



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez “
FACULTAD DE METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Análisis de cavitación en bombas que trasiegan carbonato de níquel en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Autor: Orestes Oliveros Rodríguez

Tutor: M.Sc. Jorge Luis Reyes De la Cruz

Moa, 2016

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD



Declaración de Autoridad

Yo, Oreste Olivero Rodríguez, autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

M.Sc. Jorge Luis Reyes De la Cruz

Oreste Olivero Rodríguez

PENSAMIENTOS



Pensamientos

“No pretendamos que las cosas cambien si siempre hacemos lo mismo”.

Albert Einstein

“No necesito saberlo todo. Tan sólo necesito saber dónde encontrar lo que me haga falta, cuando lo necesite”.

Albert Einstein

DEDICATORIA



DEDICATORIA

A Dios, por todas sus bondades, gracias Señor.

A mis padres, gracias por ser quien soy. Mami, infinitamente agradecido por tus preocupaciones, tu comprensión y apoyo.

A mi nueva familia Vargas y Moreno, gracias miles. Amor mío, gracias por tus consejos y por estar siempre a mi lado, aquí está lo prometido.

A toda mi familia.

AGRADECIMIENTOS



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores por la preparación y años de esfuerzo.

A mi tutor, por contribuir a mi empeño.

Roberto, gracias, que Dios te siga bendiciendo. Gracias por toda la ayuda y dedicación.

A los demás colaboradores en la industria, gracias.

A mi hermosa familia, por la atención y esfuerzo dedicado.

RESUMEN



RESUMEN

El propósito de esta investigación es el estudio de la cavitación en las bombas centrífugas, que se utilizan en el trasiego de la pulpa de carbonato básico de níquel en la Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara”. Se emplearon manómetros para realizar las mediciones a los niveles de presión, en la succión y la descarga de estas bombas; y se identificaron niveles de vibraciones de hasta 6,8 mm/s que ocurren en las caídas de presión y son considerados suficientemente severos como para causar daños al equipo en condiciones de operación continua. Aplicando la Ley de Raoult, se determinaron los niveles de presión de vapor de la pulpa de carbonato básico de níquel y los parámetros de funcionamiento de la instalación hidráulica, mediante un procedimiento de cálculo para fluidos newtonianos. El estudio permitió definir las causas que provocan la cavitación en la instalación de bombeo, revelando como principal, el descenso de la altura de succión a menos de 3,55 m. La valoración económica detectó pérdidas en la producción final de la Empresa por valores de hasta 90,85 CUC/t, producto a los efectos de la cavitación en esta instalación.

ABSTRACT



ABSTRACT

The purpose of this research is the study of cavitation on centrifugal pumps whose transport nickel carbonate slurry in the “Comandante Ernesto Ché Guevara” Company. Were used manometers to measure the pressure level, at pumps’ suction and discharge; and were identified vibration levels up to 6,8 mm/s that happen in pressure drops and are considered sufficiently severe to injure damage in continuous operation. Applying the Raoult’s Law, were determined it the nickel carbonate slurry’s vapor pressure and functioning parameters of the hydraulic installation by a procedure of calculation for newtonians fluids. The investigation allowed defining the causes that provoke cavitation in the pumping installation, revealing as principal, the descent of the suction head less than 3,55 m. The cost reducing assessment detected losses in the final production of the Company by values up to 90,85 CUC/t, product to the effects of the cavitation in this installation.

INDICE



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1 Introducción	5
1.2 Estado del arte de la investigación	5
1.3 Trabajos precedentes sobre sistema de bombeo del carbonato básico de níquel	6
1.4 Caracterización del proceso tecnológico	9
1.5 Caracterización de los sistemas de bombeo	10
1.6 Características del fenómeno de la cavitación	12
1.6.1 Presión de vapor	12
1.6.2 Tipos de cavitación	13
1.6.3 Factores que intervienen en la cavitación	14
1.6.4 Técnicas de detección de la cavitación	16
1.7 Análisis espectral de vibraciones provocadas por cavitación	17
1.8 Caracterización de las vibraciones en las bombas centrífugas	19
1.8.1 Establecimiento de los puntos de medición	21
1.9 Conclusiones del capítulo 1	22
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 Introducción	23
2.2 Materiales empleados en las mediciones de los parámetros del proceso	23
2.3 Puntos de medición de las vibraciones	24
2.4 Caracterización de las bombas utilizadas en el trasiego de carbonato básico de níquel	24
2.5 Características de la pulpa de carbonato básico de níquel	25
2.6 Presión de vapor	26
2.7 Metodología empleada para el cálculo hidráulico	27
2.7.1 Cálculo de la red hidráulica	27
2.7.2 Velocidad específica de aspiración y la carga neta positiva de succión	32
2.7.3 Comprobación de la condición de cavitación en la bomba centrífuga	33
2.8 Metodología empleada para la valoración económica	36



2.9	Conclusiones del capítulo 2	38
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL		39
3.1	Introducción	39
3.2	Características de la pulpa	39
3.3	Análisis del espectro de las vibraciones	39
3.4	Presión de vapor de la pulpa de carbonato básico de níquel	41
3.5	Caída de presión y vibraciones asociadas	43
3.6	Resultados del cálculo de la red hidráulica	46
3.7	Valoración económica	49
3.7.1	Determinación del gasto de explotación de la instalación para transportar un m ³ de pulpa de carbonato a 116,96 de distancia sin cavitación	49
3.7.2	Determinación del gasto de explotación de la instalación para transportar un m ³ de pulpa de carbonato de níquel a 116,96 m de distancia bajo régimen cavitacional	51
3.8	Impacto medio ambiental	53
3.9	Conclusiones del capítulo 3	54
CONCLUSIONES GENERALES		
RECOMENDACIONES		
ANEXOS		

INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico de todo país está sustentado en la explotación de sus recursos naturales y el desarrollo tecnológico, científico y social. En Cuba este papel lo juegan las grandes industrias.

El Estado Cubano con bases y aspiraciones superiores, gradualmente se traza estrategias orientadas a organizar mejor la producción. En este sentido las industrias se han orientado a fortalecer el mantenimiento de sus maquinarias, existiendo una tendencia a la detección y diagnóstico de fallas, como principal tarea de un sistema de monitoreo; logrando mejorar la seguridad en el proceso de producción, la reducción de averías y el mejoramiento de la eficiencia productiva.

En consecuencia, la Industria del Níquel en Cuba, también realiza estudios con la finalidad de hacer un uso más racional de sus capacidades instaladas en sus empresas y consolidar el prestigio de nuestro país en ese importante renglón de la economía.

En el municipio de Moa se encuentran ubicadas dos importantes empresas productoras de níquel, consideradas pilares de nuestra economía:

- a) Empresa productora de sulfuro de níquel y cobalto Moa Nickel S.A. “Pedro Sotto Alba”, que utiliza el proceso de lixiviación ácida,
- b) Empresa productora de níquel y cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, la cual utiliza el proceso tecnológico de carbonato amoniacal CARON.

La transportación de mineral en estas industrias se realiza de diversas formas, prevaleciendo el transporte hidráulico, por su gran aplicabilidad con diversos tipos de fluidos y fácil trasiego hacia el lugar donde se desee. Para el transporte de fluido se utiliza como componente mecánico la bomba centrífuga parte esencial de este tipo de proceso y muy ventajosa comparada con otro tipo de transporte.

En la Unidad Básica de Producción (UBP) “Recuperación de Amoníaco y Cobalto” de la fábrica “Comandante Ernesto Ché Guevara” además de recuperarse el amoníaco y el cobalto, se obtiene el carbonato básico de níquel en forma de pulpa, a una



temperatura aproximada de 100 °C resultado de la destilación de licor producto. Esta pulpa constituye materia prima necesaria para la obtención de uno de los productos finales de la Empresa.

La pulpa es transportada a los sedimentadores ubicados en la UBP “Calcinación y Sínter” a través de un sistema de bombeo, que al operar en régimen continuo, aumenta las probabilidades de que ocurran fallas producto al deterioro en sus partes móviles, generando altos niveles vibracionales. Estos sistemas operan en régimen cavitacional por las características del fluido transportado, las altas temperaturas y su densidad, produciendo pérdidas en el rendimiento de la bomba y aumento de su consumo energético.

En la Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara”, donde se realiza esta investigación se detectaron, en el sistema de bombeo de carbonato de níquel, las siguientes deficiencias:

1. Flojedad de los pernos de anclaje de la bomba al bastidor y desconchado del cimientto,
2. Inestabilidad en el flujo de pulpa de carbonato básico de níquel, hacia la UBP “Calcinación y Sínter” por averías imprevistas,
3. Escaso control de los parámetros principales de funcionamiento de la instalación,
4. Elevado costo por mantenimiento de las bombas por roturas en sus componentes.

De manera que se define como **situación problemática**:

Al existir irregularidades operacionales, la presencia del fenómeno de cavitación afecta el rendimiento del sistema de bombeo provocando inestabilidad en el trasiego de pulpa y aparición de niveles de vibraciones perjudiciales para los elementos que componen las bombas, generando considerables afectaciones económicas.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, se define como **problema**:

No está identificada la causa que provoca la cavitación en las bombas centrífugas que trasiegan la pulpa de carbonato básico de níquel.



Por lo que se propone como **objeto de estudio:**

Las bombas centrífugas modelo “5GRT” que trasiegan la pulpa de carbonato básico de níquel en la UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto” de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Campo de acción:

La cavitación en las bombas centrífugas que trasiegan el carbonato básico de níquel.

Para lo que se define como **objetivo general:**

Analizar los factores que provocan la cavitación en las bombas centrífugas utilizadas en la UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto”.

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

Identificando las causas que favorecen la presencia de cavitación, es posible atenuar los fallos y averías provocados por este fenómeno en las bombas centrífugas que trasiegan el carbonato básico de níquel en la UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto”.

Objetivos específicos:

1. Identificar las causas que influyen en la cavitación de las bombas que trasiegan pulpa, utilizando la metodología de cálculo correspondiente,
2. Determinar los niveles de vibraciones asociados a la cavitación en las bombas objeto de estudio,
3. Realizar una valoración de los resultados y de su impacto económico en la Empresa.

Tareas:

1. Realización de una búsqueda bibliográfica sobre cavitación y las vibraciones en bombas centrífugas que trasiegan hidromezclas,
2. Determinación de las características físico mecánicas de la pulpa de carbonato,



3. Instalación de manómetros a la succión y descarga de la bomba objeto de estudio y empleo del Vibxpert,
4. Establecimiento del procedimiento de cálculo para la determinación de los parámetros de la instalación de bombeo, su influencia en la cavitación y en los niveles de vibraciones,
5. Valoración del impacto económico del proceso y las afectaciones medioambientales asociadas a la instalación de bombeo del carbonato básico de níquel.

CAPITULO 1



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Para el correcto funcionamiento de una instalación hidráulica es importante el estudio de las leyes, fenómenos presentes y el proceso tecnológico del cual forma parte. Del mismo modo es importante tener en cuenta las investigaciones realizadas, las teorías existentes y todos los elementos que pudieran dar un aporte positivo a esta investigación, encausada al estudio del fenómeno de la cavitación, su acción negativa en los parámetros de las bombas y en los componentes durante la presencia de alteraciones en el comportamiento vibratorio del equipo. En consecuencia el **objetivo** de este capítulo es realizar una búsqueda y análisis bibliográfico que permita establecer los fundamentos teóricos de la cavitación en máquinas centrífugas y los niveles de vibraciones que origina.

1.2 Estado del arte de la investigación

La cavitación es un fenómeno típico de las bombas hidráulicas, pero no excluyente de dichas máquinas. La presencia de este fenómeno representa una problemática de relevada importancia que repercute en la eficiencia y el desempeño de los equipos, que incluso puede causar el deterioro parcial o total de los mismos, principalmente afecta a los impelentes. En las últimas décadas la tecnología de bombas centrífugas y turbinas ha tenido un avance significativo y se fabrican equipos con mayores velocidades específicas para minimizar esta influencia, lo que determina un incremento en el riesgo de problemas en la succión, especialmente cuando operan fuera de su condición de diseño. Sus causas y efectos han sido estudiados ampliamente a lo largo de los años, pero todavía dan lugar a serios problemas de funcionamiento.

Los estudios sobre cavitación se iniciaron en 1754 con los trabajos de Euler, en hélices de barcos, pero su importancia en la industria, no fue marcada hasta mediados del siglo XIX, cuando en 1873 Reynolds investigó los efectos de la cavitación sobre las hélices.



1.3 Trabajos precedentes sobre sistema de bombeo del carbonato básico de níquel

En el proceso de investigación de trabajos precedentes, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, relacionada con la temática de la cavitación en bombas centrífugas y la otra, sobre las vibraciones relacionadas con el fenómeno de la cavitación en las bombas.

En los estudios realizados por Karelin (1975), sobre las bombas centrífugas, el fenómeno de la cavitación es dividido en dos regímenes críticos:

- a) Se relaciona con el momento crítico de la cavitación, donde las curvas de cavitación se caracterizan por el inicio de la disminución de la carga y eficiencia,
- b) Se relaciona con el momento de caída abrupta de los trabajos de la bomba, caracterizado por la caída precipitada de los parámetros de la bomba.

Para analizar estos regímenes de cavitación hay que tener en cuenta los parámetros: carga, eficiencia y potencia en función de la reserva cavitacional.

Por otra parte el autor plantea que el trabajo de las bombas en regímenes de cavitación afecta los parámetros de trabajo, daña el equipo y termina por destruirla, disminuye el rendimiento e incrementa el consumo energético. 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; garantizando la velocidad y aceleración suficientes a la entrada del impulsor.

La reserva requerida de cavitación NPSH es definida por Pérez (2004), como un parámetro que depende de las características de construcción de la bomba y es mayor para bombas con el rodete en voladizo, que para las que lo tienen 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 %, pero no aporta más información en este sentido.

Según Pérez (1983), una de las máquinas más frecuentes en los procesos de la producción de níquel son las bombas centrífugas y son grandes consumidoras de energía, siendo así la disminución de su eficiencia traería consigo un impacto negativo en el aspecto económico y social.

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

Concluye Barrera (2010) en sus estudios que la cavitación se nota de forma clara en los oscilogramas como una onda de alta amplitud y comportamiento errático. Se notan oscilaciones en períodos de tiempo minúsculos, producto del golpeteo de las pequeñas burbujas que colapsan continuamente contra la estructura de la bomba bajo cavitación y que las lecturas tomadas en dirección axial de la ruta arrojaron los espectros más significativos, fueron seleccionadas como determinantes las lecturas tomadas en los puntos de succión, voluta y descarga de la bomba.

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 álabes 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 álabes 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 este tipo de cavitación está ligado 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 Galilei y su contemporáneo M. Marín, los cuales establecieron relaciones matemáticas entre frecuencia, longitud, tensión y masa de elementos vibrantes. Así también, Isaac Newton, Rayleigh y otros, se deben igualmente estudios en relación con el fenómeno vibratorio.

Según Palomino (1999), en Cuba, 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) 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 escritores se limitaron a dar los parámetros y normas en la puesta en marcha (Olsen 1985) sin predecir o tener en cuenta cómo pueden variar estos durante el período de explotación.

Pérez (2000) y Peláez (2000), dan un enfoque de cómo debe ser gestionada la protección ambiental en la práctica del mantenimiento industrial. Destacan el mantenimiento como la función que más puede contribuir a reducir los riesgos de impacto ambiental en las empresas, 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 últimos trabajos relacionados, Valerino (2004) establece los puntos de mediciones de las vibraciones diagnosticando el estado técnico de los ventiladores.

Palomino (1999), define 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 centrifugas) 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 la instalación objeto de este estudio, el fenómeno de la cavitación se encuentra presente de forma permanente a un alto grado, por lo que es el factor perjudicial más significativo 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 los factores antes mencionados generan altos niveles de vibración en las máquinas (bombas) dando muestra de la relación que existe entre ellos.

1.4 Caracterización del proceso tecnológico

La producción de níquel cubano se desarrolla en la zona nordeste de la Provincia Holguín en el Municipio Moa. En esta localidad existen dos importantes empresas que pertenecen al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), la Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara” que utiliza la tecnología CARON de carbonato amoniacal y la Empresa Mixta “Pedro Soto Alba” Moaníquel S.A con producción de níquel y cobalto por el proceso de lixiviación ácida.

La Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara” es de proceso continuo y se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos como hornos de soleras múltiples, sedimentadores, columnas de destilación. El uso de este equipamiento favorece la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniacal admite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentínicos. El complejo minero metalúrgico de níquel de la



fábrica de Punta Gorda comprende las siguientes unidades de producción y aseguramientos: Unidad Básica Minera, Unidad Básica de Producción de Preparación de Mineral, Unidad Básica de Producción Hornos de Reducción, Unidad Básica de Producción de Lixiviación y Lavado, Unidad Básica de Producción de Recuperación de Amoníaco y Cobalto, Unidad Básica de Calcinación y Sínter, Unidad Básica de Servicio Termoenergética, Unidad Básica de Servicio Potabilizadora, Direcciones y Unidades Básicas de Servicios para el aseguramiento al proceso productivo.

La UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto” cumple la función de limpiar los licores provenientes de la primera etapa de lixiviación para luego descobaltizarlo y obtener el sulfuro de níquel y cobalto como un producto comercializable, además de destilar el licor descobaltizado para obtener el carbonato de níquel, destilar la cola para recuperar amoníaco y producir el licor fuerte que se alimenta a la planta de Lixiviación y Lavado. En las torres de destilación de licor producto se separa parte del NH_3 y CO_2 , formándose el precipitado de Carbonato Básico de Ni, con un color verdoso característico a una temperatura de $100\text{ }^\circ\text{C}$, que es descargado de dichas torres a una presión aproximadamente igual a $0,8\text{ kgf/cm}^2$ o ($78\ 453,2\text{ Pa}$), por lo que se envía a dos tanques despresurizadores, desprendiéndose parte del agua de la pulpa de carbonato en forma de vapor que pasa a través de las chimeneas de dichos tanques al sistema de separación de partículas. La pulpa despresurizada se transporta con las bombas del tipo “5GRT” Bo-211-A, B, C, D, E hasta los sedimentadores de la UBP Calcinación y Sínter. Estas bombas deben trasegar un caudal demandado por la UBP de Calcinación y Sínter, de ahí su importancia en la continuidad del proceso.

1.5 Caracterización de los sistemas de bombeo

Las bombas son equipos mecánicos que sirven para elevar los líquidos y conducirlos de un lugar a otro, o lo que es lo mismo, comunicarles cierta cantidad de energía (carga) que les permita vencer la resistencia de las tuberías a la circulación. La carga representa la diferencia de nivel entre el lugar de donde se toma el líquido y el lugar a donde se pretende llevar. Los líquidos circulan del lugar de mayor energía al lugar

de menor energía; el suministrarle energía la bomba al líquido tiene el objetivo de producir el gradiente necesario para establecer la circulación y vencer las resistencias (Pérez 1983).

Según el análisis de la bibliografía, puede resumir que las bombas se pueden clasificar como se muestra en la figura 1.1.

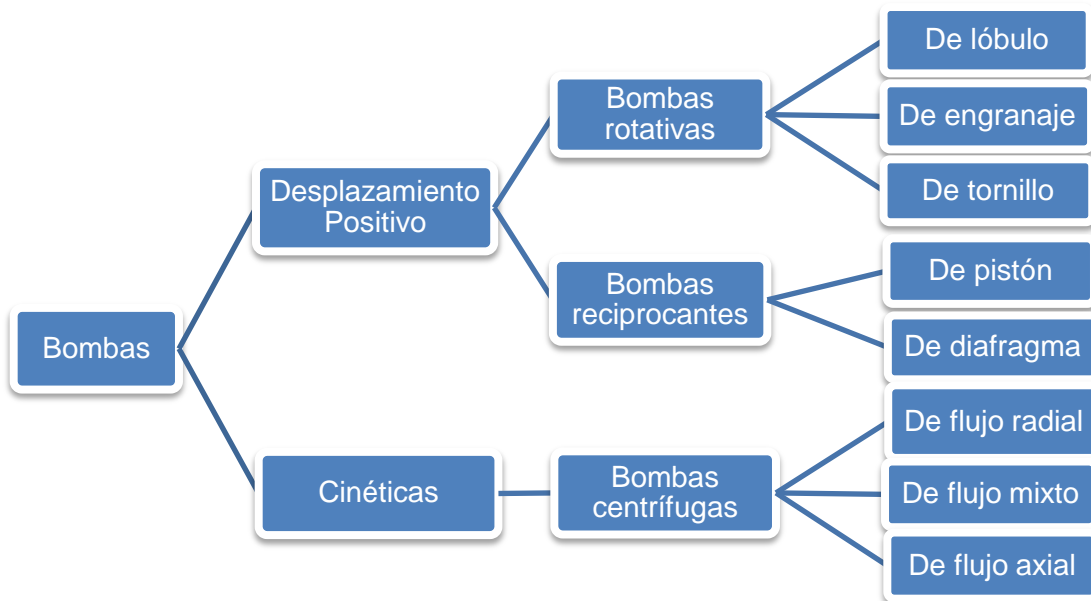


Figura 1.1. Clasificación de las bombas.

Particularmente las bombas centrífugas, según Pérez (1983), consisten esencialmente en un impelente, rodete o rotor, colocado dentro de una caja y dispuesto de manera que cuando rota, le transmite energía al líquido bombeado, aumentando la presión y la velocidad del mismo. La caja de la bomba tiene una forma que transforma la carga en velocidad (energía en forma de velocidad) a la salida del impelente, en carga a presión a la salida de la bomba, ya que de esta forma el líquido puede vencer mejor la diferencia de nivel y la resistencia que ofrecen las tuberías a la circulación. La carga a presión desarrollada por la bomba, es el resultado de la velocidad impartida al líquido por el impelente, así como del aumento de presión que se desarrolla al suministrarle un movimiento de rotación al líquido y no se debe en ningún modo a impacto o desplazamiento.

1.6 Características del fenómeno de la cavitación

La cavitación es un fenómeno de gran relevancia en el ámbito de los sistemas hidráulicos. Se define la cavitación como la evaporación parcial de un líquido en un sistema, y se caracteriza por la formación y posterior colapso de las burbujas o cavidades formadas. El término formación engloba la creación de una nueva cavidad o la expansión de una preexistente hasta un tamaño en que pueden ser observados los efectos macroscópicos (Barrera 2010).

Pérez (1983) la define como el fenómeno que se produce cuando en un punto de una corriente líquida, la presión se hace inferior a la tensión de vapor correspondiente a la temperatura a que se encuentra el líquido. El descenso de la presión hasta ese punto origina que el líquido hierva, o sea, que comience a vaporizarse. En algunos casos, dependiendo de las condiciones de la circulación se formará un émbolo (cavidad) de vapor, que llegará en ocasiones a obstruir por completo la circulación; en otros, las cavidades serán pequeñas, ocupadas por burbujas de vapor, que arrastrará la corriente y que al llegar a lugares, en que exista una presión mayor, colapsarán, acompañando este colapso con esfuerzos de compresión súbitos de una gran intensidad. En la figura 1.2 se muestran las transiciones que puede presentar el fluido en su transporte.

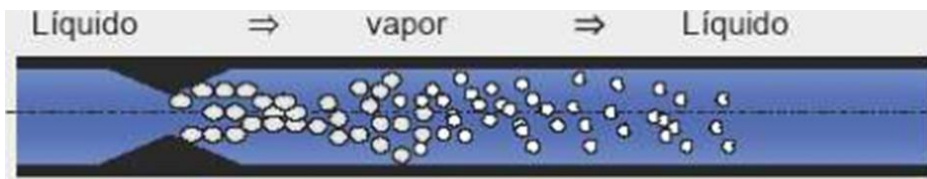


Figura 1.2. Transición del líquido a vapor. **Fuente:** Balcazar (2013).

La condición física fundamental para la aparición de la cavitación es que la presión en el punto de formación de las burbujas (o bolsas de vapor) disminuya hasta la presión de vapor del líquido en cuestión.

1.6.1 Presión de vapor

En la superficie libre de un líquido a cualquier temperatura hay una constante de moléculas en movimiento que escapan de dicha superficie, el líquido se evapora. Si

el líquido se encuentra en un recipiente cerrado, y sobre su superficie queda un espacio libre, este espacio se llega a saturar de vapor y ya no se evapora más líquido. Si aumenta la temperatura aumenta la presión de saturación y se evapora más líquido. Es decir, todo fluido tiene para cada temperatura una presión llamada presión de saturación del vapor a esa temperatura; o lo que es lo mismo, a cada presión corresponde una temperatura llamada temperatura de saturación del vapor a esa presión. Esta propiedad es fundamental en el estudio de la cavitación.

1.6.2 Tipos de cavitación

Se puede clasificar la cavitación según la forma en que se produce, según el grado de desarrollo de la misma y según la forma de manifestarse macroscópicamente, Balcazar (2013).

Según la forma de producirse la cavitación se distinguen los siguientes tipos:

1. Cavitación de vapor: debida a la disminución local de la presión en el seno de un líquido. Puede ser hidrodinámica, creada por depresiones locales debidas a la aceleración del fluido, o acústica, debida a ondas de presión transmitidas en el fluido,
2. Cavitación gaseosa: ocasionada por la introducción, desde el exterior, de energía en puntos del líquido (aumento de la temperatura, inducir vibración local de las partículas). Se habla entonces de cavitación óptica o cavitación de partículas.

Según el grado de desarrollo, se distinguen:

1. Cavitación incipiente: es una etapa inicial de la cavitación en la que empieza a ser visible la formación de las burbujas,
2. Cavitación desarrollada: se trata de una etapa en la que se tiene un número de burbujas lo suficientemente elevado como para producir una modificación del campo hidrodinámico,
3. Supercavitación: cuando se tiene una superficie sólida sumergida, la cavitación se extiende ocupando en su totalidad dicha superficie. Aparece, por ejemplo, en



las hélices de lanchas rápidas en las que las condiciones ante la cavitación son críticas,

4. Cavitación separada: etapa final de la cavitación, cuando está próxima a desaparecer. Se produce normalmente en las zonas de estela y su importancia mucho menor que las anteriores.

1.6.3 Factores que intervienen en la cavitación

Los factores más comunes que por los que puede presentarse la cavitación teniendo en cuenta los factores que la originan, según Reyes (2010) y Balcazar (2013):

Relacionados con el fluido:

1. La temperatura,
2. La densidad del fluido,
3. Las propiedades físicas mecánicas,
4. Las concentraciones de gases,
5. La composición química,
6. Las concentraciones de la fase sólida,
7. El pH.

Relacionados con las características de la red:

1. La altura de succión,
2. La presión atmosférica,
3. La altura de Presión de vapor,
4. Las pérdidas en la succión.

Relacionados con la bomba:

1. El caudal,
2. La velocidad de rotación,
3. El coeficiente de velocidad específica.



El aporte de estos autores permite definir las causas o condiciones a las que se encuentra sometida el origen de la cavitación y permite dirigir la investigación en función de las variables que intervienen en este fenómeno.

Efectos y consecuencias de la cavitación en las turbomáquinas

Los efectos que produce la cavitación son perjudiciales. El impacto de ésta alcanza diversos aspectos del sistema de bombeo, entre los cuales tenemos:

1. Reducción de la capacidad de bombeo. Las burbujas ocupan un volumen que reduce el espacio disponible para el líquido y esto disminuye la capacidad de bombeo. Si la generación de burbujas en el ojo del impulsor es suficientemente grande, la bomba se puede “ahogar” y quedar sin flujo de succión con una reducción total del flujo. La formación y colapso de las burbujas es desigual y desparejo, esto genera fluctuaciones en el flujo y el bombeo se produce en chorros intermitentes,
2. Pérdida de sólidos en las superficies límites de los materiales en contacto con la implosión de la burbuja (impulsor, carcasa), conocida como erosión por cavitación. El efecto más indeseado de la cavitación es precisamente éste. Los álabes de las máquinas, sometidos a un continuo proceso de colapso de las burbujas en su proximidad, acaban teniendo problemas serios de desgaste, que pueden terminar con el álabe y, por tanto, con las prestaciones de la máquina,
3. Ruidos generados sobre un ancho espectro de frecuencias llamada frecuencia de golpeteo. Es continuo colapso de las burbujas de cavitación produce un fenómeno vibratorio que se transmite a través de los conductos o estructura y produce molestas oscilaciones y ruido, especialmente peligrosos si la frecuencia asociada con el fenómeno de la cavitación entra en resonancia con alguna frecuencia propia de la estructura,
4. Pérdida en el rendimiento de la bomba y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas. El equipo deja de ofrecer el caudal del punto de operación,
5. Aumento del rango de vibraciones del equipo.

Además de la erosión de los componentes, en bombas grandes, la cavitación prolongada puede causar desbalance de los esfuerzos radiales y axiales sobre el impulsor debido a una distribución desigual en la formación y colapso de las burbujas. Este desbalance comúnmente lleva a los siguientes problemas mecánicos:

1. Torcedura y deflexión de los árboles,
2. Daños a los rodamientos y roces por la vibración radial,
3. Daños en el rodamiento de empuje por movimiento axial,
4. Daños en los sellos.

1.6.4 Técnicas de detección de la cavitación

Se puede comprobar la aparición de cavitación por las vibraciones y el ruido que genera, sin embargo, se busca definir el punto exacto de aparición del problema. Para ello, se pueden seguir los métodos propuestos por Balcazar (2013):

1. Por el cambio en el rendimiento hidráulico de la máquina, puesto de manifiesto en la variación de la carga, caudal, potencia,
2. Por observación visual o fotográfica de las bolsas de vapor o burbujas en los álabes del impelente,
3. Por medición de los ruidos y vibraciones que acompañan al funcionamiento de la máquina.

Observando las prestaciones de una determinada máquina, se puede inferir la aparición de cavitación cuando estas prestaciones varíen un determinado porcentaje sin modificar el punto de funcionamiento de la misma. Por medio de mediciones acústicas se puede detectar la aparición de cavitación por el brusco incremento en los niveles de ruido que se obtienen en mediciones realizadas en la aspiración de una bomba. Pero, es la medición de vibraciones en la superficie la técnica de mantenimiento predictivo más ampliamente utilizada, y esto es debido a que con ella podemos detectar una gama más amplia de defectos y de problemas en máquinas y procesos. Tiene una aplicación prioritaria en las máquinas rotativas y las bombas son una de las máquinas más susceptibles de ser controladas por análisis vibracional.

El proceso de análisis de vibraciones consiste en captar la vibración originada en la máquina con un sensor, obteniendo una señal temporal para posteriormente procesarla en el dominio de la frecuencia e identificar su origen. El análisis espectral es la base de la diagnosis por vibraciones, cada componente, cada defecto, cada daño asociado a algún componente genera una vibración a una frecuencia determinada, pudiendo identificar daños por las frecuencias excitadas y severidad de los mismos por las amplitudes alcanzadas.

1.7 Análisis espectral de vibraciones provocadas por cavitación

El análisis espectral se define como la transformación de una señal en el dominio del tiempo hacia una representación en el dominio de la frecuencia, consiguiéndose gracias a la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Conocer la velocidad de giro de la máquina es fundamental para establecer un buen análisis vibratorio, pues a raíz de esta velocidad se relaciona los picos de vibración obtenidos en el espectro, pudiendo ver tras el estudio del mismo cual es la causa incipiente que está o producirá un fallo.

La mayoría de los componentes de señal de vibración están directamente relacionados con la velocidad de la máquina, desequilibrio, desalineamiento, por tanto, tras aplicar la FFT se pueden analizar por separado cada uno de los posibles problemas de una máquina con tan solo conocer sus características constructivas y su velocidad de giro. Esta velocidad se presenta en el eje x del espectro y recibe el nombre de velocidad de sincronismo, cuyas unidades serán en min^{-1} o Hz, pudiendo pasar de una unidad a otra dividiendo o multiplicando por 60, así $3\ 000\ \text{min}^{-1}$ equivalen a 50 Hz. La forma más habitual de expresar la velocidad y las frecuencias en el espectro es mediante el número de orden (órdenes), siendo la velocidad de la máquina 1x. Las órdenes no son más que múltiplos de las revoluciones por minuto de la máquina.

