

UNIVERSIDAD DE MOA  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# Trabajo de Diploma

En opción al título de **Ingeniero Mecánico**

Cálculo verificativo del bombeo de desecho  
lixiviado (cola) hacia el nuevo depósito.

**Autor:** José David Hinojosa Elias

**Tutor:** Ms.C. Rodney Martínez Rojas

**Curso:** 2018-2019

***DECLARACION DE AUTORIDAD***

Yo: José David Hinojosa Elias.

Autor principal de este Trabajo de Diploma, conjuntamente con mi tutor, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

---

Diplomante: José David Hinojosa Elias

---

Tutor: Ms.C. Rodney Martínez Rojas

***PENSAMIENTO***

*El porvenir del país está ligado directamente al desarrollo de la ciencia y la técnica. Nunca podemos caminar con nuestros propios pies, mientras no tengamos una tecnología avanzada, basada en una técnica propia, en una ciencia propia. Por ello, la tarea de crear ingenieros es importante...*

***Ernesto Che Guevara***



## ***Dedicatoria***

Quiero dedicar este trabajo que con tanto esmero he realizado a todas las personas que de una forma u otra me han brindado su apoyo y confianza. A mi padre, mi madre, mi hermana, mi querida esposa, y en especial a mi abuelo, que el señor lo tenga en la gloria, sin olvidar a todos mis familiares que hicieron posible con su cooperación la realización de este trabajo.

## ***Agradecimientos***

Agradezco especialmente a todas aquellas personas que me apoyaron para la realización de esta tesis:

- Al colectivo de profesores de la Carrera Ingeniería Mecánica por sus enseñanzas y su sabiduría, que me permitieron formarme como Ingeniero Mecánico con un alto compromiso con la Revolución Cubana.
- A mis padres, por su total entrega para poder llegar a ser un profesional de valores éticos, a mi esposa por saberme comprender durante todo este tiempo, a mi tío y a mi familia en general, por el apoyo brindado y por siempre estar dispuestos a ayudarme.
- A mis amistades y compañeros de aula que con su apoyo desinteresado han contribuido a que alcanzara esta meta, y a la revolución cubana que me ha dado la oportunidad de formarme como profesional.

***Muchas gracias***

**Resumen**

En el presente trabajo de diploma se realiza una evaluación de la instalación de hidrotransporte de desechos lixiviados (colas), a partir de las modificaciones realizadas hacia los nuevos depósitos. Para ello se tendrá cuenta el comportamiento reológico de la hidromezcla típico de fluidos seudoplásticos, según el contenido de sólido presente en el material. Se evaluó las condiciones de régimen de trabajo de la instalación, hasta el nuevo depósito, y la del sistema teniendo en cuenta la instalación del rebombeo que mitigara la ineficacia del trasiego de dicho material. Los resultados demuestran que bajo las variaciones actuales de reducción del número de revoluciones de los motores de la bomba desde 1 450 a 1 180 rev/min, el sistema trabaja con una disminución del 59,1% del caudal a trasegar, que, junto a las condiciones de cavitación del sistema, provocan ineficiencias en el sistema. Se obtuvieron los parámetros operacionales del sistema hasta el rebombeo con un caudal de 148 m<sup>3</sup>/h a una altura de 41 m, y en el rebombeo un caudal de  $Q = 140 \text{ m}^3/\text{h}$  a una  $H = 41 \text{ m}$ . Se comprueba que si se instalara en el sistema motores de 1 450 rev/min garantizaría un caudal de aproximadamente 120 m<sup>3</sup>/h a una altura de 64 m con un costo de bombeo de 28 832,06 CUC/año, que comparado con lo que se genera por concepto de bombeo del material se ahorrarían 37 406 CUC/año.

## **Summary**

In the present work of diploma is made an evaluation of the installation of hydrotransportation of leached waste (tails), from the modifications made to the new deposits. For this, a rheological behavior of the hydromezcal typical of pseudoplastic fluids will be taken into account, according to the solid content present in the material. The working conditions of the installation were evaluated, until the new deposit, and that of the system taking into account the installation of the re-pumping that mitigated the inefficiency of the transfer of said material. The results show that under the present variations of reduction of the number of revolutions of the motors of the pump from 1 450 to 1 180 rev / min, the system works with a decrease of 59.1% of the flow to be transferred, that together with the conditions of cavitation of the system, cause inefficiencies in the system. The operational parameters of the system were obtained up to the pumping with a flow rate of 148 m<sup>3</sup>/h at a height of 41 m, and in the pumping up a flow rate from  $Q = 140 \text{ m}^3/\text{h}$  to a  $H = 41 \text{ m}$ . It is verified that if 1 450 rev/min engines were installed in the system, it would guarantee a flow rate of approximately 120 m<sup>3</sup>/h at a height of 64 m with a pumping cost of 28 832,06 CUC/year, compared to what is generated by the concept of booting of the material would save 37 406 CUC/year.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO</b>	6
1.1. Introducción	6
1.2. Investigaciones de los fluidos aplicadas al transporte por tuberías.	6
1.3. Trabajos precedentes de la instalación objeto de estudio.	9
1.4. Clasificación reológica de los fluidos.	9
1.4.1. Curvas de flujo	11
1.5. Análisis y aplicación del transporte hidráulico	12
1.6. Generalidades sobre las bombas	13
1.6.1. Clasificación de las bombas.	14
1.7. El fenómeno de la cavitación	17
1.8. Proceso tecnológico de la Planta de Recuperación.	19
1.9. Descripción del sistema de trasiego de desechos lixiviados objeto de estudio.	21
1.10. Conclusiones del Capítulo	23
<b>CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS</b>	24
2.1. Introducción	24
2.2. Características del desecho lixiviado (cola)	24
2.2.1. Caracterización reológica de los desechos lixiviados (colas) según el efecto de la concentración de sólidos.	26
2.3. Variantes del sistema a evaluar	28
2.4. Metodología empleada para el cálculo hidráulico	28
2.5. Cálculo de la curva característica de la bomba para $n = 1180 \text{ rev/min}$ .	30
2.6. Cálculo de la cavitación en bombas centrífugas	32
2.7. Determinación del costo de explotación de la instalación actual para transportar el desecho lixiviado hasta el dique.	34
2.8. Ubicación actual de los nuevos diques	35
2.9. Conclusiones del Capítulo	35
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL</b>	38



3.1. Introducción .....	38
3.2. Análisis de los resultados del Sistema Planta de recuperación de amoniaco hasta el rebombeo (PA-Re) .....	38
3.3. Análisis de los resultados del Sistema Rebombeo a los depósitos (Re – De).....	43
3.4. Análisis del Sistema desde Planta de Recuperación hasta los depósitos (PA –De).....	47
3.5. Valoración técnico económicas.....	51
3.6. Recomendaciones para evitar la Cavitación en Bombas Centrifugas.....	52
3.7. Valoración ambiental.....	52
3.8. Conclusiones del Capítulo .....	54
<b>Conclusiones generales .....</b>	<b>55</b>
<b>Recomendaciones</b>	
<b>Referencias Bibliográficas</b>	

## **INTRODUCCIÓN**

La industria cubana del níquel juega un papel significativo dentro de la economía nacional, es por ello, que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen, incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos. Actualmente se encuentra enfrascada en dos grandes procesos: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos en la producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial, para hacerla más competitiva en el mercado internacional.

En el territorio existen dos empresas productoras de materia prima para la obtención de Níquel, la Empresa Pedro Soto Alba, con una tecnología de lixiviación ácida a presión (LAP) obteniendo sulfuro de Níquel + Cobalto y la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” (ECG), posee un proceso tecnológico denominado lixiviación Carbonato Amoniacal (CARON), esta última en la que se enmarca nuestro trabajo, procesa los minerales lateríticos en forma de óxidos de Níquel + Cobalto, este esquema tecnológico permite procesar la mezcla de minerales lateríticos y serpentínicos a través de un proceso que demanda una cantidad apreciable de energía eléctrica y alto consumo de combustibles.

Una de las formas para hacer cumplir con el aprovechamiento energético, lo constituye el perfeccionamiento y aplicación de nuevas tecnologías en los sistemas de trasiego de materiales a través de tuberías, como es el caso del transporte de desechos lixiviados (Colas), generados por la Planta de Recuperación de Amoníaco, material con características trifásicas compuesta por gases, líquidos y sólidos en suspensión a altas temperaturas. Varios estudios realizados anteriormente en esta instalación, han demostrado que existe un alto consumo de energía y que la instalación bajo las condiciones actuales no trasiega el volumen de la capacidad deseada, provocados por la situación actual de búsqueda de nuevos depósitos que conlleva a la modificación de las líneas de tuberías hacia los nuevos emplazamientos.

Este trabajo va encaminado, a elevar la eficacia y la eficiencia con nuevas variantes tecnológicas que encuentran su aplicación, en los sistemas de transportación de las colas del proceso amoniaco y en otros procesos tecnológicos industriales.

