



República de Cuba
Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero - Metalúrgico
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad Metalurgia - Electromecánica
Especialidad Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Análisis de las transformaciones dinámicas existentes en la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques de la Planta Recuperación de Amoniaco.

Diplomante: Reinier Peña Breffe.

Tutores: M.Sc. Jorge Luis Reyes de la Cruz.

Ing. José Reina Zulueta.

Junio, 2007
"Año 49 de la Revolución"
Moa-Holguín



Resumen

En el presente trabajo de diploma se fundamenta de forma experimental los niveles de vibraciones en correspondencia con las alturas de succión y la variación de presión en el interior de la bomba objeto de estudio, además se plantea el procedimiento de cálculo para obtener los parámetros reales de funcionamiento de la instalación. Se compara el valor de la carga neta de succión reportada por el fabricante con los reales, determinando que la máquina rotatoria trabaja en un régimen cavitacional. También se definen los niveles de vibraciones en lo que debe operar la instalación, para garantizar el dominio de los parámetros técnicos y económicos del proceso. Otro de los elementos a destacar es la valoración de los niveles de ruido y concentración de amoníaco presentes en el sistema de bombeo, relacionado con el impacto ambiental para las condiciones actuales de operación.



Abstract

This work is based in an experimental way the levels of vibrations in correspondence with the suction heights and the variation of pressure inside the bomb study object, also carries out the calculation procedure to obtain the real parameters of operation in the installation. The value of the net load of suction reported by the fabricant is compared with the real ones and it is determined if the revolving machine works in a rating cavitation. Also it is defined the levels of vibrations in what should operate the installation, to guarantee the domain of the technical and economic parameters of the process. Another important elements is the valuation of the levels of noises and concentration of present ammonias in the pumping, related with the environmental impact for the current conditions of operation



Índice	Contenido	Págs.
Introducción.....		25
Capítulo I. Marco teórico.....		
1.1 Introducción.....		
1.2 Estado del arte.....		
1.3 Trabajos precedentes.....		
1.4 Clasificación reológica general de los fluidos.....		
1.5 Curvas de flujo.....		
1.6 Modelos reológicos.....		
1.7 Estructura de flujo de hidromezclas trifásicas por tuberías.....		
1.8 Establecimiento de los puntos de medición.....		
1.9 Características de las vibraciones en turbomáquinas.....		
1.9.1 Métodos de medición.....		
1.9.2 Magnitudes que caracterizan a las vibraciones.....		
1.10 Características del fenómeno de la cavitación en turbomáquinas.....		
1.10.1 Tipos de cavitación en bombas.....		
1.10.2 Fases de la cavitación.....		
1.10.4 Factores que intervienen en la cavitación.....		
1.11 Descripción estructural del sistema de bombeo de cola hacia los alambiques.....		
1.11.1 Características técnicas del motor eléctrico acoplado a la bomba.....		
1.12 Evolución del mantenimiento en la industria niquelífera.....		
1.13 Conclusiones del capítulo I.....		



Capítulo II. Metodología de cálculo de los parámetros de trabajo de la instalación y análisis estadístico.....	
2.1 Introducción.....	25
2.1 Materiales empleados en las mediciones de los parámetros del proceso.....	25
2.3 Metodología empleada para el cálculo hidráulico.....	26
2.3.1 Cálculo hidráulico de las tuberías.....	26
2.3.2 Cavitación en bombas centrífugas.....	31
2.4 Metodología de cálculo para el balance energético de una bomba centrífuga.....	33
2.4.1 Potencia útil que se le transmite al eje de la bomba.....	33
2.4.2 Rendimiento total de la bomba.....	33
2.5 Resultados obtenidos de la metodología de cálculo.....	34
2.6 Comportamiento de las magnitudes que caracterizan a las vibraciones.....	37
2.7 Método de la investigación experimental.....	37
2.7.1 Incidencia de cada variable.....	38
2.8 Análisis estadístico.....	42
2.8.1 Resultados del análisis estadístico.....	42
2.9 Conclusiones del capítulo II.....	44
Capítulo III. Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental.....	45
3.1 Introducción.....	45
3.2 Resultados experimentales.....	45
3.2.1 Resultados obtenidos.....	45



3.2.2 Análisis de los resultados.....	47
3.3 Valoración económica.....	48
3.4 Impacto ambiental.....	52
3.4.1 Efecto ambiental de la cola.....	53
3.4.2 Afectaciones a la salud por el amoniaco.....	53
3.4.3 Análisis del ruido en la instalación de bombeo.....	56
3.4.4 Situación actual de la instalación estudiada.....	57
3.5 Conclusiones del capítulo III.....	57
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Bibliografía.....	61

Introducción

A nivel mundial las grandes industrias tienen un lugar primordial para el desarrollo económico de cualquier país, desde las grandes potencias hasta los países subdesarrollados, como es el caso de Cuba, el cual 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, por tal razón es de gran importancia el estudio de sus instalaciones, con la finalidad de hacer un uso más racional de sus capacidades instaladas y el aumento de la eficiencia de los procesos de producción.

El objetivo esencial de la industria del níquel cubano en la planeación estratégica hasta el 2007 ha sido el incremento de la producción de los productos de Ni + Co, trabajando por la creación de nuevas capacidades productivas y la rehabilitación de las plantas existentes, para lograr su diversificación obteniendo mejores precios y consolidar el prestigio de nuestro país en ese importante renglón de la economía nacional. Actualmente en Cuba se produce Sulfuro de Níquel y Cobalto, con un 50 % de Ni y 4,5 % de Co, sinterizado con un 86 % de Ni, óxido de Níquel en polvo y Níquel granular y nodular con un 76 % de pureza. Debido al constante desarrollo en que se encuentran inmersas las industrias muchos de sus elementos requieren ser analizados con detenimiento y en consecuencia a esto establecer un diagnóstico del nivel de aprovechamiento de sus equipos.

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 minorizar 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 Recuperación de Amoniaco de la fábrica “Comandante Ernesto Ché Guevara” de Moa existen instalaciones industriales de transporte hidráulico, como es el caso de la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques. 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. Es importante destacar que la Planta de Recuperación de Amoniaco es la encargada de recuperar el amoniaco y el CO₂, los alambiques de cola juegan un papel fundamental en esta acción, su dependencia son las bombas que envían el flujo proveniente de la Planta de Lixiviación y Lavado a estos, de ahí la importancia del comportamiento eficiente en la que debe operar esta instalación.

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, puesto que este constituye una herramienta básica en el Mantenimiento por Diagnóstico que permite reducir los costos por mantenimiento.

La **situación actual** de la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- Altos consumos de piezas.
- Inestabilidad en el trasiego de la cola debido al poco control de los parámetros principales de funcionamiento de la instalación.
- Elevados consumos de energía eléctrica.

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

Los altos costos de mantenimiento generado por el deterioro progresivo de piezas de las bombas, que se han evidenciado en la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques en la Planta Recuperación de Amoniaco de la Fábrica Comandante “Ernesto Ché Guevara” provocados por el fenómeno de la cavitación y las vibraciones producidas por este.

El **problema a investigar** lo constituye:

Insuficiencia en el diagnóstico del comportamiento dinámico de bombas centrífugas en presencia del fenómeno de la cavitación.

