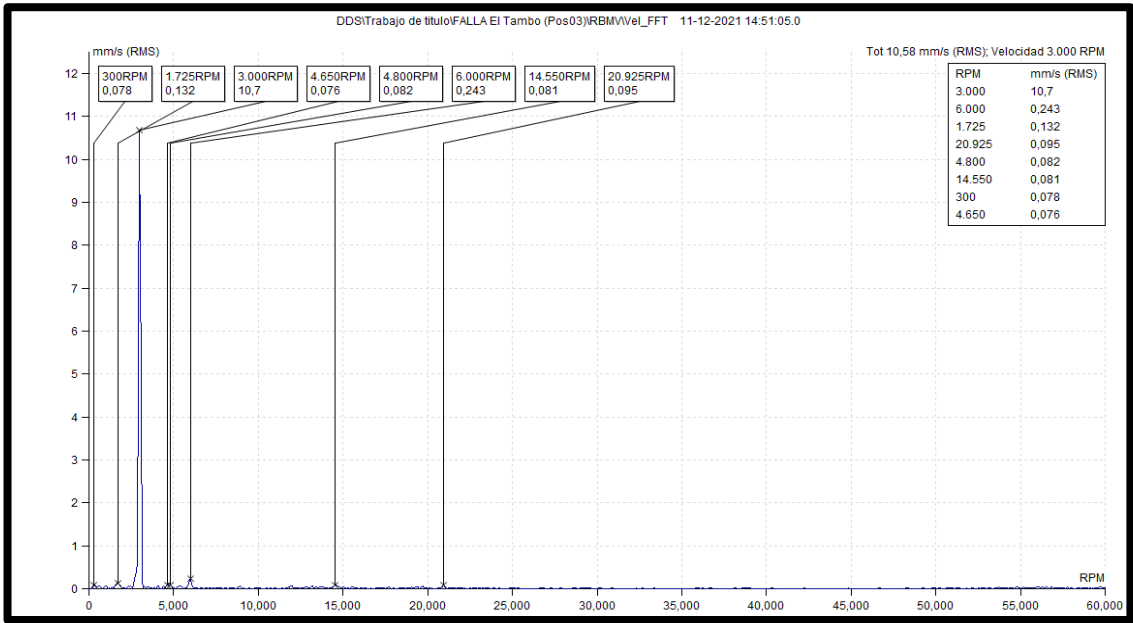


Figura 1-14: Medición horizontal – Buje Bomba

Medición propia software Adash

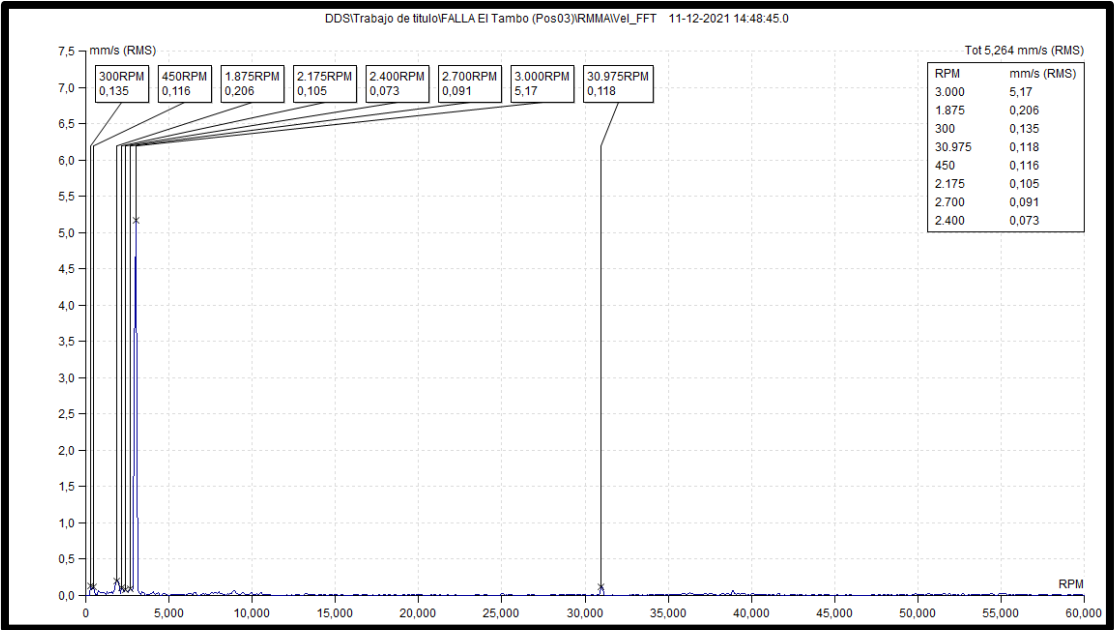


Figura 1-15: Medición axil – Rodamiento lado machón motor

Medición propia software Adash

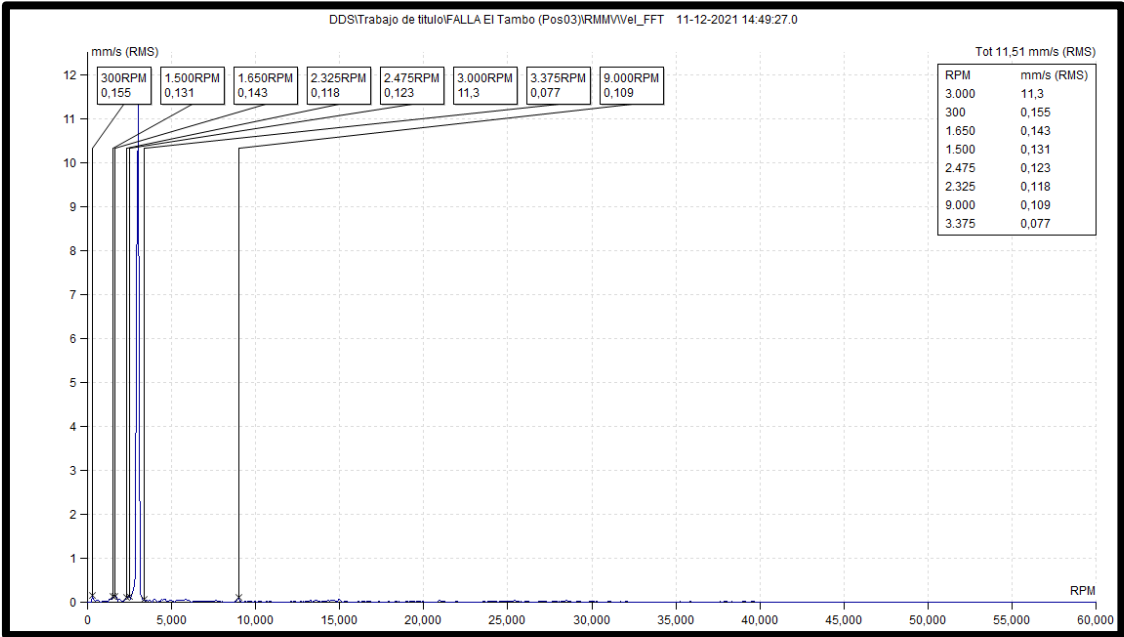


Figura 1-16: Medición vertical – Rodamiento lado machón motor

Medición propia software Adash

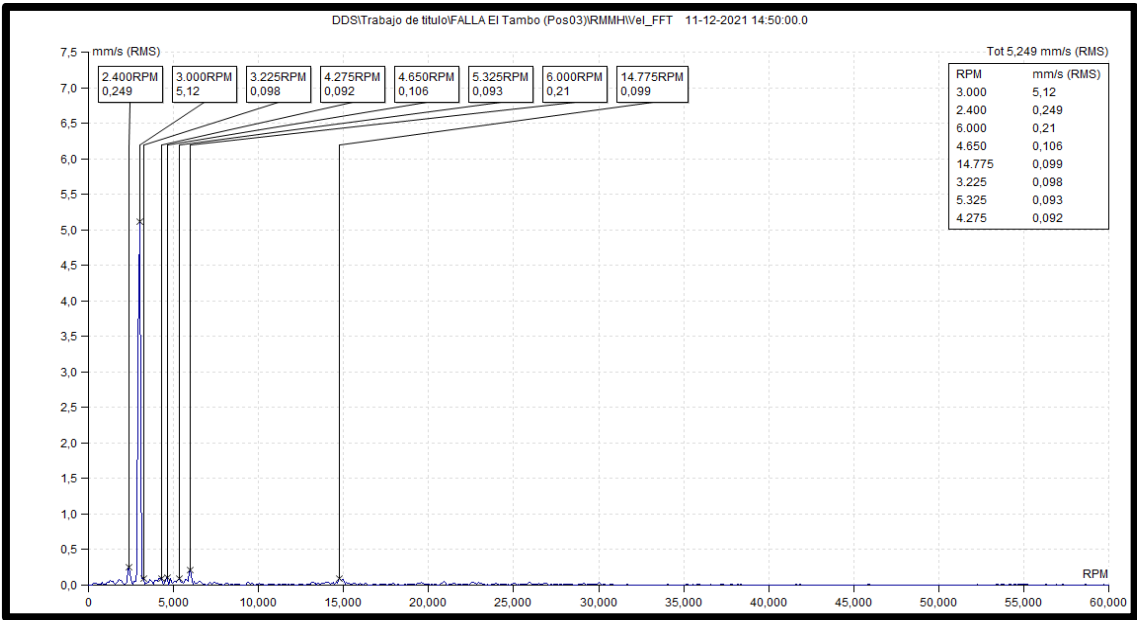


Figura 1-17: Medición Horizontal - Rodamiento lado machón motor

Medición propia software Adash

1.5.3.1. Resumen de magnitudes y diagnóstico

	Axial (mm/s [RMS])	Vertical (mm/s [RMS])	Horizontal (mm/s [RMS])
Buje bomba lado caja sello	1,7	5,14	3
Rodamiento motor lado machón	5,26	11,51	5,24

Tabla 1-7: Magnitudes de vibraciones

Valores obtenidos en terreno

Los valores de vibratorios de aceptación de equipos son evaluados por la norma ISO 10816-7 que se detallara en el próximo capítulo, por lo pronto según norma el equipo se encuentra aceptación B (Operación a largo plazo sin restricciones en el rango operativo permitido). En un análisis general de los espectros se puede descartar cavitación, ya que no se presentan vibraciones aleatorias representativas, Se descarta turbulencia debido a que no hay variables representativas antes de la 1X, la frecuencia de paso de álabes es de 18000 RPM debido a que los impulsores cuentan con 6 álabes, en los espectros medidos no hay componentes en esa frecuencia por lo que también se descarta turbulencia. En montaje del motor respecto a la bomba solo tiene una posición con los ajustes necesarios para no provocar desalineamiento, el espectro no muestra componentes que puedan atribuirlo, por lo que también se descarta vibraciones por desalineamiento.

