



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Evaluación de la cavitación del sistema de bombeo del licor producto en el proceso de lavado en la Empresa Pedro Sotto Alba.

Autor: Uber de Jesús Montero Nicle

Tutor: Ms.C. Jorge Reyes De la Cruz

Moa, 2016

Declaración de autoridad

Dando cumplimiento a lo establecido en el Convenio de Trabajo entre el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y la Empresa Moa Nickel S.A. – “Comandante Pedro Soto Alba” en el punto referente a confidencialidad, que expresa:

Confidencialidad: El ISMMM, los adiestrados, profesores, y sus representantes y otras personas naturales o Jurídicas vinculadas de una forma u otra a este Convenio acuerdan no utilizar, ni revelar ninguna información que sea suministrada por Moa Nickel.

Yo: Uber de Jesús Montero Nicle autor de este Trabajo de Diploma titulado: Evaluación de la cavitación del sistema de bombeo del licor producto en el proceso de lavado en la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” y el tutor M. Sc. Jorge Luís Reyes de la Cruz certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y a la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” quienes podrán hacer uso del mismo con la finalidad que estimen conveniente.

Uber de Jesús Montero Nicle

Ms.C. Jorge Luís Reyes De la Cruz

Pensamiento

.... Y hay muchas cosas de las que el hombre puede sentirse orgulloso y no es precisamente de lo que ha recibido sino de lo que sea capaz de realizar con sus propios esfuerzos.

Fidel Castro Ruz



Agradecimientos

A la Revolución, por darnos la oportunidad de estudiar la carrera que siempre nos interesó.

A mis padres, a mi hermano, a mi familia por su constante apoyo, cariño y preocupación.

A mis profesores, por formarnos como buenos estudiantes y prepararnos para el trabajo y para la vida.

A los trabajadores de la Empresa Pedro Sotto Alba, por su ayuda espiritual y material.

A mis amigos y compañeros de clases, por compartir tan gratos momentos de la vida estudiantil.

A mi tutor y a los que nos dedicaron incondicionalmente su tiempo desde los inicios hasta la completa confección del Trabajo de Diploma.

A todos, muchas gracias.

Dedicatoria

A la Revolución Cubana la cual me ha hecho posible alcanzar el nivel superior.

A mis padres Rubert Montero Terrero y Nereida Nicle Caballero por el amor incondicional que me han brindado y por su apoyo en todo momento de mi vida.

A mi hermano Víctor Manuel Montero Nicle por lo que representa en mi vida.

A todos los profesores quienes empezaron la tarea de enseñarme muchos conocimientos y que realmente ven en mi resultado el fruto de su arduo trabajo.

A mis familiares, amistades y compañeros de aula quienes me brindaron su apoyo en todo momento para lograr este resultado rebelado en la categoría de Técnico Superior. De todo corazón les dedico este éxito.

A los compañeros de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” quienes manifestaron su apoyo con el fin de que fuera posible el progreso de esta investigación.

Resumen

Las bombas centrífugas incurren en roturas de partes y piezas cuando funcionan en régimen cavitacional, debido a estas causas se plantea la finalidad de evaluar el comportamiento de la cavitación de estos equipos en el trasiego de fluidos con la tecnología ácida. Se determinó mediante la metodología de cálculo los principales parámetros de la instalación relacionados con la condición de cavitación teniendo como resultado que el sistema se encuentra trabajando con un régimen cavitacional con valores de altura neta positiva en la succión disponible de 1,731 m y altura neta positiva en la succión requerida de 5,5 m, se estableció el punto de trabajo de la bomba con un caudal máximo de 620 m³/h. Además, se realizaron las mediciones de las vibraciones en tres puntos fundamentales, destacándose las axiales, con una incidencia de los niveles de vibraciones de 3,6 mm/s y 5,4 mm/s, con las mismas se obtuvieron los espectros de las vibraciones donde se emite la señal aleatoria del funcionamiento de la bomba en régimen cavitacional. Se realizó una valoración económica sobre el comportamiento del gasto de explotación de la instalación para el transporte del licor producto, cuando trabaja sin cavitación, donde existe un ahorro de un 3 % en el gasto de explotación con respecto al funcionamiento con cavitación.

Abstract

The centrifugal pumps incur in breakings of parts and pieces when work in cavitation condition, due to these causes presents the purpose to evaluate the behavior of the cavitation of these teams in the moving of fluids with the acid technology itself. Determined by means of the methodology of calculation the principal parameters of the installation related with the condition of cavitation having as a result that the system meets working with a cavitation regimen with moral values of net positive height in the available suction of 1.731 m and net positive height in the requisite suction 5.5 m, the work point of the bomb with a maximum flow intensity of 620 m³/h established himself. Besides, the measurements of the vibrations in three fundamental points, standing out came true them axial, with 3.6 mm/s incidence of levels of vibrations and 5.4 mm/s, with the same it got the spectra from vibrations where emits the aleatory sign of the functioning of the bomb in cavitation regimen. It made a economical valoration, when it runs without cavitation, where a saving of a 3 % in the operating expenses regarding the functioning with cavitation exists accomplished a cost-reducing assessment on the behavior of the operating expenses of the installation for the liquor transportation.

ÍNDICE	pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.1. Introducción	6
1.2. Descripción del Proceso Tecnológico	6
1.3. Estado del arte	7
1.4. Trabajos precedentes	9
1.5. Selección de bombas centrífugas para el proceso de transporte de fluidos	13
1.5.1 Caracterización de las bombas utilizadas en el proceso del transporte del licor	14
1.6 Cavitación en bombas centrífugas	15
1.6.1. Característica del fenómeno de la cavitación	16
1.6.2 Tipos de cavitación	16
1.6.3. Vibraciones debidas a la cavitación	17
1.7. Utilización de las vibraciones para el diagnóstico de bombas centrífugas	18
1.7.1. Métodos de mediciones	20
1.7.2. Establecimiento de los puntos de medición	21
1.7.3. Equipamiento para realizar las mediciones	23
1.7.4. Medición de las vibraciones	23
1.8. Características de la fase líquida (licor)	25
1.9. Conclusiones del capítulo	26
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	27
2.1. Introducción	27
2.2. Características específicas de las bombas que interviene en el proceso	27
2.3. Parámetros a medir	28
2.3.1. Equipos e instrumentos utilizados para medir los parámetros	29
2.4. Metodología empleada para el cálculo hidráulico en la instalación	31
2.5. Cavitación en bombas centrífugas	35
2.6. Metodología de cálculo para el balance energético de una bomba centrífuga	36

2.7. Datos de la instalación	37
2.8. Puntos de medición de las vibraciones	38
2.8.1. Magnitudes que caracterizan a las vibraciones	39
2.9. Criterio de Semejanza	40
2.10. Conclusiones del capítulo	41
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	42
3.1 Introducción	42
3.2 Obtención de la curva de la red	42
3.3. Análisis de los resultados de las vibraciones.....	45
3.4. Análisis de los espectros medidos en la bomba 153-PU-1A.....	46
3.5. Valoración económica.....	48
3.6. Impacto medio ambiental	51
3.7. Conclusiones del capítulo	53
CONCLUSIONES GENERALES.....	54
RECOMENDACIONES	I
BIBLIOGRAFÍA	II
ANEXOS	V

Separador introducción

INTRODUCCIÓN

La producción de níquel a nivel mundial tiene gran importancia para el desarrollo de materiales en función de su utilización tanto en la industria aeroespacial como en la armamentística. Desde las grandes potencias hasta los países subdesarrollados, como es el caso de Cuba, se busca mejorar los procesos productivos y los medios de producción de estas, para obtener un buen provecho en beneficio de nuestra sociedad.

La industria del níquel en Cuba se ha convertido en uno de los principales renglones de nuestra economía, a causa de esto, el estudio de sus instalaciones niquelíferas es de sublime importancia en función de hacer un uso racional de sus capacidades instaladas y aumentar la eficiencia de los procesos metalúrgicos. En nuestro país hoy en día constituye algo primordial el desarrollo de tecnologías que permitan más ahorro de recursos, menos gasto de energía y menos contaminación atmosférica. El incremento de la eficiencia con el uso racional de los recursos que poseemos nos lleva a la búsqueda de productos más competitivos, para sustituir viejos y costosos esquemas tecnológicos.

Debido a que el precio del níquel cobra gran auge en el mercado internacional, su producción es fundamental para el desarrollo de la economía cubana, constituyendo la primera fuente de exportación del país.

En Cuba la producción de níquel se realiza en las fábricas productoras de níquel situadas en el nordeste de la provincia de Holguín, ubicadas en el municipio de Moa; en la que se encuentran la Empresa productora de níquel y cobalto Comandante Ernesto Che Guevara, la cual utiliza el proceso tecnológico de carbonato amoniacal CARON, y la Empresa productora de níquel y cobalto Pedro Sotto Alba, que utiliza el proceso de lixiviación ácida.

A inicios de la segunda mitad del siglo XX el país cubano experimentó avances industriales, ejemplo de estos se percibieron entre los años 1957 y 1959 donde la compañía americana Freeport Sulphur Co. construyó en el municipio de Moa una empresa metalúrgica para la producción de concentrado de níquel, partiendo de un yacimiento de laterita niquelífera en dicha zona. Este proceso se basa en la lixiviación

ácida de la limonita que contiene níquel en autoclaves a una temperatura de 250 °C y una presión de 43 bar. El níquel contenido en la limonita pasa a la solución en forma de sulfato de níquel y es recuperado nuevamente en otro sistema de autoclaves mediante la inyección de H₂S obteniéndose un precipitado de sulfuro de Níquel más Cobalto. (Ni+Co). Estos productos semielaborados se obtienen sometiendo el mineral laterítico a diversos procesos físicos y químicos a través de siete plantas de proceso continuo; ellas son: preparación de pulpa, lixiviación, lavaderos, neutralización, precipitación de sulfuros, secado y envase.

En la actualidad, la industria minero – metalúrgica utiliza diversas formas de transportación de mineral, teniendo gran auge el transporte hidráulico, debido a la capacidad que tienen las bombas para el trasiego de fluidos hacia donde se desee transportar, a su vez, el crecimiento y perfeccionamiento de los procesos productivos están ligados con las mejoras de los equipos de bombeo y con un mejor conocimiento de su funcionamiento y explotación. El transporte de fluidos ha demostrado ventajas ante otros tipos de transportes, pero también presentan desventajas como son su rápido deterioro y elevado consumo energético, fundamentalmente provocados por la cavitación y las vibraciones presentes en las bombas, lo que justifica una caracterización de estos fenómenos para minimizar los daños que ocasionan.

Fundamento de la investigación

Las bombas centrífugas y los sistemas relacionados con el trasiego de líquidos están presentes en las industrias de productos químicos, mineros, fluviales y desechos sólidos o líquidos. La mayoría de los procesos en las empresas incluyen la conducción de líquidos o transferencia de un valor de presión o de energía estática a otro. La bomba es el medio mecánico que se utiliza para el transporte de fluidos y por ello es parte esencial de todos los procesos.

En la Planta de Lavadero de la fábrica “Comandante Pedro Sotto Alba” de Moa existen instalaciones industriales de transporte hidráulico, como es el caso de la instalación de bombeo de licor producto. Se ha comprobado que en la explotación de esta instalación ocurren problemas técnicos entre los que se puede destacar la cavitación de las bombas, debido entre otros factores a las altas temperatura y densidad del fluido a

transportar, esto provoca altos niveles de vibraciones, lo cual conlleva a incontables fallos catastróficos, así como la proliferación de fuerzas dinámicas, produciendo pérdidas en el rendimiento de la bomba, daños al medio ambiente y dificulta la calidad de vida por las molestias producidas por el ruido al hombre.

La cavitación y las vibraciones presentes en máquinas rotatorias provocan afectaciones en sus partes móviles debido a la carencia de piezas de repuesto para estas bombas y a la prolongada explotación bajo condiciones poco apropiadas, lo que genera el incremento de los costos por mantenimiento, siendo necesario que estas máquinas trabajen con una mayor confiabilidad.

El grado de deterioro de una bomba se refleja en las amplitudes de las vibraciones, provocadas principalmente por el fenómeno de la cavitación. Los niveles de vibraciones excesivos son peligrosos para el funcionamiento de las máquinas; aumentan los esfuerzos, las tensiones; son fuente de desgaste de materiales, daños por fatiga y movimientos.

Esta problemática ha generado un estudio para prever, conocer y controlar el comportamiento de los niveles de vibraciones de las bombas centrífugas en régimen cavitacional, esto constituye una herramienta básica en el Mantenimiento por Diagnóstico que permite reducir los costos por mantenimiento.

La situación actual de la instalación de bombeo del licor en el proceso de lavado ha presentado averías en el funcionamiento de las bombas Cerpelli 20x 40. Dentro de las piezas y partes con mayor frecuencia de averías de estas bombas están las siguientes:

- Aros de desgastes del impelente y la voluta, desgastes excesivos de los mismos, lo que provoca vibraciones en el equipo, y baja eficiencia.
- Rotura del sistema de acoplamiento (coupling), deformación o destrucción del inserto plástico, lo que puede estar dado por desalineamiento, o algún rose que provoque que el equipo se tranque.
- Averías de los rodamientos, presentan ruidos, calentamientos, vibraciones.
- Perforación de las volutas.

- Desbalanceo del impelente por pérdida de espesor provocado por el régimen de trabajo, y exceso de pulpa en el licor, rotura de álabes, o incrustación de objetos extraños.
- Rotura de los tornillos de los anclajes de la bomba a la base metálica por vibraciones excesivas en el equipo.

A partir de estas deficiencias se declara como **situación problemática de la investigación:**

Los altos costos de mantenimiento es una de las deficiencias que se producen en la planta de Lavadero en las instalaciones de bombeo de licor producto, ocasionados por el deterioro progresivo de piezas de las bombas, debido a fallos provocados por el fenómeno de la cavitación y las vibraciones producidas por este.

