

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO CHILE



**“EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y SOLUCIÓN A
PROBLEMA DE VIBRACIONES EN EL DUCTO
DE DESCARGA DE LAS BOMBAS DE
RECUPERACIÓN DE AGUA INDUSTRIAL DE
UNA PLANTA PROCESADORA DE RELAVES”**

FRANCISCO EDUARDO ALBAYAY RUVIÑO

**MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO.**

PROFESOR GUÍA: FERNANDO ROJAS GONZÁLEZ

PROFESOR CORREFERENTE: GUILLERMO GONZÁLEZ BAQUEDANO

DICIEMBRE - 2015

Indice

Resumen	iv
Abstract	v
Glosario	vi
Introducción.....	viii
Capítulo 1: Operación de Minera Valle Central.	1
1.1 Extracción de relaves	2
1.2 Planta flotación colectiva.....	3
1.3 Planta de flotación selectiva.....	5
1.4 Plantas de secado de productos finales	5
1.5 Planta de Recuperación de Agua Industrial (RAI)	7
1.5.1 Sala de Bombas de Recuperación de Agua Industrial (RABI)	10
1.5.2 Bomba KSB 250-600.....	17
Capítulo 2: Problema detectado	24
Capítulo 3: Revisión de literatura respecto de vibraciones en ductos.	28
Capítulo 4: Medición y análisis de las vibraciones en las bombas de la sala 2.	32
4.1 Vibración de ducto de succión y de descarga de bomba RABI 7.....	34
4.2 Vibración en porta-rodamientos de bomba RABI 7	36
4.3 Vibración en patas de bomba RABI 7	39
4.4 Vibración en ducto de succión y descarga de bomba RABI 8	41
4.5 Vibración en portarodamientos de bomba RABI 8	43
4.6 Vibración en patas de bomba RABI 8	45
4.7 Vibración de fondo de bomba RABI 8	46
Capítulo 5: Determinación de frecuencias naturales en ducto de descarga de las bombas presentes en la sala 2.	48
5.1 Ensayo de respuesta en frecuencia	48
5.2 Modelo FEM del ducto descarga de las bombas RABI de la sala de bombas 2.....	50
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones del análisis de vibraciones.	53
Capítulo 7: Mediciones posteriores a implementación de recomendaciones realizadas.	55
7.1 Vibración en el ducto succión y descarga de la bomba RABI 6	55

7.2 Vibración en portarodamientos de la bomba RABI 6.....	58
7.3 Vibración en el ducto de succión y descarga de la bomba RABI 8.....	60
7.4 Vibración en el portarodamientos de la bomba RABI 8.....	62
Conclusión y Recomendación Final.....	70
Bibliografía.....	71
Anexo A: Cálculo hidráulico estación de reimpulsión de agua industrial recuperada (planta RABI).....	72
Anexo B: Datos recolectados en terreno en mediciones realizadas en equipos de la sala de bombas 2.....	78

Resumen

La puesta en marcha del tercer espesador de una planta procesadora de relaves de mineral de cobre en Chile, generó un aumento del 50% en la capacidad de agua recuperada, de 3 000 m³/h (833 l/s) a 4 500 m³/h (1 250 l/s). Para generar la impulsión de esta agua a la planta se construyó una nueva sala de bombas que aumentó a 8 unidades las 5 existentes anteriormente para dicha labor. Durante la puesta en marcha de las 3 nuevas unidades, se detectaron problemas de vibraciones excesivas que podían estar relacionados con 3 fallas ocurridas en las mismas bombas (un corte de eje y dos roturas de machón de acoplamiento), ante la aparición de estas vibraciones se arriesgaba el colapso del piping de las bombas y la posterior inundación del sector (hecho que había ocurrido con anterioridad en la sala 1 por el colapso de una válvula). Por lo que se optaba por dejar fuera de operación los equipos que presentaban altos niveles de vibración, generando mermas en la recuperación de agua de la planta y a raíz de esto, pérdidas de producción de concentrados.

Para dar solución al problema, el suscrito desarrolló una investigación especial para determinar las causas de las vibraciones presentes en el ducto. Se realizaron mediciones y análisis de vibraciones para diferentes configuraciones de flujo, se realizó un ensayo de respuesta en frecuencia ante excitación tipo impacto y se modeló en software FEM el ducto de descarga de las bombas para la determinación de sus frecuencias naturales de manera de descartar resonancias estructurales.

Se identificó que el origen de las vibraciones es producido por la obstrucción con materiales extraños en la bomba, específicamente el rodete y la cámara de succión. Se generó una metodología de inspección periódica, en base al análisis de vibraciones, para programar eventuales limpiezas en los componentes de las bombas.

El resultado del trabajo desarrollado fue disminuir los niveles de vibración hasta un 89% respecto a la condición inicial y junto con ello, alcanzar la operación normal de la planta de manera continua en el tiempo.

Keywords: vibración de piping, bombas carcasa partida axialmente, vibraciones mecánicas, planta de recuperación de agua.

Abstract

Commissioning of the third thickener in a copper mineral tailings processing plant in Chile, generated a 50% increase in recovered water capacity from 3 000 m³/h (833 l/s) to 4 500 m³/h (1 250 l/s). To pump the water to the plant, a new pump-house was built which increased to 8 units above 5 existing for this work. During the launch of the 3 new units, problems of high vibrations levels were detected, that could be related to three failures occurred in the same pumps (one cut-axis and two breaks the coupling) with the appearance of these vibrations it was risked the collapse of the piping of pumps and subsequent flooding in the sector (a fact that had occurred earlier in the room 1 by the collapse of a valve) So they decided turn out of service equipment with high levels of vibration, causing decline in water recovery plant and because of this, concentrate production losses.

To solve the problem, the autor developed a special investigation to determine the main cause of the vibrations present in the piping. Vibration measurements and analysis for different flow configurations were performed, frequency response to impact excitation test was performed and also modeling the piping in FEM software for natural frequencies determinations, in order to rule out structural resonances.

It was identified that the source of vibration is produced by foreign material clogging the pump, impeller and suction chamber specifically. Periodic inspection methodology was generated, based on vibration analysis, for programming at eventual cleaning pump components.

As a result of work developed, it was possible to reduce vibration levels up to 89% and together with it reach normal operation of the plant continuously over time.

Keywords: piping vibration, Split case pumps, mechanical vibrations, water recuperation plant.

Glosario

Mineral de cobre: Término minero que se refiere a la roca mineralizada que es económicamente viable su extracción y procesamiento para la separación del cobre en ella contenido.

Relave minero: Término minero que se refiere al residuo compuesto por roca molida, minerales y agua, producido como resultado de la extracción de la mayor fracción de minerales en el proceso de flotación.

Ley de cobre: Término minero utilizado para referirse a la fracción de cobre fino en peso presente en una muestra de mineral.

Flotación de cobre: Proceso metalúrgico encargado de generar la recolección de las partículas de mayor contenido de cobre a través de la aireación de las mismas.

Concentrado de cobre: Término minero utilizado para individualizar al producto obtenido de la flotación del mineral de cobre.

Pulpa mineral: Término minero utilizado para individualizar a la mezcla de algún mineral molido con agua.

Celda de flotación: Equipo de proceso en el cual se realiza la flotación del mineral.

Flotación Rougher (Flotación gruesa): Primera etapa del proceso de flotación, a ella ingresa el total del producto procesado en la etapa de molienda, su labor es flotar la mayor cantidad de partículas posibles.

Pitón: Equipo mecánico utilizado para la transformación de energía de presión del fluido en energía de velocidad durante una descarga al ambiente, también llamado monitor hidráulico.

Monitoreo Hidráulico: Nombre del proceso en el cual se utilizan los monitores hidráulicos (pitones) para realizar la fluidización de los relaves secos depositados en el tranque a explotar, también llamado “Pitoneo”.

Hidrociclón: Equipo de proceso utilizado para generar la separación de la fracción gruesa y la fracción fina en un material sólido a granel fluidizado con agua.

Espesador: Equipo de proceso utilizado para la recuperación de agua en plantas mineras, su principio de funcionamiento es generar la sedimentación y extracción de las partículas presentes en la pulpa minera que ingresa a él.

Molino de bolas: Equipo de proceso utilizado para reducir el tamaño de la pulpa mineral que ingresa a él.

MVC: Sigla que hace referencia a la empresa Minera Valle Central S.A.

Piping: Trazado de tuberías en una conducción hidráulica.

Vibración RMS: Parámetro estadístico utilizado como indicador del nivel de una señal de vibración mecánica, matemáticamente corresponde al promedio cuadrático de los datos recolectados en un período de tiempo determinado, puede ser en unidades de aceleración, velocidad o desplazamiento. En el desarrollo de este trabajo se utilizan los valores de vibración rms en velocidad.

Espectro de vibraciones: Representación en el dominio de las frecuencias de una señal de vibración.

Introducción

Durante Julio de 2012 se realizó la puesta en marcha del tercer espesador de la planta procesadora de relaves de Minera Valle Central (MVC) junto con esto comenzó la operación de la nueva sala de bombas de recuperación de agua industrial (RABI), durante la operación de esta última se generaron 3 fallas particulares en las bombas presentes (dos roturas de machones de acoplamiento y una fractura de eje), se evidenciaban altos niveles de vibración en el piping de descarga de las bombas y en el pasillo superior de la sala. Para identificar la causa y proponer una solución al problema presente se le encomendó al área de mantenimiento predictivo de la época, desarrollar un estudio. El área de mantenimiento predictivo¹ estaba compuesta por:

- Miguel González Gálvez con el cargo de mecánico de terreno, quien tuvo a cargo realizar las mediciones en terreno y elaborar informes con tablas resumen con valores rms y gráficos de señales temporales y espectros.
- Francisco Albayay Ruviño con el cargo de jefe de mantenimiento predictivo, estuvo encargado de definir el trabajo a realizar, revisar y analizar los datos obtenidos en terreno, establecer la solución al problema presentado y elaborar un informe final respecto del estudio realizado.

Se estableció como alcance del estudio la determinación de la causa de las vibraciones presentes en la sala de bombas N°2 y la propuesta de solución al problema. Se excluyó del alcance la implementación de las recomendaciones dado que eran responsabilidad del área de ingeniería de MVC. Cabe recalcar que el estudio se realizó haciendo uso de los recursos disponibles en el momento y se debía realizar de manera urgente porque la sala de bombas se encontraba en operación. Si bien el estudio se realizó en la sala de bombas N°2, los resultados son extensibles a la sala de bombas N°1 dado que se trata de los mismos equipos con configuraciones de piping similares, cabe mencionar que anteriormente se reportaban problemas de vibraciones en ductos y bombas presentes en la sala de bombas N°1 donde la solución adoptada era la rigidización del ducto de descarga y el reemplazo de los equipos de bombeo.

¹ El área de “Mantenimiento Predictivo” fue creada en Junio de 2012 y se encargaba del monitoreo de condición de los principales equipos rotativos de la planta.

El objetivo del estudio fue dar solución al problema de vibraciones en el piping de descarga de la sala de bombas N°2. Para esto se desarrollaron las siguientes actividades inicialmente:

- Adquisición de señales de vibración y flujo en distintos sectores de la sala de bombeo.
- Revisión bibliográfica respecto a vibraciones de piping, diseño de la sala de bombas, etc.
- Determinación de formas naturales de vibración de piping presente en la sala de bombas.

Las limitantes existentes en la realización del estudio fueron:

- Equipo adquisidor y procesador de señales de vibración SKF Microlog Analyzer GX modelo CMXA75: Cuenta con un canal de medición, el equipo está diseñado para monitoreo de condición de rodamientos en maquinaria rotativa, el programa de visualización no permite la exportación de los datos para la realización de análisis en otro software.
- Instrumentación disponible para la obtención de parámetros operacionales: Se contaba con el dato de flujo volumétrico y consumo de corriente en el motor eléctrico, ambos datos operacionales permitían solo la visualización en tiempo real del parámetro.
- No se contaba con software CFD que fuese capaz de simular en el dominio del tiempo el comportamiento de la bomba con un álabe obstruido.
- No se contaba con registros históricos de niveles de vibración en equipos y ductos presentes en la sala de bomba 1.

El presente trabajo está dividido en 9 capítulos de la siguiente forma:

Capítulo 1: Descripción general del proceso desarrollado en la planta de tratamientos de relaves de MVC.

Capítulo 2: Operación de la planta de recuperación de agua industrial (RAI). Se muestran los principales equipos presentes, se enfatiza la operación de las bombas de re-impulsión de agua industrial (RABI), se describen las características mecánicas e hidráulicas de la bomba KSB Omega 250-600A presente en el sector.

Capítulo 3: Descripción del problema detectado, se presenta la metodología a utilizar para el análisis del fenómeno detectado, se dan a conocer las principales limitantes y problemáticas presentes.

Capítulo 4: Marco teórico en base al estudio de la literatura existente respecto al tema de vibraciones en piping.

Capítulo 5: Se presentan los datos obtenidos en campo en las mediciones para determinar el estado de vibraciones de los equipos presentes en la sala de bombas 2.

Capítulo 6: Determinación de modos naturales de vibración del sistema, se cotejan los resultados obtenidos del ensayo de impacto con los obtenidos mediante el análisis de elementos finitos realizado.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones respecto del análisis de los datos obtenidos en campo.

Capítulo 8: Datos obtenidos en campo en las mediciones de vibraciones realizadas posterior a la implementación de las recomendaciones sugeridas en el capítulo anterior, se genera un resumen comparativo para la nueva bomba instalada en postura 8 (RABI 8) y se complementa con datos obtenidos del informe de mantenimiento de la bomba retirada de la postura 8.

Capítulo 9: Conclusiones finales del estudio, se muestran informes e inspecciones realizadas con posterioridad al estudio y se comparan los niveles de vibraciones anteriores y posteriores a las implementaciones de las mejoras propuestas.

Capítulo 1: Operación de Minera Valle Central.

Minera Valle Central (MVC) realiza el tratamiento de relaves mineros para la obtención de cobre y molibdeno. La operación de MVC consta del procesamiento de 2 tipos de relaves, uno es el del mineral actualmente procesado en la división El Teniente de Codelco y otro es el relave contenido en el tranque Colihues, tranque de relaves antiguo que sirvió como depósito del residuo de la producción de la división El Teniente en los años 80'.

Desde el punto de vista del proceso, la operación de la planta de MVC está dividida en 5 grandes zonas, mostradas en la Figura 1.1:

- Extracción de relaves: Es la zona donde se realiza la extracción y envío a planta de los relaves contenidos en el tranque Colihues.
- Planta de flotación colectiva: Considera los procesos de molienda, flotación y limpiezas respectivas necesarias para llevar a cabo la flotación de concentrados de cobre y molibdeno.
- Planta de flotación selectiva: Considera los procesos de flotación necesarios para separar el concentrado de molibdeno del concentrado de cobre.
- Plantas de secado de productos finales: Considera el retiro del agua utilizada para transporte del producto final.
- Planta recuperación de agua industrial: Considera los equipos necesarios para la reimpulsión del agua retirada al relave antes del envío a su depositación final.

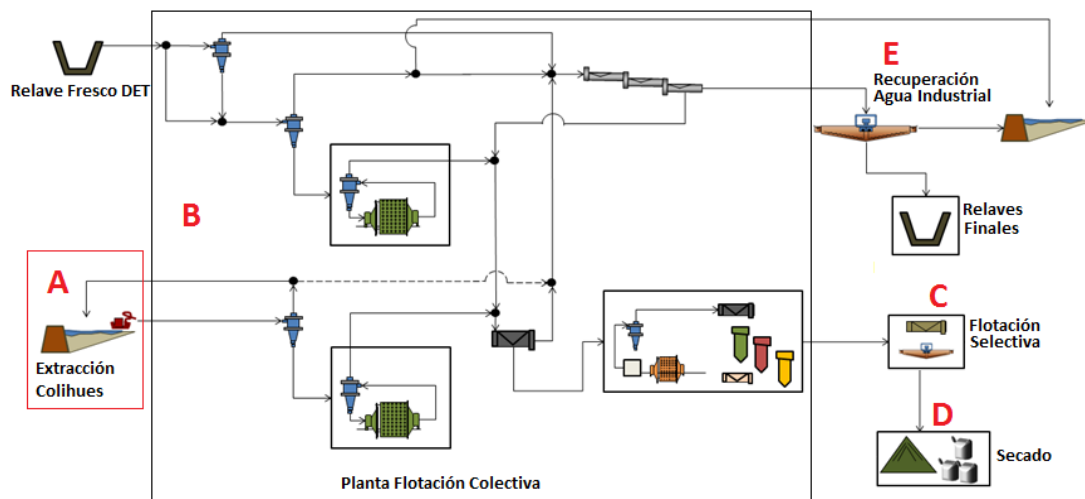


Figura 1.1, Diagrama esquemático del proceso de MVC

1.1 Extracción de relaves

Para realizar la extracción de los relaves depositados en el tranque Colihues se realiza un proceso denominado monitoreo hidráulico, el que consiste en la fluidización del relave seco compactado en el tranque. Para realizar los cortes y servir como medio de transporte se utiliza agua con un consumo total del orden de 500 l/s (1 800 m³/h), esta agua es impulsada por bombas multietapas trabajando en paralelo, se genera una presión del orden de 500 psi (34,5 bar) en la matriz de descarga, el flujo es conducido hacia dispositivos llamados pitones quienes son los encargados de transformar la energía contenida en forma de presión en energía de velocidad, el flujo de masa de agua al impactar con el talud del tranque genera el desprendimiento del material que lo conforma, de esta manera se crea la pulpa que es conducida mediante meandros, generados con excavadoras, hacia sumideros, presentes en el mismo tranque, en donde bombas centrífugas son las encargadas de enviar el flujo de relaves hacia la planta de proceso. Imágenes de cada etapa de la extracción son presentadas en las Figura 1.2 a la Figura 1.5.



Figura 1.2, Estación de Bombas de alta



Figura 1.3, Pitón



Figura 1.4, Generación de relave



Figura 1.5, Sumidero, sector impulsión hacia planta de proceso.

1.2 Planta flotación colectiva

La planta de flotación colectiva involucra al proceso de clasificación, molienda, flotación y limpiezas, la clasificación se lleva a cabo en hidrociclones que clasifican las partículas presentes en el relave de manera de obtener tamaños de F80 de alimentación a molienda del orden de $250\ \mu\text{m}$ (ver Figura 1.6 y Figura 1.7),



Figura 1.6, Clasificación en hidrociclones



Figura 1.7, Batería de clasificación Colihues

Los molinos trabajan en lazo cerrado con un circuito de hidrociclones que seleccionan el material de entrada a flotación con un P80 del orden de $130\ \mu\text{m}$. Se dispone de 8 molinos primarios, cada unidad corresponde a equipos reutilizados de otras plantas y adaptados para su operación en MVC, la planta de molienda está dividida según su antigüedad en molienda A (ver Figura 1.8) y molienda B (ver Figura 1.9).



Figura 1.8, Molienda A



Figura 1.9, Molienda B

El mineral luego de ser clasificado y molido es dirigido a la planta de flotación (70 kT/día) en donde existe un circuito Rougher, compuesto de 16 celdas FFEM de $4\ 500\ \text{ft}^3$ ($127,4\ \text{m}^3$)

(ver Figura 1.10), encargado de realizar el descartarte grueso de la fracción de baja ley de cobre-moly, el concentrado recolectado en estas celdas es dirigido al proceso de remolienda (ver Figura 1.11).

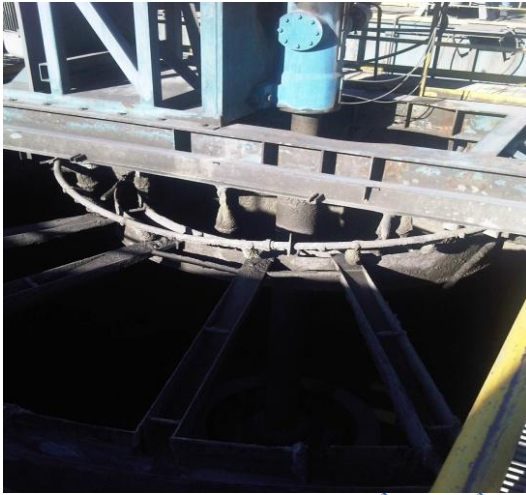


Figura 1.10, Celdas FFEM 4500 ft³ (127.4 m³), flotación Rougher



Figura 1.11, Molino de Remolienda MVC

Las colas de la flotación Rougher se unen con los descartes de los finos realizados en los hidrociclones primarios y son conducidos vía canal de hormigón a un sector de flotación en cascadas (Figura 1.12, Figura 1.13), allí la fracción fina con mejor ley de cobre es reingresada a la alimentación Rougher de la planta de flotación.



Figura 1.12, Cascadas MVC



Figura 1.13, Vista aérea cascadas de flotación

El concentrado que sale del molino de remolienda es dirigido a etapas de limpieza que se realiza tanto en celdas convencionales de aire forzado (Figura 1.14), como en columnas de flotación (Figura 1.15).



Figura 1.14, Celdas OK38 1500 ft³(42,5 m³), bancos 1ra limpieza



Figura 1.15, Columnas de flotación, 2da a 4ta limpieza

1.3 Planta de flotación selectiva

Los concentrados generados posterior a las limpiezas son enviados a un espesador (Figura 1.16) que sirve de alimentación a la planta de flotación, en ella el circuito está dividido en bancos rougher-scavenger y 6 limpiezas (Figura 1.17).



Figura 1.16, Espesador mixto, acumulador planta flotación selectiva



Figura 1.17, Planta de flotación selectiva

1.4 Plantas de secado de productos finales

Los concentrados finales son secados en plantas por separado (Figura 1.18, Figura 1.19) a razón de 2 160 lb/día (0,98 T/día) de molibdeno contenidas en concentrados de un 40% de ley y 50 T/día de cobre contenidas en concentrados de 28% de ley.



Figura 1.18, Planta Secado Cobre



Figura 1.19, Planta Secado molibdeno

El concentrado de cobre final es transportado mediante camiones tolva a Codelco Ventanas, el concentrado de moly es envasado en maxisacos y despachado sobre camiones rampla hacia la empresa Molymet.