La componente más elevada dentro de los distintos puntos medidos es la 1X a 3000 RPM, por lo que se puede diagnosticar un desbalanceo en el equipo, que puede ser debido a una incorrecta suportación de bomba, desnivel de en placa base o concreto, tenciones en líneas de descarga, etc. Actualmente se están realizando trabajos para detectar la causa, esta es la condición normal de un equipo reparada y ajustado correctamente, con medición de pandeo de ejes por lo que el desbalanceo no es provocado por una condición defectuosa mecánica de la bomba.

II. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE CONTROL DE VARIABLES
VIBRATORIAS

2.1. CONTROL DE VIBRACIONES

La metodología a utilizar se basa en cuatro pasos que se explicarán a detalle posteriormente, en resumen, los pasos son:

- Toma de muestra espectro patrón
- Primera revisión espectral
- Seguimiento de magnitudes
- Análisis espectral

Luego de investigar distintas normas y metodología de control de equipos basado en medición de vibraciones, la que se seleccionó para el desarrollo del trabajo es la norma 10816-7 “vibración mecánica. Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en piezas no giratorias, parte 7: Bombas rotatorias para aplicaciones industriales incluidas mediciones de ejes rotatorios”, esta parte de la norma es aplicable para bombas verticales multietapas tipo turbinas, siendo la única parte de la norma que permite evaluar severidad en este tipo de equipos. La metodología que se utiliza en la norma se debe implementar de manera específicas para la estación a evaluar y con una retroalimentación permanente para ser más exactos en los diagnósticos, debido a esta retroalimentación la metodología es flexible ante cambios operacionales o de condiciones físicas externas a los equipos.

2.1.1. Norma ISO 10816-7

Esta parte de la Norma ISO 10816 da instrucciones para la evaluación de vibraciones en bombas rotodinámicas para aplicaciones industriales con potencia nominal superior a 1 kW. Teniendo estos equipos con monitoreo continuo, para detectar anomalías vibratorias dependiendo de las condiciones operacionales, permite evaluar equipos desde 70 % hasta 120 % del punto de mejor eficiencia (BEP).

Las mediciones se llevarán a cabo cuando el rotor y los cojinetes principales hayan alcanzado sus temperaturas normales de funcionamiento en régimen permanente. La bomba debe funcionar en las condiciones de funcionamiento especificadas, es decir, a los valores nominales de caudal, altura de descarga y velocidad, que deben estar dentro del rango de funcionamiento preferido.

Si la vibración medida es mayor que los criterios de aceptación permitidos y se sospecha una vibración de fondo excesiva, se deben realizar mediciones con la bomba apagada para determinar el grado de influencia externa. Si la vibración con la bomba parada supera el 25 % del valor medido cuando la bomba está funcionando, es posible que sea necesaria una acción correctiva para reducir el efecto de la vibración de fondo.

La evaluación de vibraciones según esta norma se explicará más adelante.

2.2. DEFINICIÓN DE CONDICIÓN INICIAL

Los equipos montados luego de 24 horas de operación pasan a una toma de espectro el cual es analizado en busca de fallas mecánicas o alguna condición operacional que este afectando el equipo, posteriormente se realiza una evaluación bajo la norma 10816-7 para ver qué estado se encuentra el equipo y posteriormente definir sus valores de alarma y detención.

El análisis es cuantitativo, brinda pautas para garantizar que se eviten las deficiencias graves o los requisitos poco realistas. En ciertos casos, sin embargo, puede haber características específicas asociadas con una máquina en particular que requieran el uso de diferentes valores límite de zona (más altos o más bajos). En tales casos, normalmente es necesario explicar las razones de esto y, en particular, confirmar que la bomba no correrá peligro por operar con valores de vibración más altos. La norma separa a los equipos en 2 categorías:

Categoría I: Bombas que deben tener un alto nivel de confiabilidad, disponibilidad o razones de seguridad (por ejemplo, bombas para líquidos tóxicos y/o peligrosos; para aplicaciones críticas, petróleo y gas, aplicaciones químicas especiales, centrales nucleares o centrales eléctricas)

Categoría II: Bombas para aplicaciones generales o menos críticas (por ejemplo, bombas para líquidos no peligrosos)

Para cada una de estas categorías, se aplican diferentes límites de vibración. Por lo tanto, la clasificación de una bomba debe acordarse entre el fabricante y el usuario.

2.2.1. Zonas de evaluación

Zona A: La vibración de las máquinas recién puestas en marcha normalmente cae dentro de esta zona.

Zona B: Las máquinas con vibración dentro de esta zona normalmente se consideran aceptables para un funcionamiento a largo plazo sin restricciones.

Zona C: Las máquinas con vibración dentro de esta zona normalmente se consideran insatisfactorias para un funcionamiento continuo a largo plazo. Generalmente, la máquina puede operarse por un período limitado en esta condición hasta que surja una oportunidad adecuada para la acción correctiva.

Zona D: Los valores de vibración dentro de esta zona normalmente se consideran lo suficientemente graves como para causar daños a la máquina.

La norma evalúa valores de velocidad y desplazamiento, ver tablas 2-1 y 2-2.

Para evaluar el caso de los equipos de la estación el tambo se determina que son equipos categoría 2 y esta por sobre los 200 kW por lo que la evaluación se debe realizar en la última columna de izquierda a derecha.

Los valores de alarma y detención se explicarán y calcularán más adelante.

Table A.1 — Zone limits for vibration of non-rotating parts of rotodynamic pumps with power above 1 kW, applicable for impellers with number of blades $z_1 \geq 3$					
Zone	Description (see 5.2 for details of zone definitions)	Vibration velocity limit r.m.s. value mm/s			
		Category ^a I		Category ^a II	
		≤ 200 kW	> 200 kW	≤ 200 kW	> 200 kW
A	Newly commissioned machines in preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Unrestricted long-term operation in allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Limited operation	6,6	7,6	8,5	9,5
D	Risk of damage	> 6,6	> 7,6	> 8,5	> 9,5
Maximum ALARM limit (= 1,25 times the upper limit of zone B) ^b		5,0	6,3	6,4	7,6
Maximum TRIP limit (= 1,25 times the upper limit of zone C) ^b		8,3	9,5	10,6	11,9
In situ acceptance test	Preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
	Allowable operating range	3,4	4,4	4,2	5,2
Factory acceptance test	Preferred operating range	3,3	4,3	4,2	5,2
	Allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
For all acceptance tests in the preferred operating range (see 3.4), each of the filtered values ^c for rotational frequency (f_n) and blade-passing frequency ($f_n \cdot z_1$) should be		≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 3
^a For definition, see 5.1.					
^b Recommended values. The vibration magnitudes should be above these limits for about 10 s before an ALARM or TRIP is released to avoid false alarms and trips.					
^c For acceptance tests in the allowable but outside the preferred operating range, the filtered values for rotational frequency (f_n) and blade-passing frequency ($f_n \cdot z_1$) may be expected to be higher (1,3 times) than the values for the preferred operating range.					

Tabla 2-1: Límites de zona para vibración

Table A.2 — Additional criteria for vibration limits on non-rotating parts of rotodynamic pumps with running speed below 600 r/min, valid for filtered displacement values (0,5 times, 1 times and 2 times the running speed)

Zone	Description (see 5.2 for details of zone definitions)	Vibration displacement limit peak-to-peak value µm
A	Newly commissioned machines in preferred operating range	50
B	Unrestricted long-term operation in allowable operating range	80
C	Limited operation	130
D	Risk of damage	> 130
Maximum ALARM ^a		100
Maximum TRIP ^a		160
In situ acceptance test	Preferred operating range	50
	Allowable operating range	65
Factory acceptance test	Preferred operating range	65
	Allowable operating range	80
^a Recommended values. The vibration magnitudes should be above these limits for about 10 s before an ALARM or TRIP is released to avoid false alarms and trips.		
NOTE The limits are applicable for each discrete frequency mentioned.		

Tabla 2-2: Criterios adicionales para límites de vibración

Norma ISO 10816-7

2.3. VALORES LÍMITES DE ALARMA

La norma ISO 10816-7 indica que, para el funcionamiento a largo plazo, es una práctica común establecer límites de vibración operativos. Estos límites toman la forma de alarma y detención.

Alarma: Para proporcionar una advertencia de que se ha alcanzado un valor definido de vibración o se ha producido un cambio significativo, en el que puede ser necesaria una acción correctiva. en general, si ocurre una situación de alarma, la operación puede continuar por un período mientras se realizan las investigaciones para identificar el motivo del cambio en la vibración y definir cualquier acción correctiva. Para el caso de estudio los equipos serán sometidos a la toma de un espectro al inicio de su operación y posteriormente se mantendrá un monitoreo de magnitudes hasta llegar a valores de alarma, una vez esto pase se realiza monitoreo de espectros periódico hasta planificar el retiro del equipo, lo que va a depender del motivo de las vibraciones y la falla que se esté presentando.

Detención: para especificar la magnitud de la vibración más allá de la cual el uso posterior de la máquina puede causar daños. si se excede el límite de detención, se deben tomar medidas inmediatas para reducir la vibración o se debe apagar la máquina. se pueden especificar diferentes límites operativos, que reflejen las diferencias en la carga dinámica

y la rigidez del soporte, para diferentes ubicaciones y direcciones de medición. En otras palabras, estos valores son ajustables por equipo y por punto de medición.

2.3.1. Configuración de ALARMAS

los límites de alarma pueden variar considerablemente, hacia arriba o hacia abajo, para diferentes máquinas. los valores elegidos normalmente se establecerán en relación con un valor de referencia determinado a partir de la experiencia para la ubicación o dirección de medición para esa máquina en particular. Se recomienda que el límite de alarma se establezca por encima de la línea de base en una cantidad igual al 25 % del límite superior de la zona b. si la línea de base es baja, la alarma puede estar por debajo de la zona c. cuando no haya una línea de base establecida (por ejemplo, con una máquina nueva), la configuración inicial de alarma debe basarse en la experiencia con otras máquinas similares o en relación con los valores de aceptación acordados. después de un período de tiempo, se establecerá el valor de referencia de estado estable y la configuración de alarma se debe ajustar en consecuencia. se recomienda que el límite de alarma no supere normalmente 1,25 veces el límite superior de la zona b. si la línea de base de estado estable cambia (por ejemplo, después de una revisión de la máquina), la configuración de alarma debe revisarse en consecuencia.

2.3.2. Configuración de TRIPS (detención)

Los límites de TRIP generalmente se relacionarán con la integridad mecánica de la máquina y dependerán de cualquiera característica de diseño específicas que se han introducido para permitir que la máquina resista dinámicas anormales. Por lo tanto, los valores utilizados serán generalmente los mismos para todas las máquinas de diseño similar y normalmente estará relacionado con el valor de referencia de estado estable utilizado para configurar las alarmas.

Sin embargo, puede haber diferencias para máquinas de diferente diseño y no es posible dar claras directrices para los límites absolutos de TRIP. En general, el límite de TRIP estará dentro de la zona C o la zona D, pero es recomienda que el límite TRIP no supere 1,25 veces el límite superior de la zona C

Teniendo en cuenta lo anterior y teniendo los valores de espectro base o patrón los valores de alarma y de detención para los puntos más críticos de la bomba son 7,6 mm/s para alarma y 11,9 para detención. Estos valores son transversales para los 4 equipos de la sentina, debido que hasta ahora su comportamiento vibratorio es muy similar, de todas formas, se puede modificar en caso de que se detecte la necesidad.