### **Situación Problemática**

En la actualidad el sistema de trasiego de desecho lixiviado (cola) presenta problemas de ineficacia, obteniéndose operaciones ineficientes. Los depósitos de desecho hacia lo cual se evacuaban esta hidromezcla en áreas aledañas al puerto de Moa, se han saturado por años de vertimientos en los mismos, provocando desbordamiento hacia el río y el mar con los que colinda, y por la gran área superficial de los mismos, se generan grandes cantidades de polvo, todo esto trae consigo afectaciones ambientales a sus alrededores. Por lo que la empresa se ha visto en la necesidad de crear nuevos depósitos de desechos en áreas alejadas de la planta, obteniéndose nuevas condiciones en el sistema de bombeo, modificando las líneas tuberías de descargas de la misma hacia los nuevos emplazamientos, manteniendo las mismas bombas que existían.

Esto trajo consigo dificultades en el sistema de bombeo, al no tener en cuenta las nuevas condiciones de trabajo, provocando desbordamiento en el pozo de cola, y no se garantizaba el caudal necesario para evacuar la cantidad suficiente de material hacia los nuevos depósitos. Las bombas comenzaron a presentar averías e ineficiencias en sus parámetros operacionales, en la búsqueda de soluciones a los problemas que continuamente se presentaban, se toma la decisión de construir un sistema de rebombeo, que garantizará el trasiego de material bajo las nuevas condiciones. Logrando cierta eficacia con este sistema actual. Por lo que, se hace necesario realizar un estudio para evaluar el sistema de bombeo de desecho actual, y las dificultades que conllevaron a realizar estas modificaciones.

A partir de lo antes expuesto se define como **problema:**

Insuficiente conocimiento de los parámetros operacionales (punto de operación carga-capacidad, rendimiento y potencia), del sistema de bombeo de cola bajo las condiciones actuales hacia los nuevos depósitos.

Se establece como **objeto de la investigación**:

Sistema de transporte de cola de la Planta de Recuperación de Amoníaco de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **campo de acción de la investigación** se enmarca en el:

Cálculo de los parámetros operacionales del sistema de bombas centrífugas.

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente **hipótesis**:

A partir de la evaluación de las condiciones actuales de bombeo de cola desde la planta hasta los nuevos depósitos, teniendo en cuenta la instalación con el nuevo sistema de rebombeo y sin el mismo, permitirá obtener los parámetros operacionales de trabajo en el trasiego de desecho lixiviado

Se define como **objetivo del trabajo**:

Calcular los parámetros de operación de la instalación de bombeo de desecho lixiviado (cola) hacia los nuevos depósitos, bajo las modificaciones y condiciones actuales de trabajo.

Para cumplir el objetivo central, se desarrollaron los siguientes **objetivos específicos**:

1. Establecer las características técnicas del sistema actual de bombeo de cola hasta el nuevo depósito.
2. Establecer la metodología para el cálculo y proyección del sistema de bombeo. A partir de las características y propiedades de flujos del material.
3. Obtener los parámetros operacionales del sistema de bombeo vinculado con el rebombeo y sin el mismo.

se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

1. Búsqueda de información a través de tesis, informes, catálogos, libros y otros sobre el sistema objeto de estudio.
2. Establecimiento de las características técnicas del sistema y el material a transportar.

3. Cálculo de los parámetros operacionales bajo las condiciones actuales
4. Evaluación técnico económica del sistema de rebombeo

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Introducción

El transporte hidráulico consiste en el traslado de las partículas del mineral suspendas en un flujo de agua a través de una tubería o canal; este tiene una gran aplicación en la industria, en el laboreo de minas, además en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón y materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos.

Para el estudio de una instalación de bombeo es importante realizar una caracterización de los principales elementos que intervienen en el funcionamiento de la misma y del proceso tecnológico del cual forma parte. Teniendo como parte fundamental del trabajo la proposición de encontrar el punto de trabajo de dicha instalación, es importante abordar los elementos a tener en cuenta para la obtención del punto de trabajo. En tal sentido se tiene como **objetivo del capítulo:** Realizar un análisis de la bibliografía existente que proporcione información sobre los sistemas de bombeo y sus componentes.

### 1.2. Investigaciones de los fluidos aplicadas al transporte por tuberías.

D’Alambert (1744), Los cuerpos no establecen resistencia cuando se mueven a través de un fluido ideal ya sea no viscoso o invíscipido, esta teoría no es aplicable en cuerpos que se mueven a través de fluidos reales, discrepancia establecida entre teoría y experimento, actualmente resuelto, permitió dejar postulados para comprender y profundizar con claridad cuáles eran las limitaciones de la teoría de esa época para la resolución de problema sobre fluidos.

En la industria metalúrgicas tiene efectividad para la transportación de concentración de metales no ferrosos, aleaciones alcalinas y escorias de los hornos de alecciones fundidas, carbón, materias primas y concentrados hasta las plantas metalúrgicas, centrales eléctricos y puertos marítimos.

La primera aplicación reportada de este sistema se registra durante la fiebre de oro en California en 1850, posteriormente en 1889, fue patentada en Estados Unidos un sistema de transporte hidráulico de sólidos. El primer estudio académico fue elaborado por Nora Blatch en (1906), y la primera aplicación de transporte por tubería se realizó en Inglaterra en (1914). Durante la década del año 60 y 70 hubo un gran desarrollo técnico y académico de la tecnología, hasta que en 1986 surgieron las normas de transporte de pulpas (ANSI, ASME B31 11).

Iakovlev (1961,1962) con estudios experimentales demuestra que el movimiento de líquidos estructurales por tuberías se caracteriza por la presencia de un núcleo del flujo, que se mueve con velocidad constante como un cuerpo compacto.

Según Welty; *et al.*, (1976) al efectuar una evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinada por el esfuerzo viscoso entre las capas. , si el flujo en la tubería es turbulento, la variación de la velocidad a través del tubo no queda determinada únicamente por la viscosidad, sino que depende de las características que tenga la turbulencia, de las propiedades reológicas y visco-elásticas de los fluidos no newtonianos.

Costa (1984) expone que la viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, este último crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológica de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones.

Pakrovskaya (1985), realiza un amplio estudio técnico – práctico donde abarca temas muy importantes y novedosos entre los que se destacan: características, parámetros y regímenes de transportación de hidromezclas de diferentes grados de saturación; métodos para la preparación de pulpas para el hidrotransporte, desgaste hidroabrasivo de los sistemas de tuberías durante la transportación de materiales abrasivos; fiabilidad del trabajo de las instalaciones de hidrotransporte; métodos de control y regulación de los parámetros de hidrotransporte de los golpes hidráulicos; valoración económica de la efectividad del transporte hidráulico.

Vennar (1986) denomina fluido a la sustancia que, bajo la acción de un esfuerzo cortante, se deforma continua e irreversiblemente. Los gases, vapores y líquidos, son fluidos por excelencia. No obstante, existen en la naturaleza algunos materiales de apariencia sólida (por ejemplo, la plastilina, la pasta dental y otros) que fluyen a través de conductos al ser sometidos a la acción de esfuerzos cortantes. Estos materiales, desde un punto de vista técnico, son fluidos, ya que pueden deformarse continua e irreversiblemente.

Díaz; *et al.*, (1999) presentan una metodología para el cálculo del diámetro óptimo en régimen turbulento para cualquier tipo de fluido no newtoniano.

Ibarz *et al.*, (2001) considera que en el transporte por tuberías los costos son mínimos tanto de mantenimiento como en inversión, carga y descarga viene a ser un proceso continuo que puede ser llevado a cabo automáticamente con un esfuerzo mínimo, esto hace que se amortice el costo de las instalaciones, por otra parte este no tiene en cuenta las inclemencias de tiempo ni las condiciones del lugar a transitar, pero tiene sus desventajas como que el rendimiento de la tubería es constante y el del producto es logrado por la variación de los periodos de bombeo.

Darby (2002) se refiere con frecuencia a la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudoplástico o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por los dispositivos de



transporte. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológica.

### **1.3. Trabajos precedentes de la instalación objeto de estudio.**

Según investigaciones realizadas acerca de la caída de fluido por presión Martínez (2004) propone la modificación de las opciones del bombeo de las bombas de pozo de cola con succión directa desde los tanques flash en la fábrica Ernesto Che Guevara.

Turro (2002), realizó el estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal obteniendo sus propiedades y un modelo de cálculo que permite establecer los parámetros racionales de operación del sistema de flujo para la transportación de las colas.

Rodríguez (2009), diseñó un sistema en el manejo de colas desde la Planta de Recuperación de Amoníaco, hasta el nuevo depósito, que responde a indicadores técnicos, económicos y medioambientales.

Vega (2011), diseñó una propuesta sobre una nueva instalación del sistema de bombeo de cola hacia un nuevo depósito teniendo en cuenta que el viejo Dique ha llegado a su límite.

### **1.4. Clasificación reológica de los fluidos**

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en dos grupos.

- 1- Newtonianos
- 2- No newtonianos

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

Los fluidos no Newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no Newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos.

#### 1- De viscosidad independiente del tiempo

Seudoplásticos: Sus viscosidades disminuyen con el aumento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se le aplica un esfuerzo cortante ( $\tau \neq 0$ ). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para  $n < 1$ ):

$$\tau = k \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad 1.1$$

Donde:

$n$  – índice de flujo ( $n < 1$ )

$k$  – índice de consistencia.