1.5 Planta de Recuperación de Agua Industrial (RAI)

Considerando que el medio de transporte utilizado para las partículas sólidas es el agua, al final del proceso se busca recuperar la mayor cantidad posible y enviar a la depositación final el sólido con la menor cantidad posible de agua. Para realizar dicha tarea MVC cuenta con 3 espesadores de relaves marca DELKOR de 100 m de diámetro capaces de procesar 200 000 T/día de relaves (Figura 1.20).



Figura 1.20, Vista aérea planta RAI de MVC, se distinguen los espesadores, la planta de preparación de floculante, las piscinas y bombas de agua clara (RABI)

La operación de los espesadores se realiza mediante la adición al relave de un reactivo llamado floculante el cual acelera el proceso de sedimentación de las partículas presentes en el relave, esta sedimentación genera una mayor concentración de sólidos en la parte inferior del espesador, este relave con mayor contenido de sólidos es impulsado mediante bombas de pulpa hacia la canal de relaves para su depositación final. Junto con la descarga de relaves espesados, en el espesador se genera un rebalse continuo de agua clara que es conducido gravitacionalmente hacia una piscina donde el agua es impulsada, mediante bombas centrífugas, de vuelta a la planta para ser utilizada en el proceso.

Para evitar la depositación local de sólidos en el fondo del espesador, este cuenta con un mecanismo de rastras (Figura 1.21) encargadas de homogeneizar el relave junto con dirigir, hacia el cono de succión de la bomba, las partículas que han ido sedimentando.



Figura 1.21, Vista en corte espesador

El mecanismo de giro de las rastras se realiza por medio de sistema piñón corona, la corona cuenta con 5 piñones accionados con potencia oleohidráulica, los niveles de torque permisibles en las rastras son de 4 200 kNm, sobre este nivel se realiza control de altura en las rastras elevándolas, cuando el nivel de torque llega a valores superiores a un 40% del nominal, la elevación se realiza por medio de pistones hidráulicos que elevan todo el conjunto de las rastras.

Las descargas de los espesadores son impulsadas por 3 bombas de pulpa marca Weir Minerals, modelo ASH 16x18x36 SRH (Figura 1.22), a razón de 3 000 m³/h cada una, con un consumo promedio de potencia de 300 HP impulsando relaves con un contenido de sólidos del orden de 54% en peso por bomba.



Figura 1.22, Bomba Warman 18x16x36 descarga espesador.

El rebalse de agua recuperada (del orden de 4 000 m³/h) es conducida mediante canal abierta hacia un par de piscinas que alimentan 2 estaciones de bombeo encargadas de enviar el agua hacia dos estanques ubicados en el punto más alto de la planta (705 msnm).

El floculante utilizado para acelerar el proceso de sedimentación del espesador es preparado y distribuido hacia los anillos centrales de cada espesador mediante bombas de desplazamiento positivo de cavidad progresiva (Figura 1.23) a razón de 6 m³/h disueltos en 60 m³/h de agua.



Figura 1.23, Bombas cavidad progresiva alimentación floculante a espesadores de relave.

La adición de floculante es controlada manualmente, de manera local o bien remota, ajustando la velocidad de giro de la bomba en función de la alimentación al espesador y del nivel de agua clara presente en él.

1.5.1 Sala de Bombas de Recuperación de Agua Industrial (RABI)

El agua recuperada de los espesadores, es devuelta a la planta mediante una estación de bombeo que cuenta con 8 bombas centrífugas de carcasa partida axialmente instaladas en paralelo, la cota de succión es 595 msnm y la cota de descarga 705 msnm, el tubo de descarga es de acero cubierto interiormente por goma, su diámetro es de 34", espesor estándar con interior engomado con espesor de 1/2" y recorre una distancia de 1340 m, la Figura 1.24 presenta el perfil de elevaciones de la impulsión mientras que la Figura 1.26 muestra la sala de bombas 1 y la Figura 1.25 muestra la descarga de la línea de impulsión de agua recuperada.

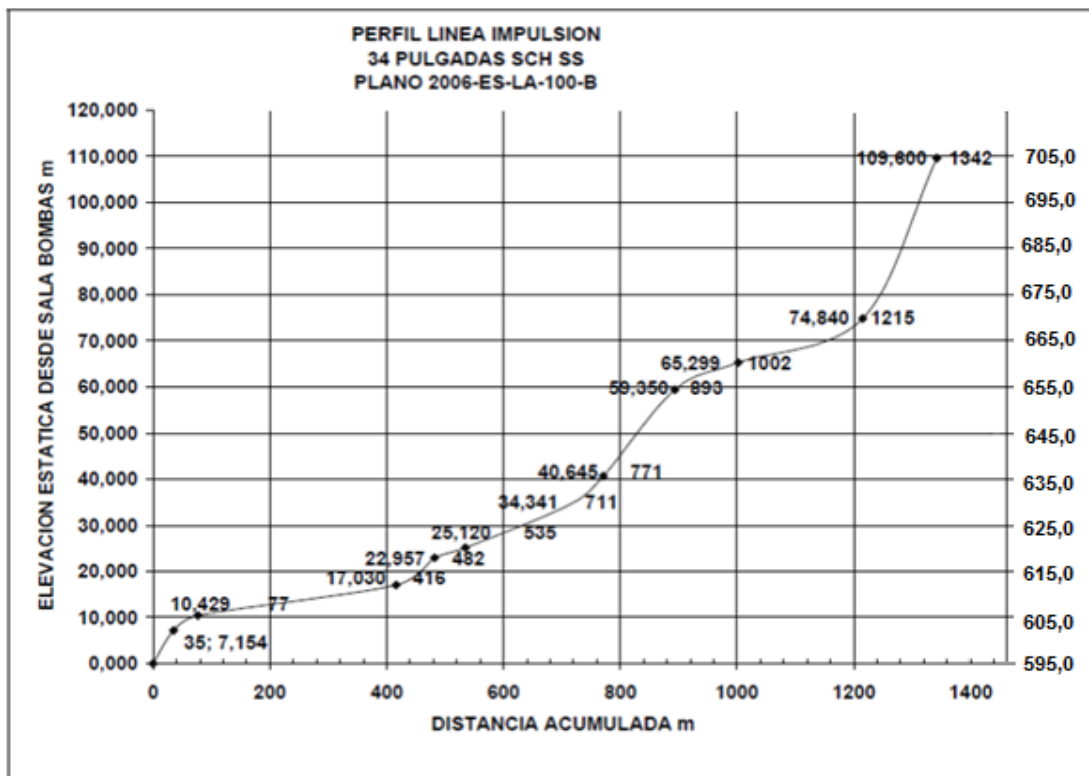


Figura 1.24, Perfil de elevaciones línea descarga bombas RABI



Figura 1.26, Sala de bombas RABI 595msnm



Figura 1.25, Descarga bombas RABI 705msnm

Cada bomba cuenta en su línea de descarga (Figura 1.28) con una junta de expansión, válvula de retención, válvula mariposa para realizar ajuste de caudal unitario, válvula de compuerta. En la línea de alimentación (Figura 1.27) cada bomba cuenta con válvula de corte, junta de expansión y válvula de despiche para efectuar el drenado ante alguna labor de mantención.



Figura 1.27, Línea alimentación bomba RABI



Figura 1.28, Línea descarga bomba RABI

La estación de bombeo cuenta además con una estación de compensación de golpe de ariete, formada por 6 estanques hidro-neumáticos de 4,2 m³ cada uno (Figura 1.29) encargados de

amortiguar las ondas de presión y depresión producidas ante algún evento de detención inesperada de bombas², su ubicación se encuentra a 50 m de la sala de bombas.



Figura 1.29, Estación golpe de ariete

La sala de bombas RABI está dividida en 2 sectores. La sala de bombas 1 que opera con los espesadores 1 y 2, esta sala cuenta con 5 bombas descargando en paralelo al ducto matriz (se presenta la disposición típica de bombas en la Figura 1.30). La sala de bombas 2 con 3 unidades acopladas a la matriz de descarga. Esta sala de bombas fue habilitada en conjunto con la puesta en marcha del espesador número 3, en Julio de 2012 (se presenta la disposición típica de bombas en la Figura 1.31). Cada una de las bombas de ambas salas cuentan con motores de 600 HP con acople directo, la potencia total instalada es de 4 800 HP (3,6 MW).

² Por diseño [11] la máxima sobrepresión ante un evento de detención de las 8 bombas funcionando en serie, llegaría a 215 mca (312 psi) y la mínima depresión será de 40 mca (58 psi) considerando una presión de funcionamiento en estado estacionario de 115 mca (167 psi).

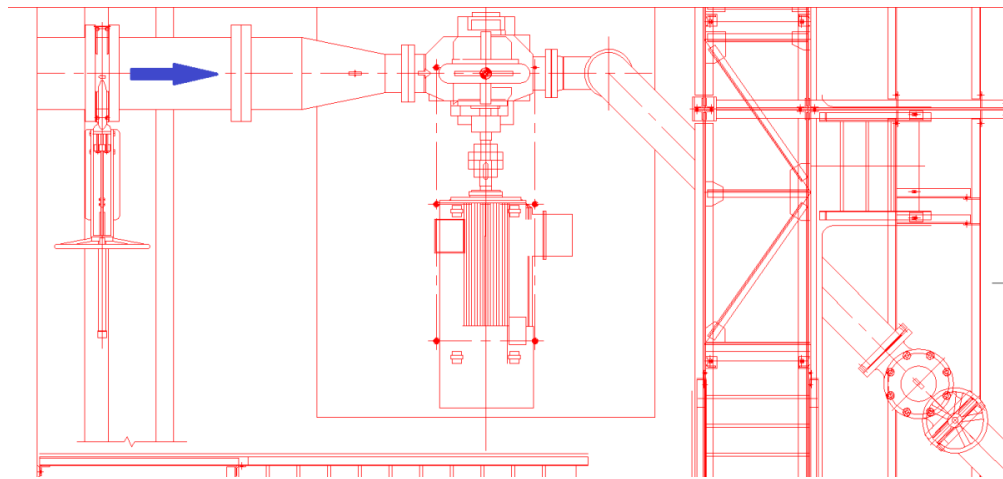


Figura 1.30, Disposición tipo de bombas en sala N°1 planta RAI

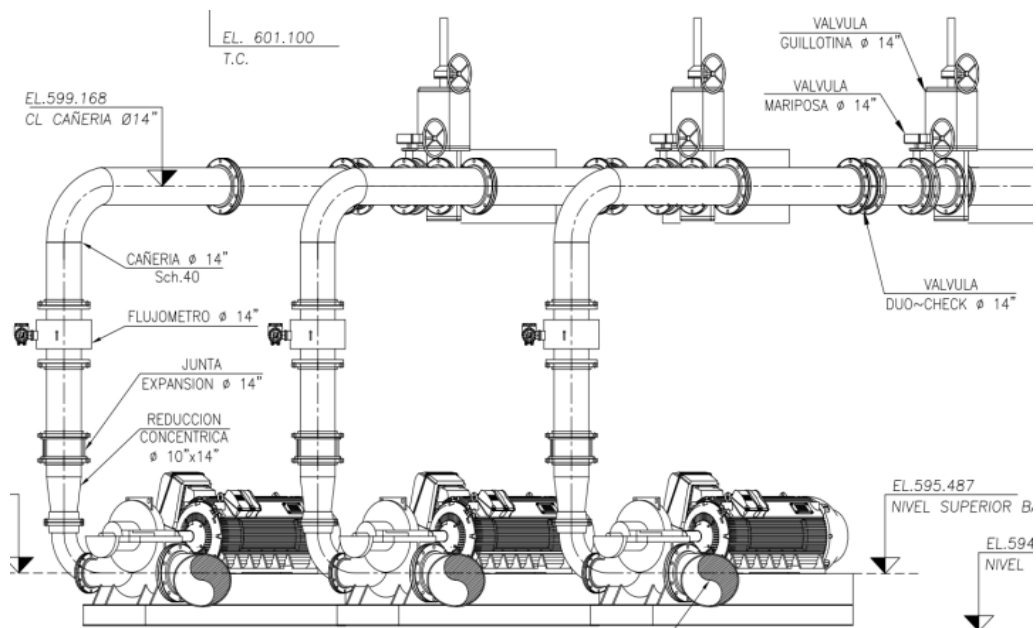


Figura 1.31, Diagrama sala de bombas N°2 planta RAI

La operación de las salas de bombas RABI depende de la recuperación de agua que se tenga en los espesadores y esta depende del flujo de alimentación y porcentaje de sólido de entrada a ellos, las variaciones que se generan en cuanto al caudal de alimentación a las piscinas de las bombas RABI son trabajadas variando el número de bombas en operación o variando el porcentaje de apertura de las válvulas de la línea de descarga de cada bomba. Considerando el modelo de pérdidas de carga de Hazen-William y los datos propios de la instalación de bombeo (ver cálculo hidráulico en Anexo A) se obtienen las distintas configuraciones de

bombeo presentadas considerando un 100% de apertura en cada válvula de descarga de las bombas (Tabla 1).

Tabla 1, Incremento de según el número de bombas en operación con válvula de descarga 100% abierta.

Número bombas	Caudal total m ³ /h	Caudal por bomba m ³ /h	Aumento caudal m ³ /h
1	1 230	1230	1 230
2	2 350	1175	1 120
3	3 440	1147	1 090
4	4 350	1088	910
5	5 200	1040	850
6	5 850	975	650
7	6 450	921	600
8	6 900	862	450

En la Figura 1.32 se presenta un diagrama altura-caudal para las distintas configuraciones de bombeo.

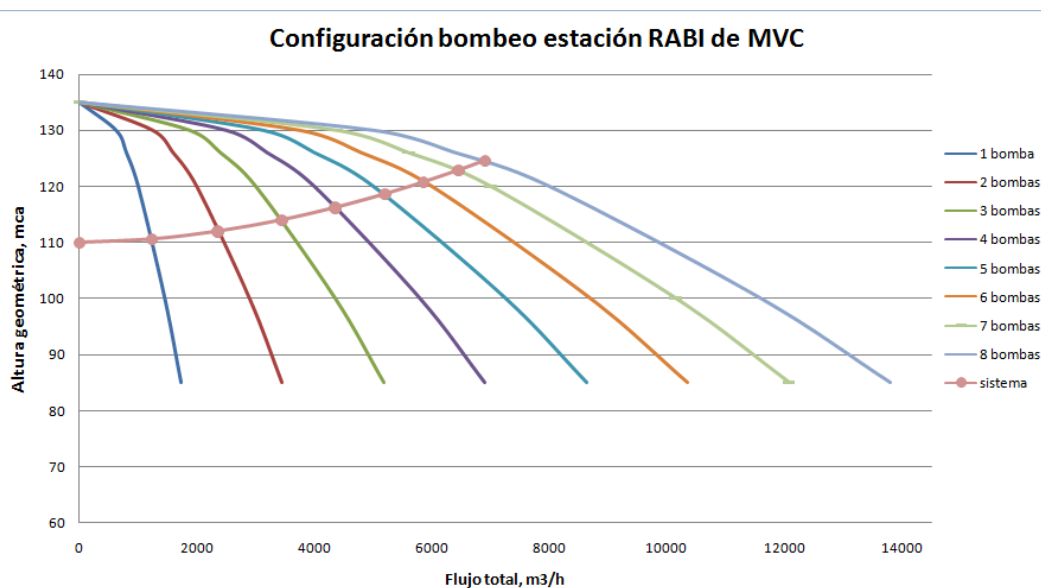


Figura 1.32, Configuraciones de bombeo estación de recuperación agua industrial de MVC.

Dadas las condiciones de operación no es posible operar con una sola bomba (con su válvula 100% abierta) dado que el motor instalado no es capaz de suministrar la potencia necesaria (610 HP), al ir subiendo el número de bombas presentes en la estación de bombeo, el aporte individual de cada una comienza a ser menor, generando que sea posible operar cada una con el 100% de su válvula de descarga abierta, en la Figura 1.33 se presenta la curva de la bomba

con las recomendaciones del fabricante respecto de los límites de operación (superior e inferior respecto del caudal [630 1 720]m³/h).

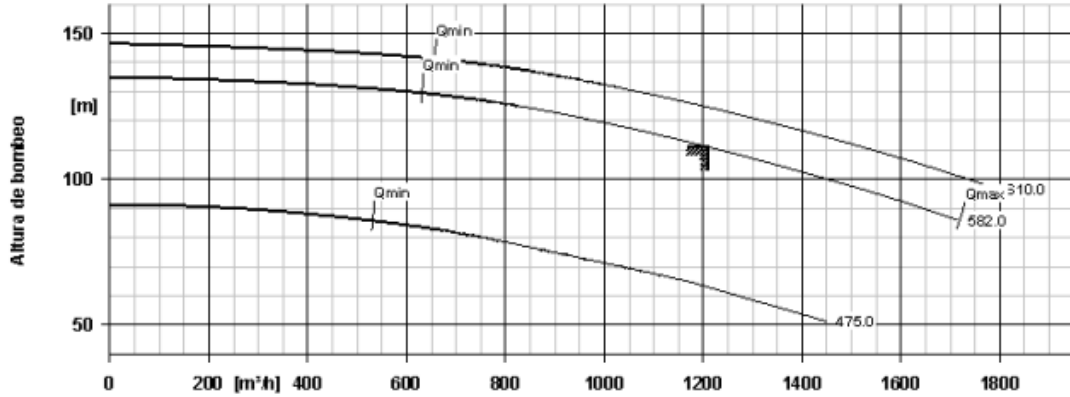


Figura 1.33, Curva bomba KSB OMEGA 250-600 A impulsor tamaño 582mm.

La operación de toda la planta RAI se realiza desde una sala de control ubicada en el sector de las compuertas de desvío a los espesadores, los operadores actúan en base a los parámetros que arroja el sistema de control web mostrado en las Figura 1.34 y Figura 1.35.

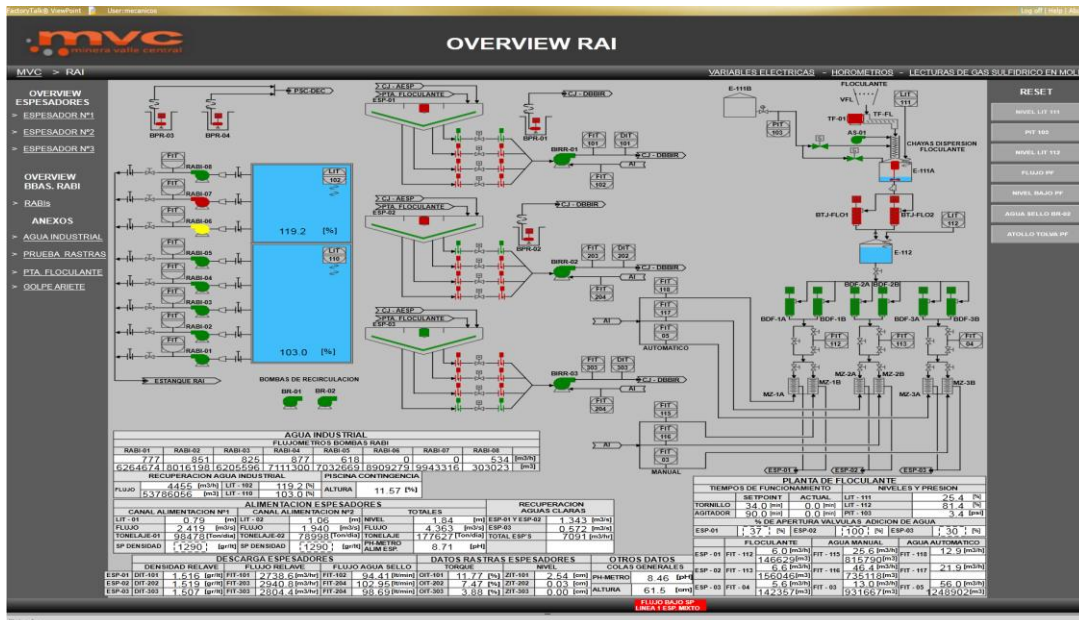


Figura 1.34, HMI general de planta RAI

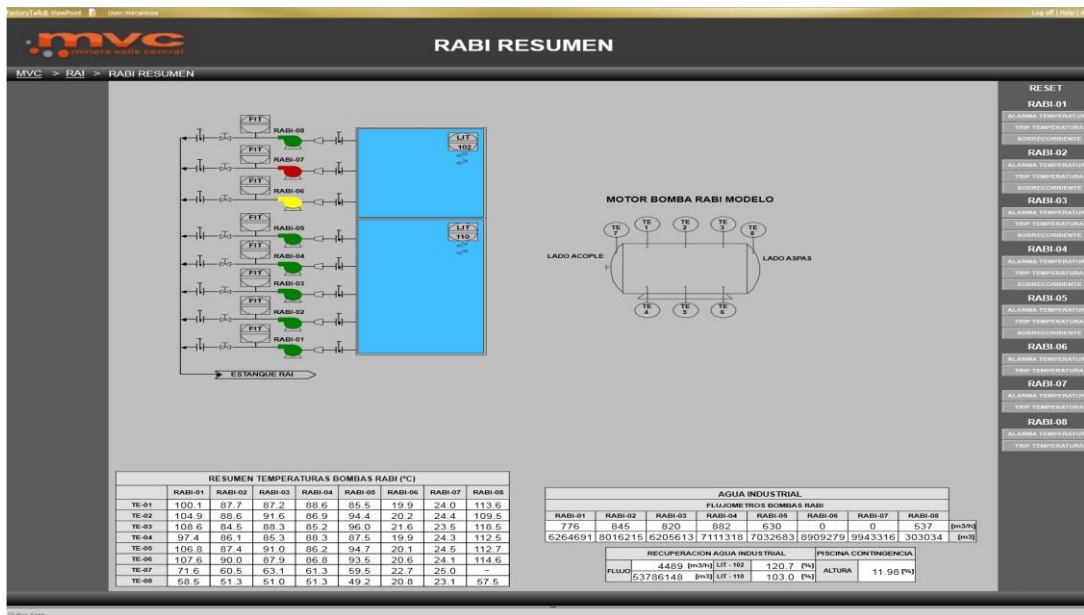


Figura 1.35, HMI estación de bombeo RABI

1.5.2 Bomba KSB 250-600

1.5.2.1 Características hidráulicas

La bomba marca KSB modelo Omega, pertenece al grupo de las bombas centrífugas de carcasa tipo voluta, axialmente partida, con doble cámara de succión y descarga simple. Su instalación es de tipo en línea, esto es, la entrada y la salida se encuentran axialmente alineadas, este tipo de bomba son ampliamente utilizadas en redes húmedas contra incendios como bomba cebadora. Dentro de sus ventajas destacan:

- La fácil mantenibilidad en terreno (permite inspeccionar o cambiar sus componentes húmedos sin necesidad de desacoplar las líneas de alimentación y descarga).
- Compensación de empuje axial.
- Mayor eficiencia hidráulica y menores valores de NPSH requeridos en comparación con bombas centrífugas de tipo carcasa partida radialmente que manejan flujos y TDH similares.