Teniendo en cuenta las deficiencias antes expuestas, se define como **problema de la investigación:**

Rotura de partes, piezas y componentes de las bombas centrífugas que funcionan en régimen cavitacional.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea:

Bombas tipo CERPELLI 20X40, con rodete en voladizo utilizada en la planta de Lavadero de la Empresa Pedro Sotto Alba.

Estableciendo como **campo de acción** de la investigación se plantea:

La hidrodinámica del licor producto de mineral lixiviado utilizado en la tecnología del proceso ácido de la empresa productora de níquel y cobalto Pedro Sotto Alba.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:**

Si se determinan los parámetros de explotación de bombas centrífugas mediante el análisis cavitacional y de las vibraciones en las instalaciones de bombeo de licores producto que trabajan en régimen cavitacional, es posible elevar la efectividad del mantenimiento, así como la evaluación y control de los fallos y averías provocados por el fenómeno de la cavitación.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo:**

Evaluar el comportamiento de la cavitación en bombas centrífugas utilizadas en la planta de Lavadero de la fábrica Pedro Sotto Alba que emplean la tecnología ácida.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean los siguientes objetivos específicos **de trabajo**:

- Establecer el marco teórico de la investigación, a partir de las bibliografías relacionadas con la cavitación y las vibraciones.
- Determinar los parámetros de operaciones en el sistema de bombeo del licor producto de la planta de Lavadero mediante las mediciones y la aplicación de la metodología de cálculo de estos parámetros.
- Realizar el análisis de los resultados, la valoración económica y el impacto medioambiental de la instalación.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos específicos propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

1. Análisis de las bibliografías actualizadas sobre la temática tratada relacionada con (cavitación, características del licor, utilización de las vibraciones como medio de diagnóstico en las bombas tipo CERPELLI 20x40 con rodete en voladizo) y establecer las limitaciones en las investigaciones planteadas.
2. Evaluación del rendimiento del sistema de bombeo de licor producto puesto de manifiesto en la variación de la altura, potencia, caudal y caída de presión que se produce en la instalación.
3. Evaluar los niveles de vibraciones de acuerdo a las regulaciones del número de revoluciones, la variación del caudal y las variaciones de presión que se producen en la instalación.
4. Evaluación de los resultados, valoración económica e impacto medioambiental del sistema de bombeo de licor producto de la planta de Lavadero.

Separador capítulo 1

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Para el estudio de las bombas centrífugas es importante realizar una caracterización de los principales procesos que ocurren en el interior de la instalación y del proceso tecnológico del cual forma parte. La cavitación y las vibraciones son fenómenos frecuentes en las máquinas hidráulicas, los cuales tienen una influencia negativa en el funcionamiento de estas, provocando fallos y bajos rendimientos, que a su vez precipitan la caída de los principales parámetros de trabajo de las bombas, este último influye directamente en los costos de mantenimiento. En tal sentido, el principal objetivo de este capítulo es realizar una búsqueda bibliográfica existente que permita definir el estado del arte en las temáticas tratadas (cavitación y vibraciones).

1.2. Descripción del Proceso Tecnológico

En la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” se utiliza, para la obtención de sulfuro de Níquel más Cobalto (Ni+Co), un proceso basado en la lixiviación ácida de la limonita. El níquel que contiene el mineral antes mencionado se convierte en una solución de sulfato de níquel y luego se recupera mediante un sistema de autoclaves a través de la inyección de H_2S para obtener un precipitado de sulfuro de níquel más cobalto. Para este proceso la empresa antes mencionada cuenta con una serie de plantas de proceso continuo que contribuyen al flujo productivo.

La Planta de Lavaderos; una de las que tributa al proceso productivo de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” tiene como función lavar la pulpa lixiviada y obtener un licor rico en níquel y cobalto separando las colas de hierro. La pulpa lixiviada se somete a un lavado con agua de retorno de la presa, agua de los deshumificadores de la planta de sulfuro previamente tratada con pulpa del Tk 6 y en última instancia con agua cruda a contracorriente por decantación en el que participan diez (10) sedimentadores, en los cuales se lleva a cabo la operación ayudados por bombas centrífugas que extraen el producto espesado de un tanque y lo depositan en el reboso del otro, del tanque 1 al tanque 10 sucesivamente. Otras extraen el líquido de un sedimentador y lo bombean al reboso del otro, así ocurre desde el tanque 10 al tanque 1 hasta obtener un licor crudo

el cual es bombeado hacia la planta de neutralización. Las bombas tipo CERPELLI 20X40, con rodete en voladizo son las encargadas de bombear este líquido, el cual recibe el nombre de licor producto. Este flujo tecnológico puede ser observado en el anexo N°2. (Manual de Operaciones, 2000)

1.3. Estado del arte

La hidráulica posee un profundo y abarcador significado ya que estudia las leyes del movimiento y equilibrio de los líquidos y los métodos de utilización de estas leyes en la solución de problemas técnicos concretos. Según Rabinóvich, (1987) el significado práctico de la hidráulica es muy amplio, ya que ella representa la base de una serie de disciplinas especiales.

Dentro de los elementos que más se destacan, el conocimiento de las leyes de la hidráulica es imprescindible para los especialistas en petróleo, por cuanto todos los procesos principales de elaboración en la industria del petróleo de una forma u otra están relacionados con la utilización y transportación de los líquidos (petróleo, derivados del petróleo, reagentes químicos, agua, solución arcillosa) por los diferentes sistemas hidráulicos.

La hidráulica tiene un gran nivel de complejidad, es por ello que el hombre, desde los primeros pasos en su desarrollo histórico, prácticamente se dedicó a la solución de los diferentes problemas de la hidráulica. Así, las investigaciones arqueológicas demostraron que cinco milenios antes de nuestra era, en una serie de países del mundo antiguo ya existían canales de irrigación y eran conocidas instalaciones elementales para elevar el agua. En muchos lugares se conservaron los restos de obras hidrotécnicas (conductos de agua, presas, acueductos), sin embargo, no existe ninguna prueba acerca de los cálculos hidráulicos de estas obras. Se supone que todas ellas fueron construidas sobre la base de las costumbres y reglas puramente prácticas.

Las primeras pruebas sobre el método científico para la solución de los problemas hidráulicos se remontan al año 250 antes de nuestra era, cuando fue descubierta por Arquímedes la ley sobre el equilibrio de un cuerpo, introducido en un líquido.

Más tarde, sin embargo, a lo largo de más de mil quinientos años, la hidráulica no tuvo ningún desarrollo notable, en esta época, caracterizada por un estancamiento general

en la ciencia y en la cultura, fueron echados en el olvido no sólo los primeros elementos del conocimiento, sino también, en gran medida, las costumbres prácticas del arte de ingeniería, y solamente en los siglos XVI-XVII en la época del Renacimiento, cuando aparecieron los trabajos de Stevin, Leonardo de Vinci, Galileo, Pascal, Newton, relacionados en particular con importantes fenómenos hidráulicos, la hidráulica alcanzó un desarrollo posterior como ciencia.

El transporte hidráulico es empleado en el traslado de las partículas de los minerales suspensos en un fluido de agua a través de tuberías y canales, requiere de una máquina o bomba que cumpla con los requisitos establecidos; las bombas han alcanzado una aplicación muy amplia en la industria. Según Reyes, (2007) esta difusión está determinada por las significativas ventajas que este presenta sobre los demás tipos de transporte en las que se destacan:

1. Garantiza un proceso tecnológico continuo disminuyendo considerablemente el volumen de las operaciones principales.
2. Eleva la productividad del trabajo.
3. Posibilita la automatización de todo el proceso de transportación.
4. Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.
5. El mineral puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.
6. Fácil Mantenimiento Mecánico.
7. Transporta por perfiles irregulares.

En función de la capacidad de trasiego de fluidos de la bombas, en la industria se utilizan numerosas formas de transportación de mineral. Existe una amplia gama de bombas, las cuales tienen la función, del trasiego del líquido mediante la aspiración y la impulsión, desde el punto de vista físico, el trabajo de la bomba consiste en la transformación de la energía mecánica del motor en energía del líquido, es decir, la bomba comunica cierta potencia al líquido que fluye a través de esta, pero tienen diferentes principios o forma, todo depende del tipo de fluido, de la temperatura a la cual se va a transportar y la presión que se requiere.

Dentro de la gran variedad de bombas en el último medio siglo han tomado mayor aplicación las bombas centrífugas, estas son máquinas de gran velocidad en comparación con las de movimiento alternativo, rotativas o de desplazamiento positivo, funcionan a altas velocidades acopladas directamente al motor de accionamiento, lo que permite que las pérdidas por transmisión sean mínimas. Una bomba centrífuga consta esencialmente de uno o más rodetes provistos de álabes, montados sobre un árbol giratorio y cerrado en el interior por una cámara de presión denominada cubierta o voluta, como aparece representado en la figura 1.1.

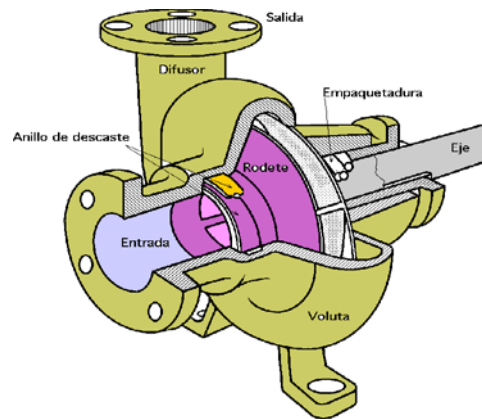


Figura 1.1. Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva. Fuente: Fernández, 2003

En la figura 1.1 se muestran las principales partes y el funcionamiento de una bomba centrífuga, aunque existen distintos tipos y variantes; la estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

1.4. Trabajos precedentes

La revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, relacionada con la temática del transporte hidráulico (bombas centrífugas y cavitación) y la otra; sobre las vibraciones relacionadas con las bombas desde el punto de vista del diagnóstico de explotación mecánica de bombas centrífugas para el establecimiento de

la política de mantenimiento de estas. De acuerdo a la primera línea sobre bombas centrífugas y cavitación se plantea lo siguiente.

Resulta muy importante el trabajo realizado por Karelin, (1975), el cual plantea que en las bombas centrífugas se puede dividir el fenómeno de la cavitación en 2 regímenes críticos. El primer régimen corresponde con el momento de inicio de la cavitación; en las curvas de cavitación este régimen se caracteriza por el inicio de la disminución de la carga y la eficiencia.

El segundo régimen crítico corresponde con el momento de caída abrupta de los parámetros de trabajo de la bomba; en las curvas de cavitación este segundo régimen está caracterizado por la caída precipitada de los parámetros de la bomba. Las curvas características para analizar los 2 regímenes de cavitación es una dependencia de los parámetros: carga, eficiencia y potencia en función de la reserva cavitacional, curvas no divulgadas en los pasaportes de la máquina. Este autor plantea además que el trabajo de las bombas en regímenes de cavitación no debe permitirse, porque afecta los parámetros de trabajo, daña el equipo y termina por destruirla, disminuye el rendimiento e incrementa el consumo energético y que en la succión de una bomba debe garantizarse una cantidad de energía crítica (carga efectiva Δh_s , por encima de la tensión de vapor), para vencer las resistencias hidráulicas en el tramo hasta los álabes del rodete; garantizando la velocidad y aceleración suficientes a la entrada del impulsor.

Pérez, (2004) define que la reserva requerida de cavitación R NPSH, es un parámetro que depende de las peculiaridades constructivas de la bomba y es mayor para bombas con el rodete en voladizo, que para las que tienen el rodete entre apoyos.

En las instalaciones que presentan algunas de las señales: ruido, vibraciones, caída de las curvas de carga, potencia y eficiencia en dependencia del gasto, daños en el impulsor; se considera presente el fenómeno de la cavitación. Karassik, (1982) considera que estas señales son inexactas para diagnosticar el grado de avance del fenómeno de cavitación y plantea que una instalación está en régimen cavitacional cuando han descendido sus principales parámetros en un 3 %, no aporta más información en este sentido.

Las bombas centrífugas son una de las máquinas más frecuentes en los procesos de lixiviación ácida y amoniacal para la producción de níquel, también se puede afirmar que son grandes consumidores de energía, es decir que un problema que disminuya su eficiencia trae aparejado un impacto negativo en los aspectos económicos y social según (Pérez, 1983).

Pérez, (2000), analiza procedimientos que permiten valorar y consecuentemente elegir las bombas centrífugas a partir de los datos técnicos aportados por el fabricante. La cavitación es un fenómeno frecuente en el trabajo de estas máquinas, influye considerablemente en los indicadores técnicos - económicos y depende no sólo del sistema, sino también de la calidad del diseño y construcción del equipo. No menos importancia tienen los materiales con los que se construyen estos equipos.

Es muy importante para la investigación el estudio realizado por Gonzáles, (2006), el cual hace una caracterización de instalaciones de bombeo en régimen cavitacional a través del análisis de las vibraciones.

También un aspecto importante a tratar es que para el trasiego de licores se utilizan bombas centrífugas que con frecuencia son afectadas por la cavitación, fenómeno que implica la formación y presencia de burbujas debido al cambio de fase de la sustancia desde su estado líquido al estado de vapor, la formación de burbujas se produce en los álaves de los impelentes de las bombas centrífugas, provocado por la disminución de la presión dinámica por debajo de la presión de vapor o de saturación del líquido en movimiento.

Cuando la presión vuelve a aumentar se produce la implosión de las burbujas generando ondas de choque que pueden dañar las bombas, provocar el desprendimiento de materiales en la superficie de los impelentes y con ello la pérdida de eficiencia del sistema (Reyes, 2010).

Friedrichs y Kosyna, (2002) estudian experimentalmente la cavitación en los alabes de máquinas de baja velocidad específica, máquinas radiales, operando en diferentes puntos de funcionamiento, observan que la caída de presión de la curva característica producida por este tipo de cavitación da lugar a una curva dentada en lugar de lisa. La

aparición de la cavitación está ligada con la relación volumen de la cavidad y ángulo de incidencia del alabe.

De acuerdo con el segundo elemento, relacionado con las vibraciones, existen antecedentes algo lejanos en el estudio del comportamiento vibratorio de los cuerpos como el de Galileo, (1592) y su contemporáneo Marín, (1611), los cuales establecieron relaciones matemáticas entre frecuencia, longitud, tensión y masa de elementos vibrantes.