Dilatantes: Sus viscosidades aumentan con el incremento de la velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ( $\tau \neq 0$ ). También se describen con el modelo de Ostwald de Waele (para  $m > 1$ ).

Plásticos ideales (Bingham): Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen este modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; Comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que su esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarle a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comenzar a fluir. El modelo Bingham se escribe:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (1.2)$$

Donde:

$\tau_0$  - esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia. (Pa)

$\mu_p$  - viscosidad plástica. (Pa. s)

Plásticos reales: Sus viscosidades también disminuyen con el aumento del gradiente de velocidad; Comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que su esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ), siguen el modelo de Bulkley – Herschel:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^m \quad (1.3)$$

De viscosidad dependiente del tiempo.

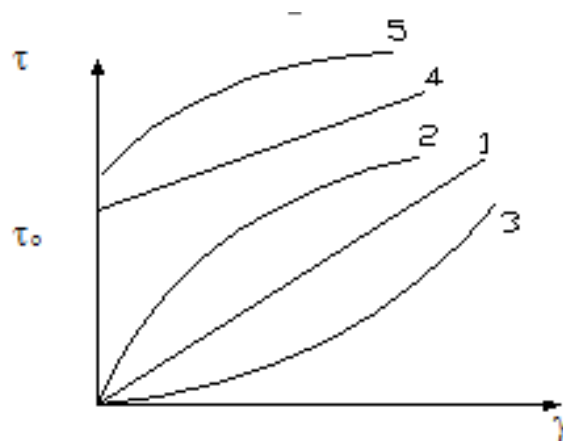
Tixotrópicos: La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidas a un gradiente de velocidad determinado.

Reopécticos: La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado.

Visco - elásticos ó de Maxwell: Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas, los cuales fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible.

#### 1.4.1. Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad (Figura 1.1), se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.



**Figura 1.1.** Curvas de flujo típica: 1-Newtonianos; 2-Seudoplásticos; 3-Dilatantes; 4-Plástico ideal (Bingham); 5-Plástico real. (Garcell, 2003)

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

### **1.5. Análisis y aplicación del transporte hidráulico**

Actualmente los materiales áridos se transportan a grandes distancias fundamentalmente por vías férreas y fluviales. El crecimiento de la producción de materiales áridos exige un desarrollo intensivo de otros tipos de transporte y en primer orden el transporte hidráulico por tuberías a largas distancias. Cada año en nuestro país y en el extranjero aumenta el volumen de transportación por tuberías de hidromezclas de carbón, esquito, arenisca, y otros. El hidrotransporte de materiales áridos a gran distancia es de alta productividad y en la mayoría de los casos es económicamente más efectivo que el transporte ferroviario, automotor y por transportadores de banda.

La efectividad del hidrotransporte crece principalmente debido a la imposibilidad de cambio por otro tipo de transporte, la posibilidad de simplificar la longitud de la vía de transporte por tuberías en comparación con el ferroviario y el automotor debido al relieve del lugar ante gastos no elevados en la preparación y homogenización de los materiales áridos con una productividad anual de la instalación. El hidrotransporte de materiales sólidos en comparación con el transporte ferroviario, los transportadores y

la vía automotriz posee las siguientes ventajas; continuidad del proceso, posibilidad de automatización completa, gran capacidad de tráfico en la línea con equipamiento de dimensiones pequeñas, ausencia de vías de transporte especiales, facilidad en la variación a la dirección y superación de obstáculos, ausencia de formación de polvo, pérdidas mínimas del material transportado, poca necesidad en servicio personal.

### **1.6. Generalidades sobre las bombas**

La bomba es una máquina que realiza el trasiego de un líquido mediante la impulsión y a veces la aspiración. Desde el punto de vista físico, el trabajo de la bomba consiste en la transformación de la energía mecánica del motor (mando) en energía del líquido, es decir, la bomba comunica cierta potencia al líquido que fluye a través de ésta. La reserva de energía que adquiere el líquido en la bomba, permite superar las resistencias hidráulicas al flujo y elevarse en la altura geométrica. La energía la adquiere la bomba en cada unidad de peso de líquido, es decir, el incremento de su energía específica, tiene dimensión lineal y representa la altura que crea la bomba durante su funcionamiento. La energía recibida por ella del motor se transforma en energía potencial, cinética y, en un grado insignificante, calorífico del flujo del líquido (Nekrasov 1968).

El funcionamiento de la bomba, acoplada al sistema se encuentra en dependencia de las propiedades hidráulicas de este sistema, llamado red, por lo que el mismo debe mantenerse estable. La energía suministrada a la bomba durante su funcionamiento, sufre cambios de transformación de la energía, parte de la energía mecánica se pierde inevitablemente a causa de las pérdidas hidráulicas, mecánicas y fugas.

La bomba de circulación se caracteriza por la llamada “curva característica”, que expresa el caudal que pueden suministrar en función de la altura de elevación.

La curva característica es una función decreciente que tiene dos puntos singulares: el punto de máxima altura de elevación ( $H_{max}$ ), con caudal nulo, y el punto de máximo caudal ( $Q_{max}$ ), con altura de elevación nula. Entre estos dos puntos la bomba puede

proporcionar cualquier caudal comprendido entre 0 y  $Q_{max}$ , a cualquier altura de elevación comprendida entre 0 y  $H_{max}$  (Skelland 1970).

Steffe y Morgan (1986) plantean que generalmente, las bombas no deben funcionar en los valores extremos o cerca de ellos, aunque hay bombas que si pueden hacerlo.

Por ello se deberá escoger el tipo de bomba adecuado.

Rabinovich (1987) plantea que la energía producida por la bomba debe vencer la resistencia que opone el fluido a su paso por la tubería y mantener la presión deseada en cualquier punto de la instalación. Por tanto, el calibre de la bomba dependerá del caudal de fluido a impulsar y de la pérdida de presión en el circuito hidráulico. Además, se tendrá presente en la selección del grupo el tipo de fluido circulante.

### **1.6.1. Clasificación de las bombas.**

Las bombas de acuerdo a su uso general, se pueden clasificar en:

1. Bombas de desplazamiento positivo (reciprocantes y rotatorias).
2. Bombas dinámicas (centrífugas, periféricas y especiales).

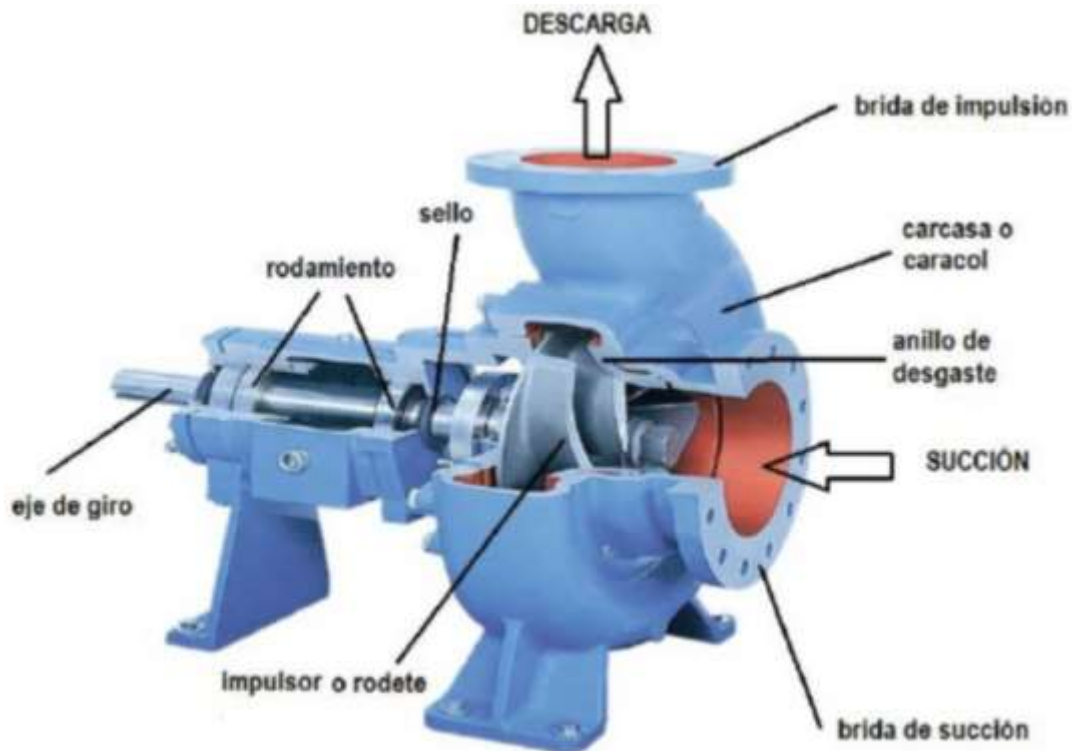
### **Bombas Centrífugas**

Dada la constante necesidad de transportar grandes cantidades de fluidos por largas distancias, las bombas centrífugas, han tomado un papel protagónico en procesos asociados a todo tipo de industrias, inclusive en aplicaciones domesticas simples.

La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento (el motor) primero en velocidad (o energía cinética) y después en energía de presión. El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado (energía transformada luego en caudal y altura de elevación), según las características constructivas de la bomba misma y en relación con las necesidades específicas de la instalación.