En la sala de bombas RABI el impulsor instalado en cada bomba es de 582 mm de diámetro externo y el motor instalado es de tipo asíncrono de 2 pares de polos capaz de generar una potencia mecánica de 450 kW (600 HP) a 1 490 rpm (Figura 1.36).

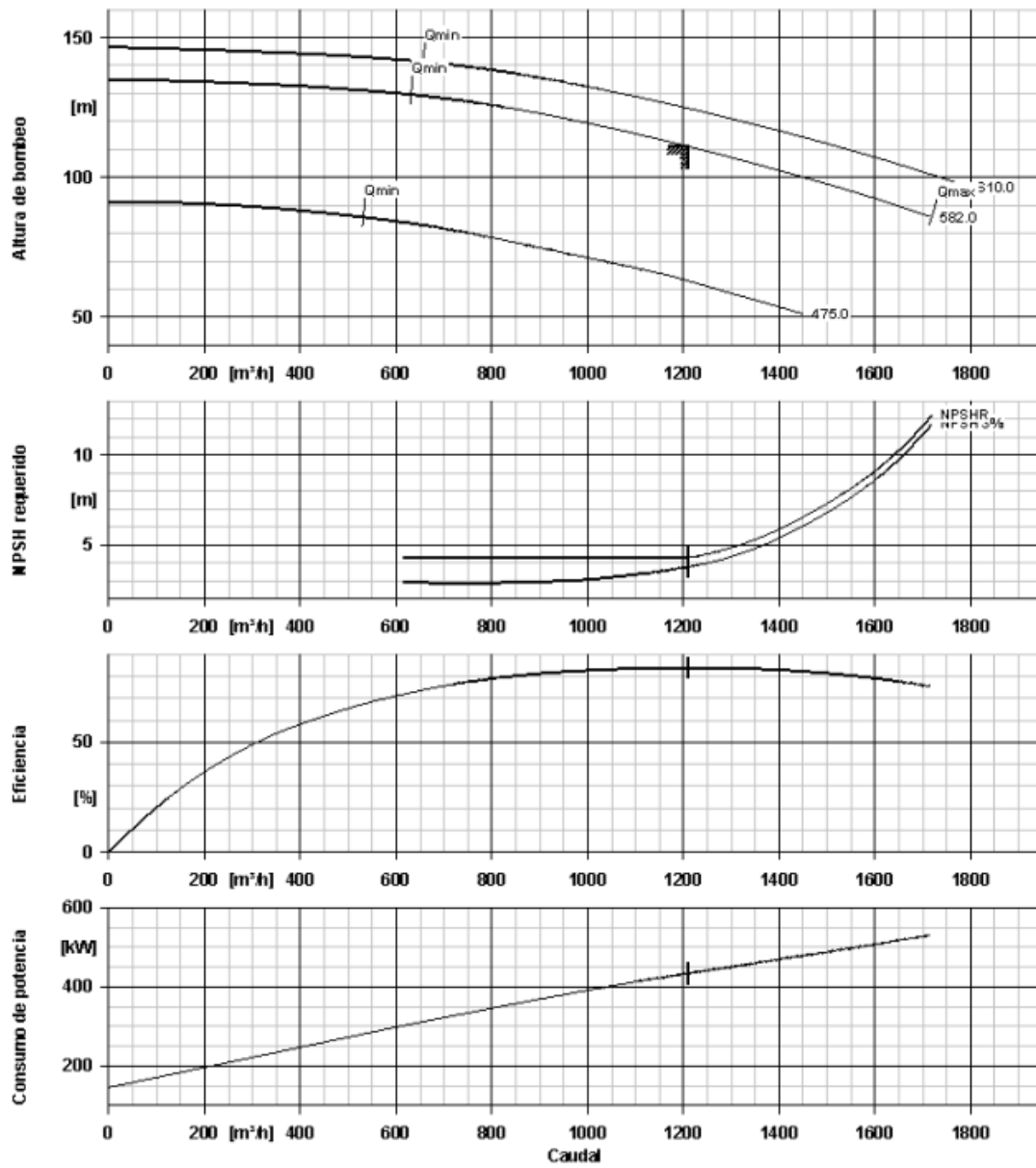


Figura 1.36, Curva bomba KSB Omega 250-600 A @ 1 490 rpm

1.5.2.2 Características mecánicas

La bomba utilizada para la impulsión del agua recuperada en los espesadores es una bomba de carcasa partida axialmente con doble cámara de succión. Originalmente las bombas poseían sello mecánico (Figura 1.37) el que fue reemplazado, en la planta, por sello tipo prensa estopa (Figura 1.38), dado que el desempeño del sello mecánico no era adecuado (constantes fallas por rotura de elementos sellantes) para la operación en la sala de bombas.



Figura 1.37, Bomba KSB OMEGA 250-600A diseño estándar con sello mecánico.



Figura 1.38, Bomba KSB OMEGA 250-600A diseño modificado con sello prensa estopa.

La Figura 1.39 muestra una vista en corte de la bomba, allí se aprecia la forma de fijación del eje de la misma (los detalles se muestran en las figuras Figura 1.40 y Figura 1.41). Las cargas radiales son absorbidas por 2 rodamientos de bolas dispuestos uno en cada extremo de la bomba. El eje es fijado axialmente, respecto a las carcasas de la bomba, en el rodamiento del lado libre, donde la fijación se realiza mediante la adición de anillos separadores en la caja portarodamientos para fijarla respecto del aro externo del rodamiento, ver Figura 1.41. La fijación del rodamiento respecto al eje se realiza por medio de un buje deslizante (pistón) que posee ajuste deslizante (0,03 mm en el diámetro) y gira solidario al eje mediante una chaveta. El pistón posee ajuste de interferencia respecto del rodamiento (0,03 mm en el diámetro), la fijación del pistón de ajuste se realiza mediante el apriete de una tuerca con hilo derecho que presiona un resorte que presiona al conjunto rodamiento-pistón respecto del ya conjunto armado sobre el eje (camisas, impulsor y rodamiento del lado acople) ver Figura 1.40.

El mecanismo de sellado para independizar las cámaras de presión y succión se realiza mediante anillos de desgaste que se ajustan inicialmente con una holgura de 0,5 mm en el diámetro. Se suele instalar un anillo de bronce que gira solidario al impulsor y un anillo, de acero inoxidable, estático solidario a la carcasa. El principio de funcionamiento, es generar un aumento de velocidad y por ende, una caída de presión de manera que la fuga entre cámara de presión y succión sea mínima. Cabe señalar que la forma de sellado de los anillos es generar la comunicación de las cámaras de manera axial (tangencial) tal como es la forma estándar para aplicaciones de agua limpia.

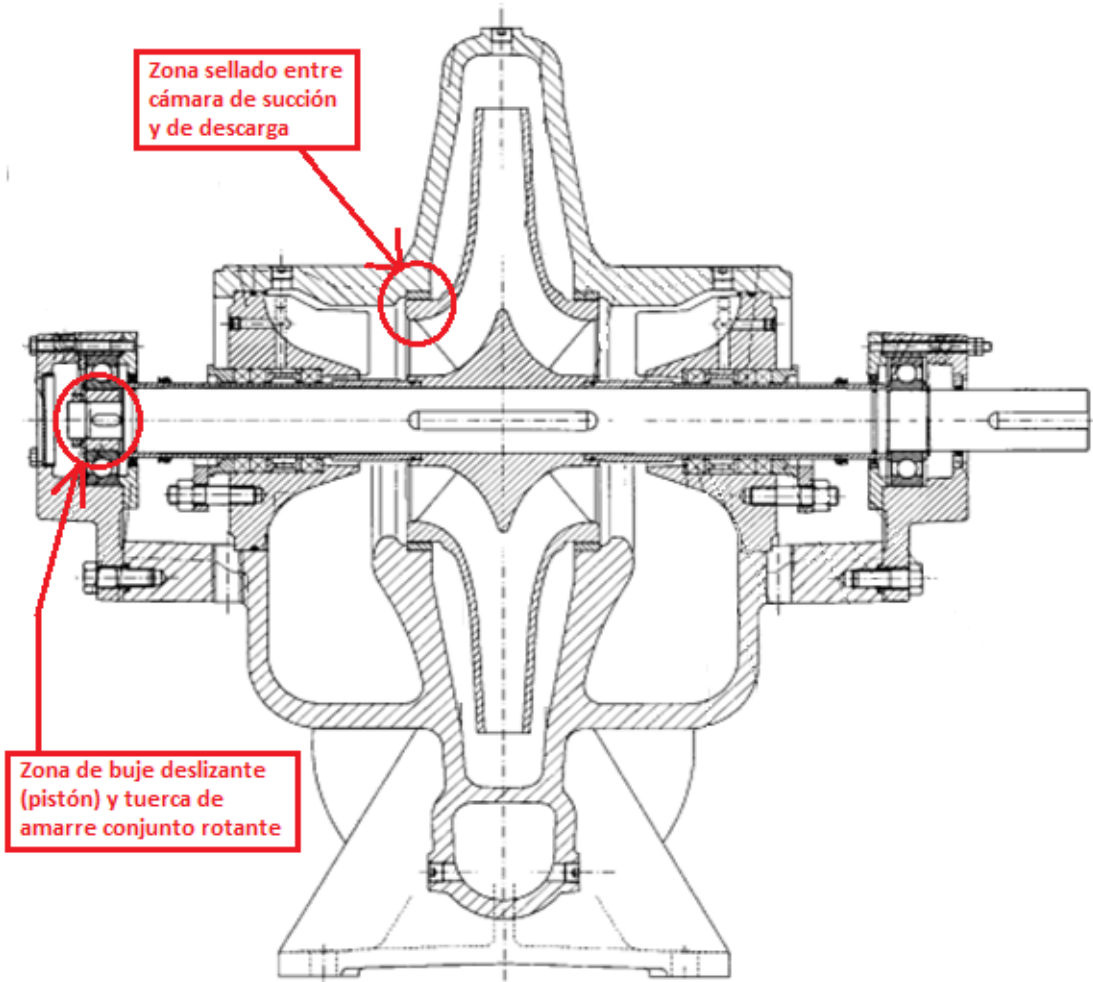


Figura 1.39, Vista en corte bomba Omega 250

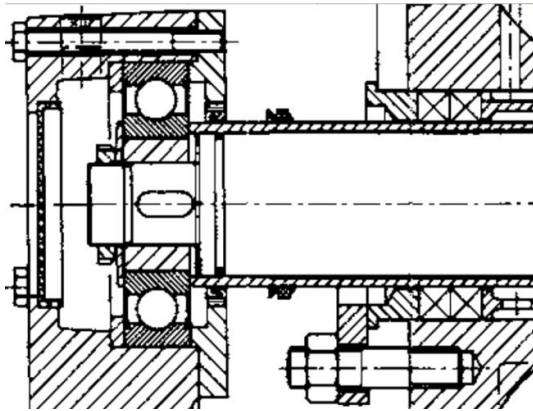


Figura 1.40, Detalle fijación conjunto rotor respecto de carcasas.

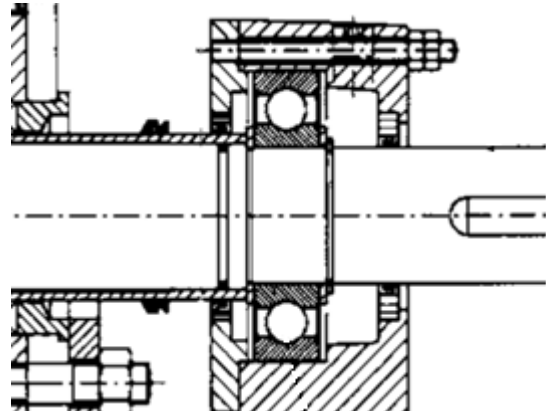


Figura 1.41, Detalle fijación rodamiento lado machón.

Habitualmente la mantención de estas bombas era realizada en una empresa colaboradora externa, donde se revisaba:

- Revisión eje.
- Balanceo dinámico conjunto rotante.
- Ajuste caja porta-rodamientos.
- Ajuste anillos de desgaste tanto de impulsor como carcasa.
- Aplicación de recubrimiento de cerámica en el interior de la carcasa, para mejorar vida útil al desgaste por abrasión.
- Verificación y ajuste de cajas prensa-estopa.
- Cambio camisas desgaste, rodamientos, retenes y sellos varios.

El costo promedio de mantenimiento³ de cada una de estas bombas es de CL\$ 7 000 000

Las fallas habituales de origen mecánico en este tipo de bombas son la soltura en la tuerca que afianza conjunto rotor (Figura 1.42), el desgarró en el chavetero de unión pistón-eje (Figura 1.43), baja en eficiencia de bomba producto de desgaste en anillos sellos de cámara de succión contra cámara de descarga (Figura 1.44).

³ Precio promedio de reparaciones desde Enero de 2015 a Agosto de 2015.



Figura 1.42 Soldadura para fijación de tuerca que afianza el conjunto rotante.



Figura 1.43 Desgarro en chavetero de afianzamiento pistón-eje.



Figura 1.44 Excesiva holgura por desgaste en anillos sellos de cámara succión contra descarga.

A raíz de las constantes fallas por soltura y pérdida de hilos en la tuerca que afianza el conjunto rotor, MVC modificó el diseño de la punta del eje integrando una tuerca de fijación con arandela de seguridad. Se extendió el chavetero y el largo de la chaveta de manera de retener la arandela de seguridad, también se modificó la geometría del buje deslizante de ajuste de manera de modificar la unión entre la camisa y el rodamiento, generando el apoyo de la camisa en el buje para que éste último transfiera la carga hacia la tuerca. Además se instaló una tapa de inspección fácilmente desmontable en el lado libre de la bomba, de manera de realizar una rápida inspección visual al rodamiento y tuerca de ajuste del mismo. En la Figura 1.45 se muestra el detalle de la nueva configuración adoptada.

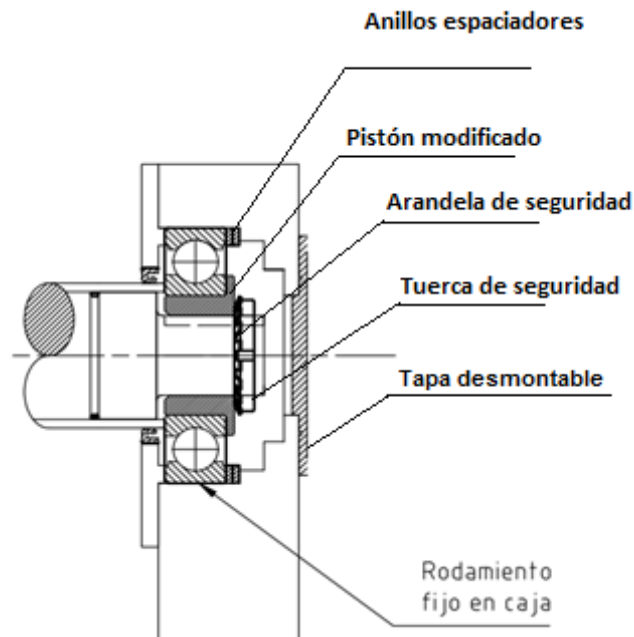


Figura 1.45, Detalle modificación espaciadores en caja portarodamieto lado libre.

Realizando las tareas de mantención con personal propio e implementando las mejoras señaladas anteriormente, se logró reducir⁴ a CL\$ 1 725 000 la mantención de cada bomba además se mejoraron los plazos de reparación ante un evento de falla inesperado. Anualmente se redujeron⁵ los costos en CL\$ 55 400 000 por conceptos de reparación (75% respecto de la condición anterior), esto considerando que la vida útil de cada bomba es de 9 meses (dada las características agresivas del agua con sólidos bombeada, ver Figura 1.46).



Figura 1.46, Piscina alimentación bombas de sala 2 vaciada para limpieza.

⁴ De Agosto de 2015

⁵ En período entre los años 2015 y 2016.

Capítulo 2: Problema detectado

Durante la puesta en marcha de la sala de bombas 2 se generaron varios problemas tanto en la sala de bombas 1 como en la sala de bombas 2. Dentro de ellos destacan:

- Falla en válvula en línea de descarga bomba RABI 1 (Figura 2.1 y Figura 2.2). La válvula de guillotina de cuerpo partido instalada sufre el colapso en los pernos de unión de sus mitades, que se separan, generando la inundación de la sala de bombas y la falla de los equipos por inundación, se debe detener planta para comenzar con la reparación del sector. El colapso de los pernos de unión de mitades de la válvula de guillotina se atribuyó a un alto nivel de vibraciones presente en la línea de descarga de la bomba posterior a la puesta en marcha de la bomba tras la modificación realizada en la línea de descarga. [13]



Figura 2.1, Sala de bombas N°1 posterior al colapso válvula guillotina línea de descarga bomba RABI 1



Figura 2.2, Colapso de válvula guillotina línea de descarga bomba RABI 1

- Fractura de eje, en el lado del machón de acoplamiento, de la bomba instalada en posición RABI 6 (Figura 2.3)



Figura 2.3, Corte de eje en bomba instalada en posición RABI 6

- Fractura de machón de bombas instaladas en posiciones RABI 6 y 7, en una oportunidad cada una.
- Altos niveles de vibraciones en la línea de descarga de las bombas tanto en sala de bombas 2 como en sala de bombas 1.

Los altos niveles de vibración presentes son apreciables visualmente en el ducto de descarga, las oscilaciones en los ductos de descarga generaban el movimiento de las pasarelas de acceso y soltura de las parrillas kerrigan allí presentes, ver Figura 2. 4.

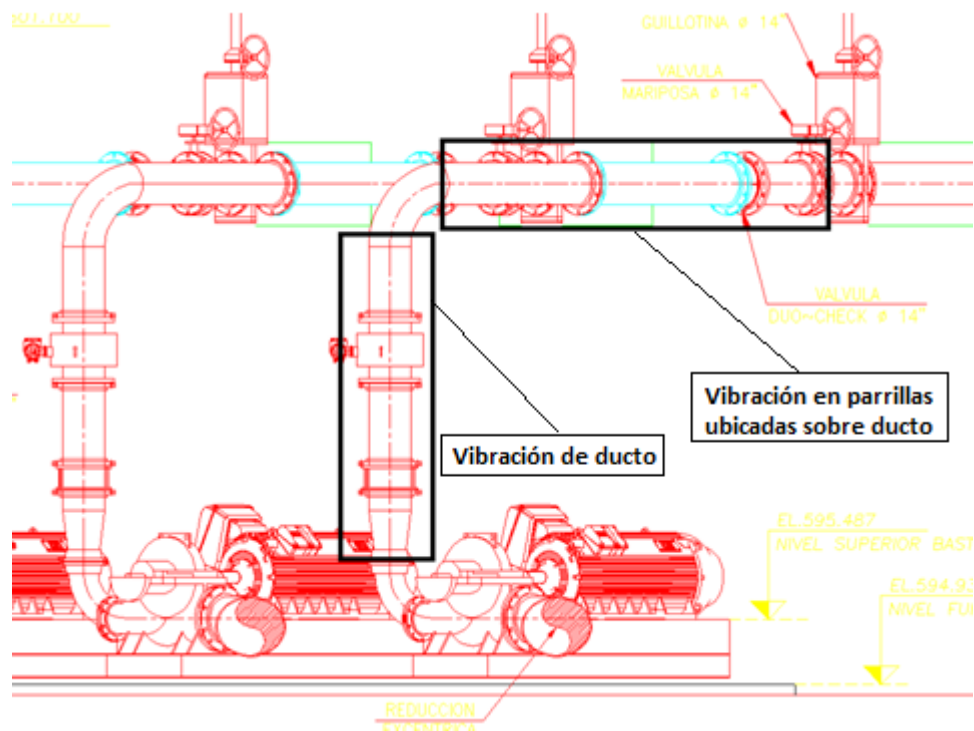


Figura 2. 4, Esquema de zonas de visualización de vibraciones durante la operación en la puesta en marcha de la sala de bombas N°2 de la planta RAI.

Dados los inconvenientes mencionados se solicitó al área de mantenimiento predictivo, liderada por el suscrito, investigar el origen de las vibraciones en los ductos de descarga y proponer una solución al problema, considerando que la sala de bombas se encontraba en operación y no se disponía de presupuesto para la contratación de una asesoría experta externa.

Para el estudio se siguió la siguiente metodología de trabajo:

- Investigación de bibliografía respecto a vibraciones en piping, dado que comúnmente el análisis se realiza en partes fijas de elementos rotantes, se carecía de conocimiento respecto a vibraciones en piping, lo que generaba la necesidad de estudiar el estado del arte y técnica desarrollada al respecto.
- Medición de vibraciones en distintos lugares del piping de alimentación y de descarga para distintas configuraciones de flujo, para identificar el sector de mayor amplificación en cuanto a niveles de vibración y como varían los niveles y composición respecto del flujo impulsado por la bomba.

- Realización de ensayo de respuesta en frecuencia ante excitación tipo impacto, para descartar que se trate de algún tipo de resonancia estructural del piping de descarga.
- Modelamiento FEM para realizar análisis modal y detectar frecuencias naturales que no se hayan detectado en ensayo de impacto.
- Medición de vibración de fondo para descartar la influencia de las otras bombas en operación respecto a de la configuración de la bomba analizada.

Vale la pena resaltar las limitantes instrumentales y premura en el establecimiento de una solución al problema presente. Respecto a la instrumentación disponible podemos mencionar que se cuenta con adquirente de datos SKF Microlog Analyzer GX modelo CMXA75, diseñado para la realización de rutas predictivas buscando detectar fallas prematuras en rodamientos de equipos rotatorios, el equipo cuenta con un canal de adquisición y limitantes en software de post-procesamiento de señales. No se cuenta con transmisor de presión en líneas de descarga, de esta forma no es posible realizar un monitoreo online de la presión en la línea de manera de cruzar estos datos con las vibraciones obtenidas, los datos de operación tanto flujo impulsado como corriente consumida por el motor eléctrico, solamente es posible visualizarlos instantáneamente en el HMI presente en la sala de control.