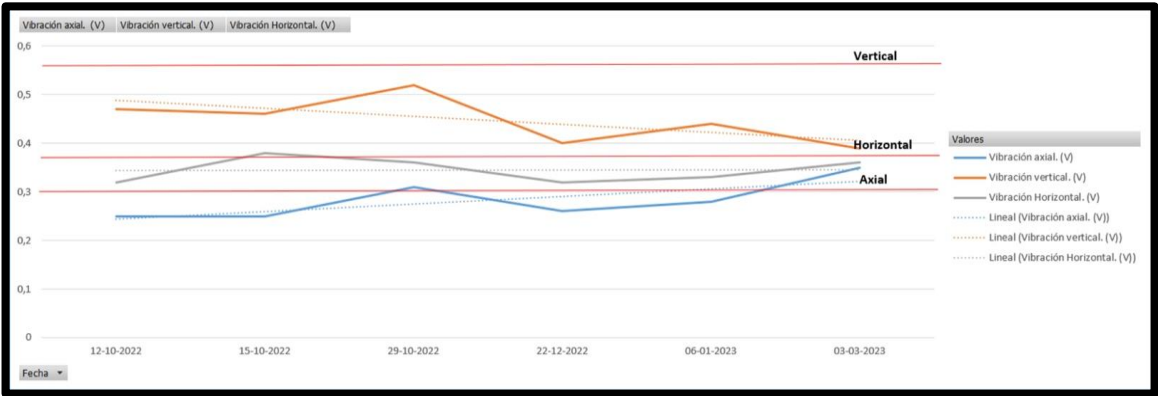


Gráfico 2-1: Gráficos históricos de bombas

Datos de base de datos vibraciones

2.4. CONTROL Y EVALUACIÓN DE TENDENCIAS DE MAGNITUDES

Para mantener el control de los equipos es necesario implementar una base de datos que permita generar gráficas y evaluar el comportamiento de las variables en el tiempo. La herramienta permite seleccionar el equipo por su estación, posición o tag y su serie, esto permite realizar evaluaciones comparativas para mejores análisis y detectar si la posición o la serie tienen un problema en particular y tomar medidas al respecto.

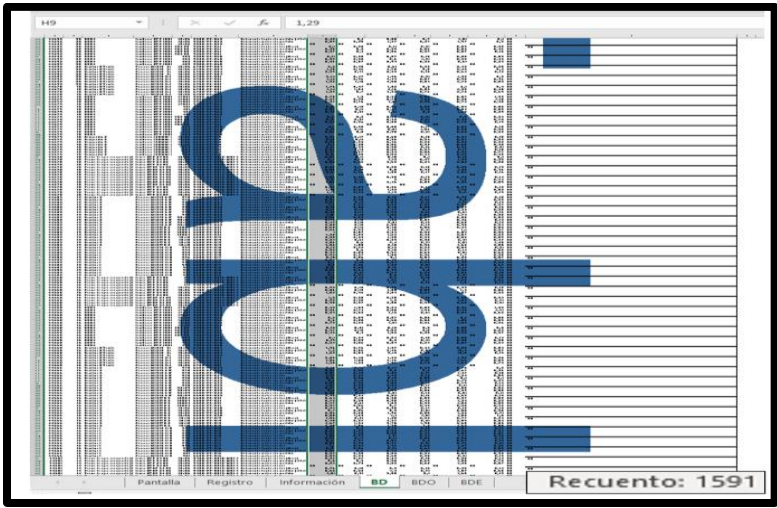


Figura 2-1: extracto de base de datos

Elaboración propia con valores vibratorios medidos en terreno

La herramienta esta generada con Excel con programación de macros, lo que permite generar bases de datos y gráficos dinámicos para facilitar el manejo de la información. Parte del documento propone la implementación de un sistema de monitoreo en línea. Ambas herramientas diseñadas para todas las estaciones de bombas verticales involucradas en el proceso de transporte de agua de proceso, cabe destacar que al tener equipos de la misma marca y modelo se puede comparar el comportamiento dependiendo de la estación y los fluidos que se manejen, pero para evaluaciones solo se deben tomar los valores de los equipos de la estación.

2.4.1. Valores vibratorios

Las mediciones de vibraciones siempre se deben realizar en los mismos puntos debido a que la orientación afecta la lectura por la transmisión de las ondas vibratorias que es distinta en todas las direcciones, la norma 10816-7 indica los ejes donde se debe realizar las mediciones y la vez menciona que estas mediciones se pueden realizar en la carcasa de equipos en caso de no contar con descansos cercanos, Como buena práctica y manteniendo el número de puntos de mediciones de bombas horizontales, se miden 4 principales áreas en el conjunto motor bomba vertical (Ver figura 2-2).

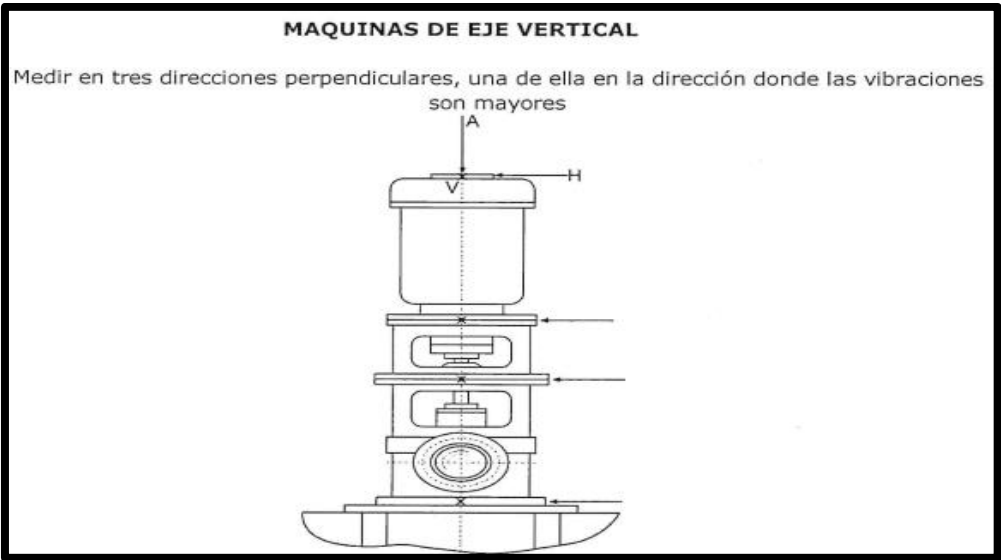


Figura 2-2: Puntos de medición de bombas verticales

Curso de análisis de vibraciones categoría 1 UDEC

Cada medición para el caso de estudio se tomarán valores de velocidad en (mm/s) RMS, aceleración (g) RMS la cual corresponde a 1 (m/s²) y desplazamiento en μm . Los valores RMS corresponden a la raíz del cuadrado de los promedios de valores de la forma de onda senoidal, esto es proporcional al área bajo la curva. Estos valores en primera instancia permiten identificar en que condición se encuentra el equipo y posteriormente una vez calculado los valores de alarma y detención no mostrarán si se acerca o si se encuentra en esa condición.

2.4.1.1. Manejo de base de datos

La herramienta utilizada actualmente permite ingresar los datos de vibración, de operaciones y registro de eventos relevantes para la operación como podrían ser cambios de equipos, problemas de contaminación en sentinas, etc. Estos datos son registrados en una base de datos que posteriormente se grafica y permite evaluar las condiciones históricas de los equipos.

Registro de vibraciones y temperatura

Tag reducido

Tag completo

Estación

Marca y modelo

Serie actual

Puntos de medición

Vibración axial (V)

Vibración axial (A)

Vibración vertical (V)

Vibración vertical (A)

Vibración Horiz (V)

Vibración Horiz (A)

Temperatura

Rodamiento motor lado libre

Rodamiento motor lado machón

Rodamiento bomba lado machón (sttuling)

Rodamiento bomba lado libre (Base)

Fecha

16-10-2022

N semana

43

Diagnostico preliminar

Guardar

Limpiar

Borrar anterior

Registro de valores operacionales

Tag reducido

Tag completo

Estación

Marca y modelo

Serie actual

Caudal

Valor

Unidad

m3/h

Corriente

Valor

Unidad

A

Potencia

Valor

Unidad

W

Torque

Valor

Unidad

Nm

% Variador

Valor

Unidad

%

Presión

Valor

Unidad

bar

Eficiencia F

Valor

Unidad

%

V6

Valor

Unidad

SD

V9

Valor

Unidad

SD

V10

Valor

Unidad

SD

V11

Valor

Unidad

SD

V12

Valor

Unidad

SD

V13

Valor

Unidad

SD

V14

Valor

Unidad

SD

V15

Valor

Unidad

SD

Fecha

16-10-2022

N semana

43

Guardar

Limpiar

Borrar anterior

Registro de eventos

Tag reducido

Tag completo

Estación

Marca y modelo

Serie actual

Evento sucedido

Fecha de evento

Semana

0

Guardar

Limpiar

Borrar anterior

Figura 2-3: Pantalla de registro de datos

Elaboración propia

Las casillas en azul son necesarias de rellenar, las casillas blancas son rellenadas de forma automática o son permanentes, en el ingreso de datos de vibraciones se puede agregar un diagnóstico preliminar el cual se extrae de los espectros vibratorios en caso de detentar un aumento de vibraciones o una condición anormal del equipo, manteniendo un registro.

2.4.2. Generación de gráficas

Las gráficas generadas permiten estudiar el comportamiento histórico y principalmente estimar en qué momento el equipo llegará a valores de alarma según lo establecido por norma, esto va a depender de cada equipo.



Figura 2-4: Pantalla gráficas

Registros de base de datos

La gráfica cuenta con cuatro filtros para llegar a los valores vibratorios específicos que se están buscando, primero se debe seleccionar la estación, luego se debe elegir si se está buscando, analizar los equipo por serie o por tag de posición, finalmente se elige el punto de medición a evaluar.

2.5. ANÁLISIS DE ESPECTROS VIBRATORIOS

El análisis de espectros busca identificar nuevas componentes que representen fallas mecánicas como pueden ser:

- Frecuencia de paso de álabes: componente que se vuelve representativa al tener falla mecánica en estos componentes, como puede ser un desprendimiento de material, fisura, etc. Deteriorándose de manera acelerada, así como a los anillos de desgaste. En este caso los impulsores cuentan con 6 álabes y la bomba opera a 3.000 RPM teniendo una frecuencia de álabes a las 18.000 RPM.
- Recirculación en impulsores: esto se debe a holguras inadecuadas entre impulsores y anillos de desgaste, lo que provoca una vibración axial que se aprecia en los espectros a peak menores a 1X, si esta vibración se presenta es debido a que el componente ya tiene desgastes significativos y requiere ser enviado a mantenimiento.
- Inestabilidad hidráulica: por lo general se presenta cuando las bombas pierden la medida entre el impulsor y el tazón o carcasa, esta medida también es conocida como “Gap” y se presenta por alguna soldadura de componente, desajuste interno de altura de eje, etc. que por

causa raíz es un desgaste o vibración de otra naturaleza, esta falla se manifiesta en frecuencias a peak menores a $1X$, en general cuando se presenta esta vibración es acompañada de recirculación en impulsores.