Newton, (1700), Rayleigh, (1840) y otros, se deben igualmente estudios en relación con el fenómeno vibratorio.

En el artículo de Cleries, (1977), se hace una valoración de las vibraciones mecánicas en los vehículos, según Palomino, (1999) en el país, hasta ese momento; no se habían realizado trabajos donde se vinculara el comportamiento vibratorio de los equipos a los parámetros de operación de sistema alguno.

Algunos autores propusieron la metodologías para la aplicación del Mantenimiento Predictivo, como (González, 1996), también lo hacen (Carcar, 1989); (SKF, 1998) y (Piedra, 2000), todos dieron procedimientos muy generales, no se particulariza, (de hecho fue difícil por las condiciones concretas de cada proceso) qué hacer con la influencia y variación de los parámetros de operación en el comportamiento vibratorio de los equipos, aunque en ocasiones se habla de registrar estos parámetros.

Otros se limitaron a dar los parámetros y normas en la puesta en marcha (Olsen, 1985) y (Mantenimiento, 1989), sin predecir o tener en cuenta cómo pueden variar estos durante el período de explotación.

Muchos coincidieron en señalar los beneficios técnicos, económicos que reporta la implementación de un sistema de Mantenimiento Predictivo, de hecho, casi todos los materiales hacen alusión a ello, tratándolos de modo diferenciado como es el caso de (Argulló, et al.1986), (Beltrán, 1988), (Gaillochet, 1998), (Gaillochet, 1998b)

Miranda et al. (2000), hacen un análisis de vibraciones y fase de las mediciones de un Ventilador Recirculador de Gases 5A, de la Central Termoeléctrica “10 de Octubre” de Nuevitas, partiendo de una avería, pero no lo relacionan con la influencia de los

parámetros de operación. Sin embargo, para un diagnóstico adecuado, como herramienta fundamental del Mantenimiento Predictivo, además, de la medición del parámetro síntoma es necesario cuantificar los parámetros del proceso y evaluar su incidencia en el comportamiento dinámico del equipo en cuestión.

Otros trabajos (Pérez, 2000); (Peláez, 2000), dan un enfoque de cómo debe ser gestionada la protección ambiental en la práctica del mantenimiento industrial, destacando a éste como la función que más puede contribuir en las empresas a reducir los riesgos de impacto ambiental, dado que es la garantía de la fiabilidad de los equipos y es además donde se realizan gran número de operaciones que pueden producir impactos.

Dentro de los trabajos relacionados con la temática Valerino, (2001) establece los puntos de mediciones de las vibraciones diagnosticando el estado técnico de los ventiladores.

Los autores Torres, (2000), Piedra, (2000); Lima, (2000) y Palomino, (1999), definen las vibraciones como: el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio.

Según Palomino, (1999), entre los elementos de las máquinas rotatorias (bombas centrífugas) que más fallan se encuentra los ejes, impulsores y rodamientos; esto se debe en gran medida a la cavitación cuando esta se encuentra en un alto grado. En nuestro caso, este fenómeno se encuentra presente de forma permanente a un alto grado en la instalación objeto de estudio, por lo que es el factor perjudicial más importante a tener en cuenta, aunque no se debe olvidar el desalineamiento que puede ser provocado por mal montaje de los elementos que componen el sistema. Es importante conocer que estos factores antes mencionados generan altos niveles de vibraciones en las máquinas (bombas) dando muestra de relación que existe entre ellos.

1.5. Selección de bombas centrífugas para el proceso de transporte de fluidos

La correcta selección de bomba, radica en conocer las condiciones en que trabajará la bomba. Además del caudal y la altura de elevación que requiere el sistema, se debe conocer otras características (redes de distribución, tipo de fluido a bombear, número

de bombas que se requieren y tipo de arreglo, pérdidas totales por conducción, entre otras más), que serán la base para seleccionar la bomba adecuada que requiere el sistema. Una vez que se conoce todo lo referente al sistema, es decir, la altura total que se requiere que tenga la bomba a seleccionar (suma de la altura de elevación y las pérdidas por conducción), se produce a examinar diferentes catálogos de curvas de bombas y así, seleccionar la que nos ofrezca el más alto rendimiento a la velocidad de rotación que requerimos.

Se puede hacer una selección equivocada por no haber investigado los requisitos del sistema ni haber determinado cual debe ser la eficiencia. Una selección inadecuada de la bomba ocasiona que el caudal de extracción sea mayor o menor al programado, provocando que la carga a la que opera el motor no sea la correcta, obteniendo de esta forma lecturas muy altas o muy bajas en las eficiencias, es decir, la bomba trabajará fuera de su punto de operación. (Balcazar, 2013)

1.5.1 Caracterización de las bombas utilizadas en el proceso del transporte del licor

Estas bombas centrífugas horizontales, Cerpelli del tipo HPEB, la bomba serie HPEB se construyen para servicios pesados a media temperatura y medias presiones de ejercicios en la industria petroquímica y en las instalaciones industriales. Las bombas serie HPEB son centrífugas horizontales con división radial, desmontaje posterior e impulsor de embocadura simple. El spiral es simple o doble y los soportes de la bomba en la parte inferior de acuerdo con las normas del American Petroleum Institute (API) 610. La boca de aspiración está en posición (END) y la boca de salida está situada verticalmente en posición (TOP), ver anexo N°3. (Colectivo de autores, 1999)

Estas bombas se clasifican como dinámicas ya que el fluido es primeramente acelerado por un impelente o alabes y entonces la velocidad del fluido es convertida a presión en un difusor que se encuentra en la voluta. Son centrífugas horizontales, de flujo radial, son de simple succión, autocebantes ya que el nivel del fluido está por encima de la bomba, unipaso, además el impulsor es cerrado y está proyectada para tener una curva característica estable.

1.6 Cavitación en bombas centrífugas

La cavitación dificulta el trabajo de las bombas centrífugas y aumenta los niveles de vibraciones; por ende las piezas de estas se deterioran con facilidad. Por ser la cavitación y las vibraciones fenómenos perjudiciales es de gran importancia su estudio y conocimiento.

Algunos criterios sobre la cavitación en bombas centrífugas son analizados por Cisneros (2007), el cual plantea que por los efectos que produce la cavitación en las bombas centrífugas se puede decir que es un ataque al corazón de la bomba; destaca además la escasa información que aportan los manuales y la existencia de pocos resultados sobre las características de las vibraciones primarias asociadas con la cavitación en las bombas centrífugas. Limitándose a describir las etapas iniciales e intermedia de la ocurrencia del fenómeno de la cavitación.

Rabinóvich, (1987) plantea que la cavitación (de la palabra latina cavitas) provoca la formación de cavidades en el líquido en movimiento, las cuales se llenan de vapores o de aire (gas). La cavitación surge en aquellos casos, en que la presión en cualquier lugar del flujo baja en tal grado que se hace menor que la presión de saturación, o sea, que la presión que corresponde a la ebullición del líquido a una temperatura dada.

El fenómeno de cavitación se puede observar, por ejemplo, en las líneas absorbentes de las instalaciones de bombeo y de las tuberías de sifones, donde su aparición está condicionada por la configuración geométrica y por el principio de acción de la propia tubería, cuya parte principal se encuentra bajo una presión menor que la atmosférica. La cavitación puede surgir también durante el funcionamiento de las turbinas hidráulicas rápidas, de las bombas centrífugas y de las hélices. En estos casos, su causa es el surgimiento de grandes velocidades locales, las cuales conllevan a la disminución de la presión. Si en este caso, la presión resulta menor que la presión de los vapores saturados, en los lugares correspondientes del flujo comienza la evaporización agitada del líquido; este último comienza a ebullicir y en él se forman las cavidades de cavitación que constan de burbujas de vapor.

Si durante el movimiento posterior del flujo la presión en él sube, ocurre la condensación del vapor, generalmente acompañada por un brusco chasquido, y las

cavidades de cavitación se cierran. A la formación de la cavitación favorece considerablemente la presencia, en el líquido, de burbujas de aire o de gases disueltos. En muchas resistencias locales, como consecuencia del gran aumento de la velocidad al estrecharse el flujo después de dilatarse, también pueden surgir los fenómenos de cavitación.

1.6.1. Característica del fenómeno de la cavitación

Analizando los criterios de cavitación, varios autores (González, 1983; Ramos, 1994; Pérez, 2000), refieren que la formación de vapor de agua a causa del descenso local de la presión por debajo de la de saturación del líquido a la temperatura del líquido, y condensación brusca subsiguiente trayendo consigo golpes hidráulicos. Este fenómeno se manifiesta muy frecuente en las bombas centrífugas. Se puede decir que supone la ebullición del líquido a temperatura ambiente provocado por muy bajas presiones.

1.6.2 Tipos de cavitación

Generalmente las burbujas que se forman dentro de un líquido son de dos tipos: burbujas de vapor o burbujas de gas.

La cavitación vaporosa se produce cuando las burbujas de vapor se forman debido a la vaporización del líquido bombeado. La vaporización se produce por adición de calor o por reducción de la presión estática (para la definición de este tipo de cavitación se excluirá la acción dinámica del líquido). La cavitación inducida por la formación y colapso de estas burbujas.

La cavitación gaseosa se produce cuando las burbujas de gas se forman por la presencia de gases disueltos en el líquido bombeado (generalmente aire, pero puede ser cualquier gas presente en el sistema).

En ambos tipos, las burbujas se forman en un punto interior de la bomba donde la presión estática es menor que la presión de vapor del líquido (vaporosa) o que la presión de saturación del gas (gaseosa).

La cavitación vaporosa es la forma más común en las bombas de proceso, generalmente ocurre debido a un insuficiente NPSH disponible o a fenómenos de recirculación interna. Se manifiesta como una reducción del desempeño de la bomba,

ruido excesivo, alta vibración y desgaste en algunos componentes de la bomba. La extensión del daño puede ir desde unas picaduras relativamente menores después de años de servicio, hasta fallas catastróficas en un corto período de tiempo.

La cavitación gaseosa se produce por efecto de gases disueltos (más comúnmente aire) en el líquido. Esta cavitación raramente produce daño en el impulsor o carcasa. Su efecto principal es una pérdida de capacidad. No debe confundirse con el ingreso de aire o bombeo de líquidos espumosos, situaciones que no necesariamente producen cavitación, pero sí reducción de capacidad, detención del bombeo y otros problemas. Balcazar, (2013)

1.6.3. Vibraciones debidas a la cavitación

En el fenómeno de la cavitación las bombas centrífugas muestran algunas señales como ruidos y vibraciones, en el caso de las vibraciones permitirán conocer la magnitud del fenómeno. Resulta importante buscar una relación entre el fenómeno de cavitación y la magnitud de las vibraciones para efectuar el diagnóstico de la bomba a través de ese parámetro. Esta relación permitiría conocer la magnitud del fenómeno de cavitación y decidir si la bomba se mantiene en explotación o se detiene.

El científico Wowk, V. (1991), fue muy claro y preciso al decir que en las máquinas de impulsión de fluidos aparecen vibraciones correspondientes al paso de un álabe, representado en la figura 1.2.

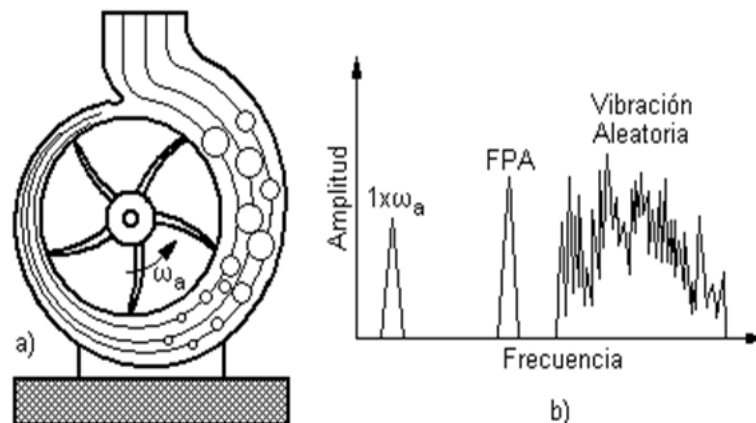


Figura 1.2. Cavitación (a) y espectro (b) de las vibraciones que genera. Fuente: Palomino, (1997)

En la figura 1.2 se muestra como incide la cavitación (a) en las vibraciones, se observa el espectro (b) que generan las vibraciones donde se tiene en cuenta el paso del álabe, la frecuencia del paso del álabe y la ocurrencia de las vibraciones de forma aleatoria que son las que demuestran la presencia de la cavitación.

1.7. Utilización de las vibraciones para el diagnóstico de bombas centrífugas

Las vibraciones aparecieron junto con el surgimiento de los primeros instrumentos musicales, en especial los de cuerda, desde ese entonces muchas personas mostraron interés por el estudio del fenómeno de las vibraciones, por ejemplo Galileo, encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas. Estos estudios y otros posteriores ya indicaban la relación que existe entre el sonido y las vibraciones mecánicas. (Peña, 2007)

Grandes físicos como Taylor, Bernoulli, D'Alambert, Lagrange, Fourier realizaron estudios entre los que podemos encontrar la Ley de Hooke en 1676 sobre la elasticidad, Coulomb dedujo la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales, Rayleigh con su método de energías; estructuraron las bases de las vibraciones como ciencia.

Si bien la teoría del comportamiento vibratorio de conjuntos mecánicos está perfectamente determinada desde hace más de un siglo, su desarrollo no data más que de unos cincuenta años atrás. La irrupción de los ordenadores y la de métodos de cálculo eficaces como, por ejemplo, los elementos finitos, así como la evolución de la electrónica con la construcción de aparatos precisos, compactos de medida y de exploración de datos, es lo que verdaderamente ha permitido desarrollar medios de cálculo y de ensayos, aunque las inversiones que hay que efectuar son todavía considerables.