Otras frecuencias que aparecen en el espectro son las llamadas frecuencias armónicas o armónicos de la velocidad de sincronismo, siendo múltiplos enteros de ésta. Por ejemplo, si la frecuencia de giro de la máquina fuera de 25 Hz (gira a

1 500 min^{-1}), y en el espectro aparecen picos de vibración a 50, 75, 100 Hz, éstas son frecuencias armónicas pues se dan a 2, 3 y 4x veces la frecuencia de giro.

La región del espectro que se encuentra por debajo de la velocidad de giro recibe el nombre de zona subsíncrona, y si se obtienen picos de vibración en esta zona, se dice entonces que el espectro contiene frecuencias subarmónicas. Cuando en el espectro aparecen estas frecuencias, suele ser síntomas de problemas mecánicos, identificándose la presencia de holguras. Además, en un grupo de bombeo, las frecuencias subsíncronas podrían ser el indicio de problemas hidráulicos.

La frecuencia natural de un sistema es aquella que tiene una tendencia o facilidad para vibrar. Todo sistema posee una o varias frecuencias naturales de forma que al ser excitadas se producirá un aumento importante de vibración llamada resonancia. La frecuencia natural o frecuencia propia es una característica intrínseca del sistema en cuestión, puesto que depende de la rigidez y masa del sistema.

En un espectro aparecen frecuencias llamadas no síncronas, que son aquellas que no son múltiplos enteros de la velocidad de giro. Por ejemplo, una frecuencia no síncrona pudiese ser la presencia de un pico de vibración a 87,5 Hz si la frecuencia de giro es de 25 Hz, lo que correspondería a un 3,5x. La cavitación provoca vibración aleatoria en una banda de frecuencia ancha en el orden de los 2 kHz y de baja amplitud que en el espectro queda aproximadamente sobre la frecuencia de paso de álabes y sus armónicos, como se aprecia en la figura 1.3.

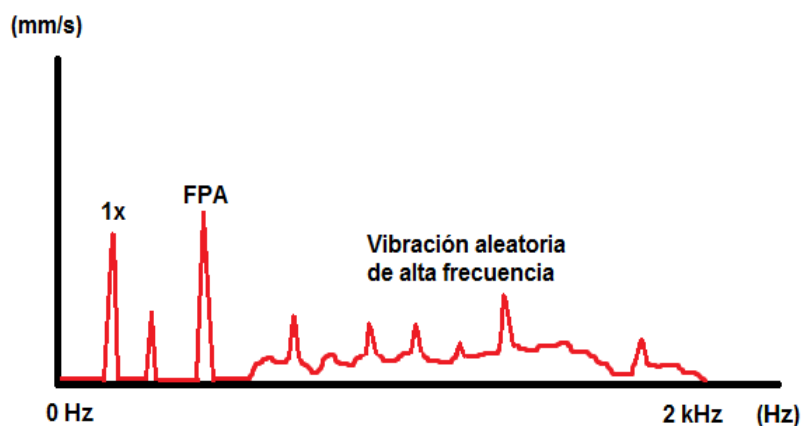


Figura 1.3. Espectro característico de la cavitación en turbomáquinas.

En la figura 1.3 se muestra un peculiar ejemplo del espectro de una turbomáquina bajo el efecto de la cavitación, en la que se distingue un amplio rango de frecuencia hasta los 2 kHz con bajas amplitudes aleatorias, que se localizan sobre la frecuencia de paso de los álabes, identificando el fenómeno de la cavitación.

1.8 Caracterización de las vibraciones en las bombas centrífugas

La NC-ISO 10816-3: 2005 e ISO 10816-3 establecen las directrices generales para la medición y evaluación de las vibraciones mecánicas de las máquinas, medidas sobre partes no rotatorias. En la tabla 1.1 se proporcionan criterios de evaluación según la clasificación de la máquina por clases basado en la norma ISO 10816-3, a continuación:

Grupo 1: Máquinas grandes. Máquinas de potencia nominal entre 300 kW y 50 MW. Motores eléctricos con altura de eje $H \geq 315$ mm.

Grupo 2: Máquinas medianas. Máquina de potencia nominal entre 15 kW y 300 kW. Motores eléctricos con altura de eje H entre 160 mm y 315 mm.

Grupo 3: Bombas con impulsores multiaspas (centrífugas, de flujo mixto o axial) con motor separado y potencia sobre 15 kW.

Grupo 4: Bombas con impulsores multiaspas (centrífugas, de flujo mixto o axial) con motor integrado y potencia sobre 15 kW.

Grupo 5: Máquinas pequeñas. Máquinas de potencia nominal bajo 15 kW (de acuerdo a ISO 2372). Motores eléctricos con altura de eje H menor a 160 mm (de acuerdo a ISO 2373).

Evaluación cualitativa de la vibración según su rango

ZONA A: La vibración de máquinas nuevas o recientemente reacondicionadas puestas en servicio, normalmente deberían estar en esta zona.

ZONA B: Máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas aceptables para operar sin restricción en un período largo de tiempo.

ZONA C: Máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas insatisfactorias para una operación continua en un tiempo prolongado. Generalmente, estas máquinas pueden operar por un periodo limitado en esta condición hasta que se presente una oportunidad conveniente para reparar la máquina.

ZONA D: Los valores de la vibración de esta zona son considerados normalmente como suficientemente severos para causar daño a la máquina.

Tabla 1.1. Rangos de severidad vibratoria para diferentes clases de máquinas con velocidad de rotación entre 600 y 15 000 cpm

Velocidad RMS (mm/s)	Grupo N° 1		Grupo N° 2		Grupo N° 3		Grupo N° 4		Grupo N° 5
	Tipo de Soporte		Tipo de Soporte		Tipo de Soporte		Tipo de Soporte		
	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	
0,18-0,28	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0,28-0,45									A
0,45-0,71									A
0,71-1,4									A
1,4-1,8									A
1,8-2,3	B	A	B	A	B	A	B	A	B
2,3-2,8									B
2,8-3,5	B	B	C	B	B	B	C	B	C
3,5-4,5	B		C		B		C		B
4,5-7,1	C	C	D	C	C	C	D	C	D
7,1-11,0	D				C				
11,0-18,0	D	D	D	D	D	D	D	D	D
18,0-28,0	D								

Fuente: NC-ISO 10816-3: 2005.

Se recomienda según la NC-ISO 10816-3: 2005, que el valor de alarma debe ser mayor que el de referencia en una cantidad igual a una proporción del límite superior de la zona B. Si la referencia es baja, la alarma puede estar por debajo de la zona C y que los valores de parada generalmente estarán relacionados con la integridad de la máquina y dependerán de las características específicas de diseño que han sido introducidas para que la máquina pueda soportar las cargas dinámicas anormales. Por tanto, los valores utilizados generalmente serán los mismos para todas las máquinas con diseños similares y normalmente no estarán relacionados con los

valores de referencia para el estado estacionario para establecer alarmas. Sin embargo, pueden existir diferencias para las máquinas de diseño diferente y no es posible brindar directrices para valores absolutos de parada. En general el valor de parada estará dentro de las zonas C o D.

1.8.1 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 axial (paralelo al eje de 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 Argulló (1986), Piedra (2000) y Estévez (2013). Las mediciones se realizaron en los ejes axial, horizontal, vertical. En la figura 1.4 se presenta un esquema del conjunto bomba - motor junto con los puntos donde se deben realizar las mediciones de vibraciones.

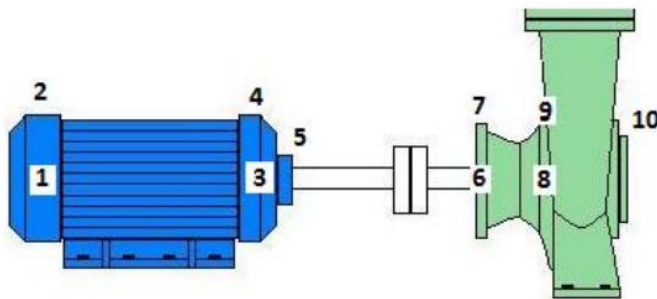


Figura 1.4. Ubicación de puntos de medición en un grupo horizontal.

Fuente: Estévez (2013).



1.9 Conclusiones del capítulo 1

1. El análisis bibliográfico demostró la existencia de diversos estudios relacionados con la cavitación en bombas centrífugas y su efecto negativo en la disponibilidad de los sistemas de transporte hidráulico.
2. Se evidenció la inexistencia de un estudio que identifique la causa de la cavitación en el sistema de bombeo de pulpa de carbonato y los niveles de vibración asociados a este fenómeno, en la Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara”.

CAPITULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

La correcta selección de los materiales y métodos permiten validar los resultados, una correcta aplicación de estos es indispensable para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto. Por esto, es necesario conocer los materiales y los métodos de cálculo para la determinación de las características de la red, la evaluación de las vibraciones en función del régimen cavitacional, algunas características y propiedades de la pulpa de carbonato básico de níquel y la metodología empleada para la evaluación del impacto económico. En tal sentido el **objetivo** del capítulo es plantear los materiales a utilizar y la metodología de cálculo para la evaluación de los parámetros de bombeo del carbonato básico de níquel en la UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto”.

2.2 Materiales empleados en las mediciones de los parámetros del proceso

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron mediciones de las presiones asociadas a los niveles de vibraciones, a continuación, se relacionan los instrumentos de medición utilizados, parámetro que registran y las características técnicas de los mismos:

1. Vibxpert: empleado en la recolección de datos FFT y análisis de señales, para la supervisión y diagnóstico de condiciones de máquinas (Anexo 1).
 - a) Rango de frecuencia de 0,5 Hz a 40 kHz
 - b) Dinámico (medido/total) de 96 dB / 136 dB
 - c) RPM de 10 a 200 000 rpm / \pm . 1 % / \pm . 1 rpm
 - d) Temperatura de -50 a +1 000 °C / \pm . 1 % / \pm . 1 °C
 - e) Desplazamiento 6 000 μ m (p-p) / \pm . 5 %
 - f) Velocidad 6 000 mm/s (p-p) / \pm . 1 %
 - g) Aceleración 6 000 m/s² (p-p) / \pm . 1 %
2. Vibrationpen (SKF): empleado también en la medición de vibraciones.
 - a) Rango de mediciones RMS velocidad de vibraciones 0,1 mm/s hasta 200 mm/s

- b) Frecuencia 10 Hz a 1 kHz
 - c) Temperatura de operación 0 °C hasta 40 °C
3. Manómetros: utilizados para medir presiones en la succión y la descarga.
- 1. Manómetro instalado en la succión (Anexo 2)
 - a) Marca: TM3
 - b) Rango de -1 kgf/cm^2 hasta 15 kgf/cm^2
 - 2. Manómetro instalado en la descarga (Anexo 3)
 - a) Marca: Nuova Fima
 - b) Rango de 0 MPa hasta 1 MPa

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.

2.3 Puntos de medición de las vibraciones

De los puntos de medición de las vibraciones, establecidos en el epígrafe 1.8.1; propuestos por Argulló (1986), Piedra (2000) y Estévez (2013), solo se tomaron en cuenta los puntos 8, 9 y 10, horizontal, vertical y axial respectivamente, relacionados con la bomba y el fenómeno de la cavitación. En presencia de la cavitación, estos puntos podrán definir los niveles de vibraciones relacionados con las presiones en el sistema.

2.4 Caracterización de las bombas utilizadas en el trasiego de carbonato básico de níquel

Los equipos utilizados en la Unidad Básica de Producción “Recuperación de Amoníaco y Cobalto” para el proceso de transporte del carbonato básico de níquel son bombas “5GRT” del tipo IpT 160/71a-Б centrífuga horizontal, de una etapa, con rodete en voladizo. La tubuladura de aspiración está dispuesta de modo horizontal en el eje del árbol, la tubuladura de impulsión está dispuesta verticalmente hacia arriba. El sentido de rotación del rotor de la bomba es contrario a las agujas del reloj mirando del lado del motor. En calidad de empaquetadura del árbol sirve el

prensaestopas blando o empaquetadura de tope. Las bombas están destinadas para bombear hidromezclas de grava, de arena y grava, de escoria, de ceniza y escoria y otras hidromezclas abrasivas con una acidez pH no menos de 6 y no más de 8, densidad hasta de 1300 kg/m^3 a temperatura hasta $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Este sistema de bombeo está constituido por 5 bombas centrífugas, de las cuales 2 se encuentran funcionando en paralelo y las otras 3 de reserva (Anexo 4). Sus principales características son:

Características Técnicas

1. Marca: GRT/160/71a
2. Codificación: Bo-211-A, B, C, D, E
3. Capacidad: $160 \text{ m}^3/\text{h}$
4. NPSHr: 5 m máx.
5. Altura de carga: 63 m
6. Altura de presión: $3,6 \text{ kgf/cm}^2$ o $353\,039,4 \text{ Pa}$
7. Rendimiento: 58,5 %
8. Temperatura del fluido a trasegar menos de $70 \text{ }^\circ\text{C}$
9. Niveles vibracionales, menos de 8,9 mm/s

Características Técnicas del motor eléctrico acoplado a la bomba

1. Potencia: 45 kW
2. Voltaje: 440 V
3. Frecuencia de rotación: $1\,450 \text{ min}^{-1}$

2.5 Características de la pulpa de carbonato básico de níquel

El equipo utilizado en las pruebas fue un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos RHEOTEST 2 de fabricación alemana que se encuentra en uno de los laboratorios del Centro de Investigaciones del Níquel (Anexo 5). En los reómetros de cilindros concéntricos, por lo general el cilindro interior o rotor gira a distintas

velocidades angulares en (min^{-1}), mientras que el cilindro exterior permanece estático. El eje del rotor se conecta a resortes que permiten medir el torque en (Pa), que es necesario aplicar para vencer la resistencia al flujo del líquido contenido entre los dos cilindros. Este equipo tiene un rango de 15 mPa·s hasta 200 Pa·s y es utilizado para fluidos no newtonianos.

Para la determinación del porcentaje de sólido se analizó la muestra en una RAD WAG, analizador de humedad (ver Anexo 6).

2.6 Presión de vapor

La presión de vapor es una propiedad importante a tener en cuenta cuando se transportan fluidos por medio de bombas centrífugas. Un análisis minucioso es requerido por su formación en la succión de la tubería de la bomba, en el orden de prevenir el deterioro en el impelente por bajas presiones producto a la cavitación.

Para la determinación de la presión de vapor, Perry (1997) plantea que los métodos que se utilizan son derivados de la ecuación de Clausius-Clapeyron para presión y temperatura inicial conocidos:

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \left(\frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R}\right) \cdot \left[\left(\frac{1}{T_2}\right) - \left(\frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (2.1)$$

Donde:

P_1 : presión de vapor de la sustancia a la temperatura correspondiente; atm

P_2 : presión de vapor de la sustancia a la temperatura correspondiente; atm

ΔH_{vap} : entalpía de vapor de la sustancia; J/Mol

R: constante de los gases; 8,314 J/(K·Mol)

T_1 : temperatura de la sustancia a la presión correspondiente; K

T_2 : temperatura de la sustancia a la presión correspondiente; K

Pero, en la vida real es raro trabajar con líquidos puros. Usualmente se lidia con líquidos que están mezclados de distintas sustancias. Mayormente estas mezclas

son creadas disolviendo una pequeña cantidad de soluto en una mayor proporción de otra llamada solvente para crear la solución. Esto es conocido como la ley de Raoult:

$$P_{\text{solución}} = P_{\text{solvente}} \cdot X_{\text{solvente}}; \text{ atm} \quad (2.2)$$

Donde:

$P_{\text{solución}}$: presión de vapor de la solución; atm

P_{solvente} : presión de vapor del solvente; atm

X_{solvente} : fracción molar del solvente; adimensional

2.7 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.

2.7.1 Cálculo de la red hidráulica

Para obtener las pérdidas totales en las tuberías y la carga de la red se emplearán estas ecuaciones recomendadas para utilizar con fluidos newtonianos según Shashi (2004).