Soltura mecánica: se presenta cuando algún componente mecánico esté suelto, genera vibraciones con múltiplos de $1X$ o múltiplos de $(1/2) X$, mientras más armónicos más grande la soltura.

Se debe considerar que al estos equipos ser multietapas la falla puede provenir de solo una de ellas y puede no ser un múltiplo o submúltiplo de la velocidad de funcionamiento, debido a que internamente un componente suelto no necesariamente mantendrá un giro solidario al eje, esto puede deberse a obstrucciones o desajuste de componentes, por esto es que si al detectar peak elevados en frecuencias aleatorias los equipos se envían a mantenimiento, previniendo mayores daños.

En el caso de desbalanceo que es la condición que se presenta de manera general en estos equipos se busca que en la estación crítica el tambo el peak $1X$ no supere los valores de la zona B de la norma ISO 10816-7 de manera individual (sin considerar otros peaks). Si los valores superan dicha zona se realiza una revisión de espectros para analizar posibles causas, se a detectado que al superar valores de la zona C por lo general se presenta desbalanceo y desgaste en las zonas de bujes (ver figura 2-5). La metodología debe lograr generar un historial que permita identificar espectros tipos de falla y tendencias de desgaste que puedan reflejarse en los valores medidos, actualmente no se cuenta con dicha información y puede ser de gran utilidad a la hora de planificar mantenimientos preventivos y los repuestos a utilizar.



Figura 2-5: Desgaste producidos en centradores

Fotografía propia

2.6. EJEMPLO DE ESPECTROS VIBRATORIOS EN BOMBAS VERTICALES

Falla en Bomba PAR: bomba pierde eficiencia y aumenta vibraciones, en espectro se detecta inestabilidad hidráulica en 0,5X(en figura 2-6 se puede observar componentes anteriores a la 1X), al realizar mantención de equipo impulsor inferior presenta desprendimiento en los álabes, evidencia en la figura 2-7.

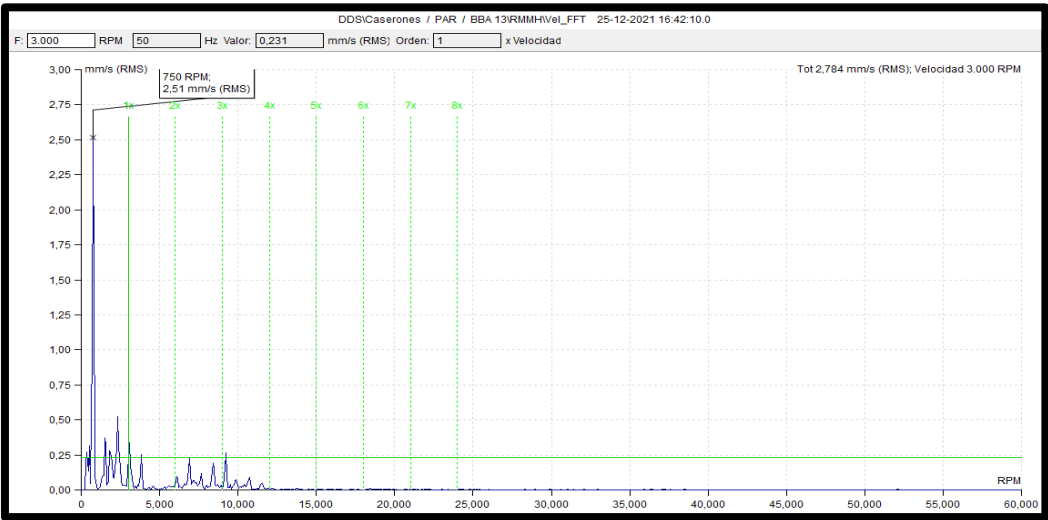


Figura 2-6: Espectro de bomba vertical

Medición propia software Adash



Figura 2-7: Impulsores con roturas

Fotografía proporcionada por taller de reparación

Detección de falla en bomba posición 4 el tambo: se detecta aumento en desbalanceo y peaks atribuibles a soldadura mecánica. En mantenimiento se detecta pandeo de ejes y desgastes sectorizados en ejes.

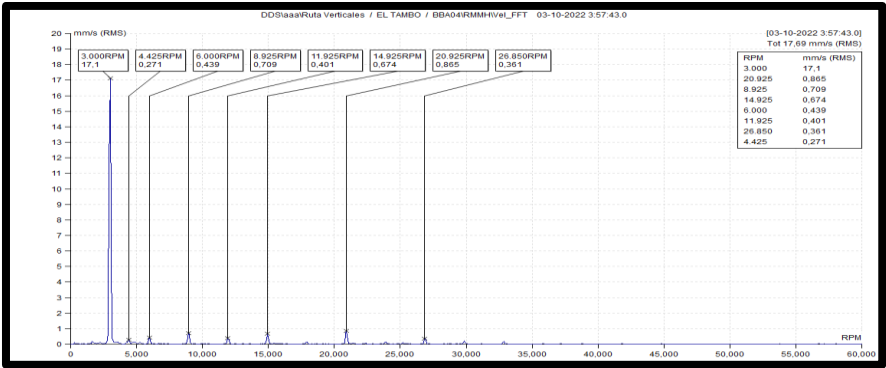


Figura 2-8: Espectro de bomba vertical

Medición propia software Adash

Bomba 18 Sentina 1: Presenta aumento en desbalanceo, equipo opera generalmente en valores menores a 1 mm/s, equipo posteriormente falla por trabamiento, en análisis de falla y diagnóstico por taller se detecta un pandeo en los ejes de bomba. En la figura 2-9 se puede observar un antes y un después del en una medición realizada en los mismos puntos a en distintos tiempos.

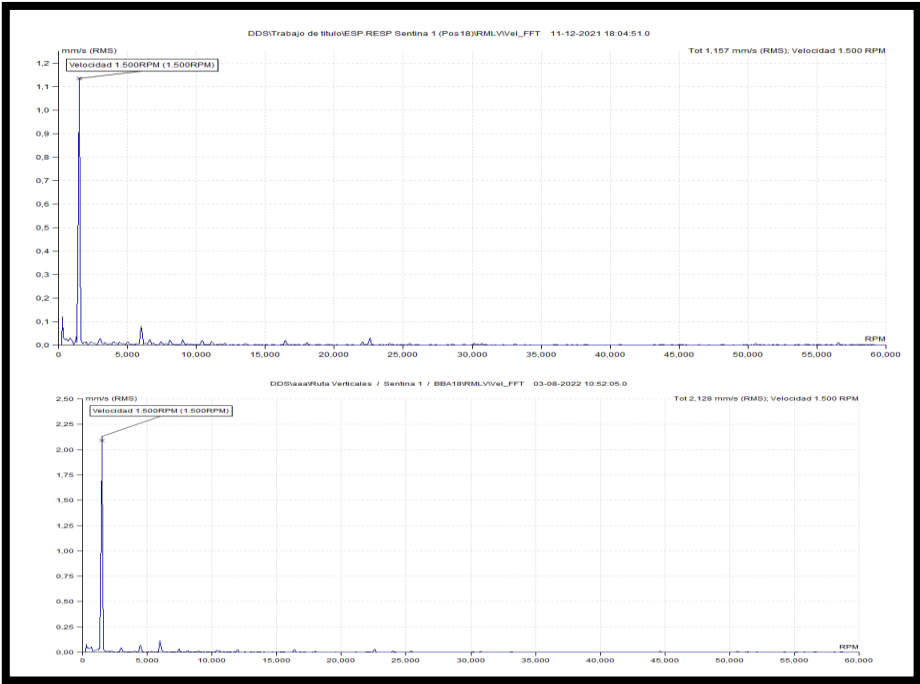


Figura 2-9: Espectro de bomba vertical

Medición propia software Adash

Bomba 20 sentina 2: presenta soldadura mecánica, al desmontar se detecta anillo de desgaste con ajuste libre respecto a tazón, en la figura 2-10 se puede ver el espectro generado por la falla y en la figura 2-11 la evidencia al momento del desarme de equipo.

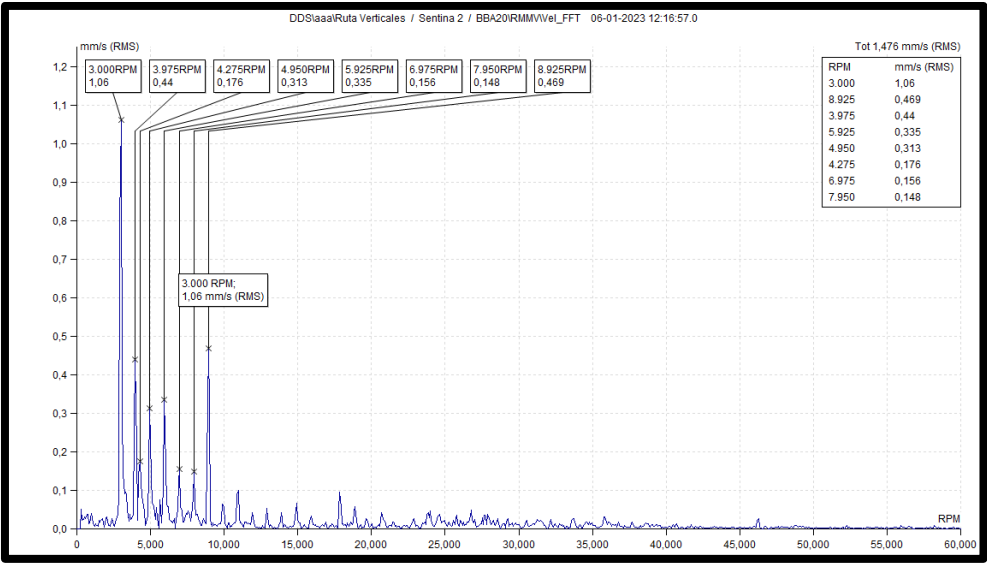


Figura 2-10: Espectro de bomba vertical

Medición propia software Adash



Figura 2-11: Impulsores desgastado

Fotografía proporcionada por taller de reparación

Los espectros mostrados anteriormente tienen el objetivo de identificar posibles componentes que pueden presentarse en una medición normal de bombas verticales.

Algunos de ellos lograron predecir la falla antes de que se produjera un deterioro significativo en los componentes de baja rotación, mientras que otros no. Por esta razón, es importante que el sistema sea retroalimentado por la empresa reparadora del equipo. De esta manera, con la información suficiente se podrán definir rangos más precisos de aceptación y descarte de equipos.