En la actualidad, estas distintas evoluciones, unidas al hecho de que la mecánica ondulatoria se está implementando como una disciplina normalmente impartida en las escuelas técnicas y universidades, permiten abordar los problemas vibratorios de un modo sistemático, con métodos probados y que perderán en el futuro su carácter un tanto desconocido, o limitado a unos pocos especialistas.

Resumiendo, las vibraciones en las piezas de máquinas y en los miembros de las construcciones siempre hay que tratar de evitarlas con el fin de eliminar el desgaste excesivo de materiales, reducir los esfuerzos repetitivos que causarán la rotura de alguna pieza, disminuir los ruidos y disminuir los costos por mantenimiento.

Los procedimientos o métodos para analizar y medir las vibraciones son considerado elementos básicos para determinar las vibraciones, según los autores Torres (2000); Piedra (2000) y Palomino (1999), refieren que de alguna manera llegan a la misma conclusión acerca de las vibraciones para ofrecer así algunas definiciones que serán importantes para su conocimiento no abordando la importancia de las vibraciones para el diagnóstico del estado técnico de los equipos dinámicos.

La vibración provoca movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio; generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos; desalineación en acoplamientos; engranajes desgastados o dañados; rodamientos deteriorados; fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y problemas eléctricos. Estas causas la determinan fuerzas que cambian de dirección o de intensidad, estas fuerzas son debidas al movimiento rotativo de las piezas de la máquina, aunque cada uno de los problemas se detecta estudiando las características de la vibración.

Las características más importantes son: frecuencia, desplazamiento, velocidad, aceleración, (energía de impulsos).

La frecuencia es una característica simple y significativa en este análisis. Se define como el número de ciclos completos en un período de tiempo. La unidad característica es c.p.m. (ciclos por minuto). Existe una relación importante entre frecuencia y velocidad angular de los elementos rotativos. La correspondencia entre c.p.m. y rpm (ciclos por minuto y revoluciones por minuto) identificará el problema y la pieza responsable de la vibración. Esta relación es debida a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo a la velocidad de giro. Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración distinta.

La amplitud de la vibración indica la importancia y la gravedad del problema, esta característica da una idea de la condición de la máquina. Se podrá medir la amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración. La velocidad de vibración tiene en cuenta el desplazamiento y la frecuencia, es por tanto un indicador directo de la severidad de vibración. Se puede decir que midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento es indicada de una forma más precisa la severidad de vibración según el intervalo de frecuencias entre la que tiene lugar, así para bajas frecuencias, por debajo de 600 c.p.m., se toman medidas de desplazamiento. En el intervalo entre 600 y 60.000 r.p.m., se mide velocidad, y para altas frecuencia, mayores a 60.000 c.p.m., se toman aceleraciones donde c.p.m., es, ciclo por minuto.

1.7.1. Métodos de mediciones

Las mediciones constituyen un importante paso dentro del programa de mantenimiento predictivo, y se basan en el seguimiento de la evolución de uno o varios parámetros seleccionados adecuadamente, de acuerdo a su sensibilidad ante los cambios en la condición de la máquina analizada.

Con las mediciones, se inicia una cadena que luego del procesamiento y análisis de las informaciones, generará un informe para el seguimiento, y diagnosis de la condición mecánica de los equipos, como el utilizado por Valerino, (2001) estableciendo el modelo estadístico y su dependencia del estado técnico para el diagnóstico de los ventiladores de tiro de calcinación.

El modo más sencillo de aplicar las tecnologías predictivas empleando las vibraciones como parámetro de diagnóstico, consiste en la medición de niveles totales de vibraciones a intervalos periódicos, en aquellos puntos que (previo estudio) constituyen los que mejor revelan el comportamiento dinámico de la máquina.

El movimiento físico de una máquina rotatoria se interpreta como una vibración cuyas frecuencias y amplitudes tienen que ser cuantificadas a través de un dispositivo que convierta éstas en un producto que pueda ser medido y analizado posteriormente. Así la frecuencia describirá ¿qué está mal en la máquina? y la amplitud ¿cuán severo es el problema?

Existen dos métodos fundamentales para la medición de las vibraciones en las máquinas:

- Medición acústica.
- Medición de superficie.

La medición de superficie es el método más utilizado en el trabajo, cuantificando las vibraciones en la superficie de la máquina. La medición se realiza de forma discreta, o sea, en algunos puntos de la máquina y en forma directa, porque se mide a través del contacto entre el dispositivo de medición y la máquina.

Las mediciones de vibraciones que se realicen al conjunto bomba-motor deben estar focalizadas en dos objetivos:

1. Verificar un funcionamiento adecuado luego del montaje, éste permitirá conocer si el montaje fue realizado de forma correcta y así se garantiza una mayor fiabilidad de la máquina una vez que entre en funcionamiento.
2. Servir como base de datos para un programa de mantenimiento predictivo del conjunto, una vez tomada la primera medición se asume como nivel cero de vibraciones y desde ese momento se comenzará a hacerse la base de datos.

1.7.2. Establecimiento de los puntos de medición

Cada máquina a monitorear se considera individualmente para decidir los puntos que ofrecerán mediciones representativas. Las vibraciones deben medirse en los puntos o zonas localizadas en las que existe mayor respuesta o contenido informativo sobre las mismas, siendo estas los cojinetes o rodamientos de apoyo de los rotores o ejes, aunque complementariamente pueden medirse otros puntos. Las direcciones de las mediciones serán axiales (paralelo al eje geométrico de la bomba) y radial (vertical y horizontal).

En maquinaria dinámica es una práctica generalmente aceptada registrar mediciones de vibración en los tres planos ortogonales (horizontal, vertical, axial) en cada rodamiento. El establecimiento de los puntos según la experiencia de los técnicos de mantenimiento puede dar idea de las respectivas fallas.

Para la selección de los puntos donde se registran las vibraciones se aplica un procedimiento publicado por diferentes autores (Piedra, et al., 2000; Argulló et al., 1986). Las mediciones se realizaron en los ejes:

- Axial –desalineamiento, problema de rodamientos
- Horizontal – desbalance
- Vertical- flajilidad

En la figura 1.2 se presenta un esquema del conjunto bomba - motor junto con los puntos donde se deben realizar las mediciones de vibraciones destacando que en la realización del trabajo las mediciones solo se tomaron en los puntos relacionados con la bomba.

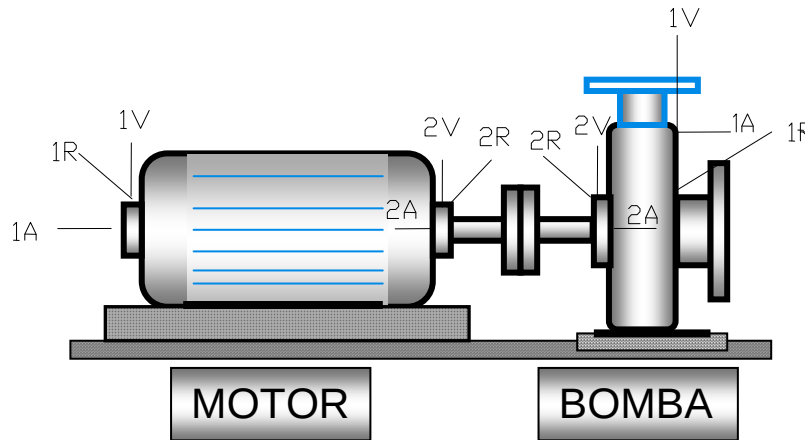


Figura 1.2. Esquema del conjunto bomba - motor y los puntos de medición de vibraciones.

Si las mediciones realizadas revelan que la características de los espectros de frecuencia obtenidos descartan problemas originados por resonancias o desbalance entre sus elementos, entonces el diagnóstico del problema se orienta hacia la acción de importantes fuerzas hidráulicas, ya que la mayoría de las bombas centrífugas operan con fuerzas hidráulicas inherentes a su funcionamiento originadas en las pulsaciones de presión que aparecen cada vez que un alabe del impulsor pasa por el difusor estacionario. Si el impulsor está correctamente centrado en la carcasa de la bomba y está alineada con los difusores, las pulsaciones de presión se balancean y las vibraciones resultantes son mínimas. Estas vibraciones generalmente son de una frecuencia igual al número de álabes del impulsor multiplicado por las r.p.m del motor.

En caso de que las pulsaciones de presión no se balanceen correctamente provocan importantes niveles de vibraciones, principalmente en las frecuencias antes mencionadas.

1.7.3. Equipamiento para realizar las mediciones

Existen varios equipos para realizar las mediciones de las vibraciones, en los que se destacan:

- Vibration Pen plus un equipo marca SKF.
- Microlog (de SKF Condition Monitoring, Inc.), Equipo que permite la recogida, almacenamiento y procesamiento de datos.
- Vibrotest 60 / vibroexpert CM-400 de colector analizador FFT.

1.7.4. Medición de las vibraciones

Las vibraciones pueden ser observadas en dos dominios básicos:

- Dominio del tiempo.
- Dominio de la frecuencia.

Ambos están vinculados directamente. La vibración es registrada por una señal eléctrica proporcional al fenómeno mecánico que se está cuantificando. Ésta se obtiene en el dominio del tiempo.

Desde el punto de vista matemático, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia se relacionan a través del aparato matemático ideado por Fourier en el siglo XIX. La evolución de la electrónica digital ha incorporado la conocida Transformada Rápida de Fourier (FFT) en instrumentos de medición y en programas de computación. En cualquiera de estos casos, el espectro obtenido muestra la distribución por frecuencias de los niveles de vibraciones.

Análisis en el dominio del tiempo

La evaluación con máxima precisión del estado mecánico de la maquinaria industrial, exige analizar e interpretar los espectros de vibraciones y los registros de éstas en el dominio del tiempo.

Sustentan estas afirmaciones:

1. La señal temporal es la representación gráfica de la amplitud de las vibraciones en función del tiempo. Esta señal contiene todas las frecuencias, armónicas y sub-armónicas que estén siendo generadas por la máquina durante la medición. De igual forma, la relación de fase inherente a cada una de estas frecuencias, aparecerá registrada en la propia señal. Esta relación de fase podrá ser observada en los registros temporales que exhiban, pulsos, modulaciones en amplitud, modulaciones en frecuencia, señales truncadas y distorsiones.
2. La Transformada Rápida de Fourier, genera el espectro de amplitudes una vez que es "alimentada" con la señal en el tiempo, empleando para ello un algoritmo físico-matemático que presupone la pérdida de cierta información. Por ejemplo, la información de fase, los valores verdaderos de las amplitudes de los pulsos, la naturaleza de estos y diferentes formas de modulación, no pueden ser identificados con facilidad en los espectros de las vibraciones debido a la pérdida de información antes referida.

Análisis en el dominio de las frecuencias

Se realiza a través de los espectros.

Los espectros de vibraciones se obtienen graficando las amplitudes en función de su frecuencia. Estos espectros contienen, frecuencias, armónicas y sub-armónicas, así como el efecto de adición y substracción de frecuencias.

Elección del parámetro vibratorio

Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir qué magnitud física se desea cuantificar para describir la vibración, pues para ello puede ser empleado el desplazamiento, la velocidad o la aceleración.

Estas magnitudes quedan definidas en la norma ISO 2041(1989):

Desplazamiento: Es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia.

El desplazamiento es la medida de las posiciones extremas de la superficie que vibra. Está relacionado con la frecuencia, por lo que cualquier medición de desplazamiento tendrá que ser realizada a una frecuencia específica. El rango de frecuencias efectivo aproximado para transductores de proximidad esta entre 0 y 600 Hz. En el caso de transductores para la medición de desplazamiento por contacto el rango de frecuencias efectivo es de entre 0 y 200 Hz.

Velocidad: vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo.

La velocidad es la medida de cuán rápido la superficie vibrante alcanza sus posiciones extremas, El rango de frecuencias efectivo para transductores de velocidad es de entre 10 Hz y 2000 Hz aproximadamente, prefiriéndose la medición de velocidad por estar sopesada directamente por la frecuencia.

Aceleración: Vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo.

La aceleración expresa la razón de cambio de la velocidad desde la posición de equilibrio hasta los extremos, teniéndose aceleraciones elevadas a altas frecuencias. Los transductores para la medición de la aceleración de las vibraciones con alta sensibilidad poseen un rango de frecuencias efectivo de entre 0.2 Hz y 500 Hz aproximadamente y los de más baja sensibilidad exhiben un rango de frecuencias de entre 5 Hz y hasta 20000 Hz.

1.8. Características de la fase líquida (licor)

La fase líquida (licor producto) contiene los sulfatos de los metales Ni, Co, Fe, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, así como una importante cantidad de ácido sulfúrico libre (que se añade en exceso para garantizar el completamiento de todas las reacciones químicas). De hecho la solución es un electrolito y teniendo en cuenta las características de la superficie de los sólidos formados, se deben producir de inmediato los fenómenos electrosuperficiales de la llamada doble capa eléctrica y el surgimiento de potenciales electrocinéticos que comienzan a interactuar en el sistema e influyen en el proceso de la caída libre de las partículas (es decir, en el proceso de sedimentación). Otro fenómeno lo constituye la presencia de geles de sílice que entorpecen también el proceso de sedimentación libre de partículas sólidas. (Manual de Operaciones, 2000).

1.9. Conclusiones del capítulo

- No existen trabajos precedentes acerca del sistema de bombeo de licor producto perteneciente a la Planta de Lavaderos del proceso de lixiviación ácida.
- En la búsqueda bibliográfica realizada y los trabajos precedentes se probó que existen insuficientes documentaciones que vinculen la cavitación con las vibraciones, y la interrelación de estas variables en las instalaciones de bombeo, para definir la relación entre ellas es necesario investigar la relación de las fases de cavitación y los niveles de vibraciones para la misma.

Separador capítulo

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Para que una instalación cumpla con las exigencias del proceso tecnológico del cual forma parte es importante la adecuada selección de los equipos que la componen. Debido a esto, es necesario que el técnico o ingeniero encargado de realizarlo conozca cuales son y cómo se determinan los principales parámetros que permiten caracterizar el trabajo del equipo; además debe saber las metodologías y métodos apropiados para calcularlos, obteniendo así una gran exactitud y veracidad en los resultados alcanzados. Es por ello que el **objetivo fundamental** de este capítulo es aplicar las metodologías de cálculo de los parámetros de la instalación, así como los equipos a utilizar para la realización de las diferentes mediciones.