Velocidad del fluido

La velocidad de flujo en una tubería depende de las dimensiones del conducto y del caudal trasegado, de esta manera la ecuación que la define es:

$$V = \frac{Q}{A}; \text{ m/s} \quad (2.3)$$

Donde:

V: velocidad; m/s

Q: caudal; m³/s

A: área de la sección transversal de la tubería; m²



Área

El conducto es de sección transversal circular por lo que la ecuación que define su área es la siguiente:

$$A = \frac{\pi \cdot d_{\text{tub}}^2}{4}; \text{ m}^2 \quad (2.4)$$

Donde:

d_{tub} : diámetro de la tubería; m

Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional del flujo. Depende de las dimensiones de la tubería, caudal, viscosidad del líquido y la densidad. Es calculado por las ecuaciones siguientes:

$$\text{Re} = \frac{d_{\text{tub}} \cdot V \cdot \rho_{\text{pulpa}}}{\mu_p} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_{\text{pulpa}}}{\pi \cdot d_{\text{tub}} \cdot \mu_p}; \text{ adimensional} \quad (2.5)$$

Donde:

V: velocidad del fluido; m/s

Q: gasto; m³/s

ρ_{pulpa} : densidad de la pulpa de carbonato básico de níquel; kg/m³

μ_p : viscosidad plástica de la pulpa; Pa·s

Diagrama de Moody

El diagrama de Moody, figura 2.1, es la representación gráfica en escala doblemente logarítmica del factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de una tubería.

En la ecuación de Darcy Weisbach aparece el término λ que representa el factor de fricción de Darcy, conocido también como coeficiente de fricción. El cálculo de este coeficiente no es inmediato y no existe una única fórmula para calcularlo en todas las situaciones posibles.

Se pueden distinguir dos situaciones diferentes, el caso en que el flujo sea laminar y el caso en que el flujo sea turbulento. En el caso de flujo laminar se usa una de las expresiones de la ecuación de Poiseuille; en el caso de flujo turbulento se puede usar la ecuación de Colebrook White.

En el caso de flujo laminar el factor de fricción depende únicamente del número de Reynolds. Para flujo turbulento, el factor de fricción depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa de la tubería, por eso en este caso se representa mediante una familia de curvas, una para cada valor del parámetro e/d , donde e es el valor de la rugosidad absoluta, es decir la longitud (habitualmente en milímetros) de la rugosidad directamente medible en la tubería.

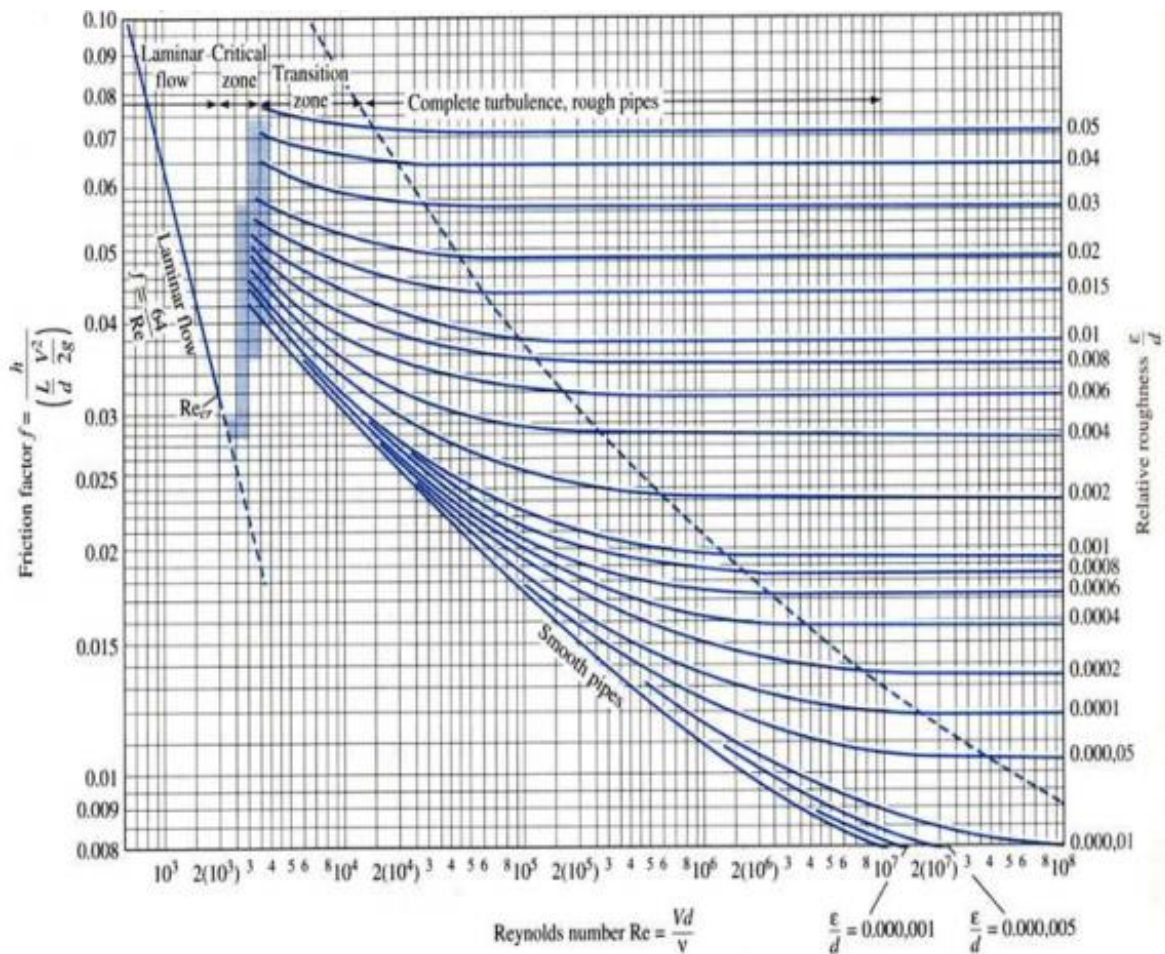


Figura 2.1. Diagrama de Moody. **Fuente:** Shashi (2004).

Factor de fricción

En el diagrama de Moody se puede determinar el factor de fricción de Darcy conociendo la rugosidad relativa de la tubería y el régimen que se presenta en el transporte de la pulpa de carbonato de níquel.

Para número de Reynolds < 2100 aproximadamente, el fluido es considerado laminar. En condiciones de fluido laminar el factor de fricción (también conocido como el factor de fricción de Darcy) se calcula como a continuación:

$$f = \frac{64}{Re}; \text{ adimensional} \quad (2.6)$$

Para condiciones de régimen turbulento, Reynolds > 4000 , se debe determinar según la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{e}{3,7 \cdot d_{\text{tub}}} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right); \text{ adimensional} \quad (2.7)$$

Donde:

f: factor de fricción de Darcy; adimensional

d_{tub} : diámetro interior de la tubería; mm

e: rugosidad absoluta de la tubería; mm

Re: número de Reynolds; adimensional

Cálculo de las pérdidas en la tubería

Las tuberías poseen coeficientes de pérdidas según las resistencias locales que tenga, para esto se definen en la tabla 2.1 los valores tomados en cuenta para las pérdidas en la succión y la descarga:

Tabla 2.1. Accesorios y sus coeficientes de resistencia hidráulica

Accesorios	Válvula	Entrada	Codo 45°	Codo 90°	Salida
Coficiente (ζ)	0,05	0,78	0,24	0,90	1



Definiendo las pérdidas en la succión por la ecuación que se relaciona a continuación:

$$\sum \zeta_{suc} = \zeta_{val} + \zeta_{entr} + \zeta_{cod.45^0}; \text{ adimensional} \quad (2.8)$$

Donde:

ζ_{val} : pérdidas en válvulas; adimensional, se obtiene de la tabla 2.1

ζ_{entr} : pérdida en la entrada de la succión; adimensional, se obtiene de la tabla 2.1

$\zeta_{cod.45^0}$: pérdidas en los codos de 45^0 ; adimensional, se obtiene de la tabla 2.1

Así como en la succión, en la descarga de la bomba también existen coeficientes de pérdidas locales en la red y sus pérdidas se determinan por la ecuación siguiente:

$$\sum \zeta_{imp} = \zeta_{cod.90^0} + \zeta_{val} + \zeta_{cod.45^0} + \zeta_{sal}; \text{ adimensional} \quad (2.9)$$

Donde:

ζ_{sal} - Pérdida en la salida de la impulsión; adimensional, se obtiene de la tabla 2.1

$\zeta_{cod.90^0}$ - Pérdidas en los codos de 90^0 ; adimensional, se obtiene de la tabla 2.1

Por tanto las pérdidas totales de la tubería están definidas por la relación a continuación:

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

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

$$R_c = \left(\lambda_t \cdot \frac{l_t}{d_{tub}} + \sum \zeta_t + 1 \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2}; \text{ adimensional} \quad (2.11)$$

Donde:

l_t : longitud total de la tubería; m

g : aceleración de la gravedad; m/s^2

A: área de la sección transversal; m²

λ_f : pérdidas por fricción; adimensional

Carga de la red

La carga de la red exterior de la instalación de hidrotransporte se recomienda calcular por la ecuación planteada por Alexandro (1986):

$$H_{\text{red}} = \Delta Z + R_c \cdot Q^2; \text{ m} \quad (2.12)$$

Donde:

ΔZ : carga estática total; m

R_c : coeficiente generalizado de la red exterior de la instalación; s²/m⁵

Q: caudal; m³/s

2.7.2 Velocidad específica de aspiración y la carga neta positiva de succión

La velocidad específica de aspiración n_{ss} , según Shashi (2004) se obtiene:

$$n_{ss} = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{(\text{NPSH}_r)^{3/4}} \quad (2.13)$$

Donde:

NPSH_r : altura neta positiva de succión para la máxima eficiencia de la bomba; ft

n: número de revoluciones para la máxima eficiencia de la bomba; min⁻¹

Q: caudal para la máxima eficiencia de la bomba; gal/min

Para la evaluación de las actuales condiciones de funcionamiento de la bomba, calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, es importante la determinación del NPSH_r , que será un despeje de la ecuación 2.11:

$$\text{NPSH}_r = \left(\frac{n \cdot \sqrt{Q}}{n_{ss}} \right)^{4/3}; \text{ ft} \quad (2.14)$$

Donde:

n: número de revoluciones para las condiciones reales de la bomba; min^{-1}

Q: caudal para actual que trasiega la bomba; gal/min

n_{ss} : velocidad específica de aspiración para la máxima eficiencia de la bomba; adimensional

2.7.3 Comprobación de la condición de cavitación en la bomba centrífuga

Con la siguiente metodología se realizan los cálculos para la comprobar si las bombas están trabajando bajo un régimen cavitacional, Pérez (2000).

Pérdidas en la succión, Nekrasov (1968):

$$\Sigma h = \left((\lambda_c \cdot \frac{l_t}{d_{tub}} + \Sigma \xi_{suc}) \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \right) + \left[\left(\frac{\lambda_c}{8 \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g} \right) \right]; \text{ m} \quad (2.15)$$

Donde:

V: velocidad del fluido a la succión de la bomba; m/s

λ_c : pérdidas por fricción a la succión; adimensional

l_t : longitud de la tubería en la succión de la bomba; m

d_{tub} : diámetro de la tubería en la succión de bomba; m

$\Sigma \xi_{suc}$: total de pérdidas locales a la succión de la bomba; adimensional

g: constante de aceleración gravitacional; m/s^2

α : ángulo de inclinación de la tobera; °

D_1 y D_2 : diámetros inicial y final de la tobera, respectivamente; mm

Altura neta positiva en la aspiración

Se denomina **NPSH** (altura neta positiva de succión) 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). Por lo que se deben conocer el NPSH disponible en la instalación y el NPSH requerido por la bomba para diversas condiciones de trabajo.

NPSH disponible

Están en función de la instalación e independiente del tipo de bomba:

$$\text{NPSH}_d = P_{\text{atm}} + H_{\text{succ}} - \Sigma h - H_t; \text{ m} \quad (2.16)$$

Donde:

P_{atm} : presión atmosférica; m

H_{succ} : altura de succión; m

H_t : presión de vapor; m

Σh : pérdidas en la succión; m

NPSH requerido

Dato básico y característico de cada bomba, varía según el modelo, tamaño y condiciones de servicio, recomendada en los datos que facilita el fabricante. Según Shashi (2004) se puede determinar mediante la ecuación 2.12.

Condición de ausencia de cavitación

Un importante parámetro relacionado con el funcionamiento de las bombas centrífugas es la altura neta positiva de succión (NPSH). Este representa la presión absoluta mínima en la succión del impelente de la bomba a una relación de flujo para prevenir la cavitación en la bomba. Si la presión cae por debajo de este valor, el impelente de la bomba puede ser dañado seriamente y su rendimiento inutilizado.

La determinación del NPSH disponible para una bomba en particular y las configuraciones de la red, requiere conocimiento de las dimensiones de la tubería en el lado de succión de la bomba, la elevación del nivel del fluido, y la elevación del ojo del impelente de la bomba en relación con la presión atmosférica y la presión de

vapor del fluido a la temperatura de transportación. El fabricante de la bomba debe especificar que ese modelo particular requiere una cantidad determinada de NPSH conocida como NPSH requerida para un caudal determinado. Basado en la actual configuración de la tubería, elevación y demás parámetros, el NPSH disponible debe ser superior que el NPSH requerido, $NPSH_d > NPSH_r$. Según Bachus y Custodio (2003) el $NPSH_d$ deberá ser, mínimo, un 10 % por encima del $NPSH_r$ o 3 ft mayor. Bachus & Custodio (2003) también hacen referencia a otros autores que expresan que deberá ser mayor la altura neta positiva de aspiración en un 50 % a la requerida, para evitar la cavitación incipiente.

Determinación del balance energético y rendimiento

El balance energético de una bomba centrífuga de la instalación estudiada y su rendimiento se sustentará por método gráfico, valores aportados por el fabricante en el manual de operación de la bomba, figura 2.2.

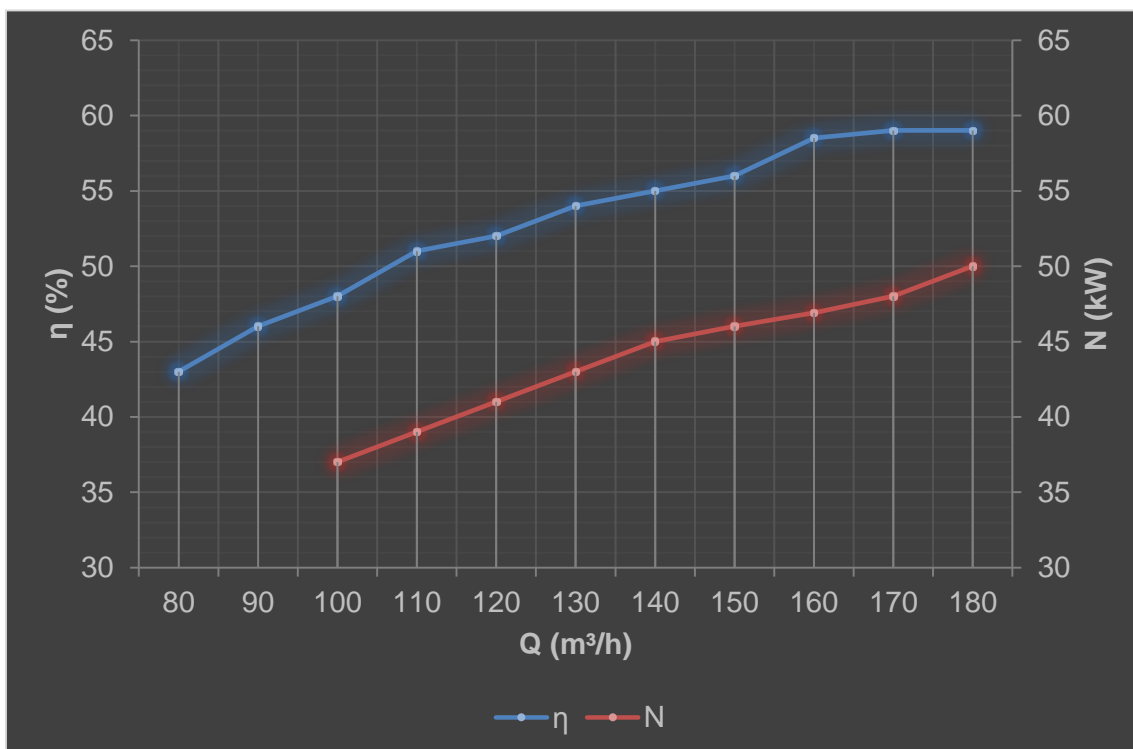


Figura 2.2. Rendimiento y potencia de las bombas GRT/160/71a.