El funcionamiento es simple: las bombas centrífugas (figura 1.2) usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión. Dentro de una cámara hermética dotada de entrada y salida (voluta) gira una rueda con paleta (rodete), el

verdadero corazón de la bomba. El rodete es el elemento rodante de la bomba que convierte la energía del motor en energía cinética (la parte estática de la bomba, o sea la voluta, convierte, en cambio, la energía cinética en energía de presión). El rodete está, a su vez, fijado al eje bomba, ensamblado directamente al eje de transmisión del motor o acoplado a él por medio de acoplado rígido.



**Figura 1.2.** Partes principales de una bomba centrífuga

Cuando entra líquido dentro del cuerpo de la bomba, el rodete (alimentado por el motor) proyecta el fluido a la zona externa del cuerpo-bomba debido a la fuerza centrífuga producida por la velocidad del rodete: el líquido, de esta manera, almacena una energía (potencial) que se transformará en caudal y altura de elevación (o energía cinética). Este movimiento centrífugo provoca, al mismo tiempo, una depresión capaz de aspirar el fluido que se debe bombear. Conectando después la bomba con la tubería de descarga, el líquido se encanalará fácilmente, llegando fuera de la bomba. El rodete de una bomba centrífuga se puede realizar según muchas variantes constructivas: rodetes

abiertos, rodets cerrados, rodets semi abiertos, rodets mono-canal, rodets axiales, rodets semi-axiales, rodets desplazados, vórtice, a espiral, etc.

Se pueden suministrar bombas centrífugas monoestadio, o sea, dotadas de un solo generador de caudal y presión (un rodete). Si hay varios rodets (el primer rodete descarga el líquido sobre el segundo y así sucesivamente) se pueden suministrar, incluso, bombas centrífugas multiestadio, caracterizadas por la suma de presiones emanadas de cada rodete. El funcionamiento de la bomba centrífuga depende del momento inicial del cebado y del modo en el cual se asegura la aspiración del mismo líquido: si la bomba se coloca a un nivel inferior al de la vena de la que se extrae el líquido, éste entra espontáneamente en la bomba (de esta manera se obtiene una instalación bajo nivel). Mientras que si la bomba se coloca sobre el surgente del cual se desea bombear, el líquido se aspirará por la bomba (así como la tubería de aspiración) tendrá que cebarse preventivamente, o sea, llena de líquido (se tratará de una bomba auto cebada).

El sistema centrífugo presenta infinidad de ventajas con respecto a los otros tipos de bombeo: aseguran un tamaño reducido, un servicio relativamente silencioso y un fácil accionamiento con todos los tipos de motores eléctricos que se encuentran en plaza. Además, presenta una fácil adaptación a todos los problemas del tratamiento de líquidos ya que, por medio de adaptaciones a las determinadas condiciones de uso, es capaz de responder a las exigencias de las instalaciones destinadas.

### **Ventajas de las bombas centrífugas**

1. Su construcción es simple y su precio es bajo.
2. El fluido es entregado a presión uniforme, sin variaciones bruscas ni pulsaciones.
3. Son muy versátiles, con capacidades desde 1,36 m<sup>3</sup>/h hasta bombas múltiples con 818,29 m<sup>3</sup>/h.
4. La línea de descarga puede interrumpirse, o reducirse completamente, sin dañar la bomba.



5. Puede utilizarse con líquidos que contienen grandes cantidades de sólidos en suspensión, volátiles y fluidos hasta de 400°C.
6. Económicas y fáciles de mantener.
7. No alcanzan presiones excesivas aún con la válvula de descarga cerrada.
8. Se adaptan a servicios comunes, suministro de agua, hidrocarburos, disposición de agua de desechos, cargue y descargue de carro tanques, transferencia de productos en oleoductos.

### **1.7. El fenómeno de la cavitación**

Cuando se bombea líquido, nunca se debe permitir que la presión en cualquier punto dentro de la bomba caiga a menos de la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. Siempre se debe tener suficiente energía disponible en la succión de la bomba para hacer que el líquido llegue al impulsor de la bomba, lugar este donde los álabes del impulsor aplican más energía.

Cuando una bomba está sometida bajo el régimen de cavitación, es porque cuando se opera con una aspiración excesiva, se desarrolla una presión de succión baja en la entrada de la misma, la presión disminuye hasta que pueda crearse un vacío y el líquido se convierte en vapor, si la presión en la tubería es más baja que la tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

Cuando la presión de entrada esta al punto de alcanzar el punto de evaporización, las bolsas de vapor forman burbujas en el lado posterior del alabe impulsor, cerca de su base. Conforme una burbuja se desplaza del área de baja presión en la admisión al área de alta presión cerca del extremo del álabe la burbuja desaparece. El ruido que se escucha en el exterior de la bomba durante la cavitación es provocado por la explosión de la burbuja de vapor, las cuales se deshacen tan rápidamente que el líquido golpea al alabe fuertemente, con la suficiente intensidad como para provocar desprendimiento de partículas del impelente, provocando picaduras, erosión, desgaste, todo esto va unido a las propiedades del líquido que transportan.

Los cambios en el NPSH disponible no alteran el rendimiento de la bomba siempre y cuando el mismo sea mayor que el NPSH requerido. Sin embargo, cuando el disponible cae por debajo del valor del requerido, la bomba comienza a tener cavitación y pierde eficiencia. La NPSHr se define como la diferencia entre la carga absoluta de succión y la presión de vapor del líquido bombeado a la temperatura de bombeo y que es necesaria para evitar la cavitación.



**Figura 1.3.** Desgaste producido por la cavitación en un rodete de una bomba.

### **Cavitación de succión**

La cavitación de succión ocurre cuando la succión de la bomba se encuentra en unas condiciones de baja presión/alto vacío que hace que el líquido se transforme en vapor a la entrada del rodete. Este vapor es transportado hasta la zona de descarga de la bomba donde el vacío desaparece y el vapor del líquido es nuevamente comprimido debido a la presión de descarga. Se produce en ese momento una violenta implosión sobre la superficie del rodete. Un rodete que ha trabajado bajo condiciones de cavitación de succión presenta grandes cavidades producidas por los trozos de material arrancados por el fenómeno. Esto origina el fallo prematuro de la bomba.

## **Cavitación de descarga**

La cavitación de descarga sucede cuando la descarga de la bomba está muy alta. Esto ocurre normalmente en una bomba que está funcionando a menos del 10% de su punto de eficiencia óptima. La elevada presión de descarga provoca que la mayor parte del fluido circule por dentro de la bomba en vez de salir por la zona de descarga. A medida que el líquido fluye alrededor del rodete debe de pasar a una velocidad muy elevada a través de una pequeña apertura entre el rodete y el tajamar de la bomba. Esta velocidad provoca el vacío en el tajamar (fenómeno similar al que ocurre en un Venturi) lo que provoca que el líquido se transforme en vapor. Una bomba funcionando bajo estas condiciones muestra un desgaste prematuro del rodete, tajamar y álabes. Además y debido a la alta presión de funcionamiento es de esperar un fallo prematuro de las juntas de estanqueidad y rodamientos de la bomba. Bajo condiciones extremas puede llegar a romperse el eje del rodete.

### **1.8. Proceso tecnológico de la Planta de Recuperación.**

La planta de Recuperación de Amoníaco tiene la función de recuperar el  $\text{NH}_3$  y el  $\text{CO}_2$  del licor, así como de las colas recibidas de Lixiviación, obteniéndose al mismo tiempo la cola como desecho y como producto la pulpa de carbonato de Ni, el licor fuerte de amoníaco y  $\text{CO}_2$ .

Esta planta recibe el licor producto desde la planta de Lixiviación y lavado, que se distribuye en tres partes en el distribuidor (255-DI -100), pasando cada porción a la batería de turboareadores. Este licor tiene aproximadamente la siguiente composición:  $\text{Ni} > 10,88 \text{ g/l}$ ;  $\text{NH}_3 \approx 70 \text{ g/l}$ ;  $\text{CO}_2 \approx 40 \text{ g/l}$ , la temperatura es  $\leq 43^\circ\text{C}$  y 360 ppm de sólido en suspensión.