2.7. PROPUESTAS DE MEJORA

Luego de investigar distintas metodologías y normas de evaluación de criticidad de equipos se logró determinar que la norma aplicable para bombas verticales de tipo turbina es específicamente la norma ISO 10816-7 la cual es la guía para la generación de una metodología específica a utilizar en la estación de bombeo, la cual cuenta con los siguientes pasos:

Paso 1: toma de muestra de espectro patrón, esto se realiza aproximadamente a las 24 horas de la puesta en marcha del equipo, cuando ya operó sin inconvenientes durante este tiempo, para esto debe ser aceptado por el personal de mantenimiento cumpliendo con el flujo nominal de la estación, la medición se realiza a velocidad nominal con 3 de 4 equipos operando como lo indica el diseño de la estación, se recolecta el espectro patrón y se tabulan los valores Peak RMS, principalmente 1X y valor total RMS del punto medido.

Paso 2: análisis espectral, se realiza una revisión al espectro en búsqueda de fallas prematuras, principalmente fallas relacionadas con una deficiente reparación o montaje de equipos, si el espectro no presenta anomalías se prosigue con el paso 3, en caso de que si las presente se salta al paso 4.

Paso 3: Seguimiento de magnitudes, de manera periódica se realizará una medición de magnitudes a los equipos dependiendo de la criticidad de la sentina, para el caso del Tambo las mediciones son 2 veces por semana, definido por personal de la compañía, valor designado por las elevadas variaciones que se generaban con un monitoreo semanal, estos datos son registrados en base de datos y graficados para identificar tendencias de comportamiento, las bombas del tambo tienen un comportamiento vibratorio elevado respecto a la norma encontrándose en la mayoría del tiempo por sobre la zona B de la norma y cercano a valores de alarma.

Bajo historial de mediciones se detectó que los equipos incluso superaban valores rms totales en un 60% respecto a valores de mediciones patrón, de todas formas, su caudal no variaba significativamente, pero si generó desgaste en componentes como anillos, ejes y bujes, con ayuda de la norma se generan valores de alarma y detención, estos son 7,6 mm/s para alarma y 11,9 para detención (ver figura 2-10), los valores pueden ser ajustados

dependiendo de la condición de los equipos tanto a la baja como al alza, justificando el aumento de los valores de alarma, asegurando que el equipo no presente daños prematuros, el historial de mediciones muestra que los equipos luego de superar los valores mediados de la zona B tienen un alza considerable en sus valores generales por lo que pasan de alarma a detención de manera muy rápida, la metodología recomienda pasar a una medición y evaluación de espectros una vez superado los valores de alarma, pasando al paso 4.

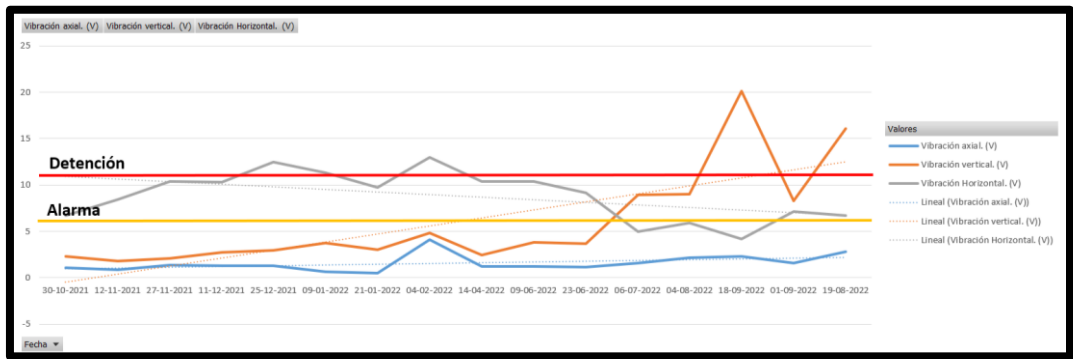


Gráfico 2-2: Comportamiento de equipo

Datos de base de datos vibraciones

Paso 4: análisis espectral, para tener un mayor conocimiento de la condición mecánica del equipo se estudia el espectro y se buscan componentes de falla y sus magnitudes. En la mayoría de los casos el aumento de vibraciones en bombas verticales es debido a un aumento en la 1X indicando desbalanceo que puede ser provocado por perdida de geometría de componentes, principalmente ejes, también puede ocurrir que se presenten componentes que causen daños en impulsores, soldaduras mecánicas, entre otras fallas y dependiendo de la magnitud de estas variables se determina el cambio o continuidad de la operación del equipo. Si bien la norma indica en qué momento se debe dar alarma y detención de un equipo vertical, no especifica valores de aceptación de componentes de falla es por esto que la decisión de enviar un equipo a mantención en etapa de alarma pasa por el analista, así como también la opción de mantener un equipo en operación una vez pasado los valores de detención según norma, para facilitar estas decisiones se debe contar con respaldo y retroalimentación del taller de reparación de esta forma se conocerá que tan significativas son las componentes de daños presentes en un espectro respecto a los componentes reales.

Una vez los equipos llegan al paso 4 de la metodología se mantienen en esta condición hasta su retiro el cual se debe programar. Gracias a contar con un equipo back up si las

mediciones son críticas el equipo se deja sin operación y se prepara repuestos y recursos necesarios para el mantenimiento.

Actualmente la recolección de datos se realiza de forma manual, lo que aumenta la probabilidad de errores como puede ser pérdida de datos, incorrecta medición, no cumplimiento de periodicidad de mediciones, etc. Es por esto que se debe obtener un sistema de monitoreo en línea con sensores de vibraciones, estos deben ubicarse en el rodamiento superior e inferior del motor, cercanos al buje de caja sello de bomba y en la base de la bomba, según los ejes indicados por la norma ISO 10816-7, considerando montaje, mantenimiento de sistema, costos de Software, paneles de control, entre otros aspectos.

Es importante aclarar que para la gerencia de aguas y relaves se considera un mantenimiento preventivo el cual solo se realiza cambio de componentes menores de alta rotación como lo son los ejes, bujes, anillos, etc. Los mantenimientos correctivos son asociados a cambio de componentes de baja rotación como pueden ser tazones, impulsores, columnas, etc.

Esta metodología de análisis vibratorio busca reemplazar al mantenimiento preventivo basado en horas, mejorando principalmente el indicador de disponibilidad, aumentando los tiempos medios entre fallas utilizando la condición del equipo como respaldo para continuar con su operación por un tiempo mayor al establecido por el preventivo y disminuyendo los tiempos de reparación dando holgura a taller y bodega para tener los stock necesarios de repuestos para mantenimiento y realizar la reparación de manera más rápida. En mediano y largo plazo esto generará disminución de costos de mantenimiento, debido a que se pretende disminuir las cantidades de mantenciones y proteger los componentes de baja rotación que son los más costosos para el contrato.

La comparación actual se puede observar en la figura 2-12, en la cual se puede ver un mantenimiento preventivo ideal en el que la maquina opera se repara siempre en los mismos tiempos, lo que es una condición ideal lejana a la realidad donde ocurren variaciones en la operación y en el comportamiento mecánico de la bomba lo que se puede asemejar al segundo gráfico, la propuesta busca detectar las falla de manera prematura evitando daños mayores y adecuarse a la realidad de los equipos en operación.

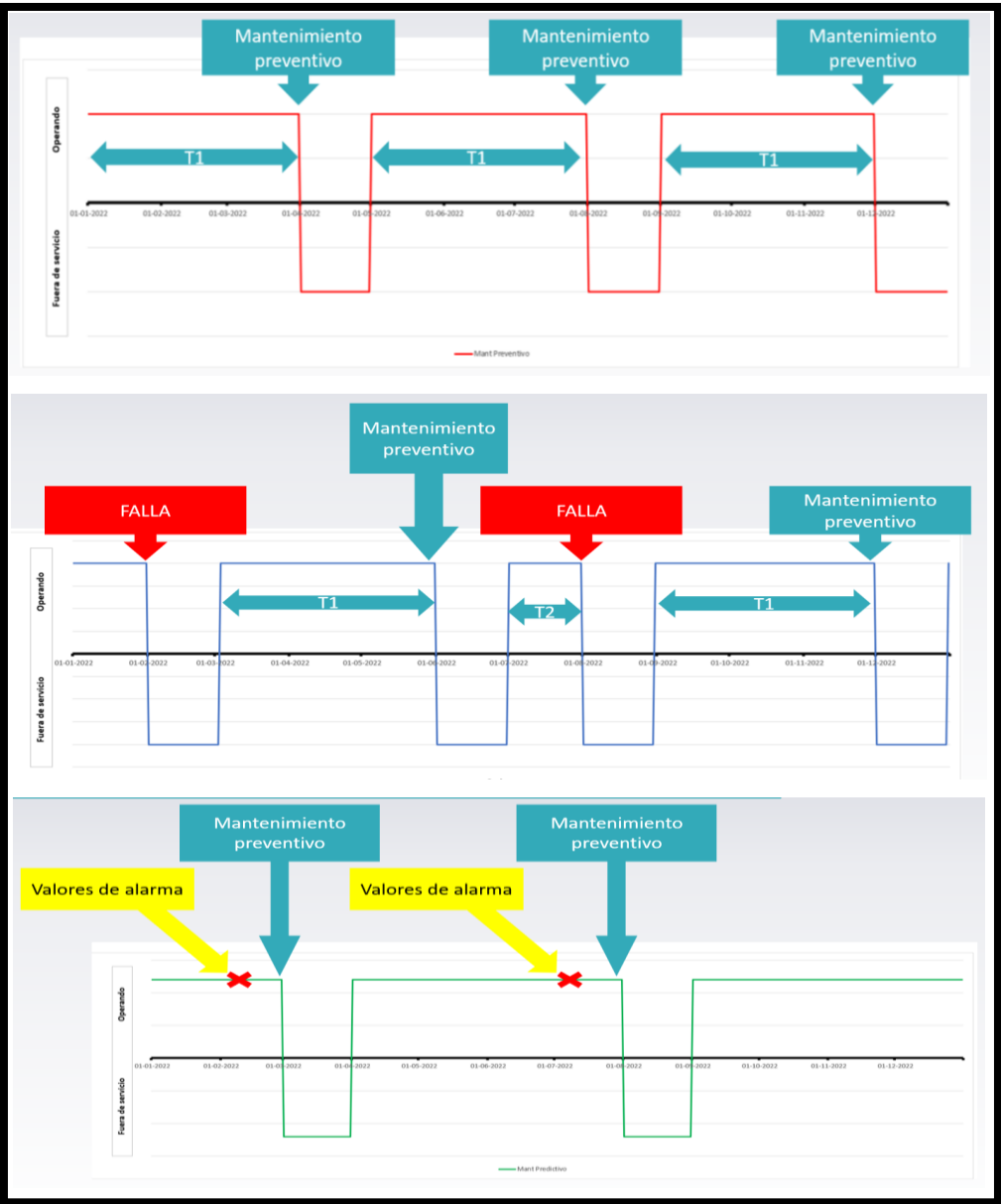


Figura 2-12: Propuesta de mejora

Elaboración propia con ejemplos de comportamiento

III. CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE PROPUESTA.

3.2. COSTOS DE MANTENIMIENTO ACTUAL

Los costos de mantenimiento son la principal variable de comparación de las estrategias de mantenimiento a utilizar, por lo que es fundamental conocer los valores actuales para evaluar los beneficios.