2.2. Características específicas de las bombas que interviene en el proceso

El sistema de bombeo de licor producto está compuesto por 32 bombas centrífugas, divididas en 10 grupos, las cuales están conectadas a 10 tanques donde se realizan 10 etapas de lavado, tres tanques de alto régimen y siete convencionales, los cuales envían a Neutralización sobre los 4500 gpm de licor, como promedio.

Características técnicas de la bomba:

Tipo de bomba: HPEB 20X40

Centrífuga horizontal

Temperatura de bombeo: 80°C

Peso específico: 1,06 Kg/dm³

Presión de salida (bar/ g.): 87psia

Carga hidrostática: 50 m

Capacidad: 499 m³/h

Eficiencia de la bomba (%):75

Velocidad:(rpm):1450

Potencia absorbida bomba: (kW):96

NPSH_r: 4,1m

Tipo de cabida: Cierre mecánico

Tipo de lubricación: aceite

Características técnicas del motor eléctrico acoplado a la bomba

Potencia: 105 kW, Voltaje: 480 V, Frecuencia de rotación: 1750 rev/min

2.3. Parámetros a medir

Se propone las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar del tema, se consideró que son las más importantes:

- Caudal Q
- Niveles de las vibraciones V
- Presión

Caudal Q: Es una variable que define el máximo flujo que puede impulsar la bomba, relacionada con la altura de succión y la velocidad específica.

Niveles de vibraciones: Se miden de tres formas, axial, vertical y horizontal, su unidad de medida es (mm/s).

Presión P: Es una variable que permite determinar si las bombas tienen un funcionamiento normal. Cuando el líquido a bombear se mueve en una región donde la presión es menor que la presión de vapor, vaporiza en forma de burbuja, disminuyendo el espacio utilizable para el paso del fluido; perturbando la continuidad del flujo debido al desprendimiento de gases y vapores, disminuyendo el caudal y el rendimiento de la bomba.

2.3.1. Equipos e instrumentos utilizados para medir los parámetros

Durante el experimento realizado en la investigación se obtuvieron mediciones de los niveles de vibraciones y los niveles de ruido, aportando una valoración integral de la instalación.

A continuación se muestran los instrumentos de medición utilizados en el trabajo, parámetros que se registran y las características técnicas de los mismos:



Figura 2.1. Vibrómetro

En la figura 2.1 se muestra el equipo con el cual se realizaron las mediciones de las vibraciones, el cual tiene como nombre Vibrómetro y posee las siguientes características.

Tipo: Viber-A+ Serial No: A00163 Transductor: VMI-199-28 SN: 3000

Sensibilidad: 105,2 Mv/g, 100 Hz Nivel de vibración: mm/s

Margen de error: ± 3

Otro instrumento de medición que se utilizó es el Vibxpert II (figura 2.2), el cual es de fabricación alemana por la compañía Pruftechnik. Posee una pantalla VGA de 115 x 78 mm a color y de alta resolución (480 x 640 píxeles). Este es un analizador de dos canales, con rango de frecuencia de 1Hz hasta 40 kHz y 102,400 líneas de resolución, mide valores globales de: aceleración, velocidad, desplazamiento, impulso de choque, revoluciones por minuto, temperatura, señales de corriente directa y corriente alterna, para análisis espectral en motores (datos de procesos) y fase.



Figura 2.2. Vibxpert II

Con este equipo se realizaron las mediciones de las vibraciones teniendo en cuenta los espectros, se almacenaron los datos y luego se procederá a realizar un análisis de los espectros cuando la bomba está en ausencia de cavitación y cuando está trabajando bajo un régimen cavitacional. Se utilizaron dos equipos de medir vibraciones porque el Vibxpert II supera en calidad e informaciones que brinda al Vibrómetro y además para realizar una comparación de los datos de las mediciones ya que el Vibrómetro posee un margen de error mayor que el Vibxpert II.

Manómetros: Se utilizaron para medir la presión del fluido en la succión y la descarga de la bomba.

Manómetro instalado en la succión

- Marca: Ashcroft Rango: 0 – 100 psi

Manómetro instalado en la descarga

- Marca: Ashcroft Rango: 0 –145 psi

- Rango: 0 –1000 kpa

Los manómetros instalados se calibraron en el departamento de Metrología por el personal especializado, se determinaron los posibles errores de lectura en varios rangos de medición mediante la comparación de indicaciones con instrumentos patrones adecuados, lográndose su correcto funcionamiento con la presencia del sello que lo identifica como equipo certificado o apto para su funcionamiento.

La calibración de un manómetro de cualquier tipo comprende en general dos etapas:

- 1- Etapa: Preparación de las condiciones necesarias para la calibración.
- 2- Etapa: Ejecución de la calibración.

2.4. Metodología empleada para el cálculo hidráulico en la instalación

El cálculo hidráulico de la bomba centrífuga se enmarca en la determinación de la carga de la red, el rendimiento total de la bomba, la potencia consumida por el motor y la comprobación de la condición de ausencia de cavitación. La metodología utilizada se establece a continuación.

2.4.1. Área de la sección transversal

$$A = \frac{\pi \cdot d_{tub}^2}{4}; \text{ m} \quad (2.1)$$

2.4.2. Velocidad del fluido

$$V = \frac{Q}{A}; \text{ m/s} \quad (2.2)$$

Q-Gasto (m³/h)

d_{tub} - Diámetro de la tubería (m)

2.4.3. Número de Reynolds del fluido

$$Re = \frac{d_{tub} \cdot V \cdot \rho_{licor}}{\mu_p} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_{licor}}{\pi \cdot d_{tub} \cdot \mu_p}; \text{ adimensional} \quad (2.3)$$

Donde:

V- Velocidad del fluido (m/s)

Q- Gasto (m³/h)

ρ_{licor} - Densidad del licor (kg/m³)

μ_p - Viscosidad plástica (Pa · s)

2.4.4. Coeficiente de pérdidas por rozamiento

El coeficiente de pérdidas de carga por el rozamiento del fluido en el interior del sistema de tubería varía según el tipo de régimen, y está determinado como sigue.

- Para régimen laminar, con número de Reynolds menor que 2300:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.4)$$

Donde:

λ : Coeficiente de pérdida de carga por rozamiento.

- Para régimen turbulento, con número de Reynolds mayor que 2300:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (2.5)$$

2.4.5. Coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior de la instalación de transporte hidráulico (Garcell, 2001)

$$R_c = \left(\lambda_c \cdot \frac{l_t}{d_{tub}} + \sum \zeta_t + 1 \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2}; \text{ adimensional} \quad (2.6)$$

Siendo:

λ_c - Coeficiente de resistencia (adimensional)

l_t - Longitud total de la tubería (m)

d_{tub} - Diámetro de la tubería (m)

$\sum \zeta_t$ - Resistencia total en la tubería (adimensional)

g - Aceleración de la gravedad (m/s^2)

A - Área de la sección transversal (m^2)

2.4.6. Altura de carga del fluido

La carga de la red exterior de la instalación de hidrotransporte se establece según (Alexandro, 1986) por la ecuación:

$$H_{red} = R_c \cdot Q^2; m \quad (2.7)$$

R_c - Coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior de la instalación de transporte hidráulico

2.4.7. Coeficiente de pérdidas en la succión (Nekrasov, 1968)

$$\Sigma h = \left(\frac{\lambda_c \cdot l_t}{d_{tub}} + \Sigma \zeta_{succ} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}; \text{ adimensional} \quad (2.8)$$

Siendo:

V - velocidad (m/s)

2.4.8. Velocidad específica de succión (Pérez, 2000)

$$n_s = \frac{n \sqrt{Q}}{(H_{succ})^{3/4}}; \text{ rev/min} \quad (2.9)$$

Siendo:

n- número de revoluciones (rev/min)

H_{succ} - Altura de succión (m)

2.4.9. Resistencia hidráulica total en la tubería (Gonzáles, 2006)

$$\Sigma \zeta_t = \Sigma \zeta_{succ} + \Sigma \zeta_{imp}; \text{ adimensional} \quad (2.10)$$

Siendo:

$\Sigma \zeta_{succ}$ - Resistencia hidráulica en la succión (adimensional)

$\Sigma \zeta_{imp}$ - Resistencia hidráulica en la impulsión (adimensional)

2.4.10. Resistencia hidráulica en la succión

$$\Sigma \zeta_{succ} = \zeta_{val} + \zeta_{entr} + \zeta_{cod.45^0} + \zeta_{cod.90^0} + \zeta_T; \text{ adimensional} \quad (2.11)$$

Donde:

ζ_{val} - Resistencia en válvulas (adimensional), se obtiene de la tabla 2.1.

ζ_{entr} - Resistencia en la entrada de la succión (adimensional), se obtiene de la tabla 2.1.

$\zeta_{cod.45^0}$ - Resistencia en los codos de 45^0 (adimensional), se obtiene de la tabla 2.1.

$\zeta_{cod.90^\circ}$ - Resistencia en los codos de 90° (adimensional), se obtiene de la tabla 2.1.

ζ_T - Unión en T (adimensional), se obtiene de la tabla 2.1.

En la siguiente tabla aparecen los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los diferentes tipos de accesorios que posee la línea.

Tabla 2.1. Accesorios y sus coeficientes de resistencia hidráulica en la succión, Fuente: Tarragó, 2008

Accesorios en la tubería	Coeficiente de resistencia (ζ)
Válvula mariposa	0,54
Válvula de compuerta	0,2
Coeficiente de entrada	0,23
Codo de 45°	0,45
Codo de 90°	0,75
Unión en T	1,8

2.4.11. Resistencia hidráulica en la impulsión

$$\Sigma \zeta_{imp} = \zeta_{cod.90^\circ} + \zeta_{val} + \zeta_{cod.45^\circ} + \zeta_{sal} + \zeta_T ; \text{adimensional} \quad (2.12)$$

Dónde:

ζ_{sal} - Resistencia en la salida de la impulsión (adimensional), se obtiene de la tabla 2.3

En la tabla 2.2 aparecen los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los diferentes tipos de accesorios que posee la línea.

Tabla 2.2: Accesorios y sus coeficientes de resistencia hidráulica en la descarga, Fuente: Tarragó, 2008

Accesorios en la tubería	Coeficiente de resistencia (ξ)
Válvula mariposa	0,54
Codo 90° (radio corto)	0,9
Codo 90° (radio normal)	0,75
Codo 90° (radio grande)	0,6
Codo de 45°	0,45
Unión en T	1,8
Coeficiente de salida	1

2.5. Cavitación en bombas centrífugas

Con la siguiente metodología de cálculo se determinará si la bomba objeto de estudio está trabajando bajo un régimen cavitacional, según (Pérez, 2000).

2.5.1. Condición de ausencia de cavitación

El parámetro NPSH_r debe ser comparado contra el NPSH_d, el cual está determinado por las características del tramo de succión del sistema y se puede mejorar aumentando el diámetro de la tubería de succión, mejorando la calidad de la tubería, reduciendo la distancia de la tubería de succión y la cantidad de accesorios. Todo lo anterior con el fin de garantizar que:

$$NPSH_d \geq NPSH_r$$

2.5.2. Altura neta positiva en la succión

Se denomina **NPSH** (altura neta positiva en la aspiración) a la diferencia entre la presión del líquido a bombear referida al eje del impulsor y la tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (es la presión del líquido, que a esa temperatura, se encuentra en equilibrio con su vapor en un depósito cerrado). Debemos por tanto conocer y combinar en cada caso el NPSH disponible en la instalación y el NPSH requerido por la bomba.

2.5.3. Altura neta positiva en la succión disponible

El NPSH_d está en función de la instalación e independiente del tipo de bomba.

$$(NPSH)_d = Patm + Hsucc - \Sigma h - Ht ; m \quad (2.13)$$

Donde:

Patm - Es la presión atmosférica (m).

Hsucc - Es la altura de succión (m).

Σh - Pérdidas en la succión

Ht - Es la presión de vapor (m).

2.5.4. Altura neta positiva en la succión requerida

El NPSHr es un dato básico y característico de la bomba, varía según el modelo, tamaño y condiciones de servicio, recomendada en los datos que facilita el fabricante.

Para la evaluación de la calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, es importante la determinación del NPSHr, que será:

$$\text{NPSH}_r = 10 \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3} ; \text{ m} \quad (2.14)$$

Donde:

C- Coeficiente de velocidad específica en la succión

En el diseño de nuevas máquinas el valor de C se determina mediante cálculo y posteriormente se comprueba con los ensayos correspondientes. En la práctica el coeficiente puede ser afectado por deficiencias del proyecto o de su ejecución. Para la realización de un análisis que permita una evaluación práctica y rápida de una bomba el coeficiente C se obtuvo en función de la velocidad específica, ($C = f(n_e)$). Su valor corresponde a las siguientes correlaciones empíricas:

1- Bombas con el rodete en voladizo: $C = 880 \log n_s^{3/4}$

2- Bombas con el rodete entre apoyos: $C = 800 \log n_s^{3/4}$

2.6. Metodología de cálculo para el balance energético de una bomba centrífuga

El balance energético de una bomba centrífuga se sustenta en el cálculo del rendimiento total de la bomba y en la potencia real que consume el motor, porque estos aspectos caracterizan energéticamente la instalación. La metodología a utilizar se establece a continuación según (Nekrasov, 1968).