Capítulo 3: Revisión de literatura respecto de vibraciones en ductos.

Se estudiaron las publicaciones de V. Kostarev⁶ ([01] y [02]) que tratan sobre resolución de problemas de vibraciones en tuberías de vapor en centrales nucleares de generación eléctrica que podían causar el colapso de estructuras o de válvulas instaladas allí. Los datos recolectados en campo eran utilizados en modelos computacionales capaces de realizar simulaciones considerando relación fluido estructura para calibrar sus parámetros. Una vez calibrados los modelos se procedía a simular el comportamiento considerando la adición de amortiguadores de vibración adosados a las líneas. Se definía el tipo, cantidad y ubicación de los amortiguadores, se instalaban y posteriormente se volvía a tomar mediciones de vibraciones de manera de generar el comparativo respecto a la situación inicial (Figura 3.1 y Figura 3.2).



Fig. 8 VES damper at the RL76 in RB LO2 (damper's piston at the piping, housing at the RB wall)

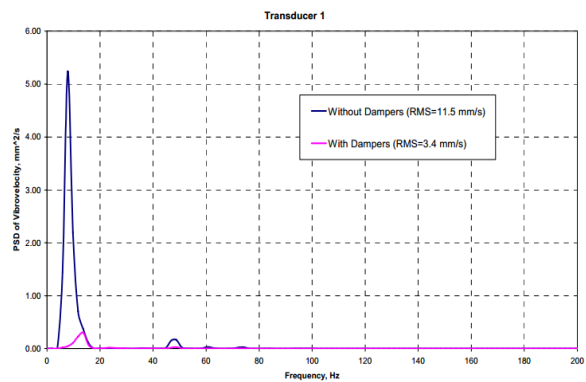


Fig. 12 PSD spectra of RA10 piping vibration before and after dampers installation

Figura 3.1, Instalación de amortiguadores de vibración en línea de vapor en central nuclear de generación ubicada en Finlandia, a la derecha se aprecia la disminución en nivel de vibraciones conseguida.

Ref: Victor Kostarev, Aimo Tuomas, Karl-Heinz Reinsch. Resolving of steam and feed-water piping vibration matter at Loviisa NPP

⁶ CKTI-Vibroseism Co. Ltd., Russia: Consultora de ingeniería mecánico-estructural dedicada al control de vibraciones en plantas de generación eléctrica (nuclear y térmicas)



Figure 7. General View of the Dampers on the SEBIM Valves 1211 (front) and 1234.

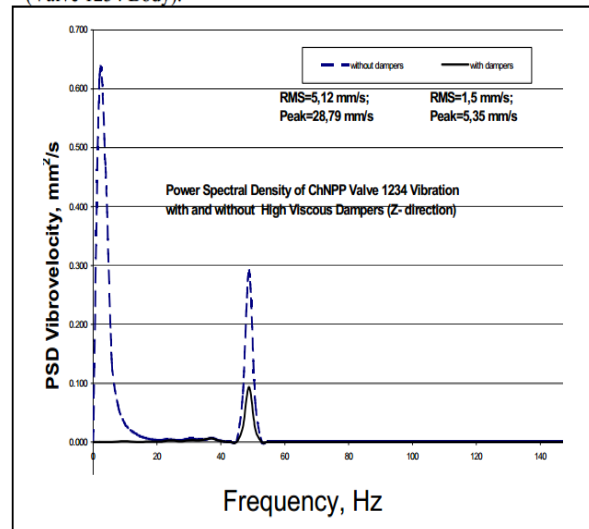


Figure 4. Vibrovelocity PSD before and after Damper Installation. Valve 1234, Measurement Point 1, direction Z.

Figura 3.2, Instalación de amortiguadores de vibración en sector de ubicación de válvulas en línea de vapor de central nuclear de generación ubicada en Chernobyl, a la derecha se aprecia la disminución en nivel de vibraciones conseguida.

Ref.: Fomin V., Kostarev V., ReinschK-H. Elimination of Chernobyl NPP unit 3 power output limitation associated with high main steam piping flowInduced vibration.

Del estudio de las publicaciones señaladas anteriormente surge la inquietud por consultar la norma VDI 3842:2004 [06] referente a vibraciones en piping en conjunto con la publicación de Watchel, Morton y Atkins llamada “Piping Vibration Analysis” [03], donde se entregan las guías para la determinación de modos naturales de vibración de tuberías considerando y no considerando la interacción fluido estructura, se muestra la necesidad de incorporar en etapas tempranas de diseño las verificaciones tales que aseguren la operación estacionaria, lejana a zona de resonancia para las tuberías. En las referencias señaladas se cruzan valores de inducción de esfuerzos alternos producto de oscilaciones causadas por resonancias estructurales del ducto, junto con datos tomados de la experiencia adquirida en la industria petroquímica generan un criterio, expuesto en dicha norma, para la evaluación de la severidad de las vibraciones medidas en ductos (Figura 3.3). El criterio es conservador y sirve como una primera aproximación en la severidad del problema, esto implica que si se está dentro de valores considerados como seguros no se generarán problemas de colapso por fatiga en un ducto en su condición nominal, si se está en nivel de cuidado o corrección se debe realizar un estudio de ingeniería para detectar la causa de las vibraciones y solucionar el problema.

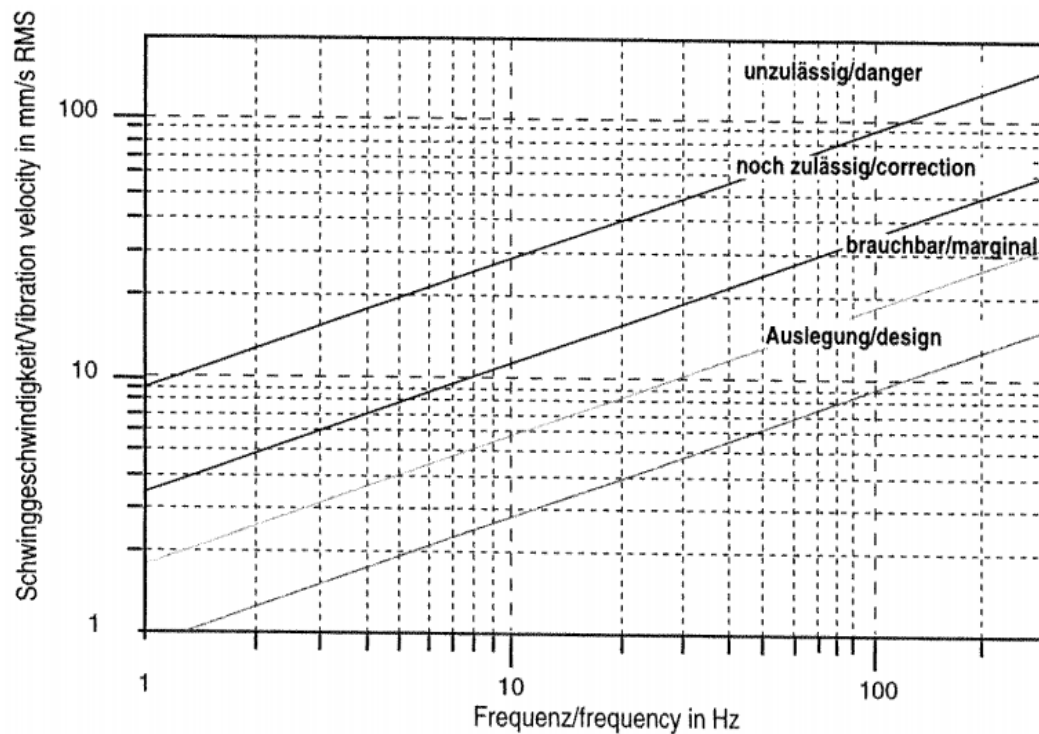


Figura 3.3, Diagrama de evaluación de severidad de vibración en piping según norma VDI 3842:2004
Piping Vibration

Se estudió también una publicación del autor Peter S. Vasilyev [04], donde se expone un estudio comparativo entre un par de modelos para la determinación de frecuencias naturales considerando la interacción fluido estructura de dos formas, una considerando el fluido como una porción de masa estructural con densidad igual a la del fluido y otra considerando el fluido como un líquido y ajustando las condiciones de contorno. Los resultados para frecuencias naturales estructurales del tubo difieren del orden del 5% y en modelo que considera propiedades de fluido en el interior se aprecian resonancias acústicas que en el modelo exclusivamente estructural no son capaces de modelarse (considerando los primeros 20 modos), pero estos modos se producen en frecuencias superiores al vigésimo armónico fundamental. En la Figura 3.4 se presenta un gráfico que muestra la correlación entre las frecuencias obtenidas en los dos modelos utilizados por los autores y se deduce que para los primeros modos naturales de excitación es una buena aproximación considerar solamente los efectos estructurales.

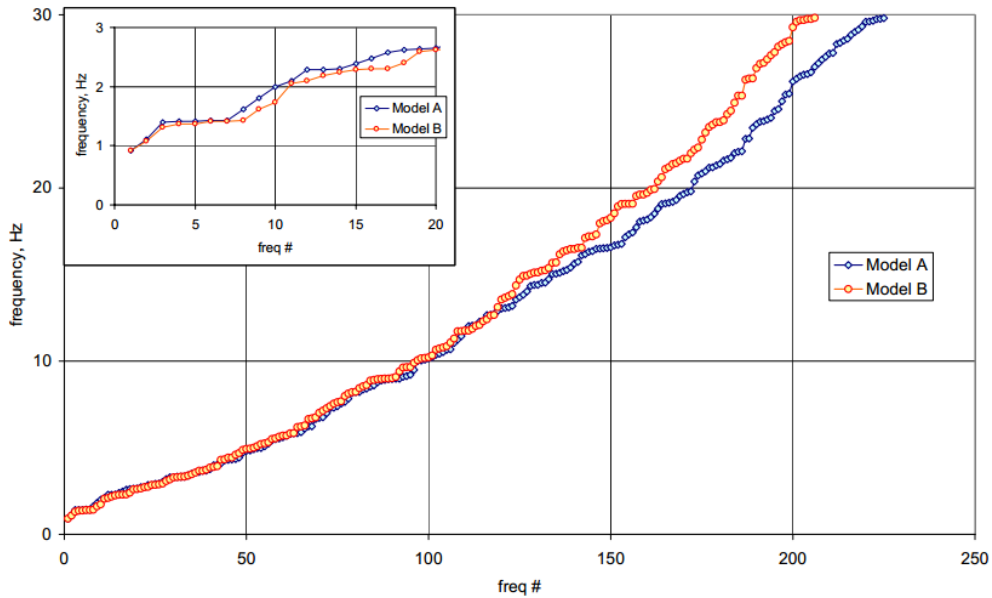


Figura 3.4, Comparación entre modelos de simulación para determinación de frecuencias naturales, ante el fenómeno de interacción fluido-estructura, el modelo A considera al fluido con sus propiedades de liquido y el modelo B considera la porción de fluido como masa estructural.

Ref.: Peter S. Vasilyev, Engineering approach for medium modeling in piping dynamic analysis.

Robert Missal [05] presenta la solución a un problema de vibraciones en el piping de descarga de un soplador (Figura 3.5) mediante la medición y caracterización del tipo de vibraciones presentes además de la realización de un análisis modal experimental mediante excitación tipo impacto (Figura 3.6), en su trabajo concluye que la excitación cíclica de un compresor de pistones genera resonancia en el ducto de descarga, la medida de mitigación propuesta fue la instalación de nuevos soportes en el tramo de amplificación de vibraciones, con esto varía la frecuencia natural del sistema y rigidiza al mismo.

Figure 6: Spectrum of the vibration speed at the measuring point MP 10 in x-direction

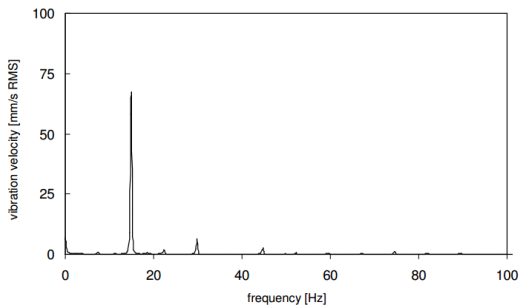


Figura 3.5, Espectro de vibración presente en sector de tubería analizada por Missal, vibración de condición de operación en estado estacionario.

Ref: Robert Missal, Causes, assessment and reduction of piping vibrations.

Figure 7: Spectrum of the vibration at the piping in the zone of the measuring point 10 with an impulse excitation and with the reciprocating compressor shut down

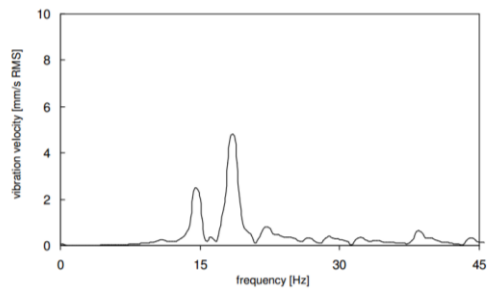


Figura 3.6, Espectro de respuesta en frecuencia ante excitación tipo impacto, (mismo punto que la medición de vibraciones en estado estacionario).

Capítulo 4: Medición y análisis de las vibraciones en las bombas de la sala 2.

Al momento de realizar las primeras mediciones (Agosto de 2012), solamente existían bombas instaladas en las posiciones RABI7 y RABI8 en la sala de bombas 2, en ellas se determinó la magnitud de las vibraciones presentes en portarodamientos y patas de bombas, carcasa y patas de motores eléctricos además de tuberías de admisión y descarga del conjunto, también se realizó un ensayo de respuesta ante excitación tipo impacto para conocer las primeras frecuencias naturales del sistema y así poder comprobar o descartar posibles resonancias estructurales, se realizó además una medición del nivel de vibración de fondo (ruido base) se busca poder aislar solamente la vibración producto de la operación del equipo para tener mejores conclusiones en cuanto al análisis de nivel de vibración realizado.

Se procedió a:

1. Medir vibraciones en la tubería de succión y descarga, porta-rodamiento y patas la bomba para 3 estados de flujo definidos según el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa ubicada en la descarga de la bomba.
2. Realizar una prueba de impacto para determinación de frecuencias naturales.
3. Medir el nivel de vibración base en la bomba y tubería (equipos contiguos operando y equipo analizado detenido).

En la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 se muestran los puntos de medición y direcciones consideradas, en la Figura 4.4 se muestra el proceso de recolección de datos en terreno.

Los resultados tanto como de señales temporales y espectros de vibración correspondientes son presentados en el Anexo B, en este capítulo se expone un resumen con los valores rms de las vibraciones obtenidas y algunas señales representativas del fenómeno observado.

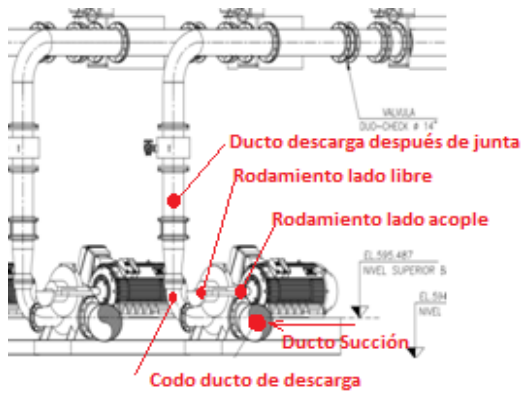


Figura 4.1, Puntos de medición, bomba RABI

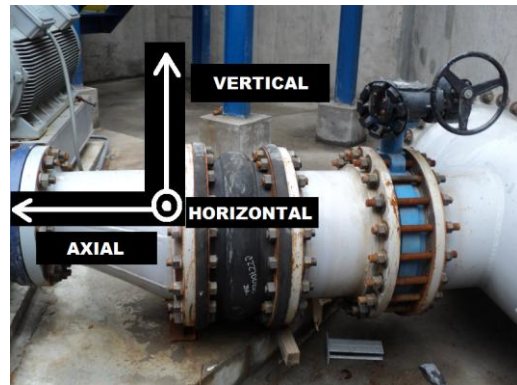


Figura 4.2, Definición de puntos de medición y direcciones, ducto de alimentación

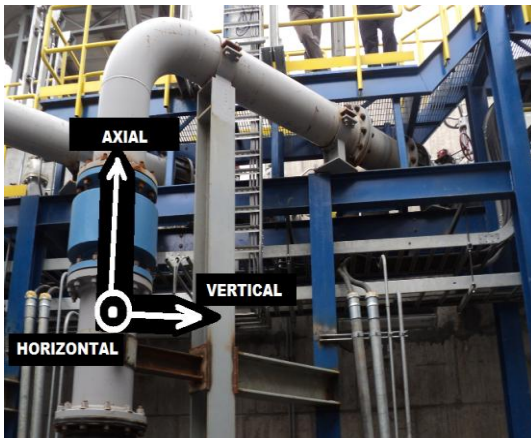


Figura 4.3, Definición de direcciones y puntos de medición, ducto de descarga



Figura 4.4, Imagen tomada durante la de recolección de datos en, bomba RABI 8.

4.1 Vibración de ducto de succión y de descarga de bomba RABI 7

En la Tabla 2 y en la Figura 4.6 se presentan los niveles de vibración rms en los ductos de succión y descarga para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 4.5 se presenta el espectro de vibración para la dirección axial en el ducto de alimentación y descarga, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 81 a 93.

Tabla 2, Vibración rms Ducto RABI 7.

Flujo [m ³ /h]	Axial- succión [mm/s]	Horizontal – succión [mm/s]	Vertical – succión [mm/s]
1 030	7,5	3,9	4,5
770	3,3	1,9	5,5
628	3,8	2,0	3,2
Flujo [m ³ /h]	Axial- descarga [mm/s]	Horizontal – descarga [mm/s]	Vertical – descarga [mm/s]
1 030	8,0	5,8	7,2
770	4,0	4,5	5,5
628	5,5	4,7	3,7

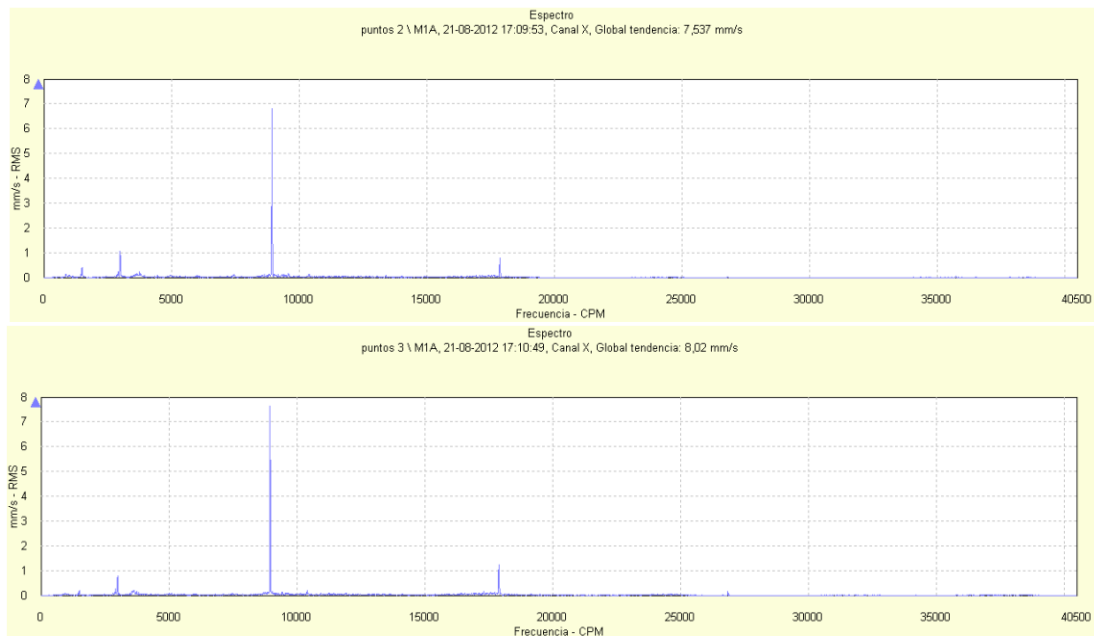


Figura 4.5 Espectros de vibración para la dirección axial en el ducto de succión y descarga de la bomba RABI 7 para una configuración de bombeo de 1 030 m³/h

Vibración ducto succión y descarga RABI7

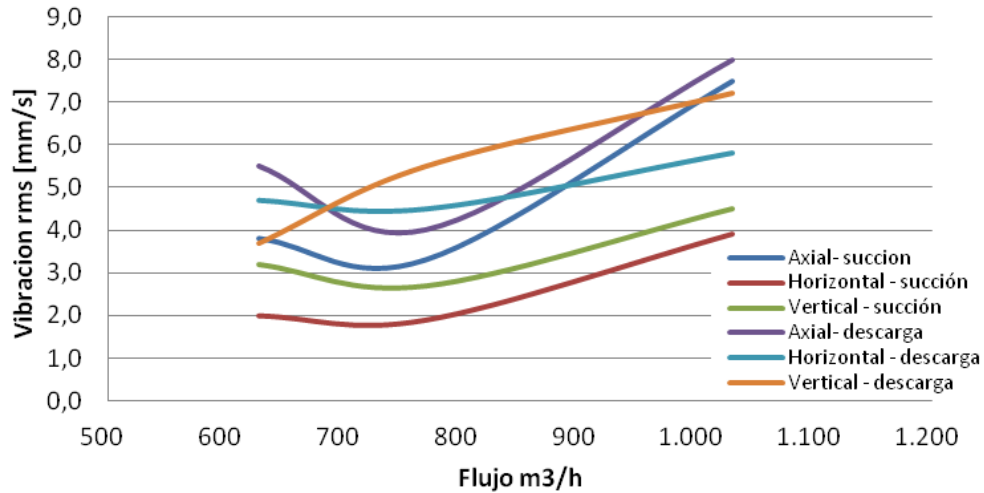


Figura 4.6, Niveles de vibración en ductos bomba RABI7

Comentarios respecto a vibraciones en ductos RABI 7:

- Las vibraciones en el ducto de succión de la bomba RABI7 se encuentran en parámetros calificados como buenos según la norma VDI 3842, la vibración predominante en la dirección axial, tanto en el ducto de succión como de descarga, se produce a una frecuencia de 8 940cpm, que coincide con la frecuencia del paso del álabe.
- Las vibraciones en el plano transversal a la tubería en el ducto de descarga se compone principalmente de vibración a una frecuencia de 1 490 cpm que corresponde a la frecuencia de giro del conjunto motor-bomba y su 2X.