2.8 Metodología empleada para la valoración económica

Para la valoración económica se analizará el costo de mantenimiento y gasto para la transportación de 1 m³ de pulpa de carbonato básico de níquel, cuando la bomba opera en estado de régimen de cavitación y sin la presencia del fenómeno.

Gasto de explotación de la instalación actual para transportar un m³ de pulpa de carbonato básico de níquel a 116,98 m de distancia

$$G_{\text{exp}} = \left(\frac{G_b \cdot L}{Q} \right); \text{CUC} \quad (2.17)$$

Donde:

G_b : gasto anual de explotación de una bomba; CUC/año

Q : caudal de cola transportada por una bomba en un año; m³/año

L : longitud de la línea que va a los sedimentadores; m

Gasto anual de explotación de una bomba

$$G_b = V + F; \text{CUC/año} \quad (2.18)$$

Donde:

V : gastos unitarios variables; CUC/año

F : gastos fijos globales; CUC/año

Gastos unitarios variables

$$V = g_s + g_{\text{elec}} + g_{\text{mant}} + g_{\text{imp}} + g_{\text{eil}}; \text{CUC/año} \quad (2.19)$$

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 de mantenimiento; CUC/año

g_{imp} : gastos imprevistos; CUC/año



g_{eli} : gatos por iluminación; CUC/año

Gastos fijos globales

$$F = g_{spi}; \text{CUC/año} \quad (2.20)$$

Donde:

g_{spi} : gasto del salario del personal indirecto

Gasto anual por consumo de energía eléctrica

$$g_{elec} = \frac{T_a \cdot N \cdot K_p \cdot t}{\eta}; \text{CUC/año} \quad (2.21)$$

Donde:

T_a : tarifa de corriente eléctrica; CUC/kW·h

N : potencia consumida por el motor durante la transportación de la pulpa; kW

K_p : coeficiente de pérdida; adimensional

t : cantidad de horas de funcionamiento en el año; h

η : rendimiento del motor eléctrico; %

Gasto anual de consumo de energía eléctrica por iluminación

$$g_{eil} = N_i \cdot T_a \cdot T_{pi}; \text{CUC/año} \quad (2.22)$$

Donde:

N_i : potencia consumida por iluminación; kW

T_{pi} : cantidad de horas de operación en el año; h

Gastos de salario del personal directo en la instalación

$$g_s = t_a \cdot t_n \cdot K_{ss} \cdot K_{dr} \cdot K_{pc}; \text{CUC/año} \quad (2.23)$$

Donde:

t_a : tarifa salarial del operario; CUC/h



t_n : tiempo de trabajo del operario en la instalación; h

K_{ss} : coeficiente de seguridad social; adimensional

K_{dr} : coeficiente de descanso distribuido; adimensional

K_{pc} : Coeficiente de pago complementario; adimensional

$$K_{pc} = 1 + \frac{c}{100}; \text{ adimensional} \quad (2.24)$$

c: Porcentaje de pago complementario; 3 %.

2.9 Conclusiones del capítulo 2

1. Se propusieron los materiales y métodos para la evaluación de parámetros como las vibraciones asociadas al fenómeno de la cavitación y las presiones de trabajo manejadas en la instalación que propician su ocurrencia,
2. Se estableció una metodología para determinar los parámetros que puedan caracterizar el régimen de trabajo para la estación de bombeo de pulpa carbonatal y la presión de vapor generada por el fluido, factores fundamentales para la evaluación de la cavitación,
3. Se tuvo en cuenta entre otros parámetros, el balance energético de la bomba y el rendimiento de la instalación, parámetros importantes para la valoración económica.

CAPITULO 3

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

3.1 Introducción

El correcto funcionamiento del equipamiento de las instalaciones de bombeo, que se utilizan en el hidrot transporte, se puede lograr aplicando condiciones adecuadas de explotación. Con este propósito es necesario evaluar, analizar y determinar el régimen de trabajo de las bombas. El **objetivo** de este capítulo es mostrar los resultados obtenidos para esta investigación; comportamiento de las vibraciones en función de las presiones en presencia del fenómeno de la cavitación, la evaluación de los parámetros de trabajo de la estación de bombeo que inciden en su cavitación, la valoración económica y el impacto ambiental.

3.2 Características de la pulpa

Se tomaron muestras de las líneas de bombeo con las características actuales de la pulpa en la descarga de las bombas hacia los sedimentadores de la UBP “Calcinación y Sínter”. Las muestras analizadas en el RAD WAG (analizador de humedad) muestran un resultado de 1% de presencia de sólido por litro de la pulpa. La pulpa de carbonato básico de níquel posee muy poco contenido de sólido y las pruebas reológicas en el RHEOTEST 2, no ofrecen los resultados comprendidos entre los valores de medición del equipo, para una densidad de 1010 kg/m^3 , a una temperatura de $98 \text{ }^\circ\text{C}$, caracterizándolo como un fluido newtoniano, por tanto se considerará como si fuera agua a la temperatura de transportación de la pulpa, con una viscosidad plástica de $0,0003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

3.3 Análisis del espectro de las vibraciones

Para la de detección de la cavitación en la instalación de bombeo de carbonato básico de níquel, se empleó el método por medición de los ruidos y vibraciones que acompañan al funcionamiento de la máquina. Aunque los niveles de ruidos no se midieron, se prestó mucha atención a estos, ya que de igual manera caracterizan la aparición de la cavitación. La medición de las vibraciones en los puntos definidos en

el epígrafe 2.3 para la máquina objeto de estudio, permitió obtener una señal temporal para posteriormente procesarla en el dominio de la frecuencia e identificar su origen. Para lograrlo se realizaron mediciones, 5 comprobaciones radiales, 5 horizontales y 5 axiales. Utilizando el Vibxpert en la recolección de datos y análisis de señales se obtuvo el espectro que se presenta en la figura 3.1, tomado en la dirección axial, eje en el que se manifiesta la presencia de la cavitación en las bombas centrífugas. Los espectros de estas mediciones se muestran en el Anexo 7.

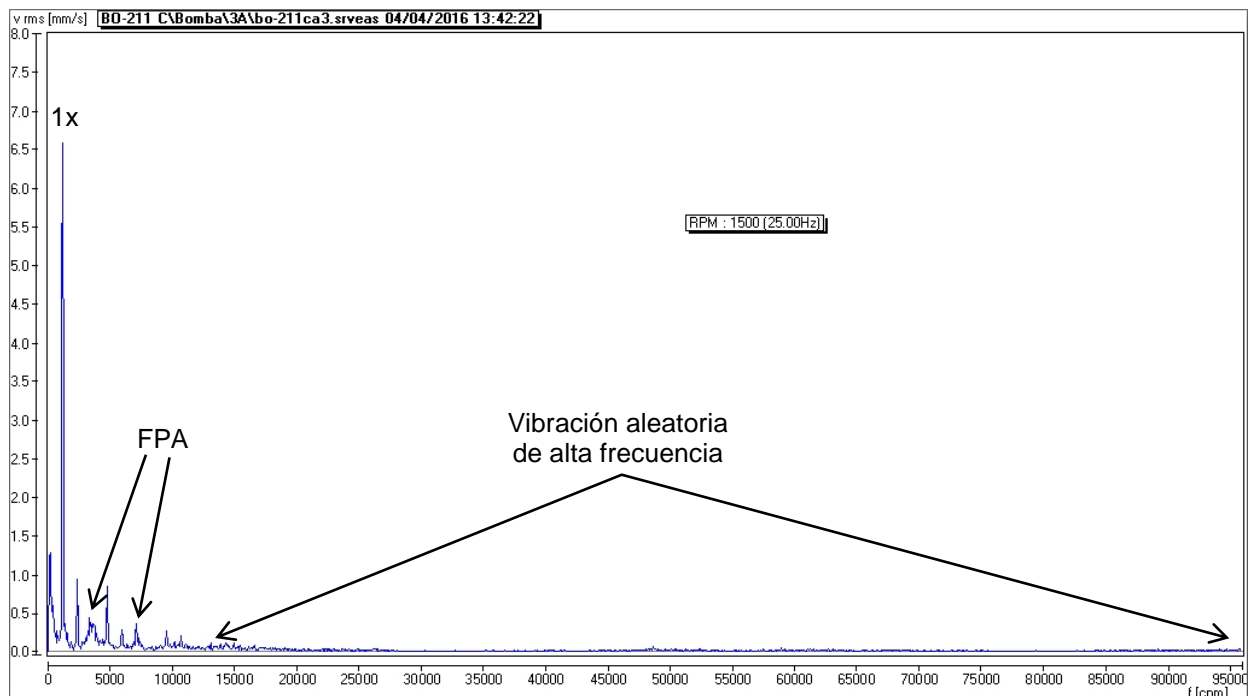


Figura 3.1. Espectro vibracional de la bomba Bo-211 C en el trasiego de pulpa.

En la figura 3.1, se puede observar, en el primer pico, una señal perteneciente a un subarmónico que caracteriza una señal de turbulencia o inestabilidad hidráulica en la impulsión de la bomba. El segundo pico (1x) es una señal sincrónica que describe la frecuencia de rotación de la máquina, de esta se derivan los picos armónicos representados en el orden de 2, 3, 4, 5, 6 y 8x siendo común el tercer y sexto orden con la frecuencia de paso de los álabes (FPA). La zona comprendida entre la menor y mayor frecuencia, con valores de 12 500 y 95 000 cpm, presenta una señal alterada con una amplitud de 0,15 mm/s, ubicada después de las señales emitidas por los pasos de los álabes y sus armónicos, esta perturbación se puede interpretar

como indicios de una aspiración insuficiente que demuestra la existencia de cavitación en estas bombas, pudiendo excitar las demás señales.

3.4 Presión de vapor de la pulpa de carbonato básico de níquel

Una propiedad importante a tener en cuenta cuando se transportan fluidos por medio de bombas centrífugas, es la evaluación de la presión de vapor, por lo que se procuró determinar las presiones de vapor de la pulpa de carbonato básico de níquel, correspondientes a las temperaturas que las generan a través de la ecuación 2.1 de Clausius Clapeyron, pero no se conocen presiones y temperaturas iniciales ni la entalpía de vapor para la hidromezcla, por lo que fue necesario utilizar la ley de Raoult, ecuación 2.2, ya que conociendo cual es el solvente (agua) y sus presiones de vapor se pueden determinar las propiedades de la solución. En tabla 3.1 se muestran las propiedades de presión de vapor para el agua según Perry (1997).

Tabla 3.1. Presión de vapor del agua

Temperatura (°C)	Presión de vapor (kPa)
0	0,6
20	2,3
40	7,4
60	19,9
80	47,4
100	101,3
150	474,0

Para la determinación de la fracción molar de la sustancia, se debe establecer la cantidad de moles del soluto y el solvente, por esto, se muestran en la tabla 3.2 el peso atómico de los átomos que componen la solución reconociendo que para el agua la fórmula química es H_2O y para el carbonato de níquel $Ni(CO_3)_2$.

Tabla 3.2. Peso atómico de los átomos que componen la pulpa de carbonato básico de níquel

Elemento	Símbolo	Peso Atómico
Carbono	C	12,01 u
Hidrógeno	H	1,01 u
Oxígeno	O	16,00 u
Níquel	Ni	58,71 u

Conociendo el peso atómico y la cantidad de los átomos que componen la sustancia, se puede determinar la masa molecular para el Carbonato de Níquel y para el Agua como se representa en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Masa molecular del H_2O y $Ni(CO_3)_2$

Átomos del H_2O	Cantidad	Peso Atómico	Total
Hidrógeno	H-2	1,01 u	2,02 u
Oxígeno	O-1	16,00 u	16,00 u
Masa Molecular			18,02 (g/Mol)
Átomos del $Ni(CO_3)_2$			
Níquel	Ni-1	58,71 u	58,71 u
Carbono	C-2	12,01 u	24,02 u
Oxígeno	O-6	16,00 u	96,00 u
Masa Molecular			178,73 (g/Mol)

Como se determinó en la tabla 3.3, el Agua posee una masa molecular de 18,02 g/mol y el Carbonato de Níquel 178,73 g/mol, sus unidades de medida están dadas por la constante de Molle. La masa molecular es un dato importante para la determinación de la cantidad de moles que representan estas sustancias de la solución.

La pulpa posee 1 % de sólido por cada litro, lo que representa 10 g de carbonato básico de níquel por cada 1 kg de pulpa, entonces:

Moles (H_2O): $1\,000\text{ g} \cdot 1\text{ mol}/18,02\text{ g} = 55,50\text{ moles}$

Moles ($\text{Ni}(\text{CO}_3)_2$): $10\text{ g} \cdot 1\text{ mol}/178,73\text{ g} = 0,055\text{ moles}$

La solución tiene un total de 55,549 moles, por lo que la fracción molar del Agua es de 0,998. Esto significa que la presión de la pulpa de carbonato básico de níquel, tendrá una desviación de la presión de vapor del solvente equivalente a la fracción molar. En la figura 3.2 se muestra el comportamiento de la curva de presión de vapor para la pulpa de carbonato básico de níquel con las actuales características físicas, determinada a partir de la ley de Raoult, ecuación 2.2.

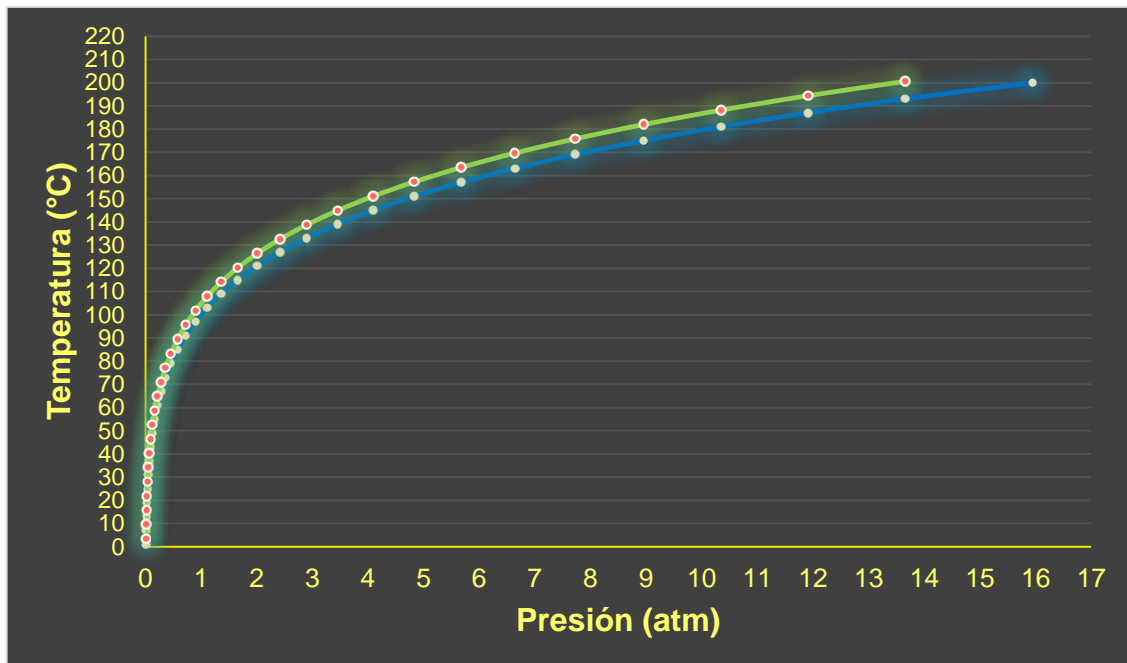


Figura 3.2. Presión de vapor del carbonato básico de níquel.

En la figura 3.1 se presentan las curvas de las presiones de vapor del Agua y de la pulpa de Carbonato Básico de Níquel, azul y verde respectivamente. Así pues, la pulpa genera una presión de vapor de 0,787 atm (79 kPa) a 98 °C.