El contrato cuenta con un listado de componentes por cada modelo de bomba el cual separa los repuestos de baja rotación como los de alta rotación, estos son una referencia para los mantenimientos a realizar, los repuestos de baja rotación son proporcionados por la compañía y los repuestos de alta rotación son entregados por el contrato de mantenimiento y cobrados a la compañía.

3.2.1. Costos preventivos

Los costos preventivos corresponden solo a repuestos de alta rotación, los cuales en su mayoría deberían cambiarse en cada mantenimiento preventivo para asegurar un buen funcionamiento del equipo.

Los ejes son evaluados dependiendo de su desgaste, deformación y tiempo de operación para saber si corresponde cambio.

Mantenimeto
Preventivo

COD SAP	Descripción	CANT. X REP	Valor CLP C/u	Valor CLP total
33022293	BUJE ARENERO (CONICO), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	1	\$24.000	\$24.000
33022294	BUJE CAMPANA, BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	1	\$464.000	\$464.000
33022295	BUJE BOWL, BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	3	\$624.000	\$1.872.000
33022296	BUJE CENTRADOR /ARAÑA, BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	2	\$624.000	\$1.248.000
33022301	ANILLO DESGASTE CAMPANA (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	1	\$832.000	\$832.000
33022302	ANILLO DESGASTE BOWL / TAZÓN (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	3	\$832.000	\$2.496.000
33022303	ANILLO DESGASTE RODETE / IMPULSOR (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	3	\$690.000	\$2.070.000
33022304	CONO SUJECIÓN DE RODETE /IMPULSOR (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	3	\$245.000	\$735.000
33022305	EJE CABEZAL, BOMBA PEERLESS VTP M12LD D1 ETAPAS	1	\$1.792.000	\$1.792.000
33022309	EJE DESCARGA, BOMBA PEERLESS VTP M12LD DE 11 ETAPAS	1	\$2.176.000	\$2.176.000
33022311	BUJE CAJA SELLO, BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	1	\$368.000	\$368.000
SIN COD	ANILLO FIN DE CAJA (TEFLON GRAFITADO)	1	\$200.000	\$200.000
SIN COD	COPLA DE AMARRE	1	\$120.000	\$120.000
SIN COD	Sello mecanico (chesterton S10)	1	\$2.442.960	\$2.442.960
Total reparación (CLP)			\$11.433.960	\$16.839.960

Tabla 3-1: Costos de componentes preventivos

Elaboración propia con valores aproximados

3.2.2. Costos correctivos

Los costos correctivos corresponden a repuestos de baja rotación los cuales no son cambiados necesariamente en cada mantención correctiva, esto esta sujeto a evaluación considerando desgastes, desprendimientos de material, deformaciones, etc.

Mantenimeto
Correctivo

COD SAP	Descripción	CANT.	Valor CLP	Valor CLP total
33022292	Filtro,BOMBA PEERLESS VTP M12LD DE 11 ETAPAS	1	\$160.000	\$160.000
SIN COD	RODETE DESCARGA	1	\$4.100.000	\$4.100.000
33022298	CAMPANA, BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	1	\$3.370.000	\$3.370.000
33022299	BOWL / TAZÓN, BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	3	\$4.350.000	\$13.050.000
33022300	RODETE / IMPULSOR SUCCIÓN (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	2	\$4.200.000	\$8.400.000
33022310	CAJA SELLO MECANICO (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD 11 ETAPAS	1	\$2.260.000	\$2.260.000
33022297	CENTRADOR / ARAÑA (INOX 316), BOMBA PEERLESS VTP M12LD DE 3, 6 Y 11 ETAPAS	2	\$1.100.000	\$2.200.000
Total reparación (CLP)			\$19.540.000	\$33.540.000

Tabla 3-2: Costos de componentes correctivos

Elaboración propia con valores aproximados

En la metodología actual de envío de bombas a mantenimiento, las empresas de reparación de bombas deben aportar los repuestos de alta rotación, mientras que los de baja son entregados por parte de la minera y no son considerados en los costos de dichas empresas.

3.2.3. Costos históricos de mantenimiento

El contrato comenzó el 1° de mayo de 2021 y se mantiene un historial desde esa fecha, con el número de mantenciones, motivos y costos de reparación. Además, por cada equipo que se envía a reparar se entrega un informe de evaluación, armado y valorizado de trabajos, de este último se desprende la información de costos de mantención y con ello se realiza tabla histórica de gastos a lo largo de los 18 meses de contrato, teniendo en cuenta las 4 bombas que corresponden a la estación de bombeo el tambo.

Peerless M12LD - 3 Et (Sentina El Tambo)			
Bomba Vertical	Mantenimiento Preventivo		
	Cantidad	Valor	Total
Mantenimientos preventivos	18	\$ 13.808.767	\$ 248.557.810
Mantenimientos correctivos	6	\$ 35.663.261	\$ 213.979.566

Tabla 3-3: Costos históricos de reparaciones

Elaboración propia con valores recolectados

Los valores de mantención son un promedio del total gastado por el número de mantenciones, hay reparaciones que se alejan considerablemente de este valor, principalmente en mantenimientos correctivos en los cuales solo se cambia el o los componentes dañados.

La cantidad de mantenciones es elevada y esto es debido principalmente a la condición de la sentina y la estrategia actual de mantenimiento. Se debe tener en cuenta que esta estación es crítica ambientalmente por lo que se es más precavido a la hora de mantener un equipo en operación, priorizando el cumplir el plan de mantenimiento preventivo con las 1500 horas de operación como valor límite.

3.2.4. Costos estimados a 2025 con mantenimiento actual

Con el historial de reparaciones de equipos se puede definir los tiempos aproximados de funcionamiento de bombas y por ende se puede definir el número de mantenimientos, tanto correctivos como preventivos, teniendo esto en cuenta la empresa a cargo de la reparación de bombas verticales tiene una proyección hasta el año 2025 de los mantenimientos a realizar con los costos asociados a dichos mantenimientos (ver tabla 3-4), la proyección es lineal pensando en que se cumplirá los tiempos de mantenimiento preventivos definidos de 7 meses de operación por bomba lo que da un mantenimiento cada 2 meses de una bomba de la estación, la proyección de mantenimientos correctivos son de 1 al año posterior al invierno que es la etapa más peligrosa de la operación a excepción del año 1 que se considera un mantenimiento extra debido a que aún hay una bomba de la estación que no a pasado por un mantenimiento mayor.

Proyección	2023												2024												2025												Mantenciones
Mantenciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	totales
Preventivos		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1	18
Correctivos				1						1												1											1			4	

Tabla 3-4: cantidad estimada de mantenimientos

Elaborado por empresa de reparación de bombas verticales

Teniendo en cuenta las cantidades mantenimientos la proyección de gastos del contrato se hace bajo un escenario pesimista en la cual se tendrán que cambiar todos los componentes asociados a cada tipo de reparación, considerando que los mantenimientos correctivos requieren el cambio de componentes de baja como de alta rotación los valores son los siguientes:

	Costos totales a 2025
Preventivos	\$303.119.280
Correctivos	\$201.519.840
Total	\$ 504.639.120

Tabla 3-5: Costos proyectados de mantenimiento a 2025

Elaborado por empresa de reparación de bombas verticales

3.3.COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Para la evaluación de los costos de implementación del sistema se revisan dos propuestas de distinto proveedores, se tomarán en cuenta los costos de adquisición y montaje de elementos de monitoreo evaluado en 3 años.

3.3.1. Costos de implementación de sistemas y sensores

Se solicitó cotizaciones de sistemas de monitoreo a distintos proveedores de sistemas de vibraciones teniendo repuesta de la empresa SKF y de la empresa Weir minerals. Los costos representados en dólares son los siguientes:

Costos de sistema Weir minerals

Costos en dolares			
	Costo	cantidad	total
Sensores inalambricos FFT+Temp	350	16	5600
Gateway + PanellIP66 + Router celular + Power Supply	1800	1	1800
Plataforma de monitoreo (desarrollo)	2500	1	2500
Costo mensual	100	36	3600
Costos de montaje	1200	1	1200
		Total	14700

Tabla 3-6: Costos de Sistema de monitoreo Weir minerals

Elaborado con datos entregados por empresas contratista

Costos de sistema SKF

Costos en dolares			
	Costo	cantidad	total
Sensores inalambricos lmx-1	350	16	5600
Gateway	2750	1	2750
Plataforma de monitoreo (desarrollo)	0	1	0
Bases para sensor inalámbrico	122	4	488
Costo mensual	120	36	4320
Costos de montaje	10866	1	10866
		Total	24024

Tabla 3-7: Costos de Sistema de monitoreo SKF

Elaborado con datos entregados por empresas contratista

En el caso del sistema SKF se paga una membresía para la utilización de su plataforma, esto considera asistencia técnica por fallas de sistema.

En ambos sistemas los costos no consideran conexión de tableros a redes de comunicación ni a redes eléctricas, los análisis de vibraciones deben realizarse por parte de la compañía o de otra empresa contratista, no están considerados en los costos de los sistemas, estos solo consideran tecnología y servicios de montajes.

Ambos sistemas son muy similares de manera técnica, ofreciendo sistemas que permiten generar tendencias, gráficos de onda y espectrales en velocidad.

Dentro de las propuestas se seleccionó el sistema Synertrex de Weir el cual es más económico que el sistema de SKF, esto puede deberse al respaldo en experiencia en vibraciones en la marca SKF y la base de datos que cuenta de sistemas de fallas en rodamientos, además los tiempos generales de implementación son menores, en conversaciones con el cliente no se considera que la diferencia de precio por los beneficios obtenidos, destacando que los análisis los realizara un especialista externo a las marcas.



Figura 3-1: Panel y Sensor sistema de monitoreo Synertrex

Fotografías propias

3.4. PROYECCIÓN DE COSTOS DE MANTENCIÓN

Para los costos de implantación se evaluarán 3 escenarios, debido a que hay incertidumbre en el comportamiento de las variables tales como son el nivel de sólidos, PH de agua, etc. Se debe tener en cuenta que independiente del buen monitoreo pueden ocurrir circunstancias en las que se genere una falla de elementos de baja rotación aumentado los costos finales de mantenimiento.

Debido a que se cuenta con proyecciones de mantenimiento a 2025 se tomaran como comparación para el análisis de costo.