Como **objeto de estudio** se plantea:

La bomba centrífuga 322A perteneciente al sistema de bombeo de cola hacia los alambiques en la Planta Recuperación de Amoniaco de la Fábrica Comandante “Ernesto Ché Guevara”.

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

Con el análisis del comportamiento dinámico de la bomba centrífuga 322 A es posible diagnosticar la influencia de la cavitación.

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

Obtener el modelo estadístico del comportamiento dinámico de la bomba 322 A para diagnosticar su influencia en las vibraciones.

Los **objetivos específicos** son:

- 1- Evaluar los parámetros dinámicos de funcionamiento de la instalación.
- 2- Determinar el comportamiento dinámico y su relación con los niveles de vibraciones.
- 3- Obtener el modelo estadístico del comportamiento dinámico de la bomba centrífuga 322 A.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos se plantean las siguientes **tareas de investigación**:

- 1- Realización de una búsqueda bibliográfica sobre la cavitación y las vibraciones en bombas centrífugas.
- 2- Determinación de la relación existente entre los parámetros dinámicos y su influencia en la cavitación a través de las vibraciones.
- 3- Establecimiento del procedimiento de cálculo para el diagnóstico dinámico de las instalaciones de bombeo.
- 4- Obtención del modelo estadístico del comportamiento dinámico de la instalación de bombeo con relación a los niveles de vibraciones.
- 5- Valoración del impacto económico del proceso y las afectaciones medioambientales asociadas a la instalación objeto de estudio.

Capítulo I: Marco Teórico

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 Turbomáquinas, los cuales tienen una influencia negativa en el funcionamiento de estas, provocando grandes fallos que a su vez precipitan la caída de los principales parámetros de trabajo de las bombas. Estos fenómenos además de ser dañinos tienen una estrecha relación entre sí, debido a que la cavitación es uno de los factores que provoca la ocurrencia de vibraciones. En tal sentido, el **principal objetivo** de este capítulo es realizar una búsqueda bibliográfica que permita establecer los fundamentos teóricos de la temática tratada (Cavitación y Vibraciones).

1.2 Estado del arte

Etimológicamente la palabra "hidráulica" proviene de las raíces griegas idros y aulos, o sea, conductos de agua. La antigüedad del término demuestra el interés que han puesto siempre los hombres en resolver el problema inmediato que se presenta al tratar de erigir núcleos urbanos, esta es la conducción del agua desde una fuente de sitio de consumo. Una etimología semejante, pero proveniente del latín, es la que corresponde a la palabra acueducto.

En el avance de los conocimientos científicos en los siglos XVI y XVII, se comenzó a aplicar los principios de la mecánica general a los fenómenos hidráulicos y surgió la hidromecánica, dividida en dos partes clásicas; la hidrostática y la hidrodinámica, según se consideraran los líquidos en equilibrio, en movimiento o se tuviera en cuenta el efecto de las fuerzas que actuaran sobre ellos.

De esta manera la hidromecánica se convirtió en la ciencia de los fenómenos asociados al estado líquido y la hidráulica quedó dedicada al aspecto de arte experimental, suministrando las fórmulas prácticas que permitieran calcular o predecir el fenómeno hidráulico ajustándose a la realidad de la naturaleza. Con los años y un mayor dominio de los conocimientos, la ciencia ha estado dirigida a explicar de forma racional los fenómenos reales y al arte empírico a buscar la base científica en sus aplicaciones.

En la época moderna se extienden estos estudios para abarcar a los fluidos en general, siendo la Mecánica de los Fluidos, la que busca y estudia las relaciones que cubren igualmente a los líquidos y los gases. Esta concepción moderna ha sido provocada principalmente, por las necesidades que se crearon con el desarrollo de la aeronáutica primero y por la coherencia posteriormente.

El transporte hidráulico es un aspecto particular de la Mecánica de los Fluidos, el cual consiste en el traslado de las partículas de los minerales suspensos en un fluido de agua a través de tuberías y canales, requiriendo de una planta de bomba arreglada y sus auxiliares.

Existe una amplia gama de bombas, las cuales tienen la misma función, pero 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 soportará.

Dentro de esa gran variedad de bombas en el último medio siglo han tomado mayor auge las bombas centrífugas. Estas son máquinas de gran velocidad en comparación con las de movimiento alternativo, rotativas o de desplazamiento positivo, que funcionan a altas velocidades acopladas directamente al motor de accionamiento, consiguiendo que las pérdidas por transmisión sean mínimas.

La cavitación es un fenómeno que 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.

- **Vibraciones**

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.

Grandes físicos como Taylor, Vernoulli, D'Alamber, Lagrange, Fourier y estudios realizados entre los que podemos encontrar la Ley de Hooke en 1876 sobre la

elasticidad, Coulomb dedujo la teoría y la experimentación de oscilaciones torcionales, 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, minorizar los ruidos y disminuir los costos por mantenimiento.

- **Cavitación**

La cavitación en máquinas rotatorias es un fenómeno común, pero el menos comprendido por todos los problemas de bombeo. Tiene distintos significados para diferentes personas. Algunos lo definen como el ruido de golpeteo o traqueteo que se produce en la bomba. Otros la llaman patinaje debido a que la presión de la bomba decrece el caudal se torna errático. Cuando se produce cavitación, la bomba no solamente no cumple con su servicio básico de bombear un líquido sino que también experimenta daños internos, fallas de los sellos, rodamientos, etc.

En el contexto de las bombas centrífugas el término "cavitación" procede del latín *cavus*, que significa espacio hueco o cavidad (en algunas literaturas lo llaman bolsones

de vapor, bolsones de gas, hoyos, burbujas, etc.), este implica un proceso dinámico de formación de burbujas dentro del líquido, su crecimiento y subsiguiente colapsamiento a medida que el líquido fluye a través de la bomba. En los diccionarios técnicos se define como la rápida formación y colapso de cavidades en zonas de muy baja presión en un flujo líquido.

En general, la cavitación es una condición anormal que puede producir pérdidas de producción, daños al equipo y lo peor de todo, lesiones al personal. Debido a esto los operarios que trabajen en cualquier instalación de bombeo deben estar capacitados para detectar rápidamente los signos de cavitación, identificar correctamente su tipo y la causa que lo produce, para así poder eliminarla o atenuarla. Una comprensión correcta de los conceptos envueltos es clave para el diagnóstico y corrección de cualquier problema de bombeo relacionado con cavitación.

1.3 Trabajos precedentes

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos relacionados con la cavitación y las vibraciones, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, relacionada con el marco teórico – metodológico de la temática del transporte hidráulico y el efecto que produce la viscosidad en estos, incluyendo las investigaciones sobre el fenómeno de la cavitación y otra; sobre las vibraciones relacionadas con bombas centrífugas, para el establecimiento de la política de mantenimientos de estas.

Respecto al primer elemento, un importante aporte fue dado por Welty, J. (1976); Bandala, M. (2001), al efectuar una evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, según estos autores la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades. Además plantean que en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento; deducen que tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que la disminuye y la aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas.

Aportaron considerablemente los trabajos de Nekrasov, B. (1968), los cuales abordan la temática relacionada con la teoría general de la hidráulica, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con el transporte hidráulico, constituyendo un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas. Además se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de movimientos hidráulicos con los equipos e instalaciones existentes en las industrias, así como; en empresas donde se aplica este método de transporte.

Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudoplástico o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por dispositivos de transporte. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológicas según Darby, R. (2000).

De tal manera para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados y diferentes factores han sido analizados. La caída de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama, T.; et all. (1980).

Adhikari, B.; et all. (2002), incorporaron el concepto de redes neuronales, como una nueva herramienta computacional en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a un 5,4 % con respecto a los valores experimentales.

Resulta muy importante el trabajo realizado por Karelin, B. (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, R. (2004) define que la reserva requerida de cavitación $NPSH_R$, 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, J. (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 amoniaca 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, F. (1983).

Pérez, R. (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.

Se puede mencionar el trabajo de diploma de Machado, A. (2003), donde se realiza una metodología para la selección de bombas a partir de las propiedades de los fluidos que se transportan en la industria del níquel, específicamente para los desechos del mineral lixiviado. Es muy importante para la investigación el estudio realizado por Gonzáles, J. (2006), el cual hace una caracterización de instalaciones de bombeo en régimen cavitacional a través del análisis de las vibraciones. Estos trabajos fueron realizados en la Planta de Recuperación de Amoniaco de la empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara”, al igual que la investigación realizada por Estévez, Y. (2006), el cual hizo un cálculo verificativo y la propuesta de modificación de la instalación de bombeo de cola en dicha planta.

Es importante destacar el trabajo realizado por Garcell, L. (2001), este hace un estudio relacionado con el flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas, estableciendo el modelo para los fluidos que se comportan como plásticos ideales Bingham.

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, G. (1592) y su contemporáneo Marín, M. (1611), los cuales establecieron relaciones matemáticas entre frecuencia, longitud, tensión y masa de elementos vibrantes. A 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, E. (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, R.; Rolo, A. (1996), también lo hacen Carcar, V. (1989), SKF. (1998) y Piedra, M.; Lima, M. (2000). Todos dieron procedimientos muy generales, no se particulariza que 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 como Olsen, U. (1985) y Mantenimiento, 5 (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, J.; Cardona, S.; Barjan, A. (1986), Beltrán, P. (1988), Gaillochet, J. (1998 a); Gaillochet, J.F. (1998 b).

En su artículo, Miranda, A.; Corney, J. (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 relacionan 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 como Pérez, A. (2000) y Peláez, O. (2000), dan un enfoque de cómo debe ser gestionada la protección ambiental en la práctica del mantenimiento industrial, destacando a este como la función que más puede contribuir en las empresas a reducir los riesgos de impacto ambiental, dado que este 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 últimos trabajos relacionado con la temática del fenómeno de las vibraciones resulta de gran interés el estudio realizado por Valerino, L. (2001), donde establece los puntos de mediciones de la vibraciones, diagnosticando el estado técnico de los ventiladores.

Los autores Torres (2000), Piedra, M.; Lima, M. (2000) y Palomino, E. (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, E. (1999), entre los elementos de las máquinas rotatorias (bombas centrifugas) que mas 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.

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. Si la velocidad de giro es n (rev/min) y el número de álabes vanos es z , entonces la frecuencia es igual a: $F = \frac{n}{60} \cdot z$; Hz (1.1)

Además, plantea que gran parte de los fallos que se producen en las bombas se debe a los fallos en rodamientos y que la observación de la temperatura de funcionamiento era un método convencional para evaluar su estado, sin embargo se ha demostrado insuficiente para determinar el grado de deterioro.

Para la selección de los puntos donde se registran las vibraciones se aplica un procedimiento publicado por Piedra, D.; et all. (2000); Argulló, J.; et all. (1986). Las mediciones se realizaron en los ejes, llegando a las siguientes conclusiones:

- Axial – desalineamiento, problema en los rodamientos.
- Horizontal – desbalance.
- Vertical – fragilidad.

Resulta evidente apreciar que en la bibliografía consultada existen pocos trabajos que relacionan el fenómeno de la cavitación con las vibraciones. Debido a la importancia que representa precisamente buscar una relación entre el fenómeno de la cavitación y la magnitud de las vibraciones, se impone la realización de una investigación que contribuya a determinar los factores que influyen directamente en la interrelación de estos, para el posterior diagnóstico de la instalación objeto de estudio a través de estos parámetros.

1.4 Clasificación reológica general de los fluidos

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtonianos y no newtonianos, según Skelland, A. (1970), Tejeda, H. (1985), Perry, J. (1988) y Díaz, A. (1989).

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos newtonianos; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante y del gradiente de velocidad.

Los fluidos no newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones.

A su vez los fluidos no newtonianos se clasifican en tres grupos:

1- De viscosidad invariable con el tiempo.

a) Seudoplásticos. b) Dilatantes. c) Plásticos reales.

2- De viscosidad dependiente del tiempo.

a) Tixotrópicos. b) Reopécticos.

3- Materiales viscoelásticos (líquidos de Maxwell).

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas. Las sustancias viscoelásticas fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, pero, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo cortante, el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos.

1.5 Curvas de flujo

Las curvas de flujo se representan gráficamente al relacionar valores experimentales de τ contra $(-dv/dy)$. Así, se obtendrán curvas de flujo de diferentes formas en dependencia de la naturaleza reológica de los fluidos, según Turiño (1984) y Tejeda, H. (1985).

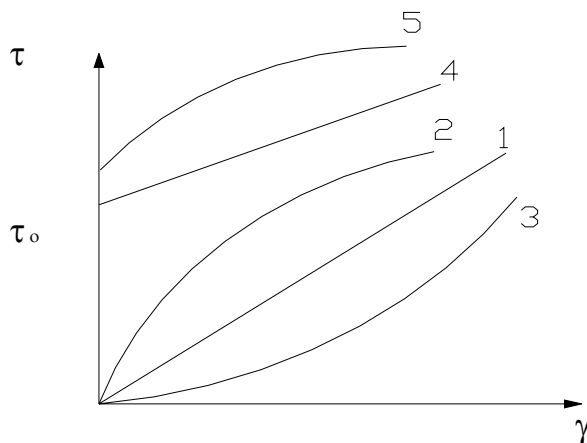


Figura 1.1: Curvas de flujo típica: 1- Newtonianos; 2- Seudoplásticos; 3- Dilatantes; 4- Plástico ideal (Bingham); 5- Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.

Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, conocer si un equipo ya construido puede ser usado con un material diferente; clasificar los materiales reológicamente y encontrar el modelo adecuado, para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin producciones "batch" y que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro.

1.6 Modelos reológicos

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas (modelos reológicos) para expresar la relación que existe en estado estacionario entre τ y $\dot{\gamma}$. Todas estas ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos, cuyo valor numérico puede determinarse a partir de los datos de la curva de flujo a temperatura y presión constante. Los modelos más difundidos son: el modelo de Ostwald de Waele, modelo de Bingham y el modelo de Bulkley – Herschel.

Según Turro, A. (2002) la composición química de los elementos predominantes en la cola, son el hierro y la sílice con valores medio de 47,6% y 12,45% respectivamente. En los resultados obtenidos se observa que las partículas de tamaños menores de 44

μ m, son mayoritarias y constituyen más del 60 % del volumen de la fase sólida, por lo que se puede decir que estamos en presencia de un comportamiento no newtoniano.