3.5 Caída de presión y vibraciones asociadas

Con el objetivo de determinar los factores que inciden directamente en la cavitación de las bombas objeto de estudio, se realizaron mediciones con las que se pueden comprobar que efectivamente existe inestabilidad del fluido en la succión,

produciendo en consecuencia vibraciones en las turbomáquinas. Los niveles de presión registrados y las vibraciones provocadas en las bombas se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Presiones y niveles de vibraciones asociados

P_s (kPa)	P_d (kPa)	V_v (mm/s)	V_H (mm/s)	V_A (mm/s)
39,22	98,06	3,2	2,5	4,3
29,42	98,06	3,3	2,4	4,6
19,61	98,06	3,9	2,2	6,2
9,8	98,06	4,1	2,4	6,4
0	98,06	6,4	4,5	11,9

Las presiones registradas en las mediciones como se pueden observar en la tabla 3.4 son variables, presentando insuficiencia en la alimentación de las bombas. Las presiones en la succión de la bomba pueden alcanzar valores de $0,4 \text{ kgf/cm}^2$ (39,22 kPa), manifestando niveles de vibraciones cercanos a los 3,2; 2,5 y 4,3 en las direcciones verticales, horizontales y axiales respectivamente. Para los valores mínimos existe una intermitencia del fluido por intervalos muy cortos en los que no hay presión en la succión generando niveles de vibraciones de hasta 11,9 mm/s.

En cuanto a los niveles de vibraciones mínimos, según la Norma Cubana e ISO 10816-3: 2005, para el Grupo 3 (Bombas centrífugas de impulsores multiaspas con motor separado y potencia sobre 15 kW) para soporte rígido, se ubican generalmente en la zona B, máquinas con vibración normalmente consideradas aceptables para operar sin restricción en un período largo de tiempo; pero para los mayores niveles registrados se encuentran en los límites superiores de la zona C, estas son máquinas normalmente consideradas insatisfactorias para una operación continua en un tiempo prolongado y generalmente pueden operar por un periodo limitado en esta condición hasta que se presente una oportunidad conveniente para reparar la máquina y en los límites inferiores de la zona D, representando que los valores de la vibración de esta zona son considerados normalmente como suficientemente severos para causar

daño a la máquina. De esta manera los efectos vibratorios que ocurren frecuentemente se pueden considerar dañinos para las bombas de la instalación de trasiego del carbonato básico de níquel, lo que se evidencia en su proceso de operación.

La fluctuación de presión, puede ser sin dudas, origen de las formaciones de cavidades en el trasiego del fluido, según lo planteado por Pérez (1983), donde la presión se hace inferior a la tensión de vapor correspondiente a la temperatura a que se encuentra el líquido, provocando este descenso cavidades pequeñas ocupadas por burbujas de vapor, que arrastradas por la corriente colapsan en lugares de mayor presión. Precisamente lo planteado es lo que ocurre en la instalación de bombeo de la pulpa de carbonato básico de níquel con las caídas de presión, representado en el figura 3.3.

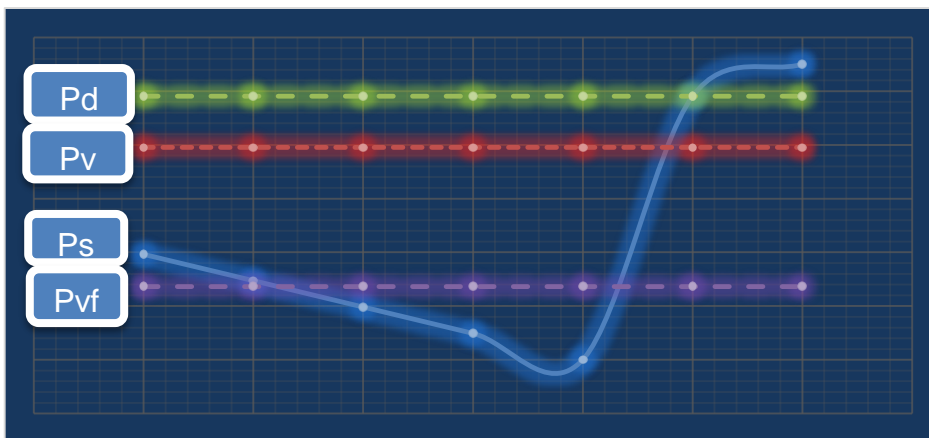


Figura 3.3. Comportamiento de las presiones.

En la figura 3.3 la succión de las bombas, las presiones registradas se encuentran por debajo de la presión de vapor generada por la pulpa de carbonato básico de níquel a la temperatura de transportación, sobrepasando este límite cuando alcanza las mayores presiones en el impelente. Para la condición límite de temperatura de transportación suministrada por el fabricante a 70 °C, la presión de vapor alcanza niveles de satisfactorios, en comparación con los actuales, aunque solo se logre mitigar un poco la magnitud de la cavitación.

3.6 Resultados del cálculo de la red hidráulica

Se evaluó la instalación mediante una metodología para fluidos newtonianos en función de las características de la pulpa, según su clasificación reológica. Los valores necesarios para la determinación de los resultados son mostrados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros necesarios

Variables	Valores	U/M	Comentario
A_i	0,025	m ²	Área de la tubería de entrada
A_o	0,017	m ²	Área de la tubería de descarga
R_c	27 882,485	-	Coefficiente de resistencia total
$\Sigma\zeta_{suc}$	1,550	-	Pérdidas locales en la succión
$\Sigma\zeta_{imp}$	6,930	-	Pérdidas locales en la impulsión
P_{atm}	10,327	m	Presión atmosférica
H_t	8,140	m	Presión de vapor
f_i	0,038	-	Factor de Darcy para la tubería de succión
f_o	0,050	-	Factor de Darcy para la tubería de descarga
n	1 180	min ⁻¹	Número de revoluciones de la bomba
d_{tubi}	180	mm	Diámetro de la tubería de succión
d_{tubo}	150	mm	Diámetro de la tubería de descarga
l_{ti}	14	m	Longitud de la tubería de succión
l_{to}	116,98	m	Longitud de la tubería de descarga

Estos parámetros son necesarios para la determinación de los valores que caracterizan el funcionamiento de la instalación de bombeo de carbonato básico de níquel, por ejemplo, los diámetros y longitudes de las tuberías que la componen y los coeficientes de pérdidas locales. Los coeficientes del factor de fricción de Darcy se determinaron mediante el diagrama de Moody, utilizando una rugosidad relativa de la tubería en la succión de 0,012 y 0,02 para el tramo de descarga.

Los parámetros de funcionamiento se lograron mediante un cálculo dinámico, variando el caudal de la bomba desde el valor mínimo hasta el máximo, los resultados se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Parámetros funcionales de la estación de bombeo de carbonato básico de níquel

Q (m ³ /h)	Re (-)	ΔZ (m)	H _{red} (m)	H _{succ} (m)	NPSH _d (m)	NPSH _r (m)
0	661,50	5,679	5,679	6	8,186	0
16,266	107 601,36	5,982	6,551	5,696	7,862	0,051
32,432	214 541,21	6,285	8,548	5,393	7,494	0,204
48,598	321 481,07	6,588	11,670	5,090	7,084	0,460
64,764	428 420,92	6,892	15,916	4,786	6,632	0,818
80,930	535 360,77	7,195	21,286	4,483	6,137	1,278
112,942	747 122,86	7,796	35,239	3,882	5,031	2,490
129,108	854 062,71	8,099	43,961	3,579	4,409	3,255
145,274	961 002,56	8,402	53,807	3,276	3,745	4,121
160	1 058 413,10	8,679	63,755	3	3,103	5

En los parámetros funcionales está definido el comportamiento de variables como el número de Reynolds, la altura de la red y la disminución de la altura de succión teniendo en cuenta el aumento del caudal. También las condiciones de altura neta positiva de aspiración disponible y requerida para la evaluación de la condición de ausencia de cavitación. Estos valores permiten definir las diferentes curvas del sistema hidráulico.

En la figura 3.4, se representa el comportamiento de las curvas de operación teniendo en cuenta las características actuales del sistema de bombeo. En el cual queda definido el punto de trabajo para una bomba en operación a los 129,58 m³/h, con una altura de 44,23 m y para dos bombas en paralelo el caudal es de 132,3 m³/h, con una altura de 45,88 m. También está representado el punto en el que el NPSH_d se iguala al NPSH_r, definiendo la zona de cavitación en los 141,43 m³/h, con 3,90 m de altura. Considerando lo planteado por Bachus & Custodio (2003), el margen de cavitación está definido además por un 10 % o 3 ft mayor el NPSH_d que el requerido, a partir del cual la zona de cavitación está presente de manera incipiente. Lo que demuestra que la cavitación está presente en el funcionamiento de las bombas en paralelo a partir de los 130 m³/h.

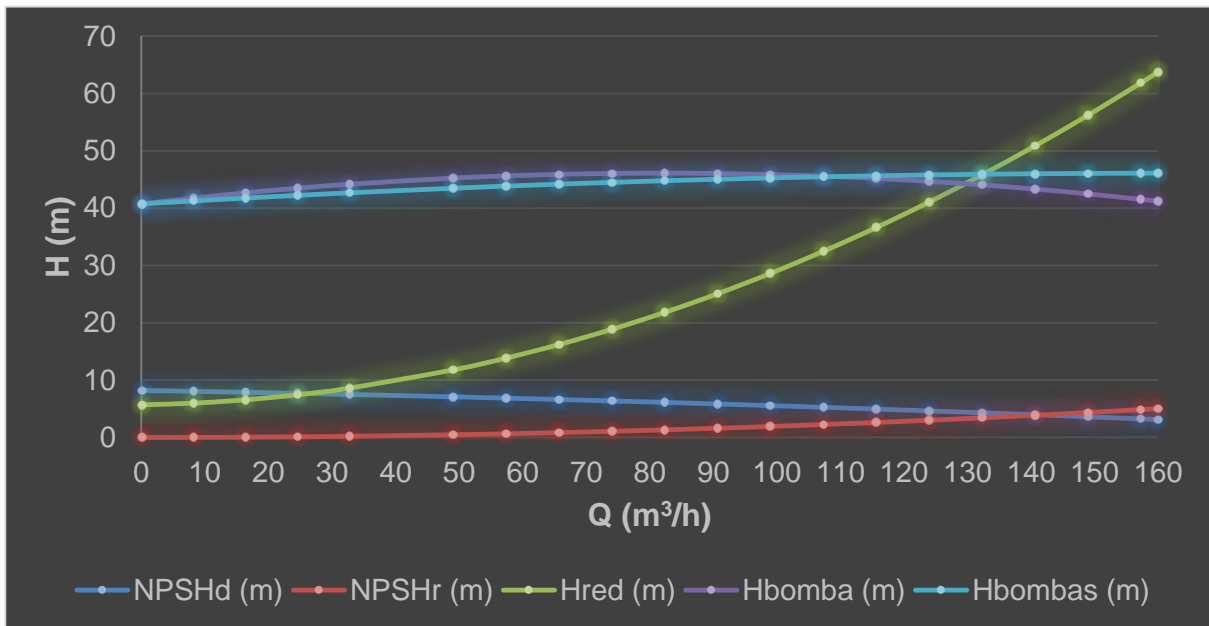


Figura 3.4. Curvas del sistema hidráulico de carbonato básico de níquel.

En consecuencia, valorando la altura neta positiva de aspiración disponible necesaria para evitar la cavitación, contra la altura de succión del tanque que le corresponde, se obtuvo la figura 3.5.

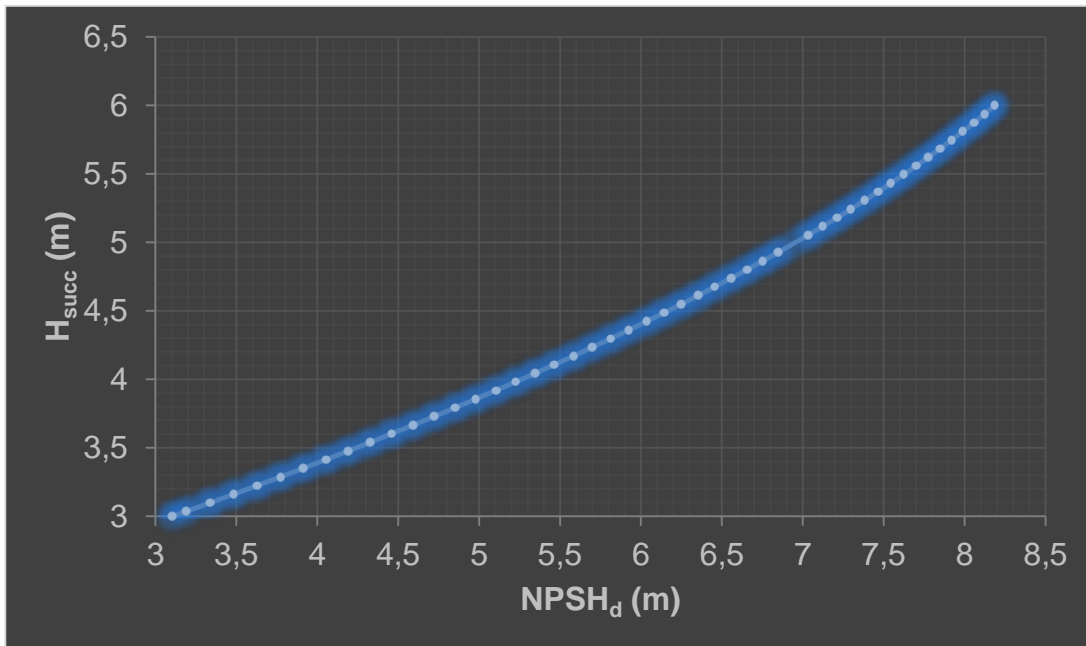


Figura 3.5. Altura neta de succión positiva crítica.

En la curva de $NPSH_d$ contra H_{succ} se relacionan los valores correspondientes entre estas variables, pudiendo arribar a la conclusión de que es necesario mantener una altura de succión mayor de 3,54 m para lograr una altura neta de succión positiva superior a la crítica de 4,33 m, punto inicial en el cual la cavitación podría ser incipiente. Esto significa que, se debe garantizar que el nivel del líquido esté por encima del borde superior de la toma de succión con valores mayores que 0,55 m.

Resultados del balance energético y rendimiento

La determinación del balance energético de una bomba, a través de las características proporcionadas por el fabricante en el manual de la bomba, establecieron que para un caudal de 129,58 m³/h su rendimiento con un es del 54 % y su potencia es de 43 kW.

3.7 Valoración económica.

En el análisis de la valoración económica se consideraron dos situaciones: una, para la determinación del costo de explotación de la instalación para la transportación de un m³ de pulpa considerando que no se encuentra operando en estado cavitacional; y la segunda situación, para la determinación del gasto de explotación de la instalación para la transportación de un m³ de pulpa, considerando las afectaciones que se producen cuando se encuentra en presencia de la cavitación.

3.7.1 Determinación del gasto de explotación de la instalación para transportar un m³ de pulpa de carbonato de níquel a 116,96 m de distancia sin cavitación

Para la primera variante, instalación funcionando en condiciones normales sin cavitación para un caudal de 130 m³/h, considerando los gastos por mantenimiento teniendo en cuenta la mano de obra, costos por materiales y costos indirectos, están generados por:

1. Un mantenimiento preventivo planificado con importe de 262,49 CUC semestral,
2. Cambio de lubricantes con un costo total de 8,45 CUC,
3. Revisión mecánica con un costo total de 178,37 CUC.

En la tabla 3.7 se muestran los valores obtenidos bajo estas condiciones.

Tabla 3.7. Gastos para la transportación de un m^3 , funcionando la instalación en condiciones normales

Variable	Valor	U/M	Comentario
g_s	238,199	CUC/año	Gastos en salario de los operarios de la instalación
g_{elec}	1 615,975	CUC/año	Gasto por consumo de energía eléctrica
g_{man}	449,310	CUC/año	Gastos por mantenimiento
g_{imp}	2 000	CUC/año	Gastos imprevistos
g_{eil}	0	CUC/año	Gastos por iluminación
g_{spi}	2 100	CUC/año	Gastos del salario del personal indirecto
T_a	0,06	CUC/kW·h	Tarifa de corriente eléctrica
N	45	kW	Potencia consumida por el motor durante la transportación
K_p	6,6		Coefficiente de pérdida
t	8 760	h/año	Cantidad de horas de funcionamiento en el año
η	96,6	%	Rendimiento del motor eléctrico
N_i	0	kW	Potencia consumida por iluminación
T_{pi}	0	h/año	Cantidad de horas de operación en el año
t_a	0,022	CUC/h	Tarifa salarial del operario
t_n	730	h/mes	Tiempo de trabajo del operario en la instalación
K_{ss}	1,1	-	Coefficiente de seguridad social
K_{dr}	1,09	-	Coefficiente de descanso distribuido
K_{pc}	1,03	-	Coefficiente de pago complementario
c	3	%	Porcentaje de pago complementario 3 %
V	4 303,485	CUC/año	Gastos unitarios variables
F	2 100	CUC/año	Gastos fijos globales
G_b	6 403,485	CUC/año	Gasto anual de explotación de una bomba
G_{exp}	0,657	CUC/ m^3	Costo de 1 m^3 a 117 m

En tabla 3.7 se relacionan los resultados de la valoración económica para la primera variante. Se tomaron en cuenta criterios proporcionados por la Empresa para la tarifa salarial, para los gastos indirectos y los coeficientes de seguridad social, de descanso distribuido y de pago complementario. Los resultados arrojan un gasto anual de explotación de una bomba por 6 403,485 CUC/año con un caudal de 1 138 800 m^3 /año de los cuales el costo de transportación es equivalente a 0,657 CUC/ m^3 a aproximadamente 116,98 m de distancia.