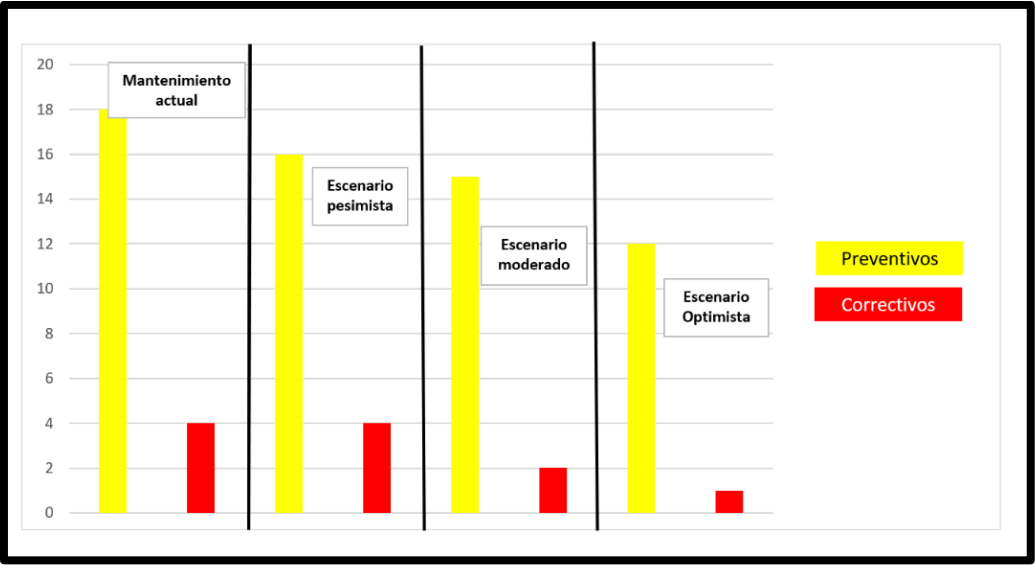


Gráfico 3-1: Número de mantenciones por escenarios

Elaboración propia con estimaciones de comportamiento

Escenario pesimista: en este caso no se logra el objetivo de disminuir la cantidad de mantenimientos correctivos y solo se logra bajar la tasa de mantenimientos preventivos en dos unidades. En este caso, el sistema mantendría costos muy similares a los obtenidos con el mantenimiento actual, logrando una leve mejora debido a que los equipos serán monitoreados de manera constante y suponiendo que los tiempos definidos para mantenimiento actuales son muy cercanos a valores los correctos.

Escenario moderado: Este escenario propone una tasa de cambio por mantenimiento preventivo de 3 meses de operación continua aproximadamente, y logra disminuir los mantenimientos correctivos a 2 ocasiones para tener mayor holgura en caso de eventualidades, es el escenario que tiene más opciones de cumplirse, acercándose a la realidad de los mtbf de otras estaciones con los equipos de la misma marca y modelo, utilizando los valores comparativos de otras estaciones para definir los tiempos de operación aproximados que se podrían lograr con un correcto monitoreo.

Escenario optimista: En este escenario se logra tener una tasa de cambio preventivo de 4,4 meses de operación continua por equipo, es decir, desde el montaje hasta el cambio del equipo transcurre un año, lo que para la estación son aproximadamente 3200 horas operando, esta situación a ocurrido actualmente con uno de los equipos de la sentina. Además, el escenario propone solo 1 mantenimiento correctivo a lo largo de los 3 años evaluados, en caso de alguna situación anómala que lo provoque.

3.5.EVALUACIÓN DE INVERSIÓN

Luego de evaluar el periodo de 3 años se realiza el cálculo promedio en mantenimientos, se calcula el ahorro que se genera anualmente a precios actuales y con eso el tiempo en el que se recupera la inversión y la rentabilidad de esta.

	Proyección	2023												2024												2025													
	Mantenciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
Mantenimiento actual	Preventivos		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		
	Correctivos				1						1												1												1				
Escenario pesimista	Preventivos		1			1		1		1		1		1		1					1		1		1		1		1		1		1		1		1		
	Correctivos				1						1												1												1				
Escenario moderado	Preventivos	1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1	
	Correctivos											1																								1			
Escenario optimista	Preventivos	1		1		1		1						1		1		1		1							1		1		1		1		1		1		1
	Correctivos																							1															

	Proyección	Mantenciones	Costos totales	TOTAL
	Mantenciones	totales		
Mantenimiento actual	Preventivos	18	\$ 303.119.280	\$504.639.120
	Correctivos	4	\$ 201.519.840	
Escenario pesimista	Preventivos	16	\$ 269.439.360	\$470.959.200
	Correctivos	4	\$ 201.519.840	
Escenario moderado	Preventivos	15	\$ 252.599.400	\$353.359.320
	Correctivos	2	\$ 100.759.920	
Escenario optimista	Preventivos	12	\$ 202.079.520	\$252.459.480
	Correctivos	1	\$ 50.379.960	

Tabla 3-8: Tabla general de posibles escenarios

Elaboración propia con datos históricos de comportamiento

	TOTAL	Costos anuales estimados	Ahorro anual	Inversión total	Recuperación de inversión (años)	% retanbilidad de inversión
Mantenimiento actual	\$ 504.639.120	\$ 168.213.040	\$ -	\$ -		
Escenario pesimista	\$ 470.959.200	\$ 156.986.400	\$ 11.226.640	\$ 13.230.000	1,2	85%
Escenario moderado	\$ 353.359.320	\$ 117.786.440	\$ 50.426.600	\$ 13.230.000	0,3	381%
Escenario optimista	\$ 252.459.480	\$ 84.153.160	\$ 84.059.880	\$ 13.230.000	0,2	635%

Tabla 3-9: Evaluación de inversión

Elaboración propia con datos de costos recolectados

Como se puede observar, la inversión a realizar es pequeña respecto a los costos anuales de mantenimiento, de esta manera incluso en un escenario pesimista la inversión tendría un buen retorno de 1,2 años.

Un escenario cercano al moderado es el que se debe buscar, de esta manera se lograría recuperar la inversión en poco más de 3 meses, ahorrando en mantenimiento cerca de 50 millones anualmente.

3.6. FLUJO DE CAJA DE PROYECCIONES

Para un mayor detalle se realiza una evaluación de flujo de caja de los escenarios posibles, de esta manera se puede conocer el costo del proyecto a día de hoy y a futuro para la minera, además se deben manejar algunos indicadores de evaluación de proyecto por lo que es importante aclarar los siguientes conceptos:

3.6.1. Valor presente

El valor presente es un concepto financiero utilizado en la evaluación de proyectos de ingeniería para determinar el valor actual de los flujos de efectivo futuros que se generarán como resultado del proyecto. Se refiere al valor actual de los flujos de efectivo futuros, ajustado por la tasa de descuento.

En otras palabras, el valor presente representa el valor actual de los flujos de efectivo que se espera que el proyecto genere en el futuro, si se descuentan a una tasa de interés específica para reflejar el costo de oportunidad de invertir en el proyecto. Este valor es importante porque permite a los ingenieros y a los inversionistas comparar los flujos de efectivo futuros del proyecto con los costos actuales de inversión, y determinar si el proyecto es una inversión rentable.

Para el caso de estudio se utilizarán los ahorros como fuentes de ingreso dentro de la evaluación de los escenarios.

3.6.2. Valor futuro

El valor futuro representa el valor que se espera que los flujos de efectivo del proyecto tengan en el futuro, si se invierten a una tasa de interés específica. Este valor es importante porque permite a los ingenieros y a los inversionistas comparar el valor presente de los flujos de efectivo con el valor futuro, y determinar si el proyecto es una inversión viable.

3.6.3. Tasa de descuento e interés

La tasa de descuento se refiere a la tasa utilizada para calcular el valor presente de los flujos de efectivo futuros de un proyecto. Es decir, es el porcentaje utilizado para descontar los flujos de efectivo futuros para determinar su valor actual. La tasa de descuento se

utiliza para reflejar el costo de oportunidad de invertir en el proyecto, lo que significa que es la tasa que un inversionista podría esperar ganar en una inversión alternativa con un riesgo similar.

La principal diferencia entre la tasa de interés y la tasa de descuento es que la primera se utiliza para calcular el valor futuro de los flujos de efectivo, mientras que la segunda se utiliza para calcular el valor presente de los flujos de efectivo. Además, la tasa de interés es una medida del costo o beneficio de utilizar el dinero, mientras que la tasa de descuento es una medida del costo de oportunidad de invertir en un proyecto.

En la industria minera, la tasa de descuento que se utiliza comúnmente en Chile es la tasa de descuento WACC (Weighted Average Cost of Capital), que se calcula en función del costo de capital de la empresa y se ajusta para reflejar el riesgo específico del proyecto. Para el caso de la minera de estudio la tasa de descuento WACC utilizada es de 14% en promedio.

3.6.4. VAN

El VAN o valor actual neto es una fórmula que permite actualizar los cobros y pagos de un proyecto para conocer si al final de este se termina ganando o perdiendo dinero.

3.6.5. IVAN

Es una relación entre la ganancia expresada en valores VAN y la inversión inicial del proyecto, utilizando para comparar distintos tipos de proyectos.

3.6.6. PRI

Es el tiempo en periodos que deben transcurrir para recuperar la inversión del proyecto, en otras palabras, cuando los beneficios ya pagaron la inversión.

3.6.7. TIR

Mide la rentabilidad media del proyecto, en teoría para tomar la decisión de realizar un proyecto la TIR debe ser mayor a la tasa de descuento aplicada, permite comparar proyectos con los mismos periodos de tiempo.

3.6.8. Flujos de escenarios

El flujo de caja realizado para el caso de estudio omite elementos importantes, debido a que se desconoce el impacto económico del proyecto para la empresa en general y no se cuenta con información financiera, tampoco con información impositiva, por lo que no se puede calcular impuestos en flujo de caja, por otro lado, las condiciones físicas de donde se realizaran los montajes de sensores son adversas, presentando condiciones de nieve, lluvia, bajas y altas temperaturas, etc. Esto genera incertidumbre de la durabilidad de los componentes no permitiendo definir valores de depreciación. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Pesimista				
Conceptos/Periodos	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
(-) Inversión inicial	\$-9.002.100			
(+) Ahorro anual respecto a condición inicial		\$12.573.837	\$ 14.082.697	\$ 15.772.621
(-) Costos de mantenimiento de sistema		\$ -90.832	\$ -101.732	\$ -113.940
Flujo neto	\$-9.002.100	\$12.483.005	\$ 13.980.965	\$ 15.658.681

Evaluación de proyecto			
Tasa de decuento Wacc		14%	
VAN	\$ 23.387.881	PRI	1
TIR	136%	IVAN	0,38490448

Moderado				
Conceptos/Periodos	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
(-) Inversión inicial	\$-9.002.100			
(+) Ahorro anual respecto a condición inicial		\$56.477.792	\$ 63.255.127	\$ 70.845.742
(-) Costos de mantenimiento de sistema		\$ -90.832	\$ -101.732	\$ -113.940
Flujo neto	\$-9.002.100	\$56.386.960	\$ 63.153.395	\$ 70.731.803

Evaluación de proyecto			
Tasa de decuento Wacc		14%	
VAN	\$ 137.306.627	PRI	1
TIR	636%	IVAN	0,06556202

Optimista				
Conceptos/Periodos	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
(-) Inversión inicial	\$-9.002.100			
(+) Ahorro anual respecto a condición inicial		\$94.147.066	\$105.444.713	\$118.098.079
(-) Costos de mantenimiento de sistema		\$ -90.832	\$ -101.732	\$ -113.940
Flujo neto	\$-9.002.100	\$94.056.234	\$105.342.982	\$117.984.139

Evaluación de proyecto			
Tasa de decuento Wacc		14%	
VAN	\$ 235.048.082	PRI	1
TIR	1056%	IVAN	0,03829897

Tabla 310: Flujos de cajas

3.7. ESTIMACIONES EN MEJORA DE DISPONIBILIDAD SEGÚN ESCENARIOS

El parámetro de mantenimiento que se busca mejorar con la propuesta es principalmente la disponibilidad de equipos, lo que asegura la impulsión y disminuye los costos y el riesgo de contaminación ambiental al que está sujeta la estación.