De los turboareadores el licor es bombeado a los filtros de hojas (FL-105...110), donde se disminuye el sólido en suspensión de 360 a 20 ppm. Este licor filtrado es almacenado en un tanque (TK -118) y es bombeado a la planta de Cobalto donde se realiza la separación del Cobalto. El licor descobaltizado se recibe nuevamente en la planta, en

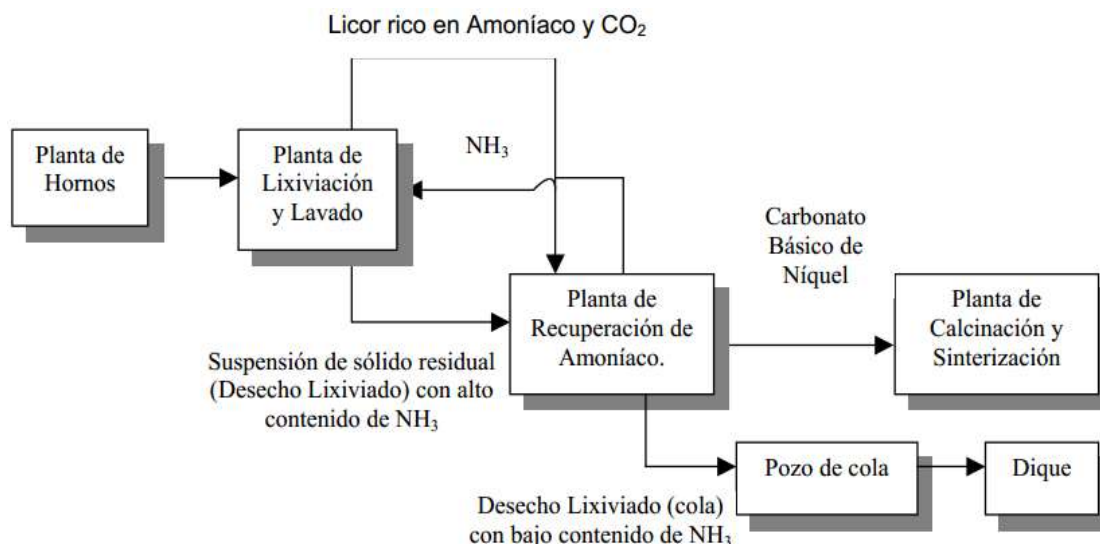
los tanques (TK-119 y 120) de capacidad 3000 m<sup>3</sup> desde donde se bombea a las torres de destilación (AB-201 a 208), aquí se separa parte del NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>, formándose el precipitado de carbonato básico de Ni que es descargado de dichas torres a una presión aproximadamente igual a 0,8 kgf/cm<sup>2</sup>, por lo que se envía a los tanques depresurizadores (EV-209 y 210), desprendiéndose parte del agua de la pulpa en forma de vapor que se escapa a la atmósfera a través de las chimeneas de dichos tanques. La pulpa depresurizada se bombea hasta los sedimentadores de la planta de Calcinación y Sínter.

Los gases compuestos por NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O se enfrían en los intercambiadores de calor de tubo y coraza (CS-201 al 208), hasta una temperatura no menor de 57 °C para evitar la formación de carbonato de amonio, pasando luego hasta el sistema de absorción.

La cola enviada desde la planta de Lixiviación se distribuye por los precalentadores (PC-301 a 309) cuya función es aumentar la temperatura de la cola antes de enviarla a las columnas de destilación (255-AB- 301 a 309), recuperando parte del calor de los gases desprendidos de las propias columnas.

La pulpa caliente alrededor de unos 50 °C se descarga por gravedad desde los precalentadores hasta los tanques de retención de cola (TK-321, 323, 325 A y B), desde donde se bombea hasta las torres de destilación. La pulpa descargada de estas torres a una presión aproximada de 0,8 kgf/cm<sup>2</sup> se envía por gravedad a los tanques depresurizadores (EV-310 y 311), para ser depresurizada. La pulpa depresurizada pasa por gravedad al pozo de cola (255-TK-312) desde donde se bombea hasta el dique de cola, según Manual de operaciones de UBP (Sección Recuperación de NH<sub>3</sub>), (2007)

La figura 1.4 presenta un esquema muy simplificado de la mayor parte del proceso tecnológico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa. En el mismo se aprecia la ubicación de la Planta de Recuperación de Amoniaco y del pozo de cola que son el tema en cuestión del proyecto.



**Figura 1.4.** Esquema del Proceso Tecnológico donde se obtienen, transportan y almacenan los desechos lixiviados (colas), según Manual de operaciones de UBP Sección Recuperación de  $\text{NH}_3$  (2017).

### 1.9 Descripción del sistema de trasiego de desechos lixiviados objeto de estudio.

La instalación de bombeo del pozo de cola (figura. 1.5) al rebombeo está compuesta por 6 bombas del tipo Гpt 160/71a, diseñadas para un número de revoluciones de 1450 rev/min, un flujo de  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ , una altura de carga de 65 m columna líquida, su mayor eficiencia es de 58,5 % y las mismas necesitan una altura positiva neta de succión NPSHr de 5m. La potencia de la bomba es de 46,9 kW. Actualmente las mismas se encuentran rotando a 1180 rev/min con tres en operación y tres en reserva; estas bombas son accionadas por motores eléctricos asíncronos trifásicos de 55 kW, y una máxima eficiencia de 92 %. Las bombas succionan directamente de un pozo con una capacidad de  $96 \text{ m}^3$  y una línea de succión de 0,86 m con una válvula de bola y además en la entrada de la bomba se encuentra una lanza que suministra agua cruda que se utiliza para la limpieza de las líneas una vez que se para el bombeo, las bombas descargan a líneas individuales de diámetros 200 mm y longitudes que varían desde 500 hasta 1000 m. Cada línea usa una válvula de bola, 29 codos de  $90^\circ$  y 22 codos de  $45^\circ$ , un compensador de fuelle, las mismas están construidas de acero y hierro fundido.



**Figura. 1.5.** Instalación actual de bombeo.

La instalación de la estación de rebombeo cuenta con un depósito, que consiste en un recipiente metálico de forma cónica con una capacidad aproximadamente de 55 m<sup>3</sup>, fabricado con planchas de 16 mm de espesor.

Al recipiente le llegan por la parte superior las líneas tecnológicas y por la descarga (parte cónica), se encuentran instaladas seis unidades de bombeo centrífugas de igual características técnicas que las instaladas en el pozo de cola.



**Figura. 1.6.** Instalación de rebombeo.

### **1.10 Conclusiones del Capítulo**

- Se exponen los fundamentos teóricos del temático objeto de estudio. A través de investigaciones realizadas en el campo del transporte de pulpas por tuberías y la caracterización de estos sistemas.
- Se realizó una búsqueda bibliográfica de la planta de Recuperación de  $\text{NH}_3$  donde se obtuvo una descripción del flujo tecnológico de la misma y se encuentra la estación de bombeo que se estudia, así como sus características técnicas.



## CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

En la realización de cualquier investigación es de vital importancia la utilización de las metodologías y métodos apropiados para lograr una mayor veracidad de los resultados esperados. Para que una instalación cumpla con las exigencias del flujo tecnológico del cual forma parte es importante la adecuada selección de los equipos que la componen. Debido a esto, es necesario que el técnico o ingeniero encargado de realizarlo conozca cuales son y cómo se determinan los principales parámetros que permiten caracterizar el trabajo del equipo; además debe saber las metodologías y métodos apropiados para calcularlos, obteniendo así una gran exactitud y veracidad en los resultados alcanzados.

El **objetivo** del presente capítulo es: fundamentar las propiedades y características del fluido a transportar, explicar los métodos, procedimientos y desarrollar una metodología de cálculo que nos permita determinar con exactitud el comportamiento de la instalación de bombeo y rebombeo de cola hasta el dique.

### 2.2. Características del desecho lixiviado (cola)

La cola es un producto residual de la planta de lixiviación y lavado y recuperación de amoníaco, de color negro grisáceo, la cual se somete destilación para recuperar el amoníaco y el CO<sub>2</sub> que contiene la misma.

Todos los fluidos que se transportan producen incrustaciones a lo largo de la explotación del sistema de bombeo. Claro, hay algunos fluidos como la cola, laterita, petróleo y otros que poseen mayor efecto en los sistemas de bombas, debido a su composición granulométrica.

Basado en algunas de las investigaciones realizadas tanto en el instituto como en la misma industria Che Guevara podemos decir que:

- La pulpa tiende a asentarse rápidamente perdiendo su humedad y formando una capa prácticamente impermeable que permite formar diques con ellos sin que se produzcan filtraciones apreciables.



- La resistencia mecánica es muy alta pues en los diques construidos se pueden mover libremente todo tipo de equipos sin que ocurran deslizamientos.
- La cola por su granulometría es de fácil arrastre por el viento., lo que provoca una alta contaminación en zonas donde se deposita.
- En tanque donde esta se almacena se observarán las incrustaciones provocado por la misma.

La cola que es bombeada posee características peculiares como es la temperatura y la densidad de la misma, así como el gran por ciento de amoníaco presente.

### **Análisis del líquido.**

Contenido de agua aproximadamente 3% de amoníaco.

### **Análisis del sólido**

**Densidad:** Es la masa del fluido contenido en la unidad de volumen.

Densidad del sólido: 3,619T/m<sup>3</sup>

Temperatura de descarga: 95 – 99 °C

### **Características del líquido que la forma**

Líquido..... Solución Carbonato Amoniacal

Concentración .....NH<sub>3</sub> – 55 g/l; CO<sub>2</sub> –28,5g/l; Ni – 0,18 g/l; Co – 0,4 g/l

Densidad..... 1,02 t/m<sup>3</sup>

Temperatura..... 43°C

PH..... 8 ÷ 9

Viscosidad.....1 cP

Conductividad del líquido..... > 20 mS/cm

### **Características del sólido que la forma**

Sólido..... Mineral Reducido

Densidad real..... 3,8 t/m<sup>3</sup>

Tamaño medio de las partículas... (80% - 200; 20% +100) Mesh

Configuración..... Aristas vivas

En la tabla 2.1, se muestran los datos de la composición química correspondiente al mineral estudiado.