Valorando, que en un m³ hay 10 kg del semiproducto necesario para la producción, sería necesario para lograr la tonelada transportar 100 m³, costando 131,4 CUC/t, empleando las dos bombas en paralelo. Considerando el 100 % de la materia prima como producto final, o sea, sin pérdidas, con un precio del níquel de 8 685,88 CUC/t con fecha mayo 2016, fuente: Bolsa de Metales de Londres (LME), Mercado de Shanghai (SMM); y que de la tonelada que produce la Empresa el porciento del contenido de níquel es del 90 %, la tonelada del producto final tendría beneficios de 7 685,892 CUC/t por concepto de transportación de la UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto” hacia los sedimentadores de la UBP “Calcinación y Sínter”.

3.7.2 Determinación del gasto de explotación de la instalación para transportar un m³ de pulpa de carbonato de níquel a 116,96 m de distancia bajo régimen cavitacional

Cuando la instalación cavita el flujo de pulpa se afecta en un 3 %, debido a esto la potencia consumida por el motor aumentara 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 116,96 m de distancia. Los gastos no calculados en esta variante se mantienen iguales a los de la variante anterior, ya que no varían. Los costos generados por mantenimiento teniendo en cuenta los costos por mano de obra, costos por materiales empleados y costos indirectos son generados por:

1. Recuperación del semicopling con un costo de 20,06 CUC,
2. Romper, encofrar y fundir la base de la bomba con un costo de 398,57 CUC,
3. Reparación de la bomba con un costo de 1 652,23 CUC,
4. Mantenimiento preventivo planificado con un costo de 262,49 CUC,
5. Pago del servicio con GSC-1049 en el montaje de bomba y fabricación de pernos de anclaje M24 con un costo total de 115,91 CUC,
6. Cambio de un impelente por año con un costo de 708,86 CUC,
7. Cambio de los rodamientos con un costo de 579,06 CUC dos veces por año

8. Cambio de empaquetadura cada dos meses por un costo de 73,76 CUC/kg, se utilizan 3 kg.

En la tabla 3.8 se muestran los valores obtenidos bajo estas condiciones.

Tabla 3.8. Gastos para la transportación de un m^3 , funcionando la instalación bajo régimen cavitacional

Variable	Valor	U/M	Comentario
g_s	238,199	CUC/año	Gastos en salario de los operarios de la instalación
g_{elec}	1 615,975	CUC/año	Gasto por consumo de energía eléctrica
g_{man}	4 537,520	CUC/año	Gastos por mantenimiento
g_{imp}	2 000	CUC/año	Gastos imprevistos
g_{eil}	0	CUC/año	Gastos por iluminación
g_{spi}	2 100	CUC/año	Gastos del salario del personal indirecto
T_a	0,06	CUC/kW·h	Tarifa de corriente eléctrica
N	45	kW	Potencia consumida por el motor durante la transportación
K_p	6,6		Coefficiente de pérdida
t	8 760	h/año	Cantidad de horas de funcionamiento en el año
η	96,6	%	Rendimiento del motor eléctrico
N_i	0	kW	Potencia consumida por iluminación
T_{pi}	0	h/año	Cantidad de horas de operación en el año
t_a	0,022	CUC/h	Tarifa salarial del operario
t_n	730	h/mes	Tiempo de trabajo del operario en la instalación
K_{ss}	1,1	-	Coefficiente de seguridad social
K_{dr}	1,09	-	Coefficiente de descanso distribuido
K_{pc}	1,03	-	Coefficiente de pago complementario
c	3	%	Porcentaje de pago complementario 3 %
V	8 391,695	CUC/año	Gastos unitarios variables
F	2 100	CUC/año	Gastos fijos globales
G_b	10 491,695	CUC/año	Gasto anual de explotación de una bomba
G_{exp}	1,111	CUC/ m^3	Costo de 1 m^3 a 117 m

En tabla 3.8 se relacionan los resultados de la valoración económica para la segunda variante. Los costos generados por el mantenimiento se evaluaron para los fallos que son consecuencia de la cavitación y las frecuencias con las que ocurren en la instalación. Los resultados arrojan un gasto anual de explotación de una bomba por 10 491,695 CUC/año con un caudal de 1 104 636 m^3 /año de los cuales el costo de

transportación es equivalente a 1,111 CUC/m³ a aproximadamente 116,98 m de distancia.

Valorando, que en un m³ hay 10 kg del semiproducto necesario para la producción de la Empresa, sería necesario para lograr la tonelada transportar 100 m³, costando 222,25 CUC/t, empleando las dos bombas en paralelo. Considerando el 100 % de la materia prima como producto final, o sea, sin pérdidas, con un precio del níquel de 8 685,88 CUC/t con fecha mayo 2016, fuente: Bolsa de Metales de Londres (LME), Mercado de Shanghai (SMM); y que de la tonelada que produce la Empresa el porcentaje del contenido de níquel es del 90 %, la tonelada del producto final tendría beneficios de 7 595,042 CUC/t por concepto de transportación de la UBP “Recuperación de Amoníaco y Cobalto” hacia los sedimentadores de la UBP “Calcinación y Sínter”.

3.8 Impacto medio ambiental

Durante varios años de explotación la Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara” ha producido un gran impacto negativo sobre el medio ambiente, debido a problemas tecnológicos y poca práctica de las medidas ambientales establecidas en todo el periodo de explotación. Se han originado afectaciones medioambientales severas relacionadas con el vertido de efluentes líquidos crudos, la gran disposición de los residuos sólidos; así como la emisión a la atmósfera de grandes volúmenes de polvo.

La estación de bombeo se ve afectada directamente por la acumulación de polvo de carbonato básico de níquel, que se emite al ambiente en la en la práctica del mantenimiento de las líneas y en los alambiques de licor amoniacal, estos residuos son dañinos para la salud del hombre, afectando a los operadores que participan en el sistema de bombeo al no utilizar correctamente los medios de seguridad.

La Conferencia Americana de Industrias Higienistas Gubernamentales declaró como cancerígeno las altas concentraciones de carbonato de níquel y existe suficiente información de cáncer producto a la exposición de estos residuos. Los síntomas de su inhalación son una tos seca, al contacto con la piel la irrita enrojeciéndola y

provocando dolor, su incidencia en la vía ocular es enrojecimiento. Una mala higiene y condiciones de trabajo pueden contribuir a enfermedades gastrointestinales.

Medidas constructivas para eliminar estos problemas

1. Mantener la cultura industrial, eliminando toda la sedimentación de polvo de carbonato básico de níquel acumulado en la UBP,
2. Recirculación del fluido en las líneas que no se encuentran en operación, de esta manera se reduce el número de intervenciones,
3. Controlar que el personal utilice los medios de seguridad en los mantenimientos de la instalación.

3.9 Conclusiones del capítulo 3

1. Las mediciones realizadas a las presiones permitieron definir las como inestables, situándolas por debajo de la presión de vapor que genera la pulpa con valores de 0,787 atm (79 kPa) a 98°C, considerándose esta una situación potencial para el origen de la cavitación, se demuestra insuficiencia en la alimentación de las bombas, generando niveles de vibraciones de hasta 11,9 mm/s, valores considerados normalmente como suficientemente severos para causar daño a la máquina,
2. Mediante la metodología de cálculo se determinaron las curvas de operación de las bombas objeto de estudio teniendo en cuenta las características actuales del sistema de bombeo, con un punto de operación para una bomba a los 129,58 m³/h con una altura de 44,23 m y para dos bombas en paralelo el caudal es de 132,3 m³/h con una altura de carga de 45,88 m, en las que la zona de cavitación estaría presente de manera incipiente, iniciando a partir de los 130 m³/h,
3. También se pudo identificar como factor causante de la cavitación, la disminución de la altura de succión por debajo del valor de 3,54 m, punto en el que el NPSH_d se vuelve crítico para el origen de la cavitación con un valor de 4,33 m. Debe garantizarse que el nivel del líquido esté por encima del borde superior de la toma de succión con valores mayores que 0,55 m.



4. El estudio arrojó que cuando la instalación de bombeo de carbonato básico de níquel funciona correctamente el costo de producción para la Empresa, es de hasta 131,4 CUC/t y cuando está bajo régimen cavitacional es de hasta 222,25 CUC/t.

CONCLUSIONES GENERALES



CONCLUSIONES GENERALES

1. Mediante la investigación se determinaron los factores fundamentales que provocan la cavitación en las bombas que trasiegan la pulpa de carbonato, mostrándose como causa fundamental de cavitación el descenso de la altura de succión a menos de 3,55 m,
2. Las mediciones realizadas arrojaron que la cavitación en esta instalación, genera vibraciones con valores superiores a 6,8 mm/s y son considerados suficientemente severos como para causar daños al equipo en condiciones de operación continua,
3. En la valoración económica se determinó que la Empresa incurre en pérdidas valoradas en 90,85 CUC/t, cuando la instalación de bombeo de carbonato básico de níquel trabaja en condiciones de cavitación.

RECOMENDACIONES



RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la utilización de un instrumento de medición para controlar el nivel en el tanque despresurizador, para garantizar que el nivel del líquido esté por encima del borde superior de la toma de succión con valores mayores que 0,55 m,
2. Evaluar la implementación de un diseño que le garantice mayor altura de succión a la bomba,
3. Instalar equipos de medición para el control de los principales parámetros de las bombas.

BIBLIOGRAFIA



BIBLIOGRAFÍA

1. Alexandro, B. I. y Kuleshov, A. A. 1986: *Investigación y establecimiento de los regímenes de la transportación de las colas del beneficio de la Fca. No. 3 de Dshezkazgan GMK*. Leningrado.
2. Argulló, J., Cardona, S. y Barjan, A. 1986: *Razones y métodos de la Medición de las vibraciones en la industria*. Automática e Instrumentación; octubre.
3. Bachus, L. y Custodio, A. 2003: *Know and Understand Centrifugal Pumps*. Elsevier Inc. New York. 270 p.
4. Balcazar, F. 2013: *Análisis de las variables de la cavitación en bombas centrífugas horizontales*. Ing. J. Santana Villarreal Reyes (Tutor). Tesis de Diploma. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional Azcapotzalco. 101 p.
5. Barrera, L. E. 2010: *Banco de pruebas para el estudio de cavitación en una bomba centrífuga mediante análisis de vibraciones mecánicas*. Mgr. Alfonso García Castro (Tutor). Trabajo de Diploma. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bucaramanga. 85 p.
6. Carcar, V. *Etapas del mantenimiento de averías. Medida, análisis y diagnóstico*. Mantenimiento; noviembre y diciembre, 1989
7. Estévez, A. M. 2013: *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación*. Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de Sevilla. 123 p.
8. Friedrichs J. y Kosyna G. 2002: *Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed*. Journal of Fluids Engineering 124, Junio: p. 356-362.
9. Gaillochet, J. F. 1998: *Vibraciones en las máquinas, Cómo estudiarlas y cómo combatirlas (1)*. MAPRO (Julio- Agosto). 59-64 p.
10. Gaillochet, J. F. 1998: *Vibraciones en las máquinas, Cómo estudiarlas y cómo combatirlas (2)*. MAPRO (Septiembre). 35-38 p.



11. González, R. y Rolo, A. 1996: *Etapas para la implementación del Mantenimiento Predictivo y por Diagnóstico en máquinas rotativas*. ESIB. Ciudad de la Habana.
12. Gonzáles, J. 2006: *Caracterización de instalaciones de bombeo en régimen cavitacional a través de las vibraciones*. Ing. Jorge Luis Reyes De la Cruz e Ing. Guillermo Torres. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 53 p.
13. Karassik, J. I. 1982: *Factores Hidráulicos del sistema*. Hydraulic Institute Standards.
14. Karelin, B. 1975: *Fenómeno de Cavitación en Bombas Centrífugas y Axiales*. Moscú. Construcción de Máquinas.
15. Kenneth, J. 2000: *Bombas, selección, uso y mantenimiento*. McGraw-Hill, New York. 379 p.
16. Navarro, M. A. 2011: *Estudio para la implementación de alarmas en el sistema de monitoreo continuo de celulosa Arauco planta Valdivia*. M. Sc. Rolando Ríos Rodríguez (Tutor). Trabajo de Diploma. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil Mecánica. 129 p.
17. NC – ISO 10816-3. 2005: *Vibraciones mecánicas – Evaluación de las vibraciones en las máquinas a través de la medición en partes no rotatorias – Parte 3: Máquinas industriales con potencia nominal superior a 15 kW y velocidades nominales entre 120 min⁻¹ y 15 000 min⁻¹ medidas in situ*. Oficina Nacional de Normalización, La Habana. 27 p.
18. Nekrasov, B. 1968: *Hidráulica*. Editorial MIR. 435 p.
19. Olsen Ubrich. 1985: *Las vibraciones en la recepción de las instalaciones*. Mantenimiento, (Septiembre y Octubre). 31-37.
20. Palomino, E. 1999: *Elementos de Medición y Análisis de vibraciones en Máquinas Rotatorias*, CEIM. Ciudad de la Habana.
21. Peláez, Orfilio. 2000: *Producción más limpia, un puente entre ecología y economía*. Granma. Año 36. Núm. 268.
22. Pérez, F. 1983: *Equipos de Bombeo*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 219 p.



23. Pérez, R. 1984: *Soluciones aproximadas del movimiento turbulento de fluidos heterogéneos viscosos e incompresibles*. Minería y Geología (1): 199- 218 p.
24. Pérez, R. 2000: *Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas*. 10 p.
25. Perry, R. H., Green D. W. y Maloney, J. O. 1997: *Perry, Manual del Ingeniero Químico*. 7 ed. McGraw-Hill, New York. 2 577 p.
26. Piedra, M., Lima, M., Reyes, R. y Pérez, R. 2000: *Procedimientos para la aplicación de las vibraciones mecánicas en el diagnóstico de máquinas*. Diagnos 2000. Ciudad de La Habana.
27. Reyes, J. L. 2010: *Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas*. Asociación Americana de Profesores de Física 4(1). 10 p.
28. Reyes, J. L. *Presión de saturación del licor amoniaco 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
29. Shashi, E. 2004: *Manual del Cálculo de Tubería*. McGraw-Hill, New York. 667 p.
30. Valerino. L. 2004: *Estudio del comportamiento Dinámico de los Ventiladores de tiro inducido de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Ing. Jorge Luis Reyes De la Cruz. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 60 p.