Las bombas verticales, como se mencionó anteriormente en el documento, cuentan con mantenimientos preventivos (cambio de componentes de alta rotación) con programación anticipada a la falla y mantenimientos correctivos (cambio de componentes de baja rotación) por imprevistos o falla repentinas.

Debido a la operación, y el historial de funcionamiento de los equipos se considera que operan en un sistema fraccionado por lo que se realizó el cálculo individual de cada bomba.

Para efectos de cálculo se promediará el tiempo de operación de los equipos considerando el total del tiempo evaluado dividido por el número de mantenciones, además se considera que el tiempo de reparación es constante y sigue siendo de 1641 horas desde que el equipo es desmontado hasta que vuelve a operación, estas consideraciones son para facilitar el cálculo debido a las incertidumbres que se pueden presentar y que no hay como determinarlas.

Cabe destacar que los escenarios consideran mantenimientos correctivos como manera de aceptación de incertidumbre del proceso y consideración de falla humana para no detectarlas fallas a tiempo o una mala definición de tiempo aceptable de operación.

Con las consideraciones mencionadas las disponibilidades estimadas se pueden ver en la siguiente tabla:

	Capacidad (m3/h)	Calculada (pasada)	Estimada por proyección	Escenario Pesimista	Escenario moderado	Escenario optimista
Bomba 1	316	73%	66%	69%	73%	80%
Bomba 2	316	63%	66%	69%	73%	80%
Bomba 3	316	54%	66%	69%	73%	80%
Bomba 4	316	57%	66%	69%	73%	80%

Tabla 3-11 Disponibilidad de bombas por escenarios

Elaboración propia con datos de escenarios

Con las disponibilidades mostradas se realiza el cálculo de disponibilidad fraccionada para estimar la disponibilidad de la estación por completo los resultados se pueden ver en la tabla 3-10, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$Rs(t) = \sum_{i=1}^n Ri(t) * I_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n I_i\right) * \prod_{i=1}^n Ri(t)$$

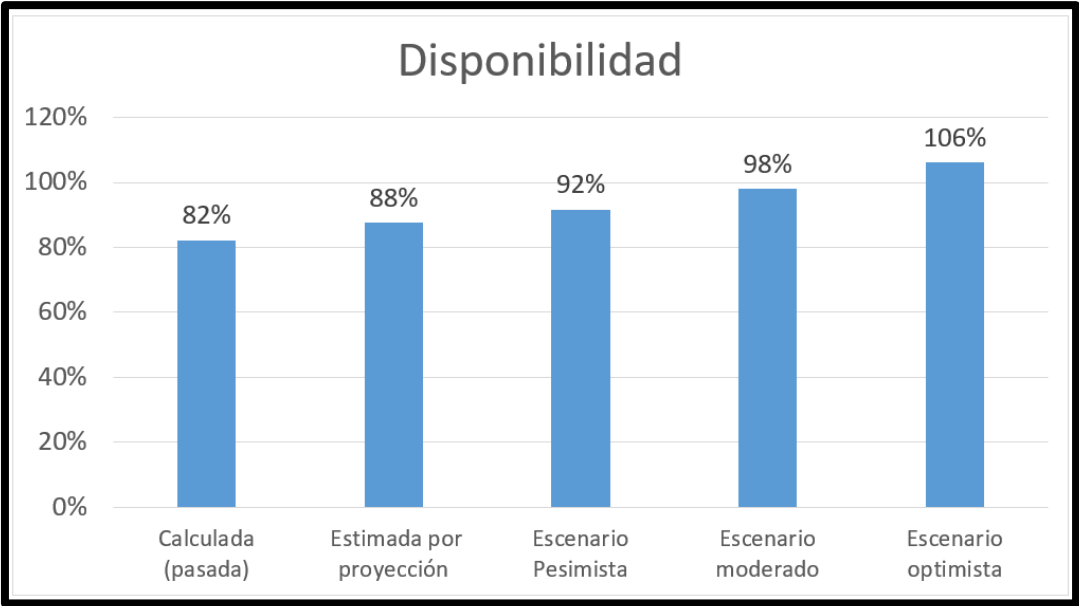


Gráfico 3-2: Disponibilidades según escenarios

Elaboración propia con valores establecidos por escenarios

Los cálculos fueron realizados bajo la siguiente tabla y formulas:

	Capacidad (m3/h)	A	(1-A)
Bomba 1	316	69%	31%
Bomba 2	316	69%	31%
Bomba 3	316	69%	31%
Bomba 4	316	69%	31%

ESCENARIOS						
N°	Eq1	Eq2	Eq3	Eq4	Prob. Ocurrencia	Capacidad Posible
1	1	1	1	1	22,667%	1264
2	1	1	1	0	10,184%	948
3	0	1	1	1	10,184%	948
4	1	0	1			
5	1	1	0	=P11*P12*Q13*P14		
6	1	1	0	0	4,575%	632
7	0	1	1	0	4,575%	632
8	0	0	1	1	4,575%	632
9	1	0	0	1	4,575%	632
10	1	0	1	0	4,575%	632
11	0	1	0	1	4,575%	632
12	1	0	0	0	2,056%	316
13	0	1	0	0	2,056%	316
14	0	0	1	0	2,056%	316
15	0	0	0	1	2,056%	316
16	0	0	0	0	0,924%	0

A sistema = 92,0%

Tabla 3-12 Formulas de disponibilidad de bombas por escenarios

Elaboración propia

	Capacidad (m3/h)	A	(1-A)
Bomba 1	316	69%	31%
Bomba 2	316	69%	31%
Bomba 3	316	69%	31%
Bomba 4	316	69%	31%

ESCENARIOS						
N°	Eq1	Eq2	Eq3	Eq4	Prob. Ocurrencia	Capacidad Posible
1	1	1	1	1	22,667%	1264
2	1	1	1	0	10,184%	948
3	0	1	1	1	10,184%	948
4	1	0	1	1	10,184%	948
5	1	1	0	1	10,184%	948
6	1	1	0	0	4,575%	632
7	0	1	1	0	4,575%	632
8	0	0	1	1	4,575%	632
9	1	0	0	1	4,575%	632
10	1	0	1	0	4,575%	632
11	0	1	0	1	4,575%	632
12	1	0	0	0	2,056%	316
13	0	1	0	0	2,056%	316
14	0	0	1	0	2,056%	316
15	0	0	0	1	2,056%	316
16	0	0	0	0	0,924%	0

=SUMAPRODUCTO(\$S19:\$S34;T19:T34)/D7

SUMAPRODUCTO(matriz1; [matriz2]; [matriz3]; [matriz4]; ...)

Tabla 3-13 Formulas de disponibilidad de bombas por escenarios

Elaboración propia

Como se puede observar a pesar de que los valores individuales de cada bomba no superan el 80% de disponibilidad, al realizar el cálculo de la estación bajo los criterios en las que la misma opera se puede lograr valores significativos en la estación como conjunto, esto es gracias a que el diseño solo necesita 3 bombas operativas al mismo tiempo dando espacio a la rotación de equipos, aclarar que si bien el cálculo entrega un valor de disponibilidad superior al 100% esto no es real y solo se logra debido a la fórmula de cálculo fraccionado, la realidad es que la estación debería lograr acercarse a esos valores bajo ese escenario.

3.8. CONCLUSIÓN.

La industria minera cuenta con sistemas robustos para el control de variables operacionales tales como flujos, presión, corriente, etc. A pesar de ello, muy pocas veces son utilizados para medir variables vibratorias que en equipos rotativos son fundamentales para la detección correcta de fallas.

El mantenimiento predictivo puede ser de gran aporte a reducir los costos de mantenimiento, en equipos de grandes envergaduras su implementación es poco significativa respecto a los grandes beneficios que puede tener a mediano y largo plazo.

Dentro de los escenarios propuestos se busca lograr cumplir con el escenario moderado el cual es abordable para un comienzo de la estrategia, a medida que este avance y no ocurran anomalías operacionales se volverá más confiable permitiendo lograr aun mejores resultados de los estimados.

Actualmente a modo de prueba uno de los cuatro equipos se encuentra con una estrategia de mantenimiento predictivo, una vez que supero las horas de operación definidas por el preventivo se decidió mantener operando, evaluando su retiro con la medición vibratoria, de esta manera un equipo que tenía definida ser enviado a mantención a las 1500 horas de operación ya alcanzo las 3000 horas y vibratoriamente está cercano al cambio después de 12 meses de su montaje.

Estos resultados demuestran que es muy probable conseguir que se cumpla el escenario moderado, teniendo ya un equipo que logro cumplir con el periodo de cambio de un año del escenario optimista, además, como se puede observar en la tabla 3-9 ya hay equipo que alcanza 73% de disponibilidad que justamente es el valor que se busca alcanzar en las 4 bombas según este escenario.

En el caso de estudio el identificar que esta estación tenía un comportamiento anómalo y sus bombas estaban fallando más de lo normal, permite lograr ahorros significativos que cumpliéndose el escenario moderado podrían alcanzar más de 50 millones de pesos anuales, lo que equivale a un tercio de la compra de una bomba, dicho ahorro se podría utilizar en la adquisición de nuevos equipos que permitan aumentar la disponibilidad y confiabilidad de la estación, estableciendo que la implementación de la estrategia es viable y logra ser beneficiosa para la gerencia y los activos involucrados.

La norma ISO 10816-7 permite evaluar la condición de los equipos de manera flexible ajustando los valores de alarma y detención según la operación de los equipos y el historial que se logre formar, por lo que es importante mantener retroalimentación constante del proceso para de esta forma lograr ser cada vez mas precisos en la detección de fallas.

Ser consciente de las variables de mantenimiento y reconociendo las condiciones en las que se encuentran los equipos nos permite establecer estrategias que permiten disminuir los costos, aumentando el beneficio para la empresa.

3.9. Bibliografía

LABORATORIO DE VIBRACIONES MECÁNICAS, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA FACULTAD DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, Análisis de vibraciones de máquinas, curso de análisis de vibraciones, categoría 2, ISO 18436-2, Año 2022, Concepción.

ISO 10816-7 vibración mecánica - Evaluación de vibración en máquinas por mediciones en piezas no giratorias, Parte 7: Bombas rotodinámicas para aplicaciones industriales, incluidas las mediciones en ejes giratorios, documentos electrónicos o partes de ellos. Reino unido, año 2009.

ADASH, Productos Adash, [consulta realizada 08 de abril del año 2023], disponible en: www.adash.com