El comportamiento reológico depende fundamentalmente de la concentración de sólido y de las propiedades superficiales, dado el alto contenido de partículas finas. A concentraciones de 25 a 35 % en peso de sólidos el comportamiento es pseudoplástico, mientras que para concentraciones mayores fluyen como plásticos Bingham. Como la concentración de sólido de la cola excede al 35 % las curvas de fluido obtenidas se comportan similar a un plástico ideal Bingham. Garcell, L. (2001).

El comportamiento del modelo de Bingham es el siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 el esfuerzo cortante límite o inicial (Pa) que es necesario vencer para que el fluido fluya, μ_p es la viscosidad plástica (Pa.s) y $\dot{\gamma}$ el gradiente de velocidad de deformación. Para $\tau_0 = 0$ la ecuación 1.1 se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$.

1.7 Estructura de flujo de hidromezclas trifásicas por tuberías

En la mayoría de los casos, en la práctica mundial, el análisis del hidrotransporte tiene un carácter bifásico, es decir partículas sólidas suspendas en líquidos, en casi todos los casos se encuentran gases disueltos en la fase líquida mediante la ebullición que tiene lugar al igualarse la presión con la tensión de vapor. Estos problemas tratados de una u otra forma en la literatura reportada por Daniels; Alberty (1963), influyen considerablemente en los parámetros de los fluidos y en la durabilidad del equipamiento.

La concentración de

Capítulo II: Metodología de cálculo de los parámetros de trabajo de la instalación y análisis estadístico.

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 como 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 y técnicas utilizadas con un algoritmo lógico en la investigación.

2.2 Materiales empleados en las mediciones de los parámetros del proceso

Durante el experimento realizado en la investigación se obtuvieron mediciones de los niveles de vibraciones, niveles de ruido y concentración de amoníaco, 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:

1- Equipo para medir vibraciones.

- Marca: VibXpert

- Rango para medir frecuencia: 0,5 – 40 kHz.

- Rango para medir número de revoluciones: 10 – 200000 rev/min. Tiene un error de $\pm 0,1$ %.

- Rango para medir desplazamiento: 0 – 6000 μm (P - P). Tiene un error de ± 5 %.

- Rango para medir velocidad: 0 – 6000 mm/s (P - P). Tiene un error de ± 1 %.

- Rango para medir aceleración: 0 – 6000 mm/s (P - P). Tiene un error de ± 1 %.

2- Manómetro: Se utiliza para medir la presión del fluido en la succión y la descarga.

- Marca: Wika.

- Rango: 0 – 10 bar .

3- Equipo para medir niveles de ruido.

- Marca: Radioshack.

- Rango: 60 – 120 dB.

4- Equipo para medir concentración de amoníaco.

- Marca: Multiwarn II.

- Rango para medir concentración de amoníaco: 0 – 200 PPM.

- Rango para medir concentración de dióxido de azufre: 0 – 75,1 PPM.

- Rango para medir concentración de sulfuro de hidrógeno: 0 – 100 PPM.

- Rango para medir concentración de dióxido de carbono: 0 – 25 PPM.

Los resultados de las mediciones de este equipo aparecen representados en la figura 1 de los anexos, mostrando que la concentración máxima de amoníaco (NH_3) es de 13,85 mg/m^3 (19,92 PPM) representando el pico más pronunciado, el cual comparado con la norma que establece como concentración máxima tolerable en inhalaciones por largo tiempo (100 PPM), tiene valores permisibles y la concentración máxima de dióxido de carbono (CO_2) es de 0,03 % Vol representando el pico más pronunciado.

2.3 Metodología empleada para el cálculo hidráulico

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.

2.3.1 Cálculo hidráulico de las tuberías

Con esta metodología se obtienen las pérdidas totales en las tuberías y la carga de la red. Estas ecuaciones son recomendadas utilizar para plásticos ideales Bingham (Garcell, 2001).

Carga de la red

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

$$H_{red} = \Delta Z + R_c \cdot Q^2 + R_g \cdot Q; \text{ m} \quad (2.1)$$

Donde:

ΔZ - Carga estática total (m). Anexo figura 1



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

R_g - Coeficiente adicional de resistencia de la red exterior, basado en la influencia del componente sólido de la hidromezcla

Q- Gasto (m^3/h)

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

$$R_c = \left(\lambda_c \cdot \frac{l_t}{d_{tub}} + \sum \zeta_t + 1 \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2}; \text{ adimensional} \quad (2.2)$$

Donde:

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)

Coeficiente de resistencia

$$\lambda_c = 4 * f; \text{ adimensional} \quad (2.3)$$

Donde:

f - Factor de fricción de Fanning

Factor de fricción de Fanning

$$f = \left(f_L^\beta + f_T^\beta \right)^{1/\beta}$$

Capítulo III: Análisis de los resultados experimentales, valoración económica e impacto ambiental

3.1 Introducción

Una de las estrategias presentes en la producción actual de la planta Recuperación de Amoniac 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 de la investigación, considerando la valoración económica y el impacto ambiental de la instalación.

3.2 Resultados experimentales

En este epígrafe se evalúan los resultados obtenidos en los experimentos a partir del análisis de los factores que intervienen en la cavitación que dependen de la máquina; relacionado con la explotación y las variables influyentes en la instalación

Es importante destacar que la eficiencia del mantenimiento, solo se puede lograr con un régimen de trabajo adecuado sin la presencia de fenómenos destructivos, en este caso nos referimos a la cavitación y los niveles de vibraciones que esta produce.

3.2.1 Resultados obtenidos

Utilizando la metodología para el cálculo hidráulico y energético de la instalación se pudo obtener el punto de operación de la misma, obteniendo los siguientes valores (figura 3.1):

$$H_{red} = 50,889 \text{ m} \quad \eta = 33,9\% \quad N = 16,808 \text{ kW} \quad Q = 110 \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal máximo que trasiega la bomba objeto de estudio es de 110 m³/h, lo que hace necesario que a la instalación se le apliquen regulaciones en la descarga para obtener el gasto que necesitan los alambiques (85 – 90 m³/h), demostrando que la bomba está sobredimensionada.