ANEXOS

Anexo 1. Vibxpert



Anexo 2. Manómetro TM3



Anexo 3. Manómetro Nuova Fima



Anexo 4. Bomba GRT/160/71a





Anexo 5. RHEOTEST 2



Anexo 6. RAD WAG



Anexo 7. Espectros de las mediciones realizadas a la vibración

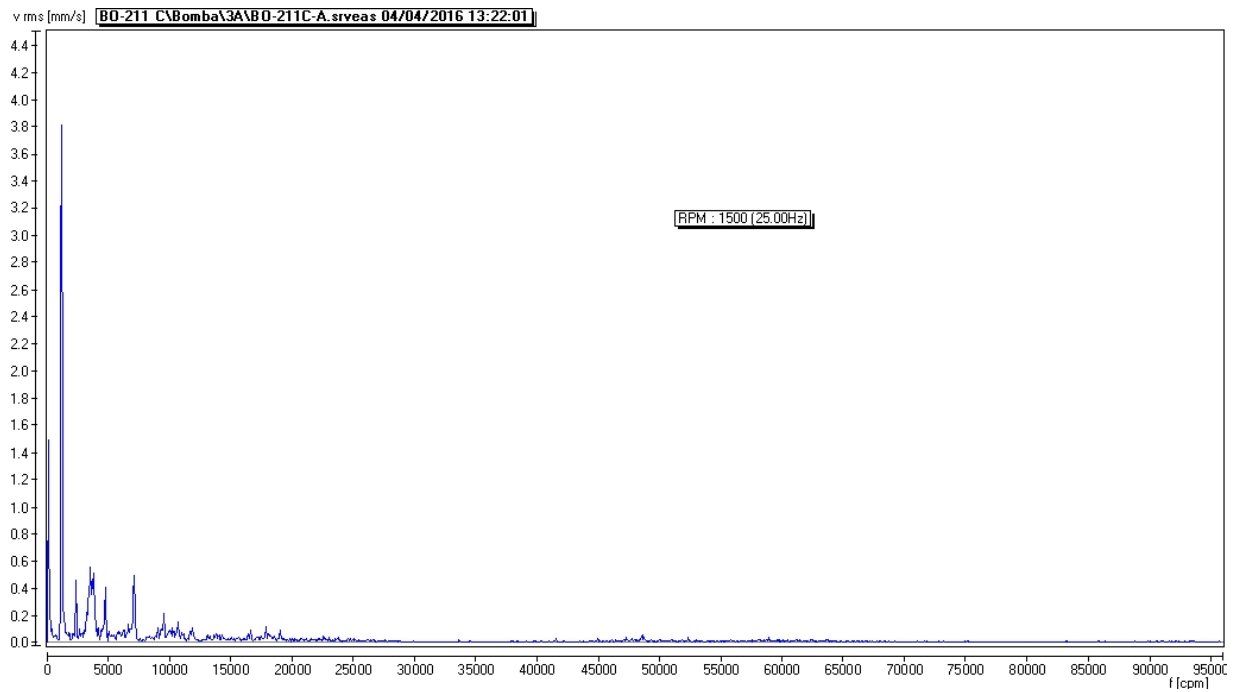


Figura 1. Espectro de la medición 1, axial.

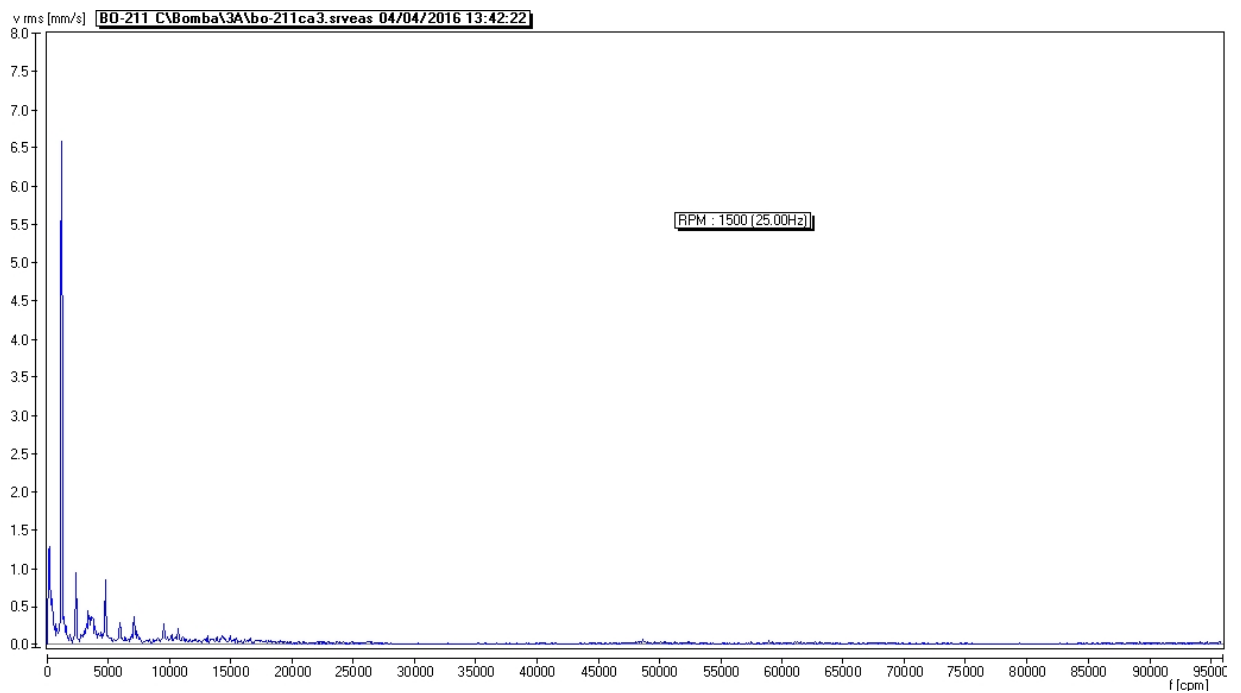


Figura 2. Espectro de la medición 2, axial.

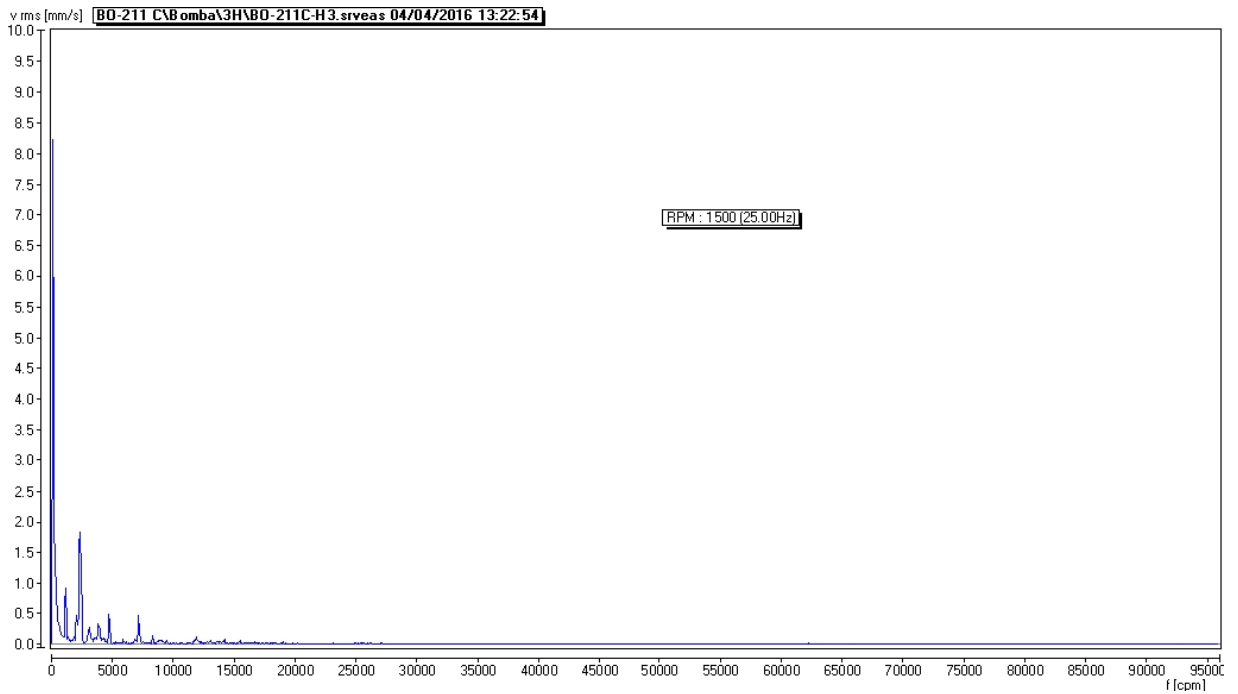


Figura 3. Espectro de la medición 1, horizontal.

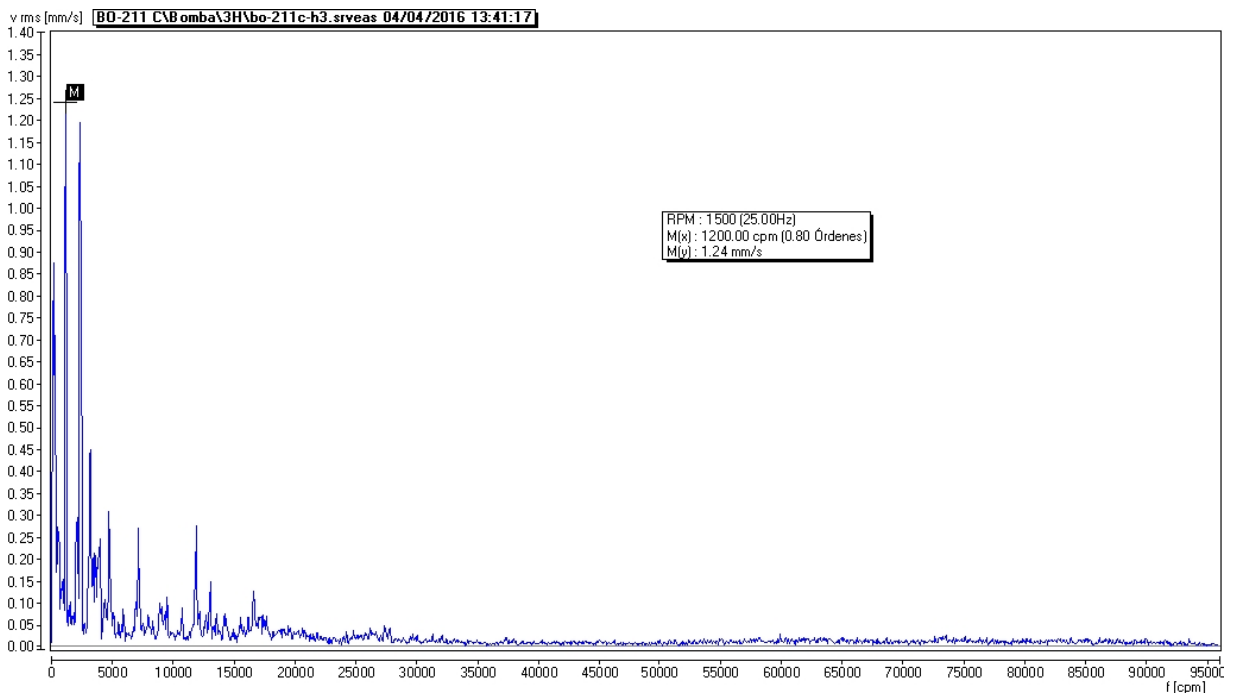


Figura 4. Espectro de la medición 2, horizontal.

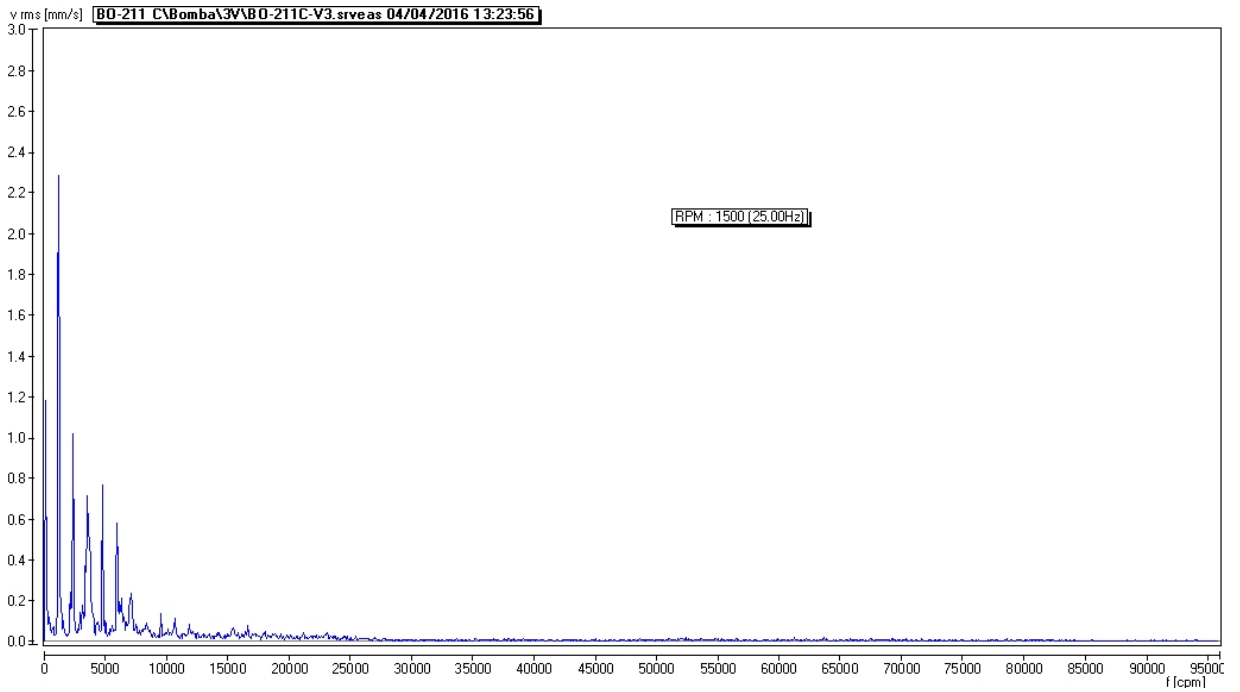


Figura 5. Espectro de la medición 1, vertical.

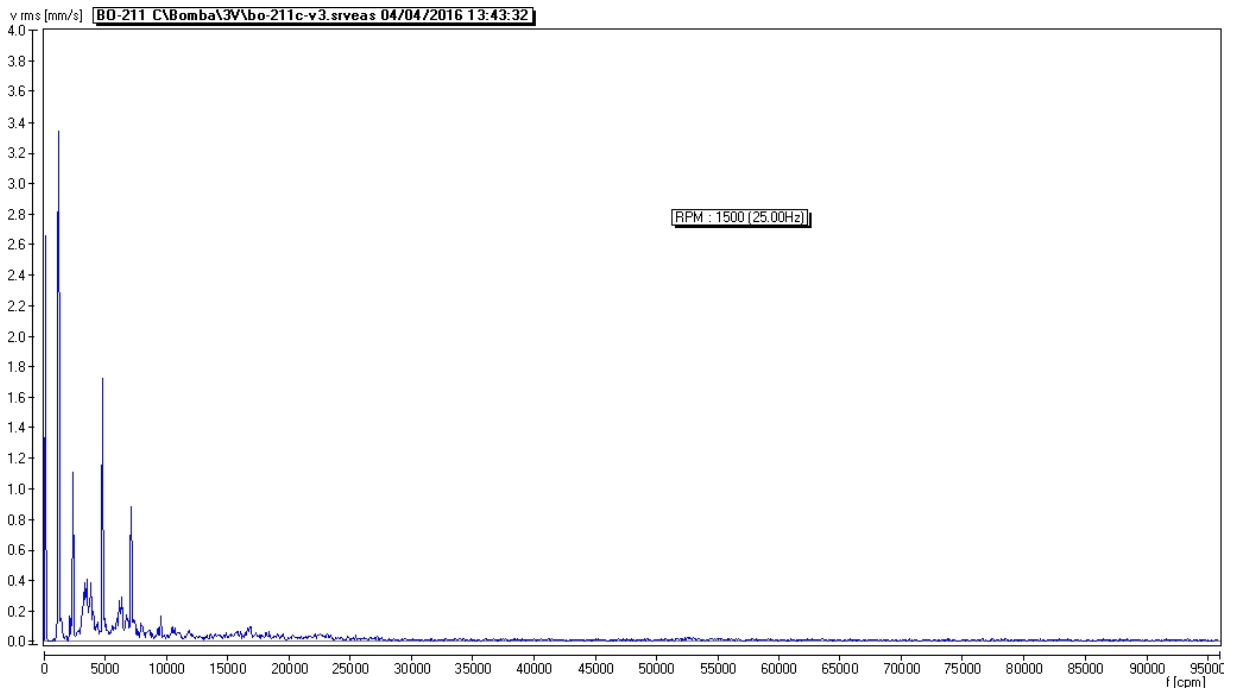


Figura 6. Espectro de la medición 2, vertical.