Composición química de los residuos lixiviados en las plantas de lixiviación y recuperación de amoníaco, en peso

Tabla 2.1. Composición química de la cola.

Elementos	(%)
Co	0,81
Ni	0,30
Fe	47,6
Cu	0,02
Cr	3,5
Zn	0,05
Mg	4,30
Al	2,0
Mn	0,75
SiO <sub>2</sub>	12,45

Según los datos de la composición química los elementos predominantes, son el hierro y la sílice con valores medio de 47,6% y 12,45% respectivamente. En general, se observa poca variabilidad en las composiciones químicas de las muestras analizadas

### **2.2.1 Caracterización reológica de los desechos lixiviados (colas) según el efecto de la concentración de sólidos.**

Según Turro (2002), para concentraciones de 30 y 35% en peso de sólido, las curvas de flujo obtenidas exhiben un comportamiento pseudoplástico, mientras que para concentraciones de 40 a 60% en peso las pulpas adquieren propiedades plásticas, mostrando un comportamiento típico de los plásticos de Bingham. En todos los

casos, a medida que aumenta la concentración los esfuerzos cortantes  $\tau$  se incrementan y por tanto, las viscosidades aparentes para un valor fijo de  $\gamma$ .

Para las pulpas que poseen comportamiento pseudoplástico sus datos han sido ajustados al modelo de Oswald de Waele, el cual está caracterizado por los parámetros reológicos: índice de consistencia, K, e índice de flujo, n (tabla 2.2). Los valores de K aumentan con el incremento de la fase sólida, mientras que los de n cambian muy poco con dicho incremento a una temperatura dada.

**Tabla 2.2.** Valores de los parámetros de los modelos reológicos a partir de sus modelos reológico (Turro 2002).

Concentración de sólido (%)	Parámetros - Reológicos			
	K (Pa.s)	n (adimen)	$\tau_0$ (Pa)	$\mu_p$ (Pa.s)
30%	0,092609	0,64	-	-
35%	0,1037132	0,63	-	-
40%	-	-	0,477077	0,020144
45%	-	-	0,5269659	0,022396
50%	-	-	1,1104501	0,035627
60%	-	-	9,146822	0,036244

La caracterización reológica permitió establecer el carácter no newtoniano de la cola, dependiendo grandemente su comportamiento de la concentración de sólidos. Así se observa un flujo Seudoplásticos a concentraciones de 25 – 35 % en peso y un comportamiento plástico Bingham para valores mayores de 40 % en peso, a todas las temperaturas estudiadas (28 - 90 °C). A partir de que las suspensiones de desecho lixiviados que se trasiegan actualmente en la empresa, mantienen una concentración de sólido alrededor del 35 %, el presente trabajo analizará dichas suspensiones como un

fluido de comportamiento reológico pseudoplásticos, y como tal establecerá la metodología de cálculo para el análisis y evaluación de sistema.

### 2.3. Variantes del sistema a evaluar

El sistema de trasiego de desecho lixiviado (colas) hasta los nuevos depósitos esta subdividido en dos partes:

1. Sistema Planta de Recuperación de Amoníaco hasta el rebombero (PA-Re)
2. Sistema Rebombero a los depósitos (Re – De)

Y se tendrá en cuenta una tercera variante para el análisis y evaluación del sistema la cual estará:

3. Sistema desde Planta de Recuperación hasta los depósitos (PA – De)

Estas tres variantes nos permitirán realizar una valoración de los parámetros operacionales, antes y después de la modificación realizada, con el rebombero y la nueva ubicación de los depósitos.

### 2.4. Metodología empleada para el cálculo hidráulico

La siguiente metodología de cálculo brinda las expresiones necesarias para la obtención de la curva que caracteriza el comportamiento del fluido a lo largo de la línea; teniendo en cuenta el caudal en función de la altura de carga de la red, permitiéndonos establecer los parámetros operacionales del sistema. El procedimiento presentado se ha tomado según Nekrasov, (1968).

#### Velocidad del fluido (cola)

Para determinar la velocidad de la cola en el interior de la línea o tubería primeramente se tiene en cuenta la ecuación de continuidad, que expresa lo siguiente:

$$Q = v \cdot A \quad (2.1)$$

Al despejarse la velocidad se obtiene:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Dónde:

$v$ : Velocidad del fluido (cola), m/s.

$Q$ : Caudal del fluido, m<sup>3</sup>/s.

$A$ : Área de la sección transversal de la tubería, m<sup>2</sup>.

Sustituyéndose la fórmula del área en la ecuación 2.2 se puede calcular la velocidad de la siguiente forma:

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2.3)$$

### Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re), permite establecer el régimen de trabajo del flujo y válida para fluidos seudoplásticos según la naturaleza reológica del fluido se determina por esta ecuación, se recomienda utilizar para fluidos seudo plásticos y dilatantes. (Garcell, 2003)

$$Re = \frac{8^{1-n} \cdot d_{tub}^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho_{col}}{K} \cdot \left( \frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (2.4)$$

Donde los coeficientes n y k:

n - Índice de flujo ( $n = 0,63$ )

K – índice de consistencia ( $K = 0,1037 Pa \cdot s$ )

Calculo del coeficiente de resistencia hidráulica lineal.

$$f = \frac{A}{Re^B} \quad (2.5)$$

**Tabla 2.3** Valores de los coeficientes A y B a partir del índice de flujo n.

n	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
A	0,0647	0,071	0,074	0,076	0,079	0,081	0,083
B	0,35	0,306	0,28	0,264	0,25	0,24	0,23

El factor de fricción se determina por la siguiente ecuación

$$\lambda_c = 4 \cdot f \quad (2.6)$$

### Resistencia mecánica de la línea

Mediante la fórmula siguiente es posible calcular las resistencias mecánicas que ofrece la tubería por la cual es transportado el fluido:

$$R = \left( \sum \xi + \lambda \frac{L}{D} \right) \frac{8}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4} \quad (2.7)$$

Dónde:

R: Coeficiente de resistencia mecánica de la línea, s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>.

$\xi$ : Coeficiente de pérdidas locales de la línea, adimensional.

L: Longitud de la línea, m.

g: Constante de la gravedad, m/s<sup>2</sup>.

### Altura de carga de la red

La expresión siguiente permite calcular la altura en metros que debe vencer el fluido para llegar a su destino:

$$H = \Delta Z + RQ^2 \quad (2.8)$$

Dónde:

H: Altura de carga del fluido, m.

$\Delta Z$ : Diferencia de altura entre la succión y la descarga de la bomba, teniendo en cuenta el nivel del líquido respecto a la horizontal, m.

### 2.5. Cálculo de la curva característica de la bomba para n = 1 180 rev/min.

Actualmente se ha comprobado que las bombas existentes en la instalación de bombeo de cola no trabajan en el número de revoluciones para la cual se construyó la curva característica de las mismas; debido a que no se tuvo en cuenta el comportamiento no newtoniano del fluido a trasegar y se asumió para la selección de las bombas un comportamiento newtoniano del mismo. Provocando que la curva de la bomba ajuste su funcionamiento a un número de revoluciones acorde a las condiciones actuales.

Los cambios en la capacidad, carga y potencia necesaria al cambiar la velocidad de rotación, pueden calcularse teniendo en cuenta, que, si no se cambia el diámetro del impelente, de acuerdo con las leyes de semejanza hidráulica, se mantendrán las siguientes relaciones.

- La cantidad de flujo entregado, varía directamente con la velocidad de rotación.
- Las cargas varían directamente de acuerdo con el cuadrado de la velocidad de rotación.
- Como consecuencia de las dos leyes anteriores, la potencia necesaria variará tanto como el cubo de la velocidad de rotación.
- La eficiencia dentro de los límites prácticos se mantendrá igual para los puntos homólogos de la nueva curva.

Para expresar en forma de ecuaciones estas relaciones, llamaremos:

- H: Carga dinámica total.      - n: Número de revoluciones.      - Q: Capacidad.

Para las variaciones de la capacidad, carga y la potencia necesaria se tendrán las siguientes expresiones.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.9)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{(n_1)^2}{(n_2)^2} \quad (2.10)$$

Con los datos de la curva de la bomba a 1 450 rev/min se obtienen los datos para construir la nueva curva característica de la bomba a 1 180 rev/min., mediante las siguientes ecuaciones.

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} \quad (2.11)$$

$$H_2 = H_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^2 \quad (2.12)$$

## 2.6 Cálculo de la cavitación en bombas centrífugas

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

### Altura neta positiva en la succión

Se denomina NPSHd (altura neta positiva en la 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 halla en equilibrio con su presión de vapor en un depósito cerrado). Debemos por tanto conocer y combinar en cada caso el NPSH disponible (NPSHd) de la instalación y el NPSH requerido (NPSHr) por la bomba.

$$NPSH_{dis} = H_{suc} - \sum h_{succ} - ht + \frac{P_{atm}}{\gamma} \quad (2.13)$$

Donde:

$H_{suc}$ : Altura de succión.