2.6.1. Potencia útil que se le transmite al árbol de la bomba

$$N_{\text{árbol}} = \frac{Nb}{1000 \cdot \eta_t} ; \text{ kW} \quad (2.15)$$

Donde:

N_b - Potencia útil de la bomba (kW)

η_t - Rendimiento total de la bomba

2.6.2. Potencia útil de la bomba

$$N_b = \rho_{licor} \cdot Q \cdot g \cdot H_d ; \text{ kW} \quad (2.16)$$

Donde:

H_d - Altura de impulsión (m)

2.6.3. Rendimiento total de la bomba

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_{mec} ; \% \quad (2.17)$$

Dónde:

η_h - Rendimiento hidráulico (%)

η_v - Rendimiento volumétrico (%)

η_{mec} - Rendimiento mecánico (%)

2.7. Datos de la instalación

Para la realización de los cálculos de la instalación es necesario conocer los siguientes datos:

- Diámetro de la tubería (d_{tub}) = 0,355 m
- Densidad del agua (ρ_{agua}) = 1000 kg/m³
- Densidad del licor (ρ_{licor}) = 1,05kg/l
- Número de revoluciones (n) = 1575 rev/min
- Viscosidad plástica (μ_p) = 0,002004 Pa·s
- Temperatura del licor = 40 °C

- Concentración de sólido que contiene el licor = 44,03 %
- Concentración de sólido expresado en coeficiente (S) = 0,4403; adimensional
- Presión atmosférica (Patm) = 10,327 m
- Carga estática total (ΔZ) = 4,52 m
- Altura de succión (Hsucc) = 4,16 m
- Longitud total de la tubería (l_t) = 145 m
- Presión de vapor del licor (Ht) = 101,3 kpa
- Coeficiente (C) = $880 \log n_s^{3/4}$; adimensional
- Gasto (Q) = 620 m³/h
- Cantidad de válvulas en la succión = 5
- Cantidad de codos de 45° en la succión = 2
- Cantidad de válvulas en la impulsión = 13
- Cantidad de codos de 45° en la impulsión = 5
- Cantidad de codos de 90° en la impulsión = 18
- Cantidad de unión en T en la succión = 3
- Cantidad de unión en T en la impulsión = 7

2.8. Puntos de medición de las vibraciones

Se establecieron dos puntos de mediciones, analizado y definido en la figura 1.2, para ello se tomaron 5 muestras en cada punto de medición en las vibraciones verticales, horizontales y axiales; a continuación los detalles.

- 5 mediciones radiales (verticales y horizontales) en el primer punto.
- 5 mediciones radiales (verticales y horizontales) en el segundo punto.
- 5 mediciones axiales en el primer y segundo punto.

Todos estos puntos de medición están determinados de acuerdo a la figura 1.2 y los resultados de estas mediciones se muestran en el capítulo 3 en la tabla 3.4.

2.8.1. Magnitudes que caracterizan a las vibraciones

Estas magnitudes según Palomino, 1977 pueden ser expresadas según las siguientes relaciones:

$$y(t) = Y \operatorname{sen}(2\pi ft) \quad (2.18)$$

$$a(t) = (2\pi f)^2 Y \operatorname{sen}(2\pi ft + \frac{\pi}{2}) \quad (2.19)$$

$$v(t) = (2\pi f) Y \operatorname{sen}(2\pi ft + \frac{\pi}{2}) \quad (2.20)$$

Donde:

y: desplazamiento; m

Y: amplitud del desplazamiento; m

a: aceleración; m/s²

v: velocidad; m/s

f: frecuencia; Hz

t: tiempo; s

La comprensión e interpretación de los patrones de vibraciones, desempeñan un rol fundamental, lo cual se logra mediante la identificación de patrones característicos. Para lograr la identificación de estos patrones se debe conocer la frecuencia fundamental, la cual se define por la ecuación 2.25

$$f_0 = \frac{n}{60}, \text{ Hz} \quad (2.21)$$

Donde:

n – velocidad de rotación del rotor de la bomba, rpm

f_0 – frecuencia fundamental

Conociendo esta frecuencia, en dependencia de su amplitud, se pueden diferenciar los patrones unos de otros. Otra frecuencia de interés es la frecuencia de paso de aspa que se define por la expresión 2.26.

$$F = f_0 \cdot N, \text{ Hz} \quad (2.22)$$

Donde:

N – número de aspas.

2.9. Criterio de Semejanza

El análisis de la incidencia de la variable del número de revoluciones permite determinar la capacidad de la bomba utilizando el principio de la similitud dinámica. Cuando se aplica a una bomba centrífuga indica que dos bombas de configuración similar tendrán características semejantes de funcionamiento.

Si se asigna el subíndice 1 a las condiciones en las cuales se conocen las características y el subíndice 2 denota las condiciones a alguna otra velocidad desconocidas, entonces:

$$Q_2/Q_1 = n_1/n_2 \quad (2.23)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (2.24)$$

Estas relaciones según (Karassik, J; 1976) se pueden utilizar sin peligro para cambios moderados en la velocidad.

Para obtener el comportamiento de las características de la bomba objeto de estudio representado para n_1 (153-PU-1A) y compararlos con las características de la bomba representada para n_2 , se seleccionaron los números de revoluciones siguientes:

$n_1 = 1750 \text{ rev/min}$, para la bomba objeto de estudio (153-PU-1A)

$n_2 = 1575 \text{ rev/min}$, para la bomba de menor valor

2.10. Conclusiones del capítulo

- Mediante las metodologías de cálculo se determinarán los principales parámetros de la instalación relacionados con la condición de cavitación y los parámetros de las vibraciones producto de esta.
- Se seleccionaron como los equipos a utilizar para la realización de las mediciones de las vibraciones y los espectros de estas el Vibrómetro y el VIBXPERT II destacándose que este último posee un grado de medición de mayor precisión.

Separador capítulo 3

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

3.1 Introducción

Una de las estrategias presentes en la producción actual de la planta de Lavaderos para disminuir los gastos en el hidrotransporte es minorizar los costos por mantenimiento. La correcta explotación del equipamiento de bombeo en un régimen operacional adecuado permite la reducción de los mismos y aumenta la efectividad del transporte hidráulico. En esta instalación, los operadores de los equipos están concientizados con la tarea de reducir el impacto negativo hacia el medio ambiente y el sentir de la necesidad imperiosa de preservar la naturaleza. En correspondencia con lo antes expuesto el **objetivo** de este capítulo es el análisis de los resultados fundamentales, la valoración económica y el impacto medioambiental de la instalación.

3.2 Obtención de la curva de la red

Según la metodología utilizada para el cálculo hidráulico y el balance energético establecido, los valores de los parámetros se muestran en la tabla 3.1, 3.2 y 3.3.

Tabla 3.1. Valores de los parámetros fundamentales del cálculo hidráulico

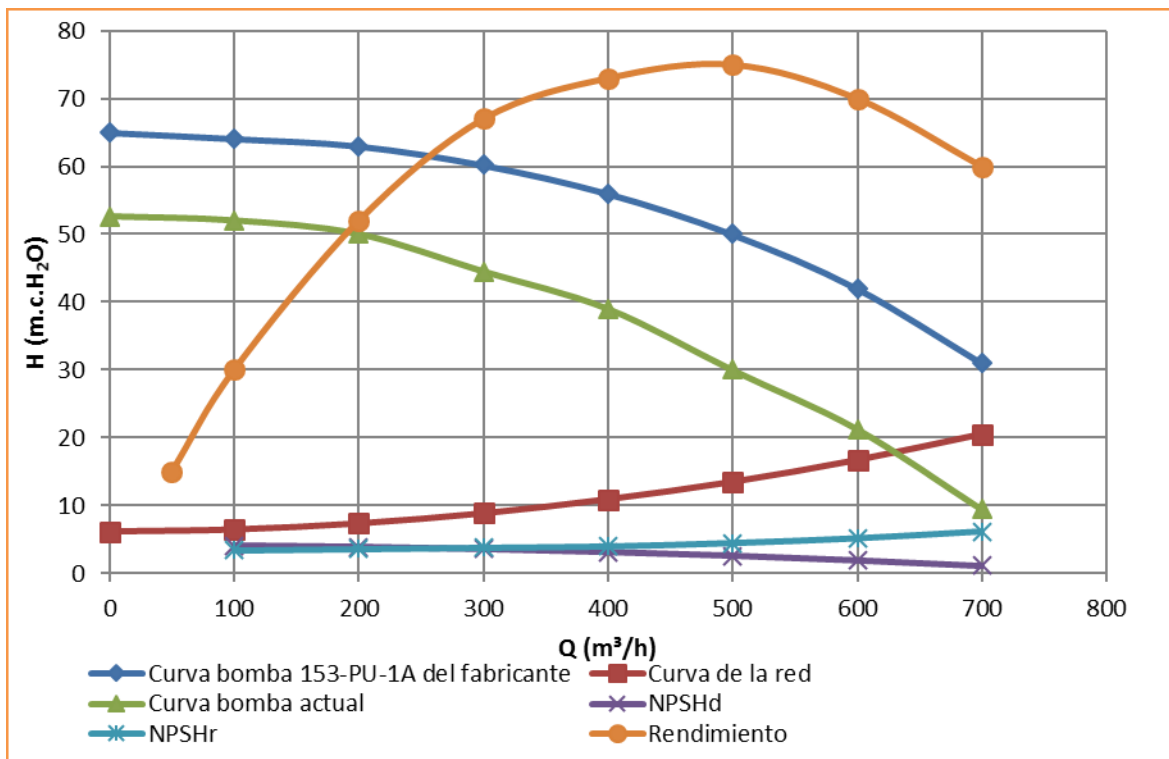
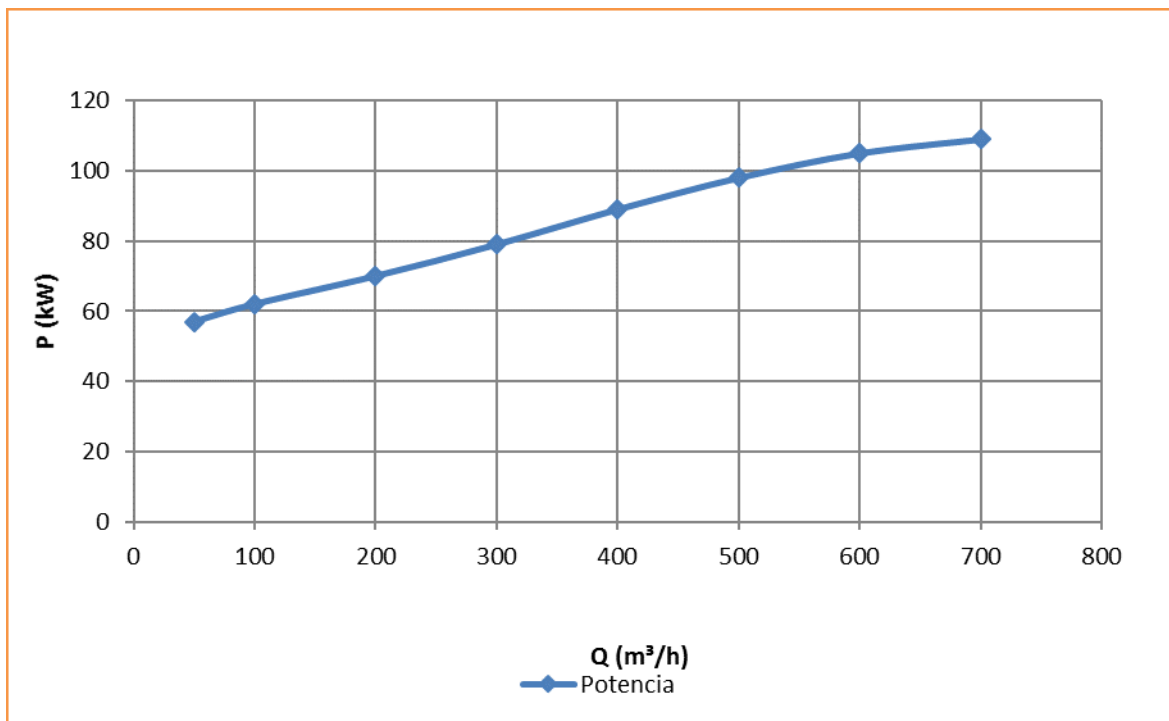
Parámetros de cálculo en la instalación	Resultados	Unidad	Ecuación
Área; A	0,0989	m	2.1
Velocidad específica; n_s	224,2	rev/min	2.9
Resistencia hidráulica total en la tubería; $\sum \zeta_t$	67,67	Adimensional	2.10
Resistencia hidráulica en la succión; $\sum \zeta_{succ}$	14,140	Adimensional	2.11
Resistencia hidráulica en la impulsión; $\sum \zeta_{imp}$	53,53	adimensional	2.12

En la tabla 3.1 se pueden observar los valores de varios parámetros que se tuvieron en cuenta para la realización del cálculo hidráulico, estos parámetros se calcularon en el software Excel.

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos, luego de desarrollada la metodología de cálculo, según Nekrasov (1968), respectiva a los parámetros fundamentales que caracterizan el comportamiento de la curva de la red, se puede observar cómo se comportan estos parámetros teniendo en cuenta diferentes caudales.

Tabla 3.2. Valores de los parámetros fundamentales del cálculo hidráulico

Parámetros de cálculo en la instalación	Q (CAUDALES)							
	0	100	200	300	400	500	600	700
V(m/s)	0	0,2729	0,5559	0,8389	1,1220	1,3949	1,6779	1,9609
Re	0	50764	103408	156052	208697	259461	312105	36475
λ	0	0,0210	0,0176	0,0159	0,0148	0,0140	0,0133	0,0128
R(s ² /m5)	352,4	397,24	389,93	386,26	383,89	382,22	380,88	379,79
H(m)	6,2	6,4895	7,3795	8,8610	10,929	13,479	16,695	20,493
Rsucc	73,63	82,450	81,013	80,292	79,826	79,498	79,233	79,019
Σh_{succ}	0	0,0601	0,2450	0,5531	0,9835	1,5139	2,1833	2,9739
NPSHd	-	4,070	3,885	3,577	3,146	2,616	1,947	1,156
NPSHr	-	3,4	3,6	3,8	4	4,5	5,2	6,2

Figura 3.1. Obtención de las curvas del sistema hidráulico**Figura 3.2.** Obtención de la curva de potencia

En la figura 3.1 y 3.2 se representa como se comportan las diferentes curvas luego de realizado el cálculo hidráulico teniendo en cuenta los parámetros actuales de la instalación, para esto se aplicó el criterio de semejanza ya que en la instalación se realizaron algunos cambios como por ejemplo: se instalaron variadores de velocidad con los cuales se redujo el número de revoluciones de 1750 rpm a 1575 rpm que es la máxima regulación que posee el sistema y por la tanto hay una variación de la altura de 65 m a 52 m. Para estas nuevas condiciones el cálculo hidráulico tuvo en cuenta las nuevas características de la red, longitud y diferencia de altura. Obtenemos luego de emplear el criterio de semejanza que la bomba posee un caudal de operación de 620 m³/h, para este caudal se tiene una altura de 17 m, un rendimiento de 67 % y una potencia de 108 kW. Para este punto de operación el valor de $NPSH_d = 1,731$ m y $NPSH_r = 5,5$ m, como el $NPSH_d < NPSH_r$ la bomba se encuentra en régimen cavitacional.