4.2 Vibración en porta-rodamientos de bomba RABI 7

En la Tabla 3 y Figura 4.8 se presentan los niveles de vibración rms en el porta-rodamientos para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 4.7 se presenta un espectro para la dirección axial en el porta-rodamientos lado acople y lado libre, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 94 a 106.

Tabla 3, Vibración rms Portarodamiento RABI 7.

Flujo m³/h	Axial- libre [mm/s]	Horizontal – libre [mm/s]	Vertical – libre [mm/s]
1 030	2,2	2,2	3,9
770	2,6	3,2	4,0
628	7,2	3,0	6,3
Flujo m³/h	Axial- acople [mm/s]	Horizontal – acople [mm/s]	Vertical – acople [mm/s]
1 030	5,1	2,6	3,7
770	4,3	2,8	6,4
628	1,9	2,7	5,1

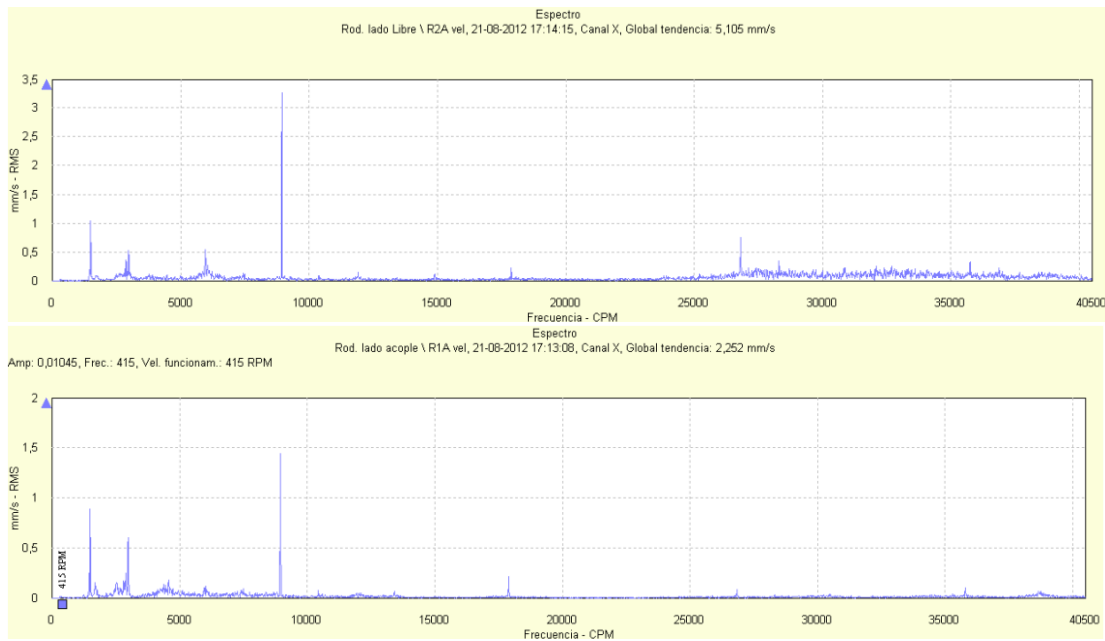


Figura 4.7 Espectros de vibración para la dirección axial en el porta-rodamiento lado libre y lado acople de la bomba RABI 7 para una configuración de bombeo de 1 030 m³/h

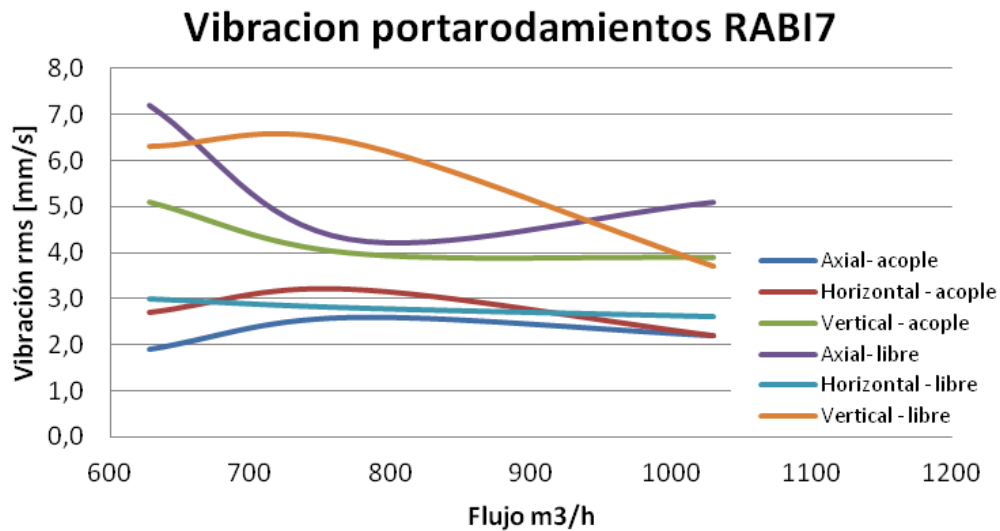


Figura 4.8, Niveles de vibración rms Portarodamiento RABI 7

Comentarios respecto a vibraciones en portarodamientos bomba RABI 7, lado acople:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- En espectro de vibraciones la componente del doble de la velocidad de giro es del orden de magnitud de la componente a la velocidad de giro, esto evidencia una medida de desalineamiento paralelo entre los ejes, pero los valores son bajos comparativamente con el nivel de vibración en velocidad de la componente a la frecuencia de paso del álabe. El nivel global de vibración se encuentra dentro del límite aceptable que establece la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.
- Los máximos valores rms obtenidos se presentan a la frecuencia de paso de álabe.

Comentarios respecto a vibraciones en portarodamientos bomba RABI 7, lado libre:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos, no obstante, se aprecia ruido de alta frecuencia (de 25 000 cpm a 40 000 cpm) que puede ser indicio de problemas hidráulicos en la bomba.
- En espectro de vibraciones la componente del doble de la velocidad de giro es del orden de magnitud de la componente a la velocidad de giro, esto evidencia una medida de desalineamiento paralelo entre los ejes, pero los valores son bajos comparativamente con la frecuencia de paso del álabe. Para algunas direcciones, el

nivel global de vibración se encuentra en el límite de riesgo que establece la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.

- Los máximos valores rms obtenidos se presentan a la frecuencia de paso de álabe.

4.3 Vibración en patas de bomba RABI 7

En la Tabla 4 y Figura 4.10 se presentan los niveles de vibración rms las patas de la bomba RABI 7 para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 4.9 se presenta un espectro para la dirección axial en la pata A y B definidas, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 107 a 115.

Tabla 4, Vibración rms Patas bomba RABI 7.

Flujo m³/h	Pata A [mm/s] Axial- succión	Pata A [mm/s] Horizontal - succión	Pata A [mm/s] Vertical - succión
1 030	1,4	0,6	3,2
770	1,0	1,0	4,0
Flujo m³/h	Pata B [mm/s] Axial- descarga	Pata B [mm/s] Horizontal - descarga	Pata B [mm/s] Vertical - descarga
1 030	1,2	0,2	2,0
770	1,6	0,1	2,0

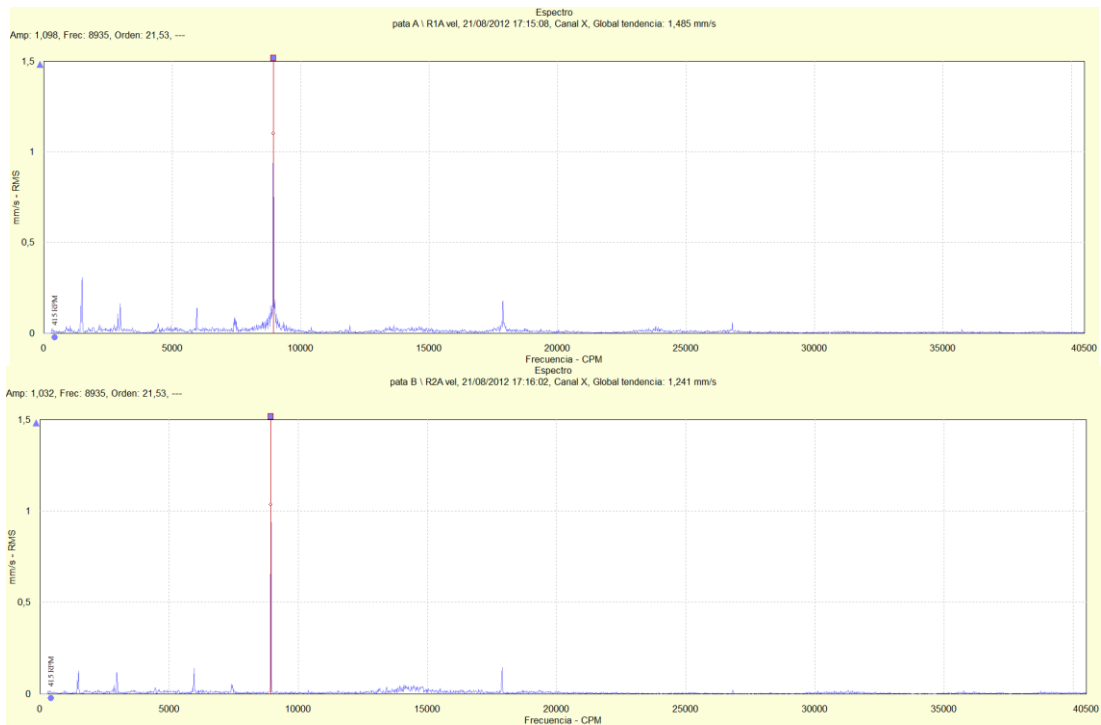


Figura 4.9 espectros de vibración para la dirección axial en el pata lado succión y lado descarga de la bomba RABI 7 para una configuración de bombeo de 1 030 m³/h

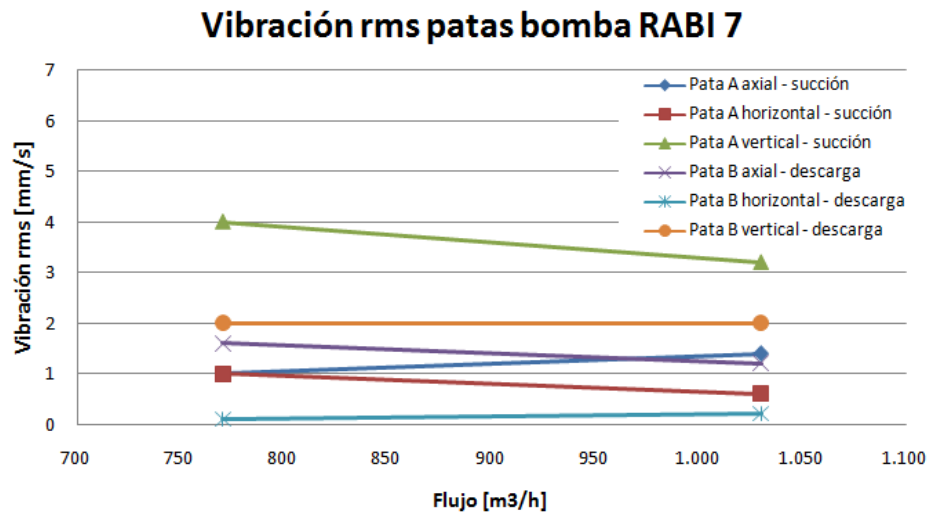


Figura 4.10, Niveles de vibración rms Patas bomba RABI 7

Comentarios respecto a vibración en patas de bomba RABI 7:

- No se aprecia una correlación directa entre flujo impulsado por la bomba y el nivel de vibraciones presente en las patas de la misma.
- Las diferencias de niveles entre distintos puntos de medición se explican por la geometría y las fijaciones individuales de cada pata.
- Los niveles rms están compuestos principalmente por vibración a la frecuencia de paso del álabe.

4.4 Vibración en ducto de succión y descarga de bomba RABI 8

En la Tabla 5 y Figura 4.12 se presentan los niveles de vibración rms del ducto de succión y descarga de la bomba RABI 8 para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 4.11 se presenta un espectro para la dirección axial el ducto de alimentación y descarga para la condición de bombeo de 988 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 116 a 128.

Tabla 5, Vibración rms Ducto RABI 8.

Flujo [m ³ /h]	Axial- succión [mm/s]	Horizontal – succión [mm/s]	Vertical – succión [mm/s]
988	4,1	5,6	7,8
760	4,7	6,0	7,7
610	4,1	5,5	4,5
Flujo [m ³ /h]	Axial- descarga [mm/s]	Horizontal – descarga [mm/s]	Vertical – descarga [mm/s]
988	23,1	31,7	27,7
760	11,9	14,1	15,3
610	10,2	13,1	13,7

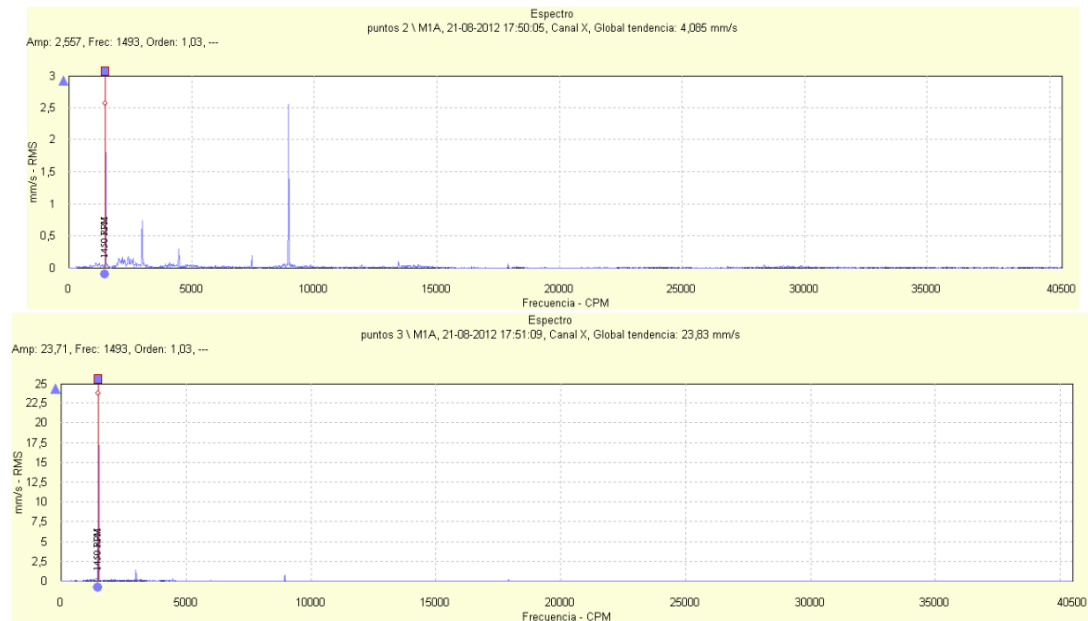


Figura 4.11 Espectros de vibración para la dirección axial en el ducto de succión y lado descarga de la bomba RABI 8 para la configuración de bombeo de 988 m³/h

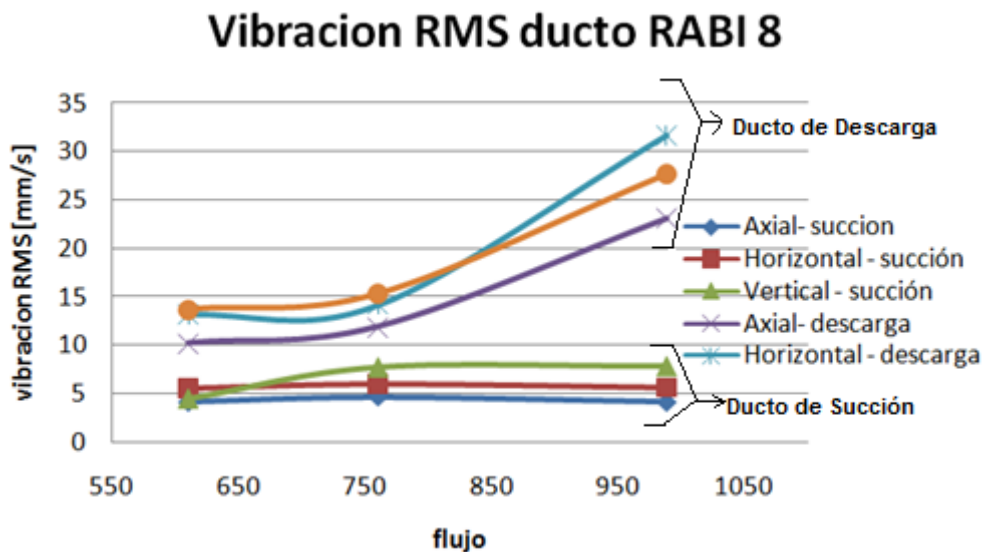


Figura 4.12, Nivel de vibración rms Ducto RABI 8

Comentarios respecto a vibración en ducto succión y descarga de bomba RABI8:

- Las vibraciones en el ducto de succión se encuentran en parámetros calificados como buenos según la norma VDI 3842, las máximas componentes de vibración se producen a la frecuencia de 8 940 cpm, que coincide con la frecuencia del paso del álabe y 1 490 cpm que corresponde a la frecuencia de giro del conjunto motor bomba.
- Las vibraciones en el plano transversal a la tubería en el ducto de descarga se componen principalmente de vibración a una frecuencia de 1 490 cpm que corresponde a la frecuencia de giro del conjunto motor-bomba, estas vibraciones se encuentran sobre los parámetros establecidos, por la VDI 3842, para condición normal de funcionamiento. Se deben tomar medidas para atenuar estos niveles de vibración.

4.5 Vibración en portarodamientos de bomba RABI 8

En la Tabla 6 y Figura 4.14 se presentan los niveles de vibración rms del porta-rodamientos lado acople y lado libre de la bomba RABI 8 para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 4.13 se presentan los espectros para la dirección axial en el porta-rodamientos lado acople y lado libre para la condición de bombeo de 988 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 129 a 141.

Tabla 6, Vibración rms Porta-rodamiento RABI 8.

Flujo [m ³ /h]	Axial- libre [mm/s]	Horizontal – libre [mm/s]	Vertical – libre [mm/s]
988	4,8	6,2	8,9
760	4,4	7,7	8,3
610	4,1	6,6	7,5
Flujo [m ³ /h]	Axial- acople [mm/s]	Horizontal – acople [mm/s]	Vertical – acople [mm/s]
988	6,8	5,4	6,3
760	5,1	4,5	5,5
610	5,1	4,1	5,2

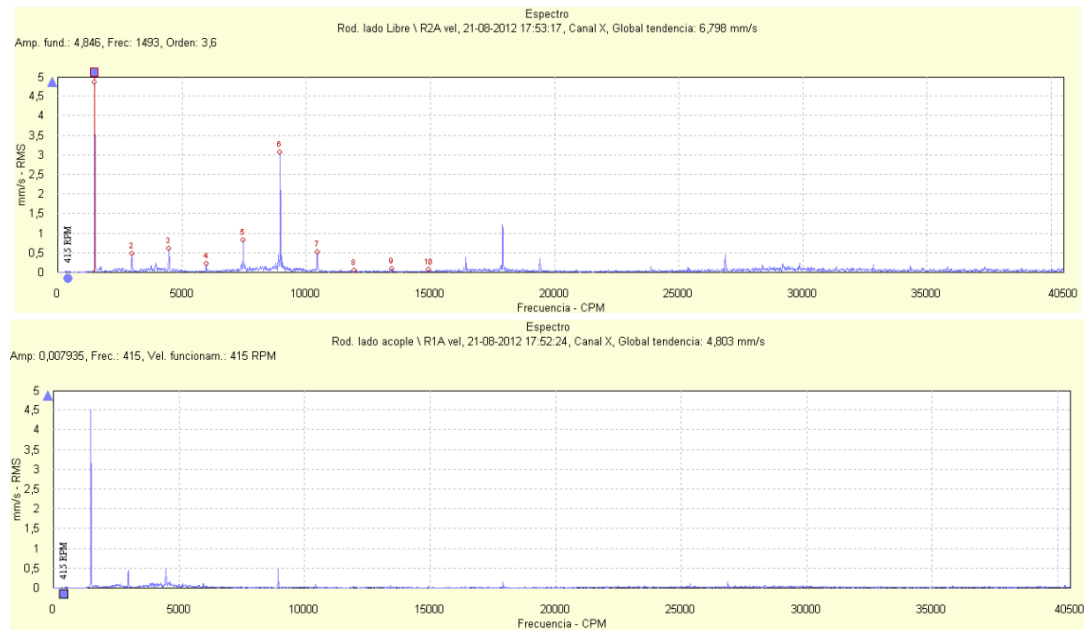


Figura 4.13 Espectros de vibración para la dirección axial en el porta-rodamientos lado libre y lado acople de la bomba RABI 8 para la configuración de bombeo de 988 m³/h

Vibración RMS portarodamientos RABI8

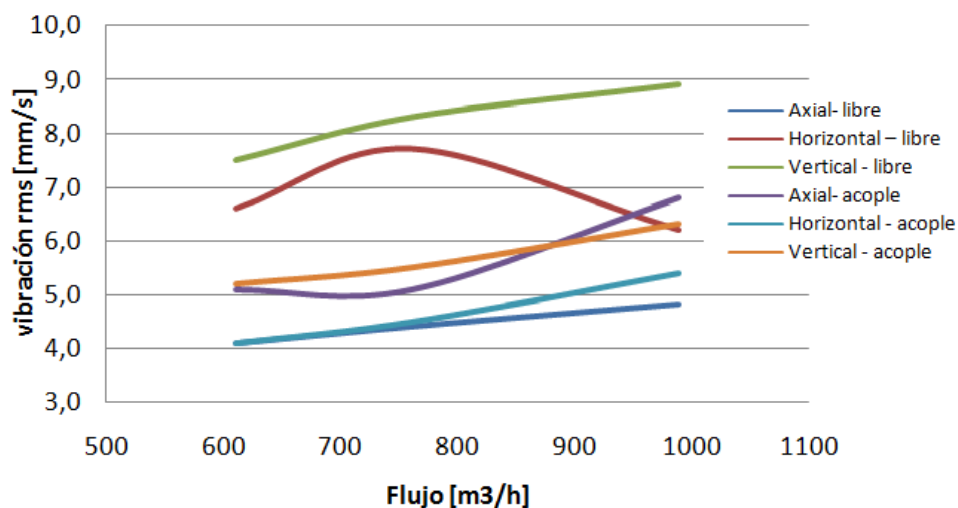


Figura 4.14, Nivel de vibración rms Porta-rodamiento RABI 8

Comentarios respecto a vibración en porta-rodamientos bomba RABI8, lado acople:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- El nivel global de vibración es considerado peligroso según la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.
- Los máximos valores rms obtenidos se presentan a la frecuencia de giro de la bomba.