$P_{atm}$ : Es la fuerza ejercida por la atmósfera por unidad de superficie

$ht$ : Tensión de vapor a una temperatura determinada,  $h_t = 10,55m$  para  $90^\circ C$

$\sum h_{succ}$ : Pérdidas en la succión

$\gamma$ : Peso específico

Para realizar este cálculo es necesario conocer las pérdidas en la succión.

$$\sum h_{succ} = R_s \cdot Q^2 \quad (2.14)$$

Donde

$R_s$ : resistencia mecánica de la línea en la succión,  $s^2/m^5$



### Altura neta positiva en la succión requerida

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

Para la evaluación de la calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, es importante la determinación del  $(NPSH)_{req}$ , el cual se calcula por la expresión 2.15.

$$(NPSH)_{Req} = 10 \cdot \left( \frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{3/4} ; [m] \quad (2.15)$$

Donde:

C - coeficiente de velocidad específica en la succión; (rev / min) .

En el diseño de nuevas máquinas el valor del coeficiente de velocidad específica en la succión se determina mediante cálculo y posteriormente se comprueba con los ensayos correspondientes. En la práctica el coeficiente puede ser afectado por deficiencias del proyecto o de su ejecución. Para la realización de un análisis que permita una evaluación práctica y rápida de una bomba, el coeficiente de velocidad específica en la succión se obtuvo en función de la velocidad específica.

$$C = 800 \log n_s^{3/4} \quad (2.16)$$

La velocidad específica se calcula a partir del caudal y la carga que corresponde al máximo rendimiento de la máquina o por los parámetros nominales de la misma.

Según sea la velocidad específica o característica  $n_s$ , las bombas centrífugas y otras de paletas, semejantes a estas, se dividen en los siguientes tipos:

$$\text{Lentas : } n_s \leq 80 \quad \frac{D_2}{D_1} = 2,2 - 3,5$$

$$\text{Axiales o de hélice: } n_s = 600 - 1200 \quad \frac{D_2}{D_1} = 1$$

Normales:  $n_s = 80 - 150 \quad \frac{D_2}{D_1} = 2,2 - 1,8$

Diagonales o helicoidales:  $n_s = 300 - 600 \quad \frac{D_2}{D_1} = 1,3 - 1,1$

Rápidas:  $n_s = 150 - 300 \quad \frac{D_2}{D_1} = 1,8 - 1,3$

De tal forma, la velocidad específica se calcula empleando la ecuación:

$$n_s = 3,56 \cdot \frac{n\sqrt{Q}}{(H_{succ})^{3/4}} \quad (2.17)$$

Donde:

$n$ : número de revoluciones; (  $rev/min$  ),

$H_{succ}$ : altura de succión; (m),

$Q$ : caudal o gasto del fluido; ( $m^3/s$ ).

Para la evaluación de la calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, se toma como  $NPSH_r = 5$  m según (Martínez 2004)

## 2.7 Determinación del costo de explotación de la instalación actual para transportar el desecho lixiviado hasta el dique.

Uno de los principales parámetros de las industrias productoras en el mundo actual, es la valoración económica del consumo de energía en la explotación de cualquier instalación a escala industrial, con el fin de reducir los costos. El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación (Martínez 2010):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (2.18)$$

Donde:

$C_{bom}$ : Costo de bombeo de la instalación (CUC/año)

$t_{el}$  - Tarifa eléctrica (0,144 CUC/kW.h)

$t_t$  - Tiempo de trabajo del equipo(h/año)

$\eta_m$  - Rendimiento del motor eléctrico (%)

$\eta_b$  - Rendimiento de la bomba (%)

N - Potencia de trabajo (W)

## 2.8. Ubicación actual de los nuevos depósitos

Los volúmenes de cola obtenidos durante el proceso, son trasegados con la utilización de las bombas para pulpa de procedencia rusa instaladas en el pozo de cola ubicadas en la cota +24,0 msnm hasta el dique viejo que se localizaba aproximadamente en la cota +5,00 msnm, fuera de operación en estos momentos por encontrarse en su máxima capacidad.

Ante la imposibilidad de continuar vertiendo la masa sólida en el viejo dique de colas, se realizó un estudio sobre las áreas potenciales para la construcción del nuevo dique, arrojando las mejores condiciones el valle del Río Yagrumaje, que se encuentra en el área de la mina situada en las coordenadas nacionales 1 ( $x_1 - 219250$  ;  $x_2 - 221250$ ) y 2 ( $y_1 - 701300$  ;  $y_2 - 703150$ ). Dicha área limita por el norte con el río Moa y la carretera Moa – Baracoa, por el este con la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara y las instalaciones mineras. Por el sur con el yacimiento Yagrumaje Sur, y por el oeste con el área de dicha mina, encontrándose el mismo a una cota +64,00 msnm a una distancia aproximada desde el pozo de cola hasta el nuevo dique de 4 km. (Ver anexo 1)

## 2.9. Conclusiones del Capítulo

- ✓ Teniendo en cuenta los elementos empleados en la instalación y las características del fluido, se estableció la metodología de cálculo para la evaluación del sistema actual objeto de estudio.
- ✓ Se plantearon las fórmulas para el cálculo de las alturas netas positiva de succión, disponible (NPSH<sub>d</sub>) y la requerida (NPSH<sub>r</sub>) aplicada a través de la metodología de los

cálculos hidráulicos planteada para este tipo de fluido, donde se podrá comprobar si la instalación trabaja bajo un régimen de cavitación.

- ✓ Se estableció la metodología de cálculo para el trazado de la curva de la bomba para el número de revoluciones que están operando actualmente que es 1 180 rev/min.

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL

### 3.1 Introducción

Con las metodologías y métodos empleados en el Capítulo 2, se ha logrado detectar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos que están presentes en la investigación.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones desarrolladas que han permitido proyectar la curva del sistema de bombeo de colas desde la Planta de Recuperación de Amoníaco hasta el rebombeo, desarrollando además una documentación técnica que da las soluciones que son desconocidas actualmente y por esta causa existe un gasto y un régimen cavitacional en la instalación.

El **objetivo** de este capítulo: Analizar los resultados obtenidos para esta investigación.

### 3.2 Análisis de los resultados del Sistema Planta de Recuperación de Amoníaco hasta el rebombeo (PA - Re)

Para la obtención de los resultados de la metodología del cálculo hidráulico se tuvieron en cuenta los siguientes datos, tabla 3.1:

**Tabla 3.1** Pérdidas Hidráulicas en la línea de bombeo

Accesorios	Cantidad	coeficiente de perdida	Resultado
Codo de 90°	29	0,8	23,2
Codo 45°	22	0,4	8,8
Válvulas de bola	2	1,5	3
Pérdida a la salida		1	1
Pérdida en la entrada		0,9	0,9

➤ **Datos de la línea**

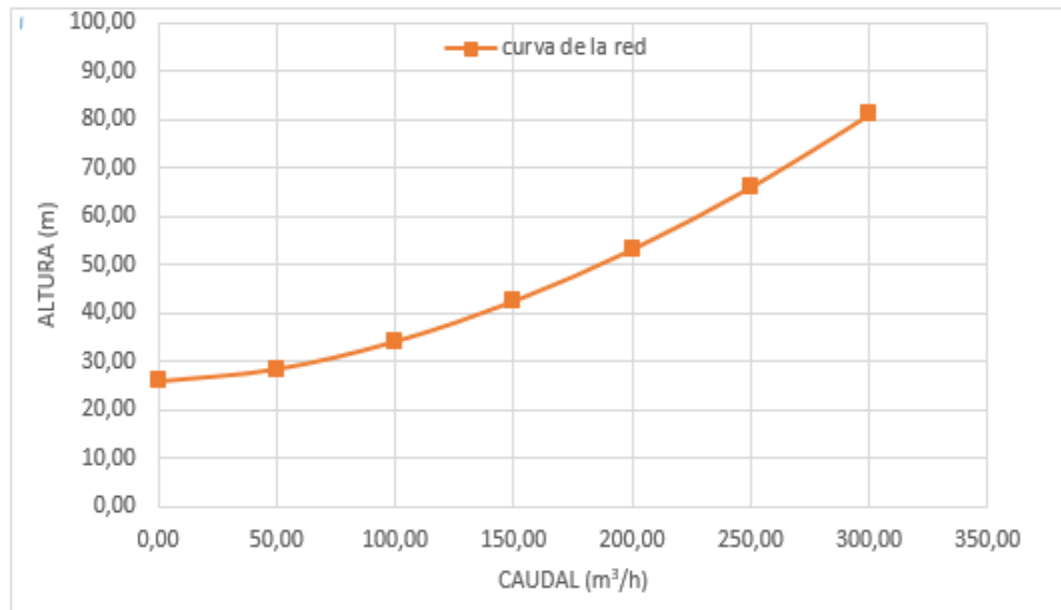
- Longitud de succión: 0,86 m
- Longitud de descarga: 980 m
- Diámetro de succión 0,3 m
- Diámetro de descarga 0,2 m

Según la metodología de cálculo hidráulico establecido en el Capítulo 2, obtendremos los valores de los parámetros que se muestran a continuación en la tabla 3.2:

**Tabla 3.2.** Parámetros característico para la determinación de la curva de la red.

Q(m³/h)	Q(m³/s)	Vs(m/s)	Vd(m/s)	Re-s	Re-d	$\lambda_s$	$\lambda_d$	Rs	Rd	Rt	H red
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	9,1	1907,5	1916,7	26,0
50	0,01	0,20	0,44	1154	2685	0,054	0,044	10,7	13040,9	13051,7	28,5
100	0,03	0,39	0,88	2983	6940	0,043	0,035	10,4	10688,1	10698,6	34,2
150	0,04	0,59	1,33	5199	12095	0,037	0,030	10,2	9549,6	9559,9	42,6
200	0,06	0,79	1,77	7710	17938	0,034	0,027	10,1	8832,6	8842,7	53,2
250	0,07	0,98	2,21	10468	24353	0,031	0,025	10,1	8323,0	8333,1	66,1
300	0,08	1,18	2,65	13438	31263	0,029	0,024	10,0	7934,6	7944,7	81,1

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 3.2 obtenemos la curva característica de la red del sistema (Figura 3.1).