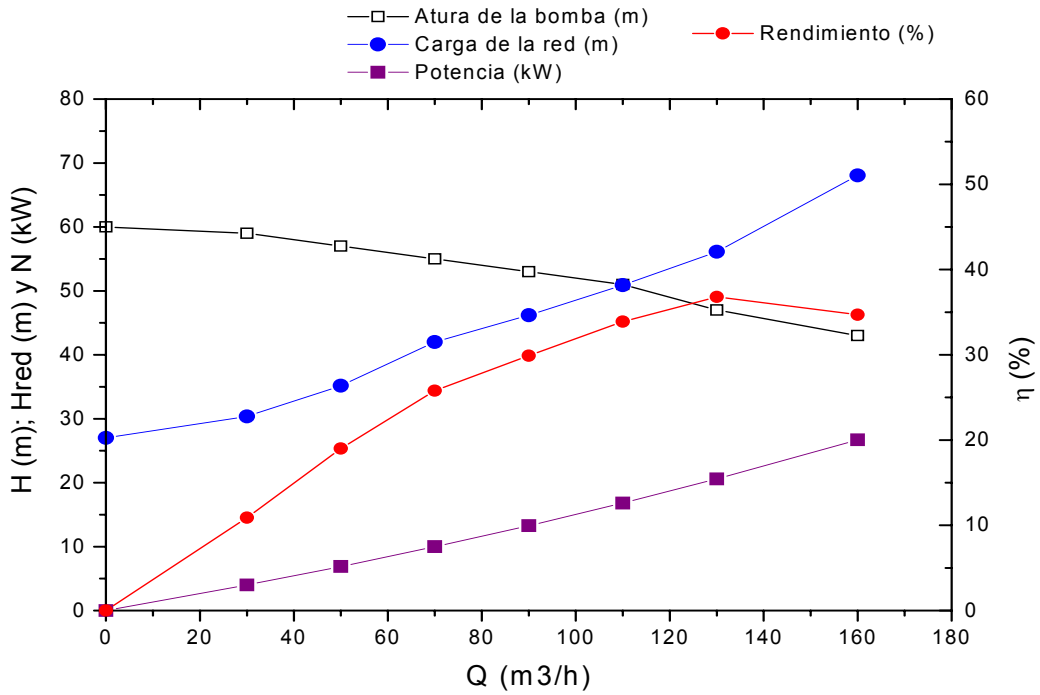


Figura 3.1: Características de trabajo de la bomba objeto de estudio

En los gráficos obtenidos en la figura 3.2 y 3.3 se muestran las incidencias de la variación de presión, altura disponible crítica y los correspondientes niveles de vibraciones en las posiciones horizontal, vertical y axial (punto 1 y 2).

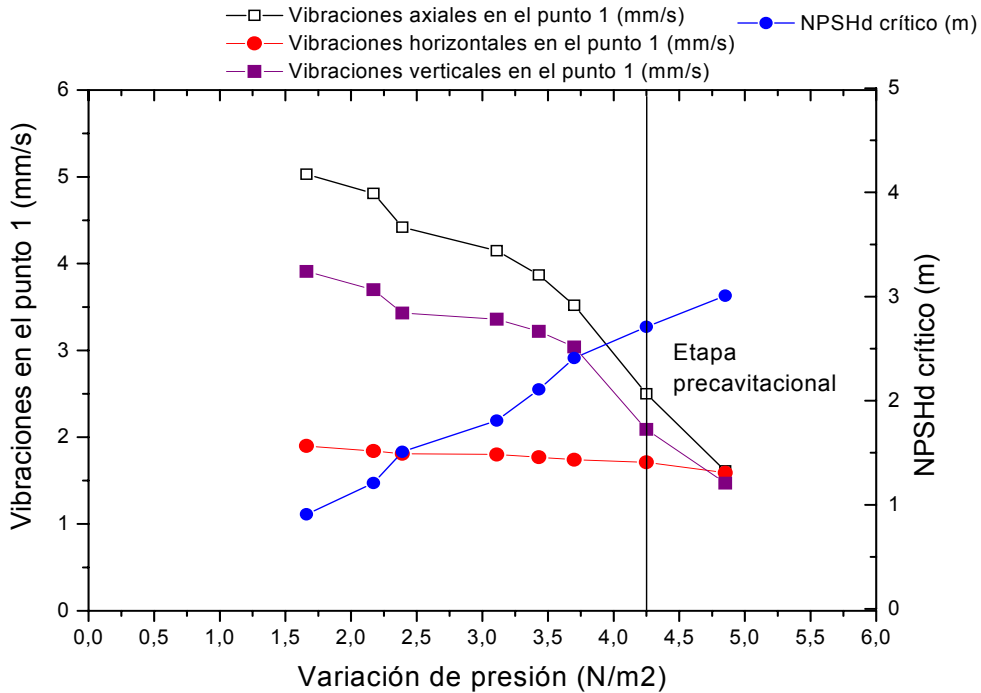


Figura 3.2: Niveles de vibraciones pertenecientes al punto 1 asociados a la variación de presión y HPSHd crítico

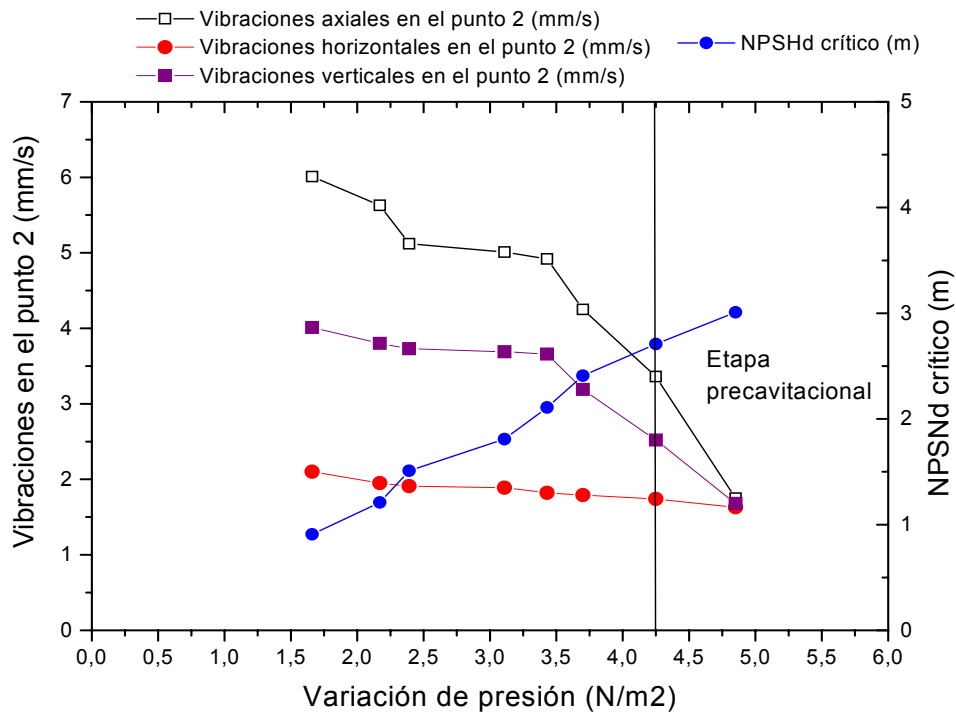


Figura 3.3: Niveles de vibraciones pertenecientes al punto 1 asociados a la variación de succión y HPSHd crítico

3.2.2 Análisis de los resultados

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se comprobó que:

- 1- El caudal máximo que se puede obtener de la bomba 322 A es de 110 m³/h, lo que demuestra que está sobredimensionada para el proceso.
- 2- La instalación trabaja en un régimen cavitacional. Esto es provocado por varios factores, entre los principales se encuentra la temperatura de la cola, el descontrol existente en los niveles del tanque retención y la variación de presión existente en la instalación.
- 3- Analizando las Figuras 3.3 y 3.4 se puede afirmar que cuando la variación de presión es menor que 4,25 N/m² aumentan considerablemente los niveles de vibraciones, las cuales no deben exceder de 7 mm/s (límite admisible) según la tabla de severidad anexo (tabla 6) para este tipo de máquinas y disminuye el NPSHd crítico.

3.3 Valoración económica

La realización del análisis económico se sustentará en la determinación del gasto de explotación de la instalación objeto de estudio para transportar un m³ de cola a 50 m de distancia cuando esta trabaja sin cavitación y con cavitación.