Comentarios respecto a vibración en porta-rodamientos bomba RABI8, lado libre:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- El nivel global de vibración es considerado peligroso según la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.
- Los máximos valores rms obtenidos se presentan a la frecuencia de giro de la bomba.

4.6 Vibración en patas de bomba RABI 8

En la Tabla 7 y Figura 4.16 se presentan los niveles de vibración rms de las patas de la bomba RABI 8 lado succión y lado descarga para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 4.15 se presentan los espectros para la dirección axial en el las patas acople y lado libre para la condición de flujo de 988 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 142 a 150.

Tabla 7, Vibración rms Patas bomba RABI 8.

Flujo [m ³ /h]	Pata A [mm/s] Axial- succión	Pata A [mm/s] Horizontal - succión	Pata A [mm/s] Vertical – succión
988	3,0	1,6	5,8
760	2,7	2,3	6,1
Flujo [m ³ /h]	Pata B [mm/s] Axial- descarga	Pata B [mm/s] Horizontal - descarga	Pata B [mm/s] Vertical – descarga
988	2,7	0,6	2,2
760	2,7	0,8	1,8

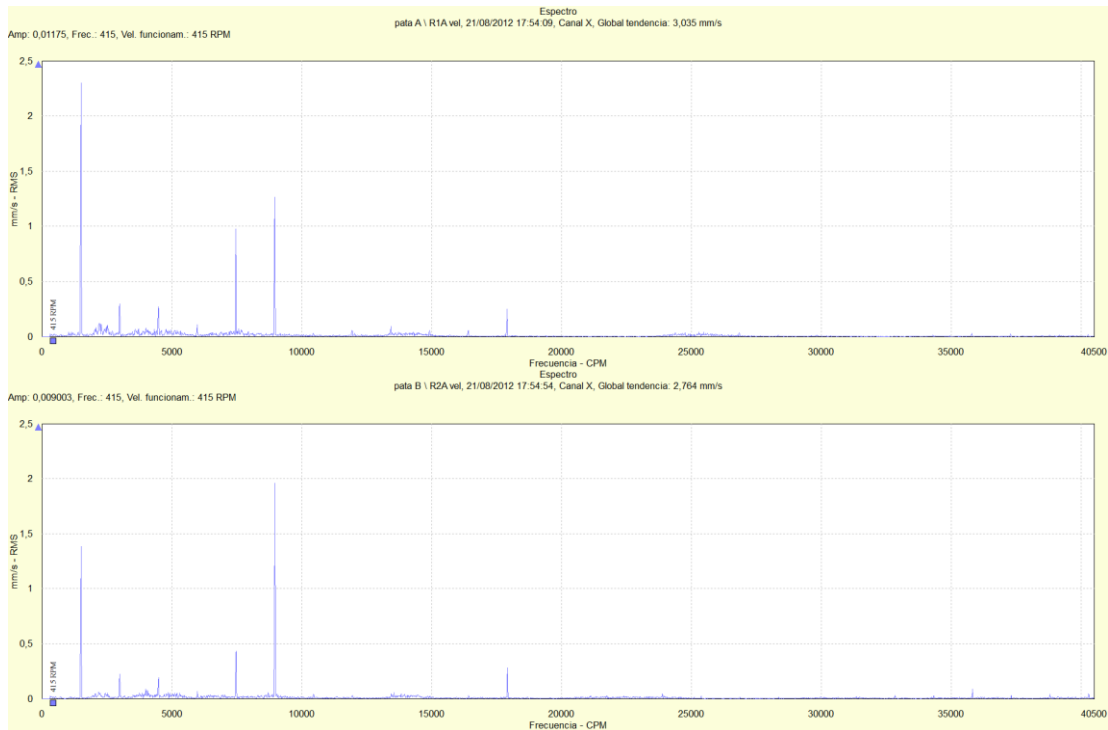


Figura 4.15 Espectros de vibración para la dirección axial en pata lado succión y lado descarga de la bomba RABI 8 para la configuración de bombeo de 988 m³/h

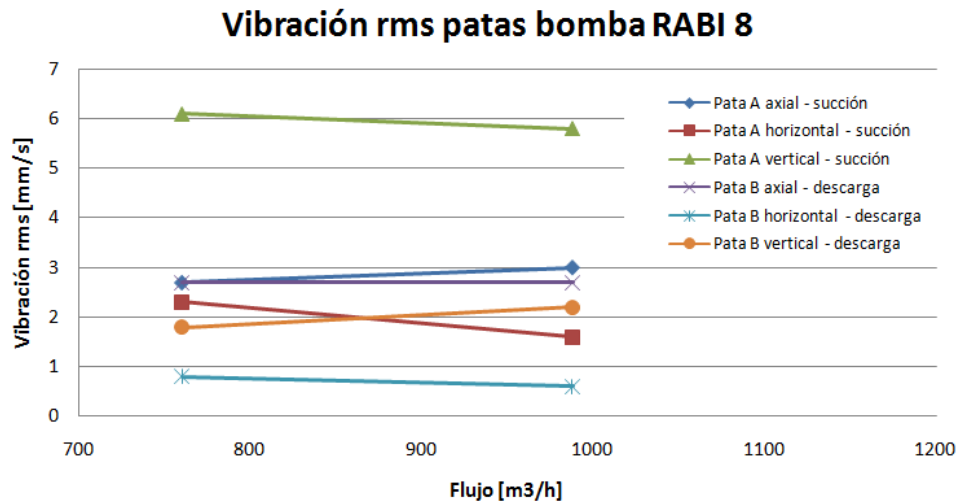


Figura 4.16, Vibración rms, patas bomba RABI 8

Comentarios respecto a vibración en patas de bomba RABI 8:

- No se aprecia una correlación directa entre flujo impulsado por la bomba y nivel de vibraciones presente en las patas de la misma.
- Las diferencias de niveles entre distintos puntos de medición se explican por la geometría y las fijaciones individuales de cada pata.

4.7 Vibración de fondo de bomba RABI 8

Las mediciones de ruido de fondo se efectuaron en ducto de descarga de la bomba RABI 8 bajo la condición de operación de la bomba RABI 7 impulsando 1 030 m³/h, los valores de vibración obtenidos fueron⁷:

Vibración Axial: 0,09 mm/s

Vibración radial: 0,64 mm/s

En la vibración radial se aprecia en la señal temporal una modulación en frecuencia dominante de 1 490 cpm. En señal axial se aprecia mayor cantidad de ruido pero dominado

⁷ En el Anexo B de las páginas 151 a la 154 se presentan la totalidad de señales adquiridas en el ducto de alimentación y descarga para esta configuración de medición.

por la frecuencia de 1 490 cpm su 2x y un par de frecuencias que no representan múltiplos enteros de la velocidad de giro del conjunto motor-bomba. (Ver Figura 4.17)

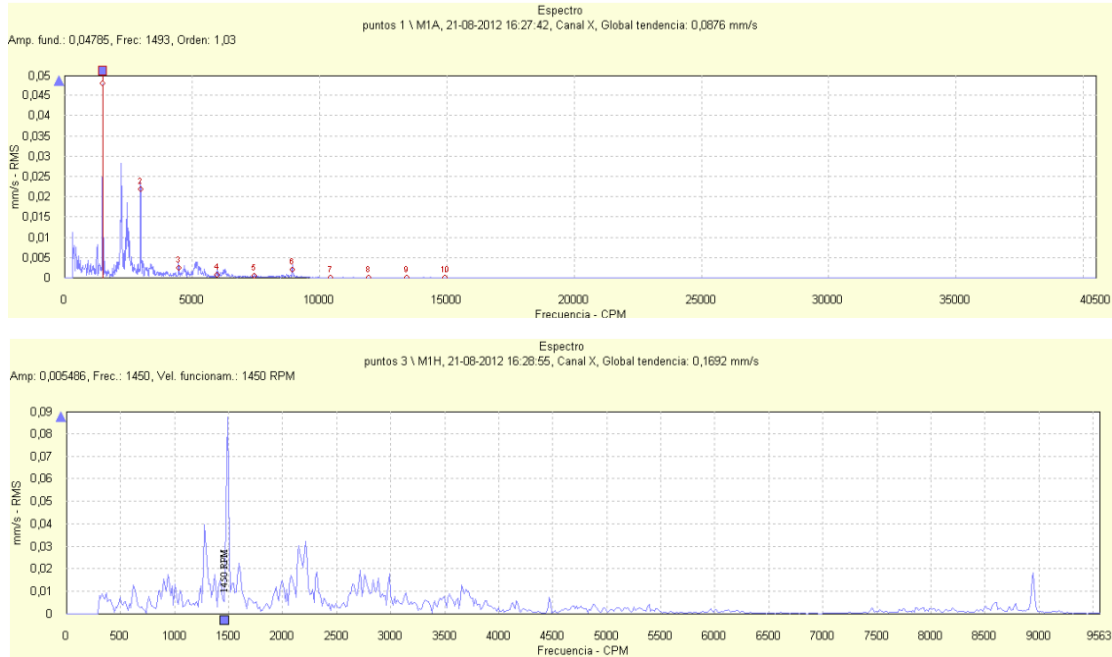


Figura 4.17 Espectros de vibración del ruido de fondo para la dirección axial y horizontal en el ducto de descarga de la bomba RABI 8 para la configuración de detención en la bomba RABI 8 y operación en la bomba RABI7.

Los niveles rms de vibración son de baja intensidad respecto de la vibración presente para cualquier configuración de operación del equipo.

Capítulo 5: Determinación de frecuencias naturales en ducto de descarga de las bombas presentes en la sala 2.

5.1 Ensayo de respuesta en frecuencia

Se procedió a excitar la tubería de descarga de la bomba RABI 8 mediante impactos en unión flangeada presente entre junta de expansión de 14'' y carrete flange-flange de 14'', y a tomar lectura de vibraciones en direcciones axial y transversal en tramo superior a junta de expansión de 14'', en la Figura 5.1 se presenta el lugar de impacto y adquisición de señales.



Figura 5.1, Configuración de excitación y adquisición en ensayo de respuesta ante impacto en bomba RABI8

Los impactos se realizaron de manera radial en la zona descrita, para la estimación de la frecuencia natural se traspasaron los valores de la vibración, punto a punto para 160 datos en total por cada dirección, a un archivo de texto, posteriormente este archivo de texto fue procesado en software MATLAB para determinar las frecuencias naturales obtenidas, en la

Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 se muestran los resultados obtenidos para las señales axial y transversal:

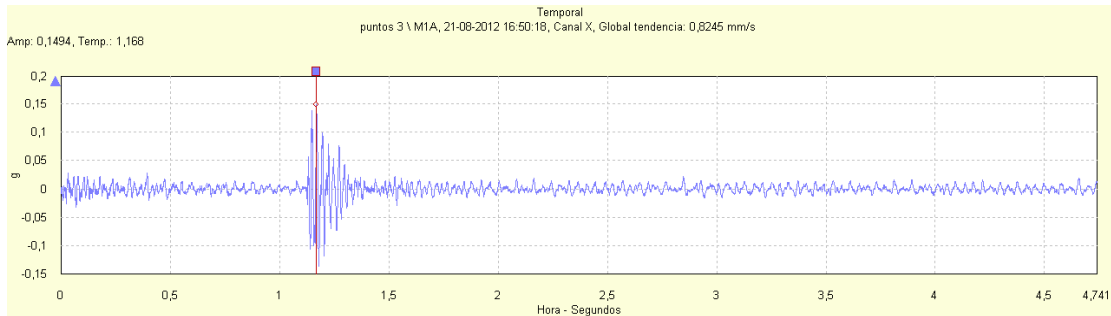


Figura 5.2, Señal temporal vibración axial, respuesta ante perturbación tipo impacto

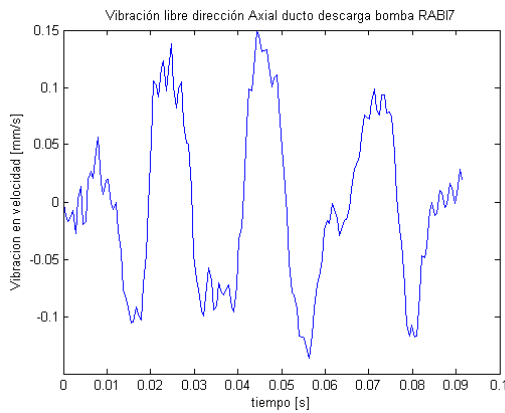


Figura 5.3, Fracción de señal temporal vibración axial, respuesta ante perturbación tipo impacto

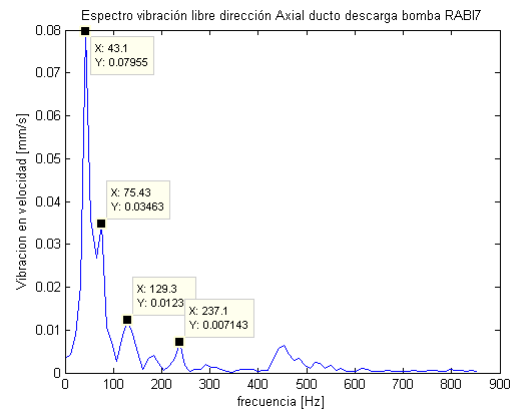


Figura 5.4, Respuesta en frecuencia de sistema, en componente axial, ante impacto aplicado

Frecuencia natural axial detectada: 43,1 Hz (2 586 cpm), 75,4 Hz (4 524 cpm), 129,3 Hz (7 758 cpm)

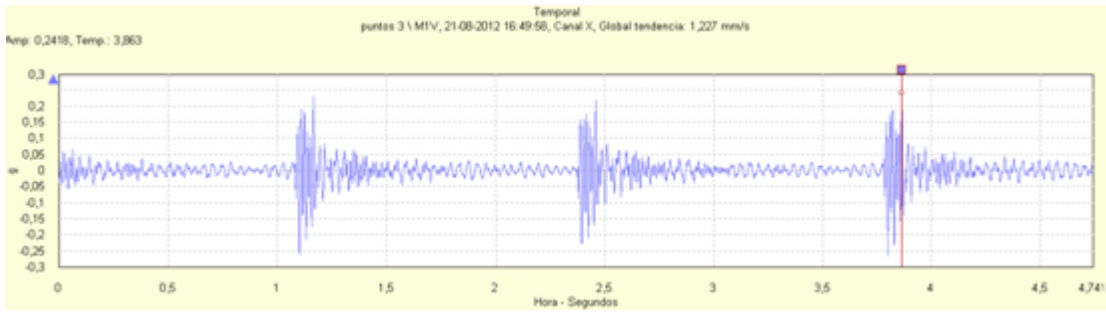


Figura 5.5, Señal temporal vibración transversal, respuesta ante perturbación tipo impacto

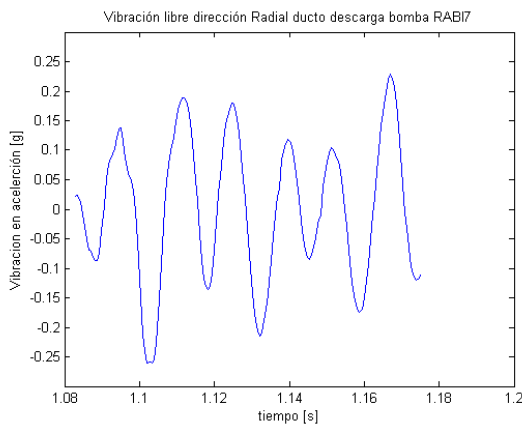


Figura 5.6, Señal temporal vibración transversal, respuesta ante perturbación tipo impacto

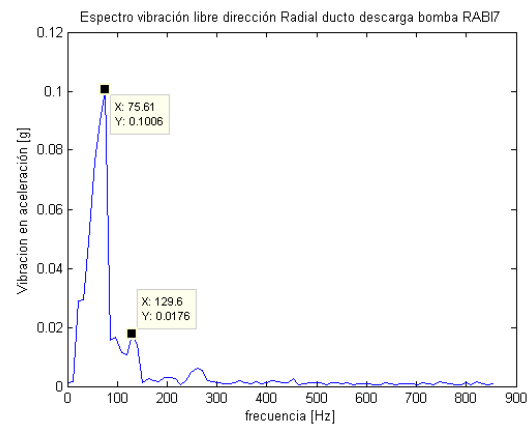


Figura 5.7, Respuesta en frecuencia de sistema, en componente axial, ante impacto aplicado

Frecuencia natural radial detectada: 75,6Hz (4 597 cpm), 129,6Hz (7 776 cpm)

5.2 Modelo FEM del ducto descarga de las bombas RABI de la sala de bombas 2.

Se modeló en software de elementos finitos el ducto de descarga de las bombas RABI presentes en la sala de bombas 2, se modeló la tubería en material acero, los flujómetros y válvulas presentes en la línea de impulsión fueron modelados según sus dimensiones manteniendo el peso constante y aumentando su densidad puntualmente. Las condiciones de borde utilizadas fueron de empotramiento en ambos extremos de la tubería y empotramiento en vigas estructurales incluidas en el modelo 3D, el enmallado se realizó con calidad fina, se configuró el software para la obtención de las 10 primeras frecuencias naturales.

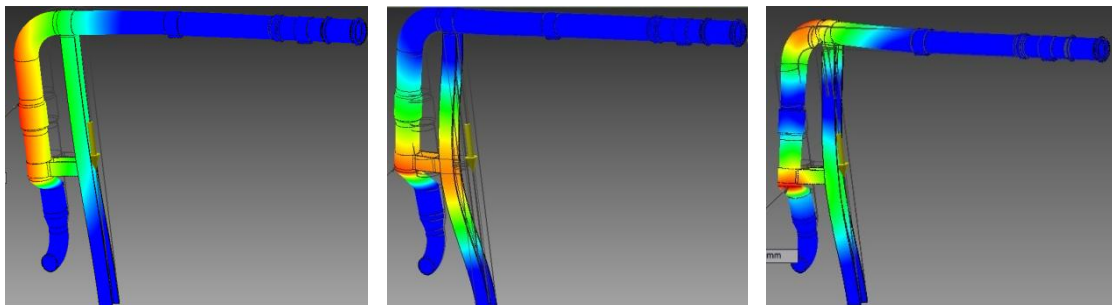
En la Figura 5.8 se presenta una imagen del modelo sólido y en la Tabla 8 se presentan los valores de las frecuencias naturales obtenidas, en la Figura 5.9 se muestran los 3 primeros modos de vibración.



Figura 5.8, Modelo 3D utilizado en análisis modal.

Tabla 8, Frecuencias naturales obtenidas a partir de modelo FEM de ducto de descarga bombas RABI

Modo	Frecuencia [Hz]
1	27,43
2	39,65
3	61,56
4	80,00
5	85,65
6	87,12
7	118,94
8	158,43
9	158,59
10	163,67



1er modo natural, $f= 27,4$ Hz 2do modo natural, $f= 39,7$ Hz 3er modo natural, $f= 61,6$ Hz

Figura 5.9, 3 primeros modos de vibración ducto descarga bombas RABI

En la Tabla 9 se aprecia la comparación entre los modos naturales obtenidos a partir del ensayo de respuesta ante impacto y los modos obtenidos en simulación numérica.

Tabla 9, Comparación frecuencias naturales obtenidas a partir de ensayo de respuesta ante impacto y modelo FEM

Modelo FEM [Hz]	Ensayo impacto [Hz]	% Variación
27,43		
39,65	43,1	-8,7%
61,56		
80,00	75,5	5,6%
85,65		
87,12		
118,94	129,5	-8,9%
158,43		

La no detección de algunos modos de vibración en el ensayo de impacto se explica por la energía entregada al sistema mediante los impactos localizados, al ser puntual es más probable excitar localmente el sistema provocando respuestas ante impacto en modos de vibración más altos que el natural donde predomina el desplazamiento local en el sector del punto de medición. Se compararon las frecuencias determinadas mediante el ensayo de impacto y modelo FEM de manera que se cotejaran las que más se asemejaran, de esta forma la desviación obtenida del ensayo de impacto respecto al modelo FEM fue menor al 10% para las frecuencias naturales detectadas. De todos los datos obtenidos se puede concluir que se descarta una resonancia estructural entre la excitación presente a la velocidad de giro de la bomba y las frecuencias naturales del ducto de descarga.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones del análisis de vibraciones.

- Se observó un comportamiento proporcional entre el nivel de vibraciones y el flujo impulsado por la bomba.
- Para la bomba instalada en la postura RABI8 se observó en la dirección transversal al sentido del ducto, un alto nivel de vibración, de tipo sinusoidal con frecuencia de 1480cpm.
- El nivel de vibraciones en el ducto de alimentación permanece relativamente constante a pesar de variar el flujo impulsado por la bomba.
- En el porta-rodamientos de las bombas los niveles de vibración se ven incrementados por la presencia de frecuencia de paso de álabe (6x velocidad de giro).
- En las patas de las bombas los niveles de vibración permanecen constantes en relación al flujo impulsado por la bomba, los espectros muestran una oscilación predominante a la frecuencia de paso del álabe de la bomba (6x velocidad de giro).
- Para las vibraciones presentes en la bomba RABI 8, existe una condición anormal en los elementos de impulsión de la bomba que generan pulsaciones de presión en el ducto de descarga, generando la oscilación del mismo a la frecuencia de giro de la bomba, estas pulsaciones son proporcionales al flujo impulsado. Con la determinación de las frecuencias naturales realizada, se descartó que el alto nivel de vibraciones pudiese deberse a alguna resonancia estructural.
- Los altos niveles de vibración a la frecuencia de paso de álabe presentes en los porta-rodamientos de la bomba y patas de la misma indican problemas de traspaso de fluido entre impulsor y carcasa, esto por operación con flujos muy bajos respecto al punto de mejor eficiencia (BEP) para la configuración de impulsión de la bomba (rodete-rpm).
- Para la postura RABI 8, se recomienda cambiar la bomba presente por otra con mantenimiento al día para evaluar su comportamiento.