Tabla 3.3. Valores de los parámetros fundamentales del balance energético

Parámetros de cálculo en la instalación	Resultados	Unidad	Ecuación
Potencia útil del árbol; $N_{\text{árbol}}$	16,4	kW	2.15
Potencia útil de la bomba; (N_b)	12338	kW	2.16
Rendimiento total de la bomba; (η_t)	75	%	2.17

En la tabla 3.3 se muestran los resultados de los principales parámetros del balance energético.

3.3. Análisis de los resultados de las vibraciones

Tabla 3.4. Parámetros medidos en la bomba centrífuga 153 PU 1A

n (rpm)	Q (m ³ /h)	P _s (kpa)	P _d (kpa)	V _{V1} mm/s	V _{H1} mm/s	V _{A1} mm/s	V _{V2} mm/s	V _{H2} mm/s	V _{A2} mm/s
1575	620,5	20,6	193	3,2	3,6	3,6	3,8	5,2	5,4
1225	525,1	34,4	151	1,5	1,5	2,3	1,5	2,2	2,6
875	345,6	27,5	96,5	0,5	0,3	0,7	0,3	0,6	0,8
682.5	177,1	6,89	68,9	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2	0,4

Donde:

n- Número de revoluciones (rpm)

Q- Caudal (m^3/h)

P_s- Presión en la succión (kpa)

P_d- Presión en la descarga (kpa)

V_{V1}- Vibración vertical en el punto 1 (mm/s).

V_{H1}- Vibración horizontal en el punto 1 (mm/s).

V_{A1}- Vibración axial en el punto 1 (mm/s).

V_{V2}- Vibración vertical en el punto 2 (mm/s).

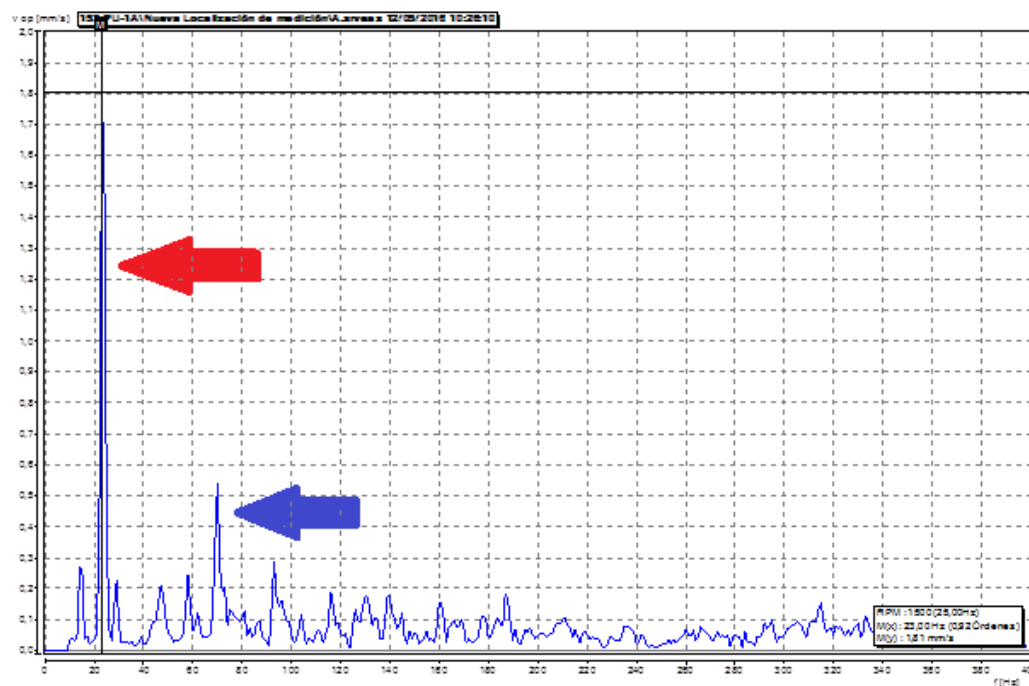
V_{H2}- Vibración horizontal en el punto 2 (mm/s).

V_{A2}- Vibración axial en el punto 2 (mm/s).

En la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos a partir de la regulación del número de revoluciones en el sistema de bombeo de licor producto, se puede observar como a medida que se van realizando regulaciones va ocurriendo una disminución del caudal y además se va produciendo una caída de presión en el sistema por lo que se puede confirmar que está ocurriendo el fenómeno de cavitación, lo cual trae como consecuencia que ocurran vibraciones; se aprecia además los valores que tomaron los niveles de vibraciones en sus formas fundamentales: horizontales, verticales y axiales, donde estas últimas son las que poseen los valores más elevados cuando está presente la cavitación.

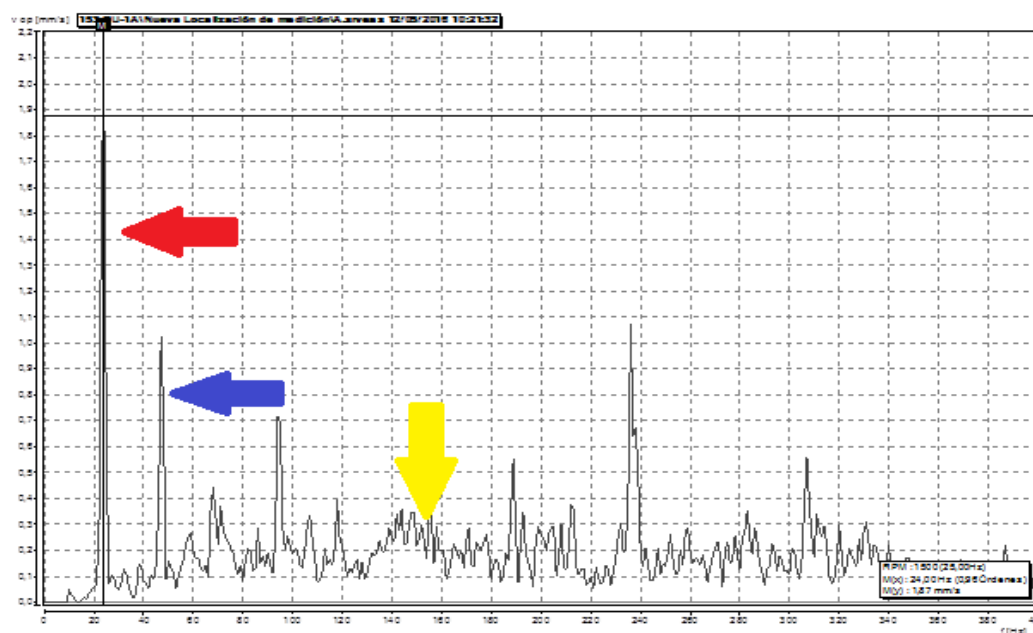
3.4. Análisis de los espectros medidos en la bomba 153-PU-1A

De las mediciones del comportamiento de las vibraciones realizadas, se representan los espectros medidos, los cuales se midieron para diferentes regulaciones del número de revoluciones, estos espectros se midieron de forma axial debido a que son los que inciden con mayor frecuencia cuando la bomba se encuentra cavitando, figuras 3.3 y 3.4.

Figura 3.3. Espectro medido en la dirección axial de la bomba

Para la identificación de estas frecuencias se utiliza la siguiente leyenda:

➡ Frecuencia fundamental
 ➡ Frecuencia de paso de aspa
 ➡ Vibraciones aleatorias

Figura 3.4. Espectro medido en la dirección axial de la bomba

En la figura 3.3 se muestra el espectro medido en la bomba en el cual mediante la leyenda se señalan la frecuencia fundamental y la frecuencia de paso de aspa, las cuales se pueden obtener mediante las ecuaciones 2.25 y 2.26. Como podemos observar no hay cavitación porque no está presente la señal aleatoria.

En la figura 3.4 se muestra el espectro medido en la bomba, en el cual mediante la leyenda se señalan la frecuencia fundamental y la frecuencia de paso de aspa, las cuales se pueden obtener por las ecuaciones anteriormente mencionadas. Es de gran importancia señalar que aquí si está presente el fenómeno de la cavitación ya que estamos en presencia de la señal aleatoria.

3.5. Valoración económica

La valoración económica se realizó teniendo como elemento a comparar en la bomba el gasto de explotación para el transporte de un m³ de licor a 145 metros de distancia y el grado de afectación sobre la pieza afectada que es el impelente.

3.5.1. Determinación del gasto de explotación de la instalación actual para transportar un m³ de licor a 145 m de distancia.

Variante 1(para cuando la instalación trabaja sin cavitación).

Gasto de explotación de la instalación actual para transportar un m³ de licor a 145 metros de distancia.

$$G_{\text{exp}} = \left(\frac{Gb \cdot L}{Q} \right) \cdot n \quad (3.1)$$

Donde:

Gb : Gasto anual de explotación de una bomba.

Q : Caudal de licor transportado por una bomba en un año (4685184 m³/año).

L : Longitud de la línea (145 m).

n : número de bombas en la instalación. (4)

Gasto anual de explotación de una bomba

$$Gb = V + F \quad (3.2)$$

Donde:

V: Gastos unitarios variables.

F: Gastos fijos globales.

Gastos unitarios variables.

$$V = Gelec \quad (3.3)$$

Donde:

Gelec: Gastos por el consumo de energía eléctrica.

Gastos unitarios variables

$$V = 7\,079,243 \text{ CUC}$$

Gastos fijos globales.

$$F = g_{amort1} + g_{amort2} + g_{spi} \quad (3.4)$$

Donde:

g_{amort1} : Gasto de amortización de las bombas (CUC).

g_{amort2} : Gasto de amortización de las tuberías con los soportes (CUC).

g_{spi} : Gasto del salario del personal indirecto (CUC).

Gastos fijos globales

$$F = 252\,558,6 \text{ CUC/año}$$

Gasto anual por consumo de energía eléctrica.

$$Gelec = \frac{Ta \cdot N \cdot K_p \cdot t}{\eta} \cdot 4 \quad (3.5)$$

Donde:

Ta: Tarifa de corriente eléctrica 0,287 CUC/Kwh.

N: Potencia consumida por el motor durante la transportación del licor (Kw).

K_p : Coeficiente de pérdida, 1,08

t: Cantidad de horas de funcionamiento en el año. (4800)

η : Rendimiento del motor eléctrico (85%).

Gasto anual por consumo de energía eléctrica

$G_{elec} = 7\,079,243 \text{ CUC/año}$

Gasto anual de explotación de una bomba

$G_b = 259\,637,8 \text{ CUC/año}$

Gasto de explotación de la instalación actual para transportar un m^3 de cola a 145 m de distancia es de:

$G_{exp} = 36,82695 \text{ CUC}$

Variante 2 (para cuando la instalación trabaja con cavitación).

Gasto de explotación de la instalación actual para transportar un m^3 de licor a 145 metros de distancia.

$$G_{exp} = \left(\frac{G_b \cdot L}{Q} \right) \cdot n \quad (3.6)$$

Con la cavitación el caudal es afectado en un 3 % de caudal en un año.

Q: Caudal de licor transportado por una bomba en un año, cuando esta cavita ($140555,52 \text{ m}^3/\text{año}$).

$G_{exp} = 1\,072,515 \text{ CUC}$

Tabla 3.5. Gasto de explotación de la instalación para la transportación de un m^3 de licor.

INDICADOR	V1sin cavitación	V2 con cavitación
Gasto para transportar un m^3 de licor en 145 m (CUC)	36,82695	1072,515

El comportamiento de los gastos de explotación para el transporte de un m^3 licor a 145 metros de distancia muestra que cuando la instalación trabaja sin cavitación existe un ahorro de un 3 % en el gasto de explotación.

La sustitución de un impelente, a causa del deterioro de los álabes provocado por la cavitación, genera un gasto de 18 754 USD, valor que se le adiciona al gasto de explotación del sistema, véase Anexo No. 1.

3.6. Impacto medio ambiental

La fábrica productora de níquel y cobalto Pedro Sotto Alba, durante varios años de explotación ha producido un gran impacto negativo sobre el medio ambiente, debido a problemas tecnológicos y al manejo ambiental inadecuado durante todo el período de explotación, lo que ha ocasionado afectaciones medioambientales severas.

El principal impacto que produce la instalación de bombeo de licor hacia los tanques de la planta son los gases por la presencia de ácido en el licor, vertido del licor al piso, vibraciones, ruidos y otros componentes nocivos para la salud del hombre.

Efectos ambientales en la instalación de bombeo de licor

- Uno de los problemas que presenta la instalación son los vertidos de licor al piso, esto es perjudicial para la salud humana ya que este licor posee grandes concentraciones de ácido por lo que puede ocasionar graves quemaduras, esto ocurre por averías en las tuberías de conexión con el sistema de las bombas, estas pueden ser abundantes según la magnitud del vertido.
- Los operadores que laboran en la instalación se encuentran expuestos a agentes químicos en forma de gases industriales tales como: CO, CO₂, SO₂, SO₃, NH₃ (con una concentración de 20 ppm).
- Constantes averías de la bomba de licor, provocando inmediaciones y desprendimientos de gases calientes en la instalación.