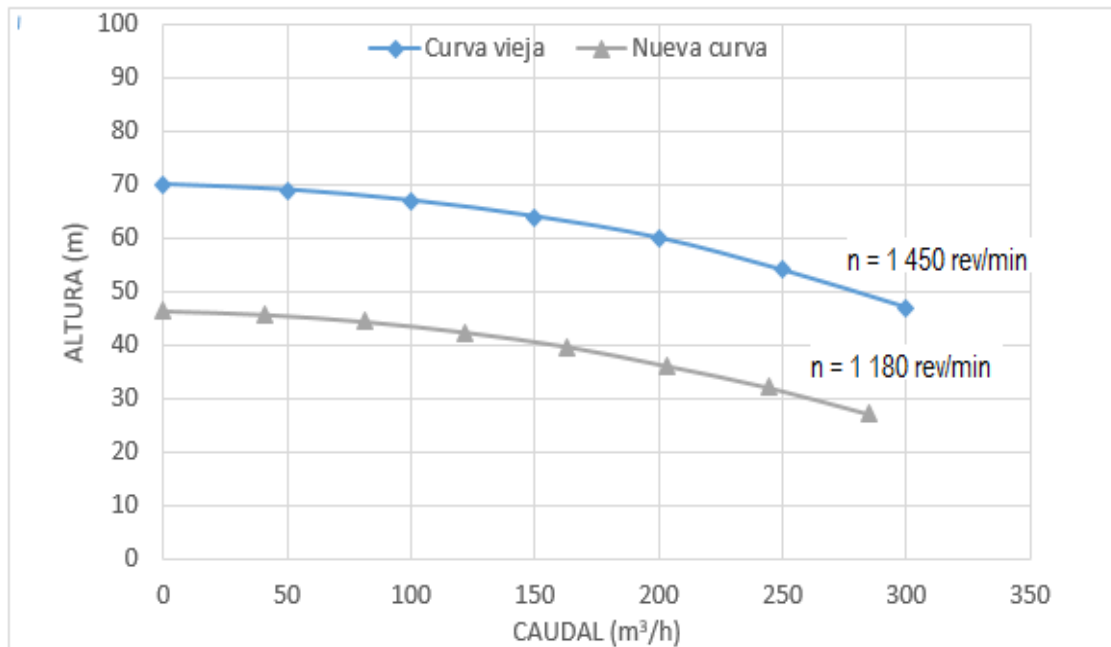


**Figura 3.1.** Curva característica de la red

Una vez obtenida la curva de la red, se hace necesario obtener o graficar la curva de la bomba. Se destaca que el sistema de bombeo actual consta de un catálogo disponible para obtener la curva de la bomba para ese modelo a 1 450 rev/min. Por problemas que ha tenido la bomba se le han hecho modificaciones y por tanto la bomba trabaja a 1 180 rev/min, con el empleo la ecuación (2.11) y (2.12) se obtuvo la data para construir la curva de la bomba (Tabla 3.3), y después se procedió a graficar dicha curva. (Figura. 3.2).

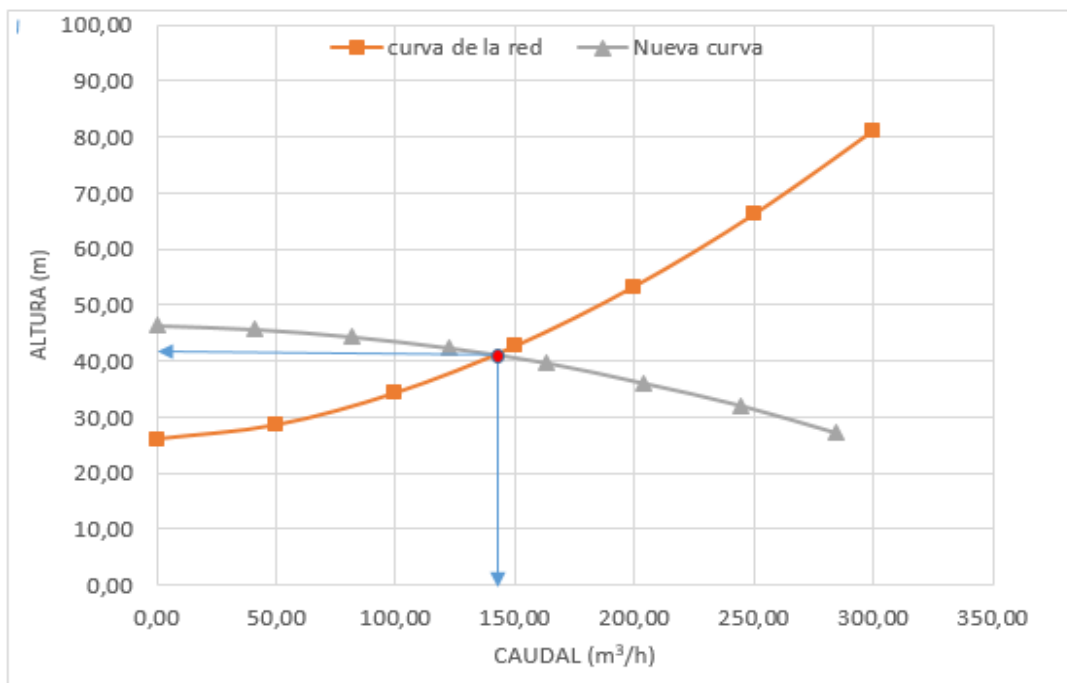
**Tabla 3.3.** Data para construir la curva a 1 180 rev/min

$Q_1(\text{m}^3/\text{h})$	$n_1(\text{rev}/\text{min})$	$n_2(\text{rev}/\text{min})$	$Q_2(\text{m}^3/\text{h})$
0	1 450	1 180	0,00
50	1 450	1 180	40,69
100	1 450	1 180	81,38
150	1 450	1 180	122,07
200	1 450	1 180	162,76
250	1 450	1 180	203,45
300	1 450	1 180	244,14

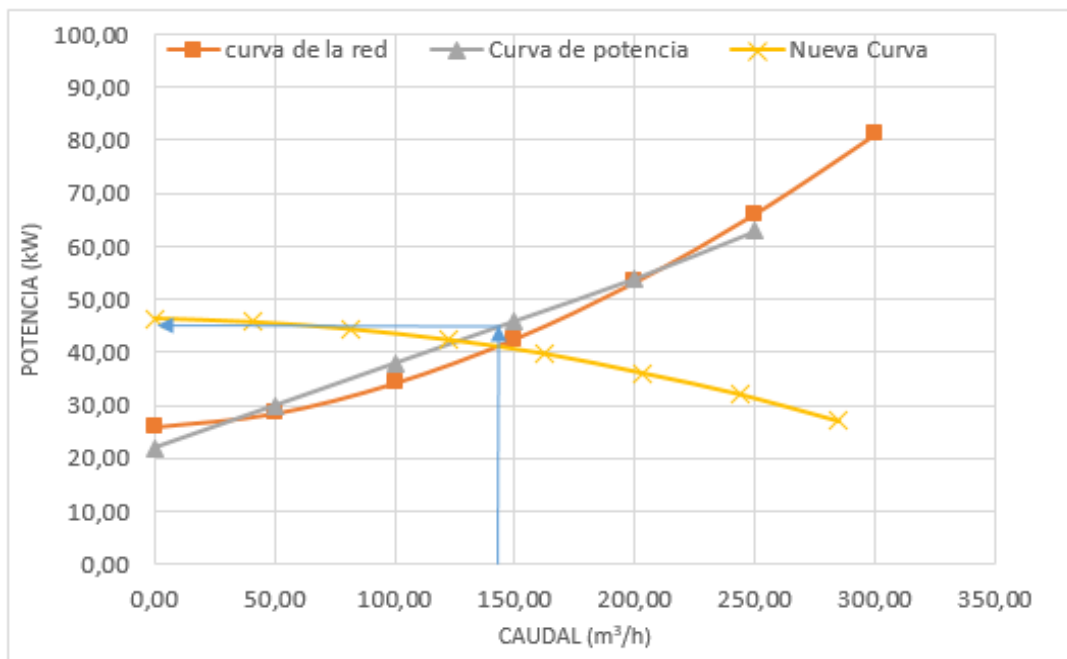


**Figura 3.2.** Curva de Bomba 160/71a, a 1 180 rev/min

. En las figuras 3.3, 3.4, 3.5 se muestran los parámetros operacionales del sistema PA - Re para las condiciones de trabajo dadas.