- Para la postura RABI 7, se recomienda continuar con la operación habitual de la bomba.
- Se debe instalar bomba en postura RABI 6 para evaluar su comportamiento.

Capítulo 7: Mediciones posteriores a implementación de recomendaciones realizadas.

Como recomendación tras el levantamiento de la condición de operación de las bombas RABI presentes en la sala de bombas 2, se propuso instalar una bomba en la posición RABI 6 para realizar las mediciones, también se propuso reemplazar el equipo ubicado en la postura RABI 8 para evaluar la condición con un equipo con mantenimiento al día.

Una vez implementadas ambas recomendaciones y con fecha 01 de octubre de 2012 se realizaron las mediciones de vibraciones para distintas configuraciones de flujo en las bombas RABI 6 y RABI 8 recién instaladas, a continuación se presentan los resultados⁸:

7.1 Vibración en el ducto succión y descarga de la bomba RABI 6

En la Tabla 10 y Figura 7.2 se presentan los niveles de vibración rms del ducto de succión y descarga de la bomba RABI 6 para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 7.1 se presentan los espectros para la dirección axial en el ducto de succión y descarga para la condición de bombeo de 1 000 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 157 a 169.

Tabla 10, Vibración rms Ducto RABI 6 posterior a instalación.

Flujo [m³/h]	Axial- Succión [mm/s]	Horizontal – Succión [mm/s]	Vertical – Succión [mm/s]
650	3,1	4,8	4,9
800	2,7	4,6	4,1
1 000	2,5	5,7	4,1
Flujo [m³/h]	Axial- Descarga [mm/s]	Horizontal – Descarga [mm/s]	Vertical – Descarga [mm/s]
650	10,1	7,8	2,1
800	8,9	1,3	6,3
1 000	7,1	2,5	7,1

⁸ Los flujos máximos alcanzados durante la ejecución de los ensayos se ven influenciados por la condición de bombeo de la sala en general (número de bombas en paralelo) junto con las eficiencias mecánicas e hidráulicas de las bombas ensayadas y no tienen que ser los mismos que en las pruebas anteriormente realizadas.

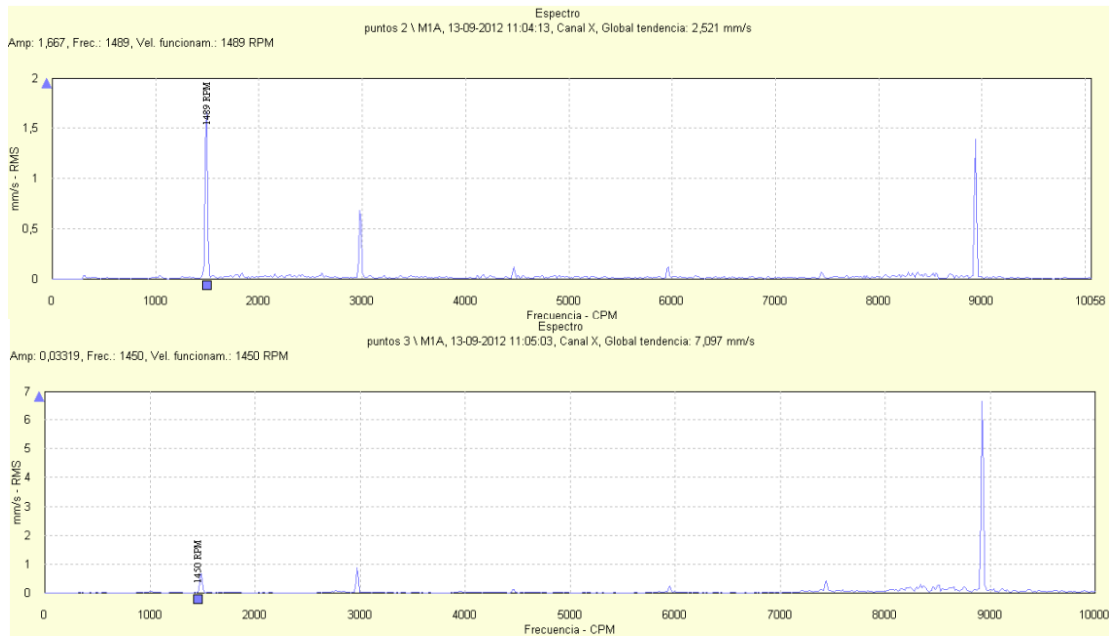


Figura 7.1 Espectros de vibración para la dirección axial en el ducto de succión y descarga de la bomba RABI 6 para la configuración de bombeo de 1 000 m³/h.

Vibración RMS ducto RABI 6

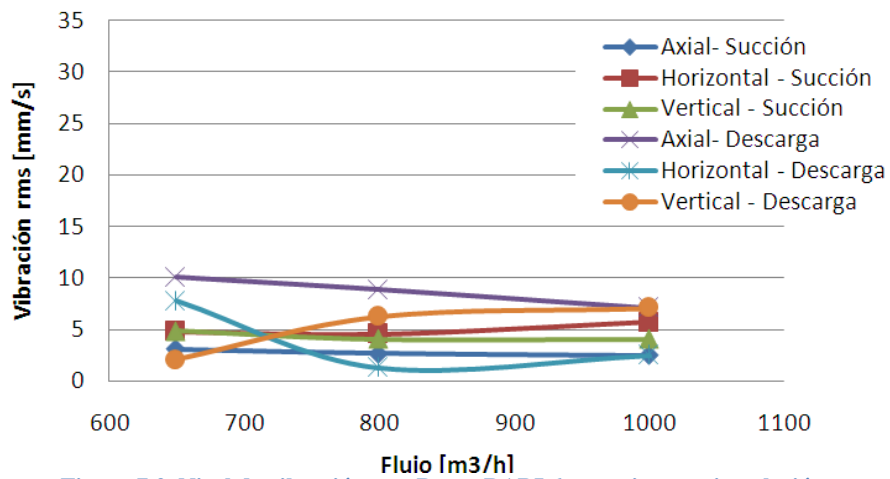


Figura 7.2, Nivel de vibración rms Ducto RABI 6 posterior a su instalación.

Comentarios respecto a la vibración en ducto de succión y descarga de bomba RABI6:

- Las vibraciones en el ducto de succión de la bomba RABI6 se encuentran en parámetros calificados como buenos según la norma VDI 3842.

- Las vibraciones en el plano transversal a la tubería en el ducto de descarga de la bomba RABI 6 se componen principalmente de vibración a una frecuencia de 1 490 cpm y 8 940 cpm que corresponden a la frecuencia de giro del conjunto motor-bomba y frecuencia de paso del álabe respectivamente, su nivel es calificado como bueno según la norma VDI 3842.

7.2 Vibración en portarodamientos de la bomba RABI 6

En la Tabla 11 y Figura 7.4 se presentan los niveles de vibración rms del porta-rodamientos lado acople y lado libre de la bomba RABI 6 para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 7.3 se presentan los espectros para la dirección axial en el porta-rodamientos lado acople y lado libre para la condición de bombeo de 1 000 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 170 a 182.

Tabla 11, Vibración rms Portarodamiento RABI 6 posterior a su instalación.

Flujo [m ³ /h]	Axial- libre [mm/s]	Horizontal – libre [mm/s]	Vertical – libre [mm/s]
650	4,4	2,6	4,6
800	4,4	3,3	3,9
1000	7,4	2,0	5,5
Flujo [m ³ /h]	Axial- acople [mm/s]	Horizontal – acople [mm/s]	Vertical – acople [mm/s]
650	4,6	5,4	6,2
800	4,4	5,5	6,7
1000	7,2	5,5	6,7

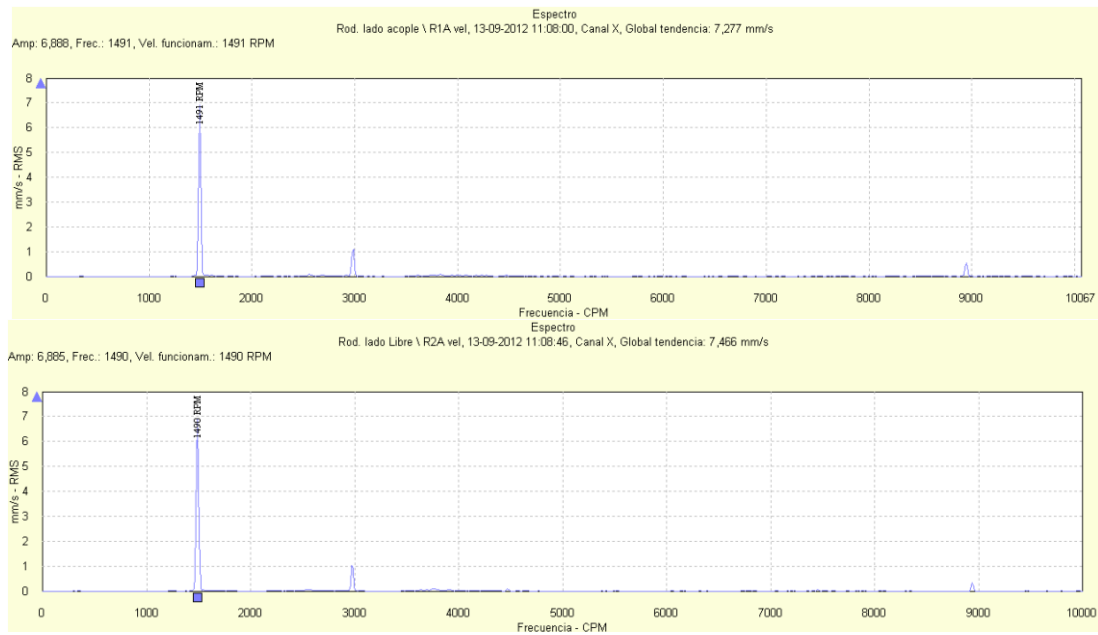


Figura 7.3 Espectros de vibración para la dirección axial en el porta-rodamientos lado acople y lado libre de la bomba RABI 6 para la configuración de bombeo de 1 000 m³/h.

Vibración RMS portarodamientos RABI 6

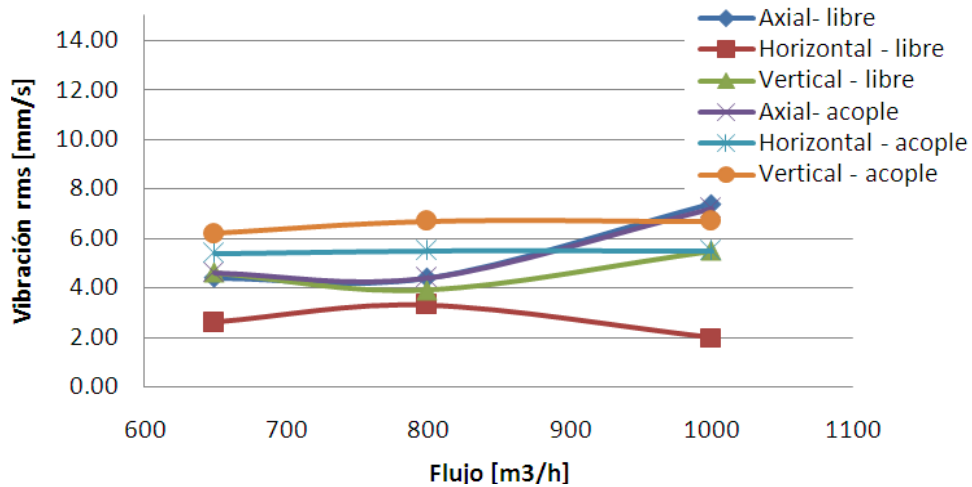


Figura 7.4, Nivel de vibración rms Portarodamiento RABI 6 posterior a su instalación. [mm/s]

Comentarios respecto a la vibración en portarodamientos bomba RABI 6, lado acople:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- El nivel global de vibración se encuentra dentro del límite aceptable que establece la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo, sin embargo existen un par de medidas que sobrepasan el valor aceptable definido por la norma. El nivel de vibraciones no representa peligro para la operación.
- Los máximos valores rms obtenidos se presentan a la frecuencia de giro de la bomba.

Comentarios respecto a la vibración en portarodamientos bomba RABI 6, lado libre:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- El nivel global de vibración se encuentra dentro del límite aceptable que establece la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.
- Los máximos valores rms obtenidos se presentan a la frecuencia de giro de la bomba.

7.3 Vibración en el ducto de succión y descarga de la bomba RABI 8 con bomba nueva

En la Tabla 12 y Figura 7.6 se presentan los niveles de vibración rms del ducto de succión y descarga de la bomba RABI 8, posterior al reemplazo de la bomba, para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 7.5 se presentan los espectros para la dirección axial en el ducto de succión y descarga para la condición de bombeo de 820 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 183 a 191. En las Figura 7.7 y Figura 7.8 se presenta un comparativo de los niveles de vibración en los ductos versus flujo impulsado, antes y después de la intervención realizada. No fue necesario realizar las pruebas para flujos superiores a 820 m³/h porque el comportamiento anómalo de vibraciones en el ducto de descarga se había reparado.

Tabla 12, Vibración rms, Ducto RABI 8 posterior a cambio de bomba.

Flujo [m ³ /h]	Axial- succion [mm/s]	Horizontal – succión [mm/s]	Vertical – succión [mm/s]
650	4,8	3,5	4,9
820	2,3	2,7	3,5
Flujo [m ³ /h]	Axial- descarga [mm/s]	Horizontal – descarga [mm/s]	Vertical – descarga [mm/s]
650	6,3	4,1	5,4
820	6,2	3,6	4,5

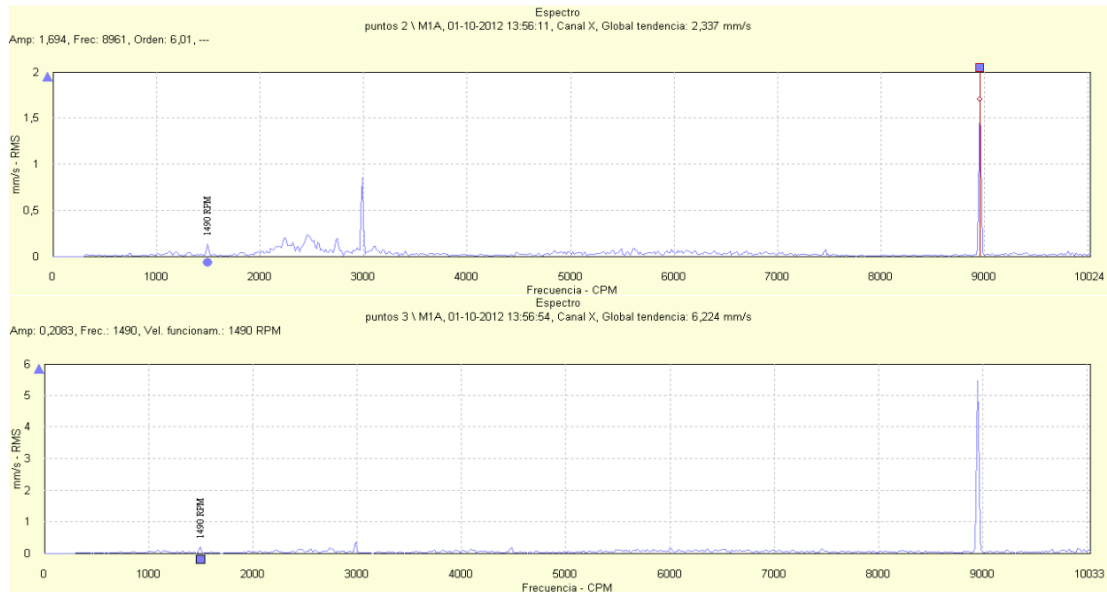


Figura 7.5 Espectros de vibración para la dirección axial en el ducto de succión y descarga de la bomba RABI 8 para la configuración de bombeo de 820 m³/h.

Vibración RMS ducto RABI 8

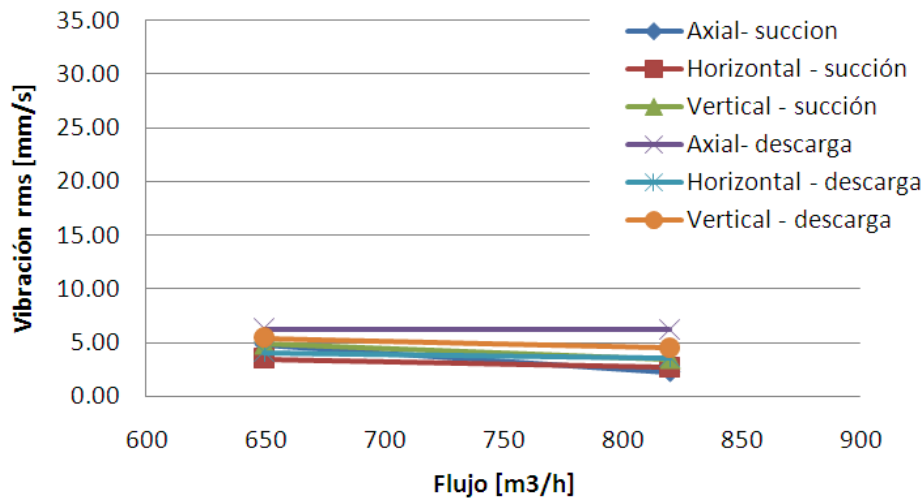


Figura 7.6, Nivel de vibración rms Ducto RABI 8 posterior a cambio de bomba

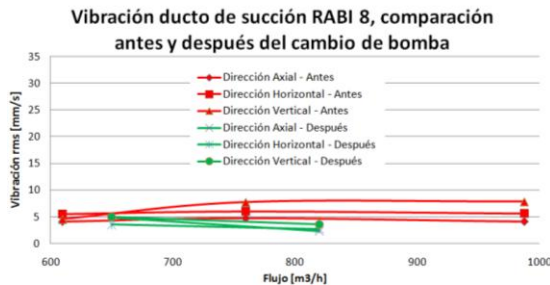


Figura 7.7 Comparativo ducto succión antes y después de cambio de bomba.

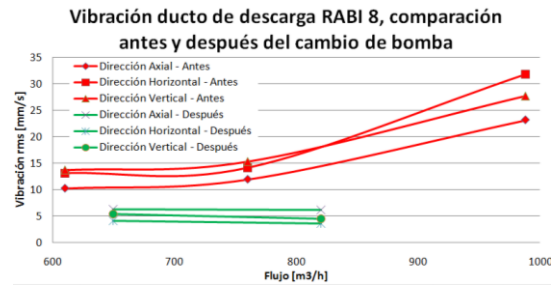


Figura 7.8 Comparativo ducto de descarga antes y después de cambio de bomba.

Comentarios respecto a la vibración en ducto de succión y descarga bomba RABI8:

- Las vibraciones en el ducto de succión y descarga de la bomba RABI8 se encuentran en parámetros calificados como buenos según la norma VDI 3842, las máximas componentes de vibración se producen a la frecuencia de 8 940 cpm, que coincide con la frecuencia del paso del álabe y 1 490 cpm que corresponde a la frecuencia de giro del conjunto motor bomba.
- Para el ducto de descarga se aprecia una baja considerable en los niveles de vibración en todas las direcciones.

7.4 Vibración en el portarodamientos de la bomba RABI 8 con bomba nueva

En la Tabla 13 y Figura 7.10 se presentan los niveles de vibración rms en el portarodamientos lado acople y lado libre de la bomba RABI 8 para las direcciones axial, vertical y horizontal definidas. En la Figura 7.9 se presentan los espectros para la dirección axial en el porta-rodamientos lado acople y lado libre para la condición de bombeo de 820 m³/h, para un detalle de cada señal temporal y espectro respectivo, revisar el Anexo B páginas 192 a 200. En las Figura 7.11 y Figura 7.12 se presenta un comparativo de los niveles de vibración en el porta-rodamientos versus flujo impulsado, antes y después de la intervención realizada.

Tabla 13, Vibración rms, portarodamiento RABI 8, posterior a cambio de bomba.

Flujo [m³/h]	Axial- libre [mm/s]	Horizontal – libre [mm/s]	Vertical – libre [mm/s]
650	3,8	2,7	6,6
820	3,1	2,4	4,9
Flujo [m³/h]	Axial- acople [mm/s]	Horizontal – acople [mm/s]	Vertical – acople [mm/s]
650	3,6	3,3	6,4
820	2,9	2,9	6,3

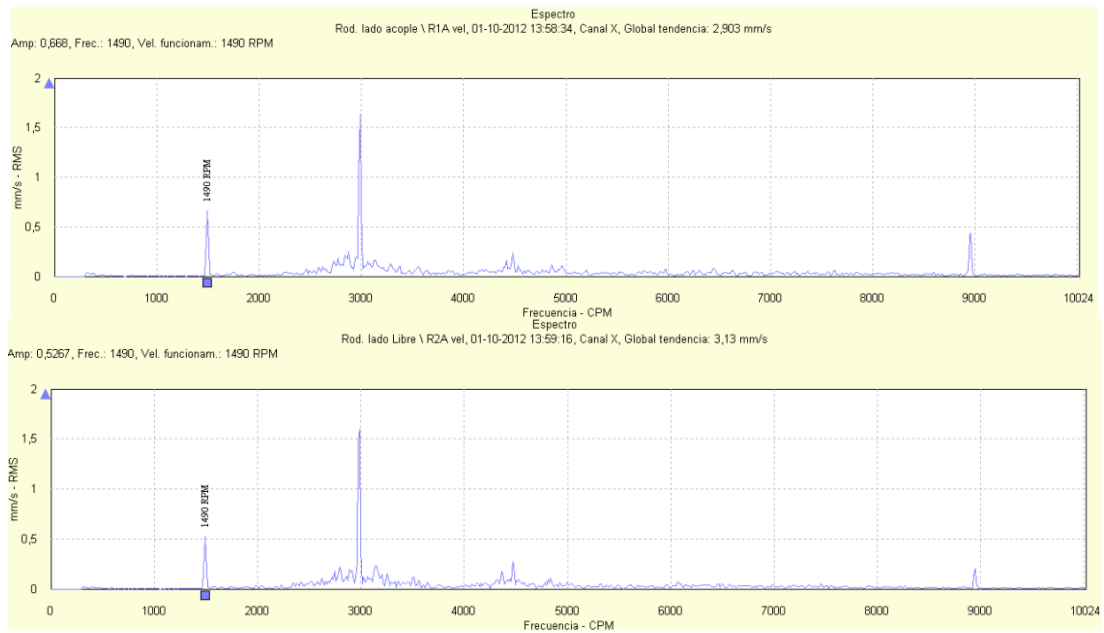


Figura 7.9 Espectros de vibración para la dirección axial en el porta-rodamientos lado acople y lado libre de la bomba RABI 8 para la configuración de bombeo de 820 m³/h.