Variante 1 (para cuando la instalación trabaja sin cavitación)

Gasto de explotación de la instalación para transportar 1 m³ de cola a 50 metros de distancia

$$G_{\text{exp}} = \left(\frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \cdot n; \text{ CUC.} \quad (3.1)$$

Donde:

G_b - Gasto anual de explotación de una bomba (CUC/año)

Q - Caudal de cola transportada por una bomba en un año (1138800 m³/año)

L - Longitud de la línea que va al alambique (50 m)

n - número de bombas en la instalación (4)

Gasto anual de explotación de una bomba

$$G_b = V + F; \text{ CUC/año} \quad (3.2)$$

Donde:

V - Gastos unitarios variables (CUC/año)

F - Gastos fijos globales (CUC/año)

Gastos unitarios variables

$$V = g_s + g_{\text{elec}} + g_{\text{mant}} + g_{\text{imp}} + g_{\text{il}}; \text{ CUC/año} \quad (3.3)$$

Donde:

g_s - Gastos en salario de los operarios de la instalación (CUC/año)

g_{elec} - Gastos por el consumo de energía eléctrica (CUC/año)

g_{mant} - Gastos por mantenimiento (CUC/año)

g_{imp} - Gastos imprevistos (CUC/año)

g_{eli} - Gatos por iluminación (CUC/año)

Gastos de salario del personal directo en la instalación

$$g_s = (T_a)(t_n \cdot K_{ss} \cdot K_{dr} \cdot K_{pc}) \cdot 12; \text{ CUC/año} \quad (3.4)$$

Donde:

T_a - Tarifa salarial del operario (2,82 CUC/h)

t_n - Tiempo de trabajo del operario en la instalación (2304 h)

K_{ss} - Coeficiente de seguridad social (1,1)

K_{dr} - Coeficiente de descanso distribuido (1,0909)

Coeficiente de pago complementario

$$K_{pc} = 1 + \frac{c}{100}; \text{ adimensional} \quad (3.5)$$

Donde:

c- Porcentaje de pago complementario (3 %)

$K_{Pc} = 1,03$

$g_s = 96366,85 \text{ CUC/año}$

Gasto anual por consumo de energía eléctrica

$$g_{elec} = \frac{T_a \cdot N \cdot K_p \cdot t}{\eta} \cdot 4; \text{ CUC/año} \quad (3.6)$$

Donde:

T_a -Tarifa de corriente eléctrica (0.06 CUC/Kwh)

N- Potencia consumida por el motor durante la transportación de la cola (45 kW)

K_p . Coeficiente de pérdida; 6,6 (adimensional)

t- Cantidad de horas de funcionamiento en el año (8760 h)

η - Rendimiento del motor eléctrico (96,6 %)

$g_{elec} = 646\,390,06 \text{ CUC/año}$

Gasto anual por mantenimiento

$g_{man} = 3772 \text{ CUC/año (SGestMan)}$

Gastos imprevistos

$$g_{imp} = 7675,94 \text{ CUC /año (SGestMan)}$$

Gasto anual por iluminación

$$g_{il} = N_{il} \cdot T_a \cdot T_{pi} ; \text{CUC /año} \quad (3.7)$$

Donde:

N_{il} - Potencia consumida por iluminación (3,85 kW)

T_{pi} - Cantidad de horas de operación en el año (4380 h)

$$g_{il} = 1011,78 \text{ CUC /año}$$

Gastos unitarios variables

$$V = 755216,63 \text{ CUC /año}$$

Gastos fijos globales

$$F = g_{amort1} + g_{amort2} + g_{spi} ; \text{CUC /año} \quad (3.8)$$

Donde:

g_{amort1} - Gasto de amortización de las bombas (CUC /año)

g_{amort2} - Gasto de amortización de las tuberías con los soportes (CUC /año)

g_{spi} - Gasto del salario del personal indirecto (2100 CUC)

Gastos de amortización de las bombas

$$g_{amort1} = \frac{N_g \cdot I}{100} \cdot 4 ; \text{CUC /año} \quad (3.9)$$

Donde:

N_g - Tasa de amortización (6 %)

I - Valor inicial del equipo (2500 CUC)

$$g_{amort1} = 600 \text{ CUC /año}$$

Gastos de amortización de las tuberías y soportes

$$g_{amort2} = \frac{N_g \cdot I_t}{100} ; \text{CUC /año} \quad (3.10)$$

Donde:

I_t - Valor inicial de las tuberías y soportes (1164,78 CUC)

$$g_{\text{amort}2} = 69,89 \text{ CUC/año}$$

Gastos fijos globales

$$F = 2769,89 \text{ CUC /año}$$

Gasto anual de explotación de una bomba

$$G_b = 757986,52 \text{ CUC/año}$$

Gasto de explotación de la instalación para transportar 1 m³ de cola a 50 metros de distancia

$$G_{\text{exp}} = 0,053 \text{ CUC}$$

Variante 2 (para cuando la instalación trabaja en cavitación)

Cuando la instalación cavita el flujo de cola que transporta es de 80 m³/h, a diferencia del flujo trasegado cuando trabaja sin cavitación (130 m³/h), debido a esto la potencia consumida por el motor aumentará con la disminución del rendimiento del motor; esto ocasiona que el gasto anual por consumo de energía aumente considerablemente cuando la bomba cavita y consecuentemente aumente el gasto de explotación de la instalación para transportar un m³ de cola a 50 metros de distancia.

Los gastos no calculados en esta variante se mantienen iguales a los de la variante anterior, ya que no varían. En esta variante solo se expondrán los valores de los parámetros que varían y los resultados obtenidos.

Gasto anual por consumo de energía eléctrica

$$g_{\text{elec}} = \frac{T_a \cdot N \cdot K_p \cdot t}{\eta} \cdot 4; \text{ CUC/año}$$

Donde:

$$N = 27,69 \text{ kW}$$

$$\eta = \text{Rendimiento del motor eléctrico (59,45 \%)}$$

$$g_{\text{elec}} = 646294,38 \text{ CUC/año}$$

Gasto anual por mantenimiento

$$g_{\text{man}} = 4883 \text{ CUC /año}$$

Gastos unitarios variables

$$V = g_s + g_{elec} + g_{mant} + g_{imp} + g_{il}; \text{ (CUC/año)}$$

$$V = 756231,95 \text{ CUC/año}$$

Gasto anual de explotación de una bomba

$$G_b = V + F; \text{ CUC/año}$$

$$G_b = 759001,84 \text{ CUC /año}$$

Gasto de explotación de la instalación para transportar 1 m³ de cola a 50 metros de distancia

$$G_{exp} = \left(\frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \cdot n; \text{ CUC}$$

Donde:

$$Q = 700800 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$G_{exp} = 0,087 \text{ CUC}$$

El comportamiento de los gastos de explotación para el transporte de un m³ cola a 50 metros de distancia muestra que cuando la instalación trabaja sin cavitación existe un ahorro de un 6 % en dicho gasto, al compararse con esta funcionando con cavitación, representando un valor de 0,005 CUC.

3.4 Impacto ambiental

La planta de níquel de Punta Gorda “Comandante Ernesto Che Guevara”, 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 periodo de explotación, se han originado afectaciones medioambientales severas; como son:

- La emisión de gases conteniendo amoníaco y carbonato de níquel en los alambiques de cola y licor.
- Generación de dióxido de azufre (SO₂) y otras sustancias nocivas durante el proceso de separación de cobalto, filtración y secado al aire libre en un almacén abierto sin sistema de extracción de gases por tiro forzado, los cuales producen corrosión en las instalaciones.