Medidas constructivas para eliminar estos problemas

- Corregir todos los salideros de licor en toda la instalación.
- Efectuar chequeo médico periódicamente y pruebas especializadas (audiometría) para conocer el estado de salud de todo el personal de la planta.
- También es necesario utilizar los equipos de protección cuando se requieren debido que al ocurrir algún salidero de licor se pueden ocasionar quemaduras debido al ácido que contiene este.

Afectaciones sufridas por el ruido en las instalaciones de bombeo

En las bombas en su interacción con el medioambiente es bueno destacar que existe un nivel de ruido medio respecto a las normas internacionales establecidas por el banco mundial sobre medio ambiente, salud y seguridad. Aunque si no se utilizan los medios de protección adecuados pueden producir daños profundos a la salud humana por acumulación y constancia en el tímpano del oído, lo que conlleva a que pueda ocurrir pérdida de la audición.

Análisis del ruido en la instalación de bombeo

Los niveles máximos admisibles de ruido y los aspectos de protección contra el ruido, constituyen los requisitos higiénicos sanitarios que habrá de observarse en los puestos y locales de trabajo, con el objetivo de disminuir los efectos nocivos del ruido sobre los trabajadores que desarrollan su actividad laboral en los mismos. Los valores máximos admisibles de los niveles de ruido se establecen en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Límite de exposición del ruido

Nivel de sonido	Tiempo permisible de exposición
90 dB	8: 00 horas
91 dB	7: 00 horas
92 dB	6: 00 horas
97 dB	3: 00 horas
100 dB	2: 00 horas
105 dB	1: 00 horas
110 dB	30 minutos
115 dB	15 minutos (nivel máximo permisible)

Protección contra el ruido

- Cuando los valores límites no pueden cumplirse por razones de índole técnica, será necesario garantizar la protección de los trabajadores con medios individuales de protección auditiva.
- Las zonas con niveles sonoros superiores a 90 dB se consideran con riesgo de la pérdida auditiva del trabajador y debe indicarse con señales de seguridad, encontrándose además la administración obligada a tomar las medidas pertinentes para garantizar la salud de sus operarios.

- Se prohíbe la permanencia de trabajadores en zonas con niveles de presión sonora superior a 135 dB en cualquier frecuencia de las bandas de octava.
- Los operarios de los puestos y locales de trabajo ruidosos están en la obligación de utilizar los medios de protección personal que se le facilitan y cumplir las normas de trabajo que disminuyan la exposición a este factor. En caso de incumplimiento se considerará una violación de la disciplina laboral.
- Garantizar la adquisición de orejeras contra ruido para los trabajadores que laboren bajo un régimen de trabajo con nivel de presión sonora de forma constante por encima de 65 dB.

3.7. Conclusiones del capítulo

- La instalación no cumple con la condición de ausencia de cavitación donde a través de la metodología de cálculo se comprobó que el $NPSH_d < NPSH_r$ con valores de $NPSH_d = 1,731$ m y $NPSH_r = 5,5$ m.
- Se realizaron las mediciones de las vibraciones en tres puntos fundamentales, vertical, horizontal y axial, destacándose las axiales, ya que influyen con mayor frecuencia cuando está presente el fenómeno de la cavitación, con los valores más elevados, los cuales son 3,6 mm/s y 5,4 mm/s.
- Se determinó que en las mediciones de los espectros de las vibraciones existe el patrón del comportamiento de la cavitación, este patrón se identifica mediante vibraciones aleatorias.
- En la instalación objeto de estudio las vibraciones son producto de la caída de presión en la descarga y la regulación del caudal del fluido.
- Cuando ocurre la cavitación el gasto de explotación en que incurre el sistema es afectado por el deterioro de los álabes en el cual por sustitución de piezas del impelente se incurre en un gasto de 18754 USD.
- Pudimos destacar los principales gastos económicos, así como el impacto medio ambiental que existe en la instalación para el transporte del licor.

Separador conclusiones generales

CONCLUSIONES GENERALES

- En la búsqueda bibliográfica realizada y los trabajos precedentes se probó que existen insuficientes documentaciones que vinculen la cavitación con las vibraciones, y la interrelación de estas variables en las instalaciones de bombeo, para definir la relación entre ellas es necesario investigar la relación de las fases de cavitación y los niveles de vibraciones para la misma.
- Se realiza el diagnóstico de la instalación, donde no se cumple la condición $NPSH_d > NPSH_r$, manifestándose la presencia del régimen de cavitación.
- Se obtuvo como resultado del diagnóstico los parámetros de la instalación, mostrando que cuando se realizan regulaciones del caudal aumentan considerablemente los niveles de cavitación y las vibraciones pueden llegar a niveles de 3,6 mm/s y 5,4 mm/s.
- El comportamiento de los gastos de explotación para el transporte de un m³ licor a 145 metros de distancia muestra que cuando la instalación trabaja sin cavitación existe un ahorro de un 3 % en el gasto de explotación.
- Se destacan los principales efectos ambientales en los que incurre la instalación objeto de estudio, así como los límites de exposición del ruido a los cuales podemos estar expuestos y las medidas para erradicar estos problemas.

RECOMENDACIONES

- Utilizar los valores de vibraciones axiales correspondientes a los obtenidos en las mediciones como método de control para evitar que exista la cavitación.
- Realizar una evaluación del sistema de bombeo del licor producto teniendo en cuenta las pérdidas en las que se incurre en la instalación para evitar la cavitación.
- Evaluar la posibilidad de aplicar el sistema on-line con el objetivo de tener un control de cómo se comportan los niveles de vibraciones.
- Realizar instalaciones de manómetros en los demás sistemas de bombeo para controlar la caída de presión.

BIBLIOGRAFÍA

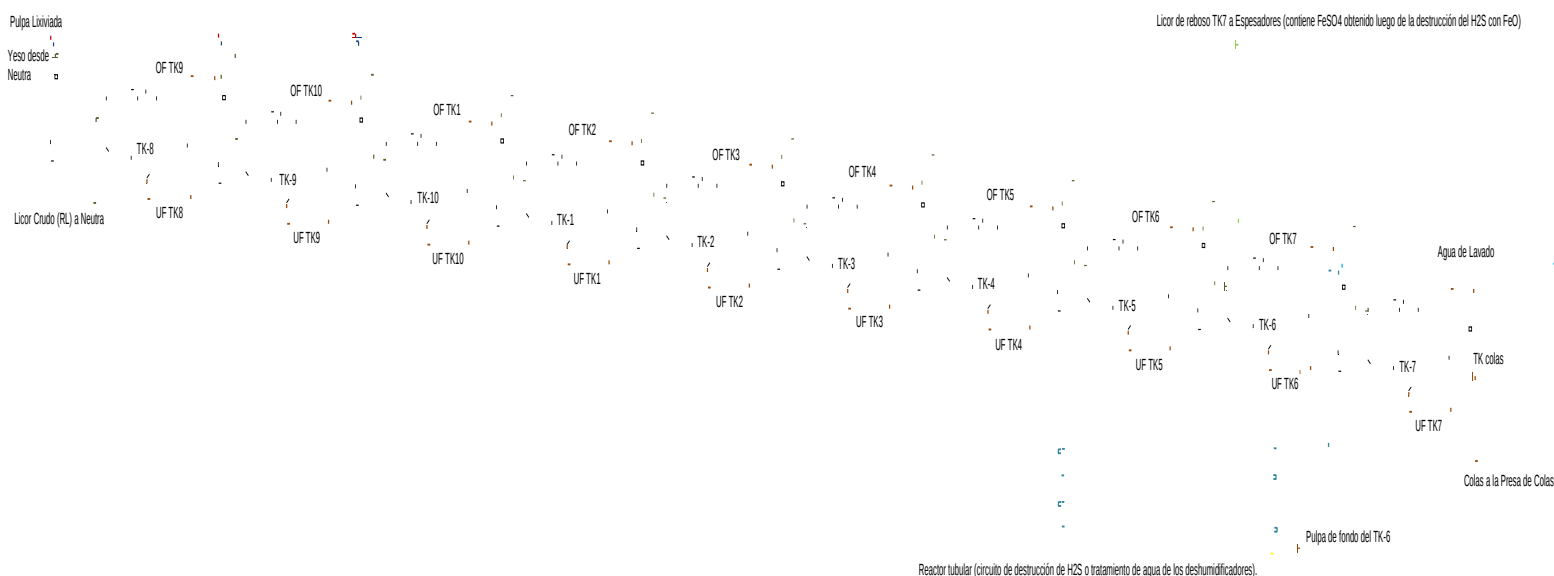
- 1- Alexandro, B. Investigación y establecimiento de los regímenes de la transportación de las colas del beneficio de la fábrica de Dshezkazgan GMK. Leningrado, 1986.
- 2- Argulló J., Cardona S. Barjan A. "Razones y métodos de la Medición de las vibraciones en la industria." Automática e Instrumentación; octubre, 1986.
- 3- Autores, c. d. Manual de Operaciones, Planta de Lavaderos, Citrix, 2000.
- 4- Autores, c. d. Libro de Instrucciones número C 459. Bombas centrífugas horizontales tipo HPEB, 153-PU-1A/B/C.14 de Enero de 1999.
- 5- Avery, H. Mantenimiento Industrial por soldadura. ABEX Corporation. Boletín técnico. No. 22.1980.
- 6- Balcazar C. F. Análisis de las variables de la cavitación en bombas centrífugas horizontales. Tesis Curricular, Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco, 2013.
- 7- Cisneros H B, Cavitación. Un ataque al corazón de las bombas centrífugas, 2007 [En línea], disponible en (<https://www.mch.d/documentos/pdf/cavita.Pdf>) [Accesado el día 20 de abril de 2016].
- 8- Darby, R. Laminar and turbulent pipe flows of non-Newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena, 2000.
- 9- Díaz, A. Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos (segunda parte) flujo por bombeo. *Revista Tecnología Química*, 1999, 19(1): 18-27.
- 10- Fernández D, P. Bombas Centrífugas y Volumétricas, 2003.
- 11- Friedrichs J. G. Kosyna, Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed. *Journal of Fluids Engineering*, 124, 356-362, Junio (2002).
- 12- Gaillochet J.F. "Vibraciones en las máquinas (2), "Cómo estudiarlas y cómo combatirlas". MAPRO. (Septiembre), 1998: Págs. 35-38.

- 13-Gaillochet J.F. "Vibraciones en las máquinas (1), "Cómo estudiarlas y cómo combatirlas". MAPRO (Julio - Agosto), 1998: Págs. 59-64.
- 14-Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
- 15-Gonzáles, J. "Caracterización de instalaciones de bombeo en régimen cavitacional a través de las vibraciones". Trabajo de diploma. ISMM. Moa. 2006.
- 16-Karassik, J. Factores Hidráulicos del Sistema. Hydraulic Institute Standards. 1982.
- 17-Machado, A. "Metodología para la selección de bombas a partir de las propiedades de los fluidos que se transportan en la industria del níquel". Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
- 18-Nakayama, T. Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food science: 45 (4), 844 – 847 (1980).
- 19-Nekrasov, B. Hidráulica. Editorial MIR. 1968.435 p.
- 20-Olsen Ubrich. "Las vibraciones en la recepción de las instalaciones". Mantenimiento, (Septiembre y Octubre), 1985: Págs. 31-37.
- 21-Palomino Marín, Evelio. "Elementos de Medición y Análisis de vibraciones en Máquinas Rotatorias", CEIM. Ciudad de la Habana, 1999.
- 22-Peña Breffe, R. Análisis de las transformaciones dinámicas existentes en la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques de la Planta Recuperación de Amoniaco. Trabajo de diploma ISMM, 2007.
- 23-Pérez, F. Equipos de Bombeo. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1983.
- 24-Pérez, R. Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas. 2004.
- 25-Pérez, R. Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas. 2000
- 26-Perry, J.H. Chemical engineers handbook. 6 ed. New York: McGraw Hill Book, 1984.
- 27-Piedra Díaz M, Lima Álvarez M, Reyes Rodríguez R, Pérez Castañeda R. 2000.
- 28-"Procedimientos para la aplicación de las vibraciones mecánicas en el diagnóstico de máquinas". Diagnóstico Ciudad de La Habana, 2000.

- 29-Rabinóvich, E. Z. Libro de Hidráulica. Capítulo 1, 1987.
- 30-Reyes, J. L. Diagnóstico de instalaciones de transporte de hidromezcla afectadas por cavitación. Minería y Geología; v.23 n.3 / 2007.
- 31-Reyes, J. L. Diagnóstico de los parámetros de explotación de bombas centrífugas de mediana capacidad en presencia de régimen cavitacional. Tesis de Maestría. ISMM. Moa. 2007.
- 32-Reyes, J. L. Presión de saturación del licor amoniacal y su relación con el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas. Minería y Geología /v.31 n.1 /enero-marzo /2015 / p.111-129
- 33-Rodríguez Tarragó, H. L. Temas de Flujos de Fluidos, 2008.
- 34-Skelland, A.H.P. Non-Newtonian Flow and Heat. Transfer. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
- 35-Tejeda, H.D. Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
- 36-Valerino. L. "Estudio del comportamiento Dinámico de los Ventiladores de tiro inducido de la Empresa Comandan te Ernesto Che Guevara". Tesis de maestría ISMM, 2001.

ANEXOS**Anexo N°1.** Costo de las piezas de la bomba

Descripción	Precio (USD)
Acoplamiento	13158,14
Acoplamiento, medio	14901,98
Tapón del respiradero	181,55
Soporte	13816,13
Rodamiento	920,43
Aro de desgaste, voluta	1342,76
Tuerca del impelente, giratoria	724,44
Camisa, lado casquillo	1505,68
Cubierta, bomba	25717,89
Camisa del eje	1283,77
Aro de desgaste giratorio, impelente	5004,82
Sello mecánico	1804,99
Deflector	717,55
Impelente	18754,49
Cuerpo principal	11045,65
Eje de la bomba, conjunto	11777,16
Rodamiento de empuje	72,95

Anexo N°2. Esquema del flujo tecnológico de la planta de Lavaderos

Anexo N°3. Vista de la instalación de bombas CerPELLi de la planta de Lavaderos



Continuación vista de la instalación de bombas CerPELLi de la planta de Lavaderos