Vibración RMS portarodamientos RABI 8

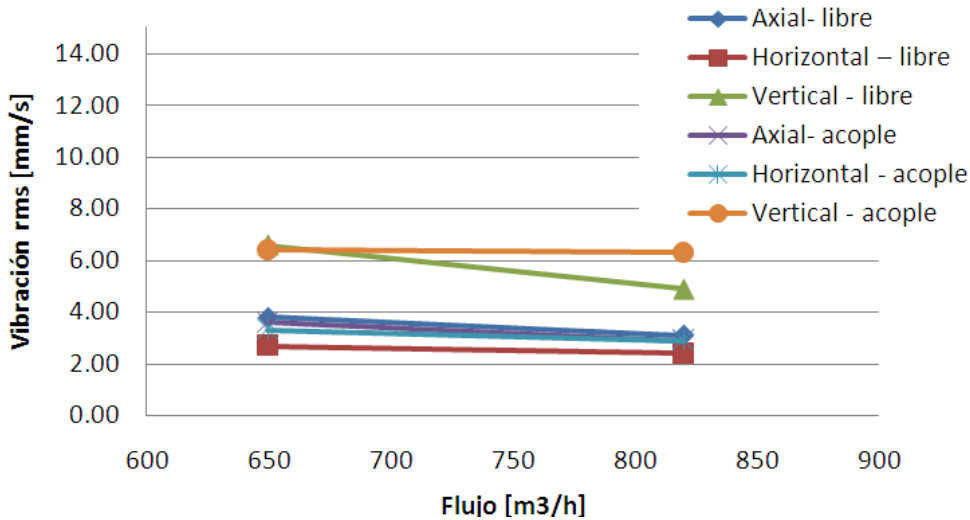


Figura 7.10, Vibración rms Porta-rodamiento RABI 8, posterior a cambio de bomba.

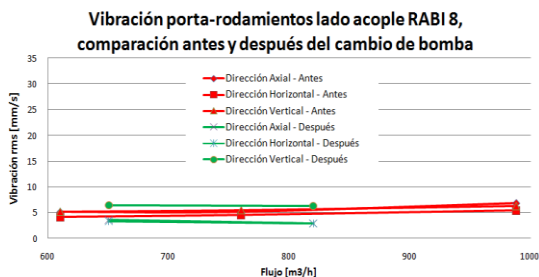


Figura 7.11 Comparativo porta-rodamientos lado acople antes y después de cambio de bomba.

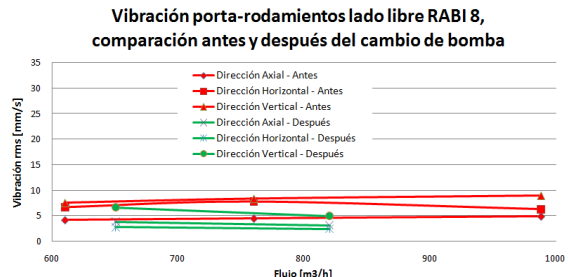


Figura 7.12 Comparativo porta-rodamientos lado libre antes y después de cambio de bomba.

Comentarios respecto a la vibración en porta-rodamientos de la bomba RABI 8, lado acople:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- El nivel global de vibración es considerado aceptable según la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.
- Los espectros de vibración muestran que la vibración total se compone en mayor parte de vibración a la velocidad de giro del conjunto motor bomba y a su 2X, esto puede ser un indicador de desalineamiento entre el conjunto motor-bomba.

- Los niveles de vibración obtenidos en el porta-rodamientos lado acople son del mismo orden que los presentes en la bomba anteriormente instalada, no representando problemas para la operación.

Comentarios respecto a la vibración en porta-rodamientos de la bomba RABI 8, lado libre:

- No se aprecian frecuencias de falla de rodamientos.
- El nivel global de vibración es considerado aceptable según la norma ISO 10816-7 para larga vida del equipo.
- Los espectros de vibración muestran que la vibración total se compone en mayor parte de vibración a la velocidad de giro del conjunto motor bomba y a su 2X, esto puede ser un indicador de desalineamiento entre el conjunto motor-bomba.
- Los niveles de vibración obtenidos en el porta-rodamientos lado libre son del mismo orden que los presentes en la bomba anteriormente instalada, no representando problemas para la operación.

En la Tabla 14 se presenta un comparativo en cuanto a los valores rms de vibración en ducto de descarga obtenidos en postura RABI 8 entre bomba con mantenimiento al día y bomba antiguamente instalada.

Tabla 14, Comparativo nivel de vibraciones en ducto descarga antes y después de cambio de bomba postura RABI 8

Flujo	Dirección vibración	Antes de cambio de bomba [mm/s]	Después de cambio de bomba [mm/s]	% de reducción
Restringido	Axial	10,2	6,3	38%
	Vertical	13,7	5,4	60%
	Horizontal	13,1	4,1	69%
100%	Axial	23,1	6,2	73%
	Vertical	27,7	4,5	84%
	Horizontal	31,7	3,6	89%

Además, cabe mencionar, que desaparecen las componentes de vibración a la velocidad de giro de la bomba en el ducto de descarga (para similares condiciones de flujo), solo se mantiene la vibración presente a la frecuencia de paso del álabe, ver Figura 7.13 y Figura 7.14.

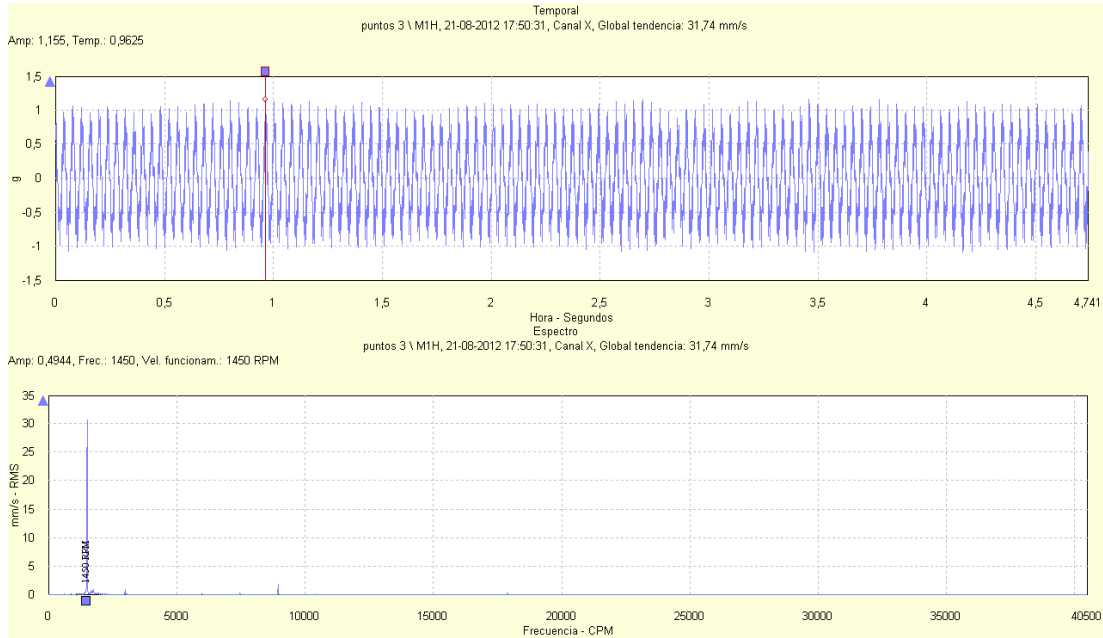


Figura 7.13, Señal temporal y espectro vibración radial, ducto descarga bomba RABI 8 fecha 21 de Agosto de 2012, 988 m³/h

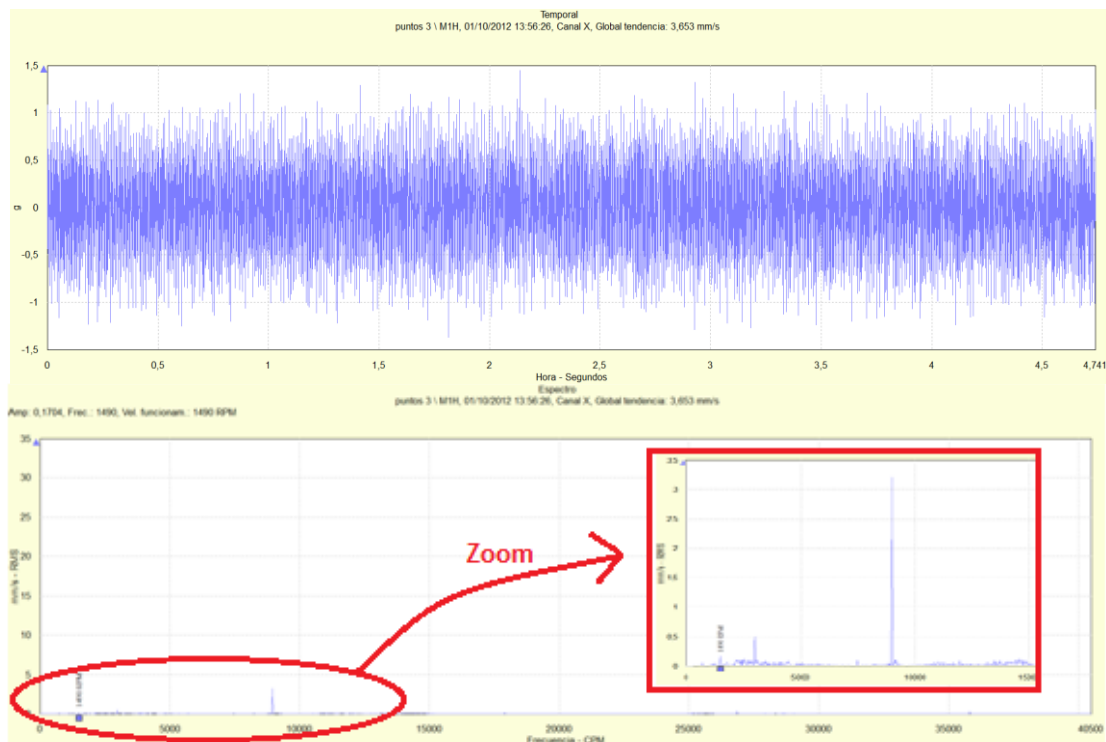


Figura 7.14, Señal temporal y espectro vibración radial, ducto descarga bomba RABI 8, fecha 01 de Octubre de 2012 (bomba con mantenimiento recién realizado), 820 m³/h

La recomendación cumple con el objetivo esperado respecto a la disminución de los niveles de vibración presentes en el ducto de descarga, pero se sigue desconociendo la causa del origen de las mismas, por esta razón se solicita a empresa contratista que realiza reparaciones, la confección de un informe detallado del estado de recepción de la bomba retirada de postura RABI8. Se encontró desgaste producto de la operación en anillos y contaminación con elementos extraños en interior de bomba, ver Figura 7.15 tomada del informe de recepción de bomba emitido por empresa Bombatek en dicha oportunidad [12].



Detalle madera atrapada en impulsor de bomba retirada postura RABI 8.



Detalle de plástico atrapado en impulsor de bomba retirada postura RABI 8.



Detalle de residuos presentes entre anillos de desgaste bomba retirada postura RABI 8.



Detalle de guante atrapado en impulsor de bomba retirada postura RABI 8.

Figura 7.15, Elementos encontrados en impulsor bomba retirada de postura RABI8.

Se aprecia la obstrucción del impulsor con elementos extraños ajenos al fluido bombeado, dentro de los elementos extraños encontrados se aprecia la existencia de tacos de madera, se asume que esta puede provenir de despuntes utilizados para los moldajes realizados durante la construcción del espesador y que no fueron retirados antes de la puesta en marcha del equipo.

Tras notar que la recomendación respecto al cambio de bomba en la postura RABI8 (redujo el nivel de vibraciones en el ducto de descarga) y tras revisar el informe de recepción de la bomba saliente (donde se encontraron elementos extraños alojados en el impulsor), se recomendó cada vez que se detecten altos niveles de vibración en el ducto de descarga, realizar medición de vibraciones y si el nivel rms de vibración se encuentra dentro de la zona de 'alerta' según VDI 3842 y con contenido en frecuencia dominado por la velocidad de giro

del impulsor, se debe proceder a destapar la bomba para retirar elementos extraños eventualmente allí alojados. De la misma forma, se incluyó en la ruta de mantenimiento predictivo el control de vibraciones en el ducto de descarga de las bombas RABI.

En Figura 7.16 se muestra informe tipo de la ruta realizada en bombas RABI.

En la Figura 7.17 se presentan imágenes de la primera revisión de una bomba en terreno realizada el 06 de Diciembre de 2012 posterior a la medición y análisis de las vibraciones detectadas en la bomba RABI 1 de la Sala de Bombas 1.

RABI N° 8

Flujo de bomba en momento de medición: 705 m3/h

Consumo eléctrico en momento de medición: 498 amperes

Motores bombas rabi

Cuerpo de motor	Tº amb	lado acople mm/s			Tº C	lado libre mm/s			Tº C
		axial	horizontal	vertical		axial	horizontal	vertical	
10/06/14	13°C	1.9	2.1	1.2	44°C	2.1	1.9	2.6	32°C
11/07/14	10°C	1.6	1.9	1.2	50°C	1.7	1.8	1.7	28°C
07/08/14	10°C	1.5	1.5	3.9	45°C	2.6	1.7	1.5	30°C
03/09/14	10°C	1.8	2.0	1.1	54°C	1.8	1.8	2.1	32°C

Porta rodamiento bombas rabi

Porta-rod bomba	Tº amb	lado acople mm/s			Tº C	lado libre mm/s			Tº C
		axial	horizontal	vertical		axial	horizontal	vertical	
10/06/14	13°C	3.0	3.0	4.5	30°C	3.3	3.2	4.5	41°C
11/07/14	10°C	5.1	2.8	4.3	55°C	4.6	2.8	5.0	26°C
07/08/14	10°C	6.9	6.5	4.0	25°C	6.6	4.4	5.9	24°C
03/09/14	10°C	4.4	3.3	6.2	26°C	5.9	3.4	5.6	50°C

Ducto descarga

Ducto	Codo cañería descarga		
	Axial	horizontal	vertical
10/06/14	2.5	2.1	4.1
11/07/14	2.3	3.1	4.7
07/08/14	2.7	2.1	4.2
03/09/14	2.4	2.4	3.6



Figura 7.16, Informe típico de vibraciones tomadas en bomba RABI 8

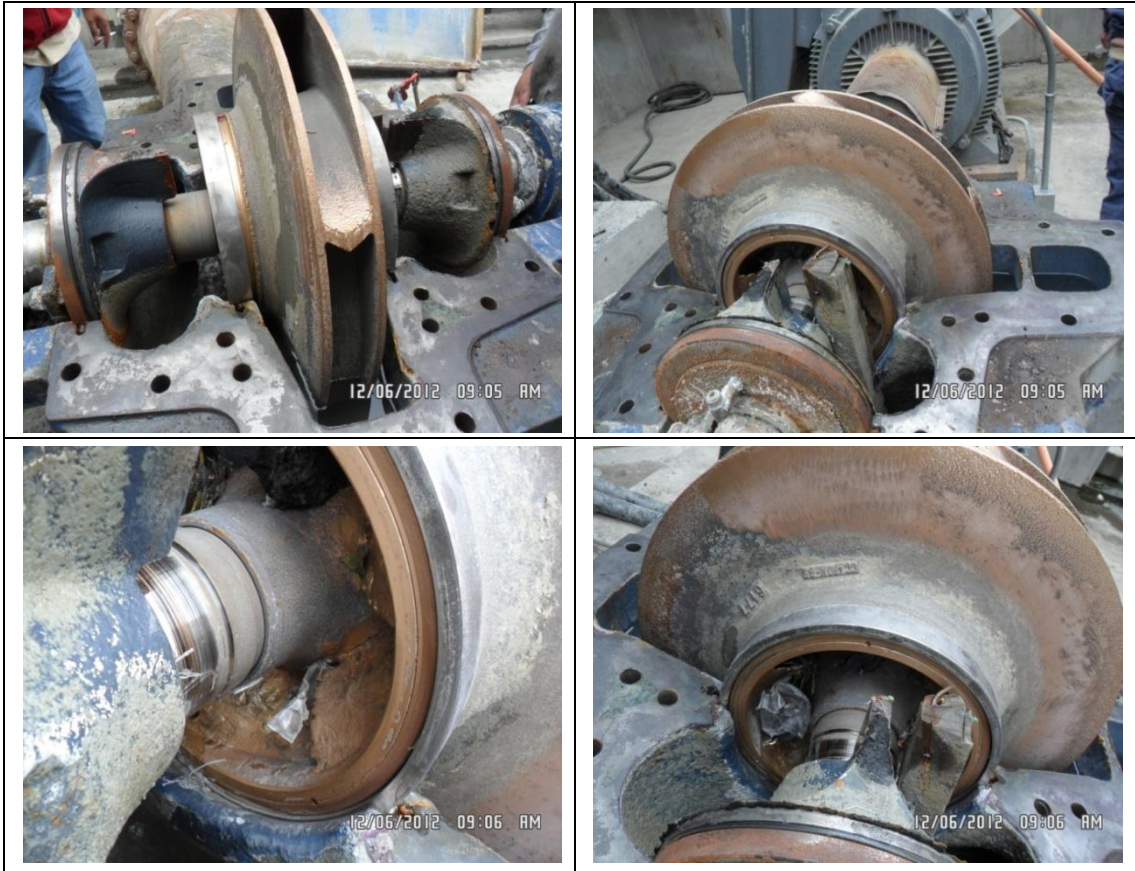


Figura 7.17, Fotografías de revisión a elementos de impulsión de bomba RABI 1 posterior a análisis de vibraciones realizado. (Diciembre de 2012)

Conclusión y Recomendación Final.

Se concluye que los altos niveles de vibración estructural en piping de descarga se generaban a partir de una pulsación de presión generada en la descarga de la bomba y originada por la obstrucción de álabes y succión de la misma. La obstrucción se genera, principalmente, por restos de maderas, utilizadas para moldajes durante la construcción del tercer espesador, que no fueron retirados en su oportunidad.

Se recomienda que cada vez que se detecten altos niveles de vibración en ducto, realizar medición de vibraciones, si el nivel rms de vibración en velocidad se encuentra dentro de la zona de ‘alerta’ según VDI 3842 y con contenido en frecuencia similar a los detectados en bomba RABI 8 (frecuencia de giro del impulsor), se debe proceder a destapar la bomba para retirar elementos extraños eventualmente allí alojados.

El cambio de bomba realizado en la postura RABI 8 generó una disminución, en los niveles de vibración en velocidad en el ducto de descarga, de hasta un 89% respecto a la condición de operación con obstrucciones en la cámara de succión e impulsor de la bomba.

Se agrega a ruta de vibraciones el sub-equipo “ducto descarga” para tener de otra forma un control indirecto del estado interior de las bombas.

Las conclusiones determinadas a partir del estudio realizado para las bombas presentes en la Sala de Bombas 2 son completamente extensibles a las bombas presentes en la Sala de Bombas 1 dado que las configuraciones de la descarga son similares.

Bibliografía

- [01] FOMIN V., KOSTAREV V., REINSCH K-H. Elimination of Chernobyl NPP unit 3 power output limitation associated with high main steam piping flow Induced vibration. En: SMiRT⁹ 16 (Washington, USA, Agosto 2001)
- [02] KOSTAREV V., TUOMAS A., REINSCH K-H. Resolving of steam and feed-water piping vibration matter at Loviisa NPP. En: SMiRT 19 (Toronto, USA, Agosto 2007)
- [03] WATCHEL JC., MORTON S., ATKINS K. Piping vibration analysis. En: 19 simposio de turbomáquinas (San Antonio Texas, USA, 1990)
- [04] VASILYEV P. Engineering approach for medium modeling in piping dynamic analysis. En: SMiRT 18 (Beijing, China, Agosto 2005)
- [05] MISSAL R. Causes, assessment and reduction of piping vibrations. En: Pipeline Technology Conference 2007.
- [06] VEREIN Deutscher Ingenieure (Alemania). Vibrations in piping systems. VDI3842 Of. 2004.
- [07] INTERNATIONAL Organization of Standarization (Suiza). Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts. ISO 10816-7 Of. 2009,
- [08] AMERICAN Petroleum Institute (USA). Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries. API610, 9th Of: 2009.
- [09] LESLIE D. y VARDY A. Practical Guidelines for fluid-structure interaction in pipelines: A review. En: 10th International meeting of the work group on the behaviour of hydraulic machinery under steady oscillatory conditions (Trondheim, Noruega, Junio 2001)
- [10] OLSON D. Pipe vibration testing and analysis. En: AMERICAN Society of Mechanical Engineers. The Companion guide to the ASME boiler & pressure vessel code. Capítulo 37.

⁹ Structural Mechanics in Reactor Technologies

[11] VOGT S.A. Estudio Golpe Ariete CV-11/ 25049. [Informe]. Santiago 2011, papel.

[12] BOMBATEK SA, Informe inspección bomba centrífuga horizontal axialmente partida INFO1869-RP1981-12. [Informe]. Santiago 2012, papel.

[13] DEPARTAMENTO Ingeniería MVC, Informe falla válvula guillotina 14'' marca VCH, Febrero 2012. [Informe]. Rancagua 2012, papel.

Anexo A: Cálculo hidráulico estación de reimpulsión de agua industrial recuperada (planta RAB).

Anexo B: Datos recolectados en terreno en mediciones realizadas en equipos de la sala de bombas 2.