- Generación de gases y compuestos químicos nocivos para la salud de los trabajadores en el área de preparación de sulfhidrato de sodio.
- Alta generación de calor en áreas aledañas a los alambiques de cola y de licor, produciendo stres al trabajador.
- Ruidos, que aunque estén en la norma, afectan por acumulación y constancia el tímpano del oído y ocurre la pérdida de la audición.
- Altos niveles de amoniaco y erosión del polvo de cola en los residuos, afectando a la fauna natura.

3.4.1 Efecto ambiental de la cola

- 1- Los operadores que participan en el sistema de bombeo de cola están expuestos a los gases tóxicos y calientes que se desprenden de esta por derrame a causa de roturas en las tuberías y salideros.
- 2- Sedimentación de polvo de cola en lugares donde se ha averiado el sistema, afectando la salud de los trabajadores.

Medidas constructivas para eliminar estos problemas

- 1- Dar mantenimiento y conservación a todo el puente de tuberías, principalmente en las uniones y sellos.
- 2- Mantener la cultura industrial, eliminando toda la sedimentación del polvo de cola derramado en la planta.
- 3- Corregir todos los salideros de cola en la instalación.

3.4.2 Afectaciones a la salud por el amoniaco

- 1- El amoniaco, tanto el líquido como el vapor es fuertemente irritante para la piel, los ojos y las vías respiratorias.
- 2- El amoníaco es muy tóxico y la exposición a altas concentraciones puede producir quemaduras, cegueras y hasta la muerte.
- 3- Las concentraciones bajas de amoniaco pueden cortar la respiración, pero sin provocar efectos nocivos.
- 4- Las concentraciones medias de amoníaco pueden causar decaimiento, irritación, congestión, hinchazón o entumecimiento de las membranas mucosas de los ojos, nariz y garganta.

5- El líquido produce quemaduras graves, parecidas a las quemaduras cáusticas y estas varían de acuerdo con la concentración del amoníaco y del tiempo que se permanezca expuesta al mismo.

6- Cuando el amoníaco líquido se pone en contacto con la piel, produce congelación rápida e intensa en la zona afectada.

7- La ingestión del amoníaco líquido origina una acción corrosiva severa en la boca, la garganta y el estómago.

8- El amoníaco gaseoso tiene una gran acción irritante en cualquier tejido húmedo; la taquipnea y la taquicardia (agitación de la respiración y los latidos del corazón respectivamente), son algunos de los efectos originados por la irritación de las vías respiratorias; pudiendo llegar hasta detener la respiración.

Medidas de seguridad

1- El personal que trabaja con amoníaco siempre debe tener en cuenta hacia donde circula el aire para situarse de manera que este no bata sobre él, para que los vapores del amoníaco sean alejados del mismo.

2- Hay que situar duchas y lavaderos de ojos y cuerpo convenientemente para que cualquier obrero afectado se aplique grandes cantidades de agua rápidamente.

3- También es necesario utilizar los equipos de protección cuando se requieren.

4- Instruir adecuadamente a los trabajadores respecto a los métodos de manipulación del amoníaco con el objetivo de prevenir el contacto directo del líquido a una exposición imprevista del gas.

Medios de seguridad

1- Si las concentraciones están por encima de los 100 PPM (partes por millón) de amoníaco en los gases del ambiente, deben usarse respiraderos o máscaras y espejuelos de seguridad.

2- Si se está manejando amoníaco deben utilizarse guantes de goma industriales y delantal engomado para evitar las salpicaduras en el cuerpo.

3- Si las concentraciones están por encima de 3000 PPM deben utilizarse trajes engomados bien puestos para evitar afectaciones a la piel, es decir, el cuello debe mantenerse abrochado, los guantes se mantendrán por fuera de la camisa y los pantalones quedarán por fuera de las botas, también puede pasarse grasa por la piel antes de ponerse el traje para evitar que los vapores del amoníaco sean absorbidos; las cremas no son suficientes para la protección.

En la tabla 3.1 se exponen los efectos que produce en el ser humano el amoníaco a distintas concentraciones.

Tabla 3.1: Efectos del amoníaco a distintas concentraciones

PPM de amoníaco en el aire	Efectos
53	Mínimo olor permisible
100	Concentración máxima tolerable en inhalaciones por largo tiempo
300 – 500	Concentración máxima tolerable en inhalaciones por corto tiempo (1/2 – 1 hora)
400	Concentraciones mínimas que causan irritaciones inmediatas en la garganta
700	Concentraciones mínimas que producen irritaciones inmediatas en los ojos
1720	Concentraciones mínimas que hacen toser
2500 – 4500	Concentraciones peligrosas, incluso en tiempo breve
5000 – 10 000	Muerte rápida, obstruye la inhalación en corto tiempo

En el análisis del experimento se realizaron mediciones de las concentraciones de amoníaco presentes en la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques (tabla 7, anexos), apreciando que están en las normas permisibles. Estas concentraciones varían según los escapes de amoníaco que ocurran en la instalación y pueden exceder los límites permisibles, debido a salideros imprevisto e irregularidades de operación, tomando como medida que los operarios lleven consigo el equipamiento que los protege de los gases.

3.4.3 Análisis del ruido en la instalación de bombeo

En las bombas, en su interacción con el medioambiente, se destaca que existe un nivel de ruido medio respecto a las normas internacionales establecidas por el banco mundial sobre medio ambiente, salud y seguridad. Si no se utilizan los medios de protección adecuados pueden producir daños profundos a la salud humana.

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 3.2.

Tabla 3.2: 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)

En la investigación se realizaron mediciones de los niveles de ruido a 1 m de distancia de la bomba objeto de estudio. Estas oscilaron entre (88 – 91) dB, lo que demuestra que se encuentran en el rango permisible, no obstante; se recomienda usar los medios de protección auditiva para disminuir los efectos perjudiciales del mismo.

Protección contra el ruido

- 1- 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.
- 2- 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.

3- 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.

4- 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.

3.4.4 Situación actual de la instalación estudiada

La instalación en la actualidad presenta un ambiente deteriorado debido al tiempo de explotación de dicha planta. En la misma se producen niveles de ruidos aceptables según las normas internacionales, aunque en ocasiones las vibraciones generan ruidos a niveles inadmisibles.

En esta planta ocurren con frecuencia escapes de gases amoniacales, ya sea por una mala operación de los operarios, rotura de los equipos o porque estos se encuentran en mantenimiento; los cuales dañan la naturaleza y afectan la salud de los trabajadores.

Otro de los problemas presentes en el área de trabajo es el vertido de cola al piso, esto ocurre cuando se llenan los tanques de retención por la parada repentina de una bomba o por alguna avería en una de las tuberías de conexión con el sistema o de las bombas. Al derramarse esta cola, se desprende un porcentaje de amoníaco presente en ella, que pasará directamente al aire; el cual es abundante según la magnitud del vertido.

3.5 Conclusiones del capítulo III

- 1- El caudal máximo que se puede obtener en la bomba 322A es de 110m³/h y el que necesita el proceso es de 85 m³/h - 90 m³/h, demostrándose que está sobredimensionada.
- 2- Cuando la variación de presión es menor de 4,25 N/m² aumentan los niveles de vibraciones.
- 3- Si se opera la instalación con altura de succión superior a 2,70 m se obtendrán los valores mínimos de vibraciones.



- 4- Cuando la instalación trabaja sin cavitación se ahorra un 6 % en el gasto de explotación para transportar 1 m^3 de cola a 50 metros de distancia, representando un valor de 0,005 CUC.
- 5- La concentración de amoniaco existente en el sistema de bombeo de cola se encuentra dentro de la norma permisible.
- 6- Los niveles de ruido que genera la instalación de bombeo están en el rango permisible.



Conclusiones generales

- 1- Se determinó que para valores de variación de presión menores de $4,25 \text{ N/m}^2$ aumentan considerablemente los niveles de vibraciones.
- 2- Se obtuvo el modelo matemático estadístico en correspondencia con los niveles de vibraciones, mostrando la dependencia que tienen estas en con relación a la variación de presión.
- 3- Mediante el procedimiento de cálculo utilizado en la investigación se demostró que la instalación no cumple con la condición de ausencia de cavitación.
- 4- Se comprobó que si la instalación trabajar sin cavitación existe un ahorro de un 6 % en el gasto de explotación para transportar 1 m^3 de cola a 50 metros de distancia, representando un valor de 0,005 CUC.
- 5- Los niveles de ruido existentes en la instalación oscilan entre (88 – 91 dB), los cuales están dentro del rango permisible.
- 6- La concentración de amoniaco máxima presente en la instalación de bombeo es de $13,85 \text{ mg/m}^3$ (19,85 PPM), la cual está dentro de las concentraciones permisibles según la norma.



Recomendaciones

- 1- Valorar el diseño de un nuevo tanque con una mayor altura, lo que aumentará el nivel de succión de la cola.
- 2- Instalar un variador de velocidad como método más eficiente de regulación.
- 3- Instalar equipos de mediciones de los principales parámetros de las bombas donde sea necesario.
- 4- Realizar estudios referentes a la influencia del diámetro de la tubería en el rendimiento de la instalación.

Bibliografía

- 1- Adhikari, B; Tindal, K. Artificial Neural: A New Tool for Prediction of Pressure Drop Non – Newtonian Fluid Foods Throug Tubes. Journal of Food.
- 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- Alexandro, B. Investigación y establecimiento de los regímenes de la transportación de las colas del beneficio de la fábrica de Dshezkazgan GMK. Leningrado, 1986.
- 4- Bandala, M. Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México (2001).
- 5- Bombas Centrifugas. 2002. (<http://www.sulzer.com/com/main.htm>).
- 6- Carcar, V. “Etapas del mantenimiento de averías. Medida, análisis y diagnóstico”. Mantenimiento; noviembre y diciembre, 1989.
- 7- Cisneros, H. Cavitación”Un ataque al corazón de las Bombas Centrifugas” [En línea], disponible en (<http://www.mch.cl/documentos/pdf/cavita.pdf>). [Accesado el día 28 de marzo de 2007].
- 8- Darby, R. Laminar and turbulent pipe flows of non Newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena, 2002.
- 9- Díaz, A. Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos (segunda parte). Revista Tecnología Química, 1999, 19(1): 18-27.
- 10- Estévez, Y. “Cálculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de cola de la Planta de Recuperación de Amoniaco de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara”. Trabajo de diploma. ISMM. Moa. 2006.
- 11- Evaluación del Fenómeno de la Cavitación. 2002. <http://www.fluidedesign.com>)
- 12- Gonzáles, J. “Caracterización de instalaciones de bombeo en régimen cavitacional a través de las vibraciones”. Trabajo de diploma. ISMM. Moa. 2006
- 13- González, R; Rolo, A. “Etapas para la implementación del Mantenimiento Predictivo y por Diagnóstico en máquinas rotativas”, ESIB. Ciudad de la Habana, 1996.
- 14- Gonzáles, V. Hidráulica, Bombas y Compresores. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1983.
- 15- Gaillochét, J. Vibraciones en Máquinas (1), como estudiarlas y como combatirlas. MAPRO (Julio - Agosto), 1998: págs. 59 – 64.



- 16- Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones no newtonianos. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
- 17- Karassik, J. Factores Hidráulicos del Sistema. Hy draulic Institute Standards. 1982
- 18- karelin, B. Fenómeno de Cavitación en Bombas Centrífugas y Axiales. Moscú. Construcción de Maquinarias. 1975.
- 19- Manual de operaciones, combinado minero – metalúrgico “Cdte. Ernesto Ché Guevara. Taller de Recuperación de amoniaco. Moa. 1988.
- 20- 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
- 21- Mijailov, N. Estructura del flujo de hidromezclas trifásicas por tuberías. Moscú: Construcción de maquinarias, 1994.
- 22- Nakayama, T. Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food science: 45 (4), 844 – 847 (1980).
- 23- NC 19 – 01 - 07: 1983. Vibración. Métodos de Medición.
- 24- NC 19 – 01 – 08: 1983. SNPHT. Máquinas manuales. Niveles admisibles de vibraciones.
- 25- Nekrasov, B. Hidráulica. Editorial MIR. 1968.435 p.
- 26- Olsen, U. “Las vibraciones en la recepción de las instalaciones”. Mantenimiento, (Septiembre y Octubre), 1985: Págs. 31-37.
- 27- Pasaporte de la máquina.
- 28- Palomino, E. “Elementos de Medición y Análisis de vibraciones en Máquinas Rotatorias”, CEIM. Ciudad de la Habana, 1999.
- 29- Peláez, O. “Producción más limpia un puente entre ecología y economía”. Granma. Año 36. Núm. 268, 2000.
- 30- Pérez, A. “La Protección Ambiental en el Mantenimiento Industrial. Un enfoque para su gestión”. Diagnos 2000. Ciudad de La Habana, 2000.
- 31- Pérez, R. Soluciones aproximadas del movimiento turbulento de fluidos heterogéneos viscosos e incompresibles. Minería y Geología (Moa)(1): 199 – 218. 1984



- 32- Pérez, R; Sviatlana, M. Sobre la elección de criterios de semejanza hidrodinámica aplicadas al transporte hidráulico. *Minería y Geología (Moa)*(3): 91 – 116; 1984.
- 33- Pérez, R. Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas. 2000.
- 34- Pérez, R. Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas. 2004.
- 35- Pérez, F. Equipos de Bombeo. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1983.
- 36- Piedra, M; Lima, M. Procedimientos para la aplicación de las vibraciones mecánicas en el diagnósticos de máquinas. *Diagnos 2000*. Ciudad de La Habana, 2000.
- 37 - Perry, J. *Chemical engineers handbook*. 6 ed. New York: McGraw Hill Book, 1984.
- 38- Ramos, N. Bombas, Ventiladores y Compresores. Editora ISPJAE, Ciudad de la Habana, 1994.
- 39- Rodríguez, O. *Dibujo Aplicado para Ingenieros*, Tomo II. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1986, 347P.
- 40- Skelland, A. *Non-Newtonian Flow and Heat. Transfer*. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
- 41- Turro. A. Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaco. Tesis doctoral. ISMM. Moa. 2002
- 42- Tejada, H. Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
- 43- Valerino. L. “Estudio del comportamiento Dinámico de los Ventiladores de tiro inducido de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”. Tesis de maestría ISMM, 2001.
- 44- Welty, J. *Wicks Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer*. Ed.J.Wiley and Sons. Nueva York. EUA. (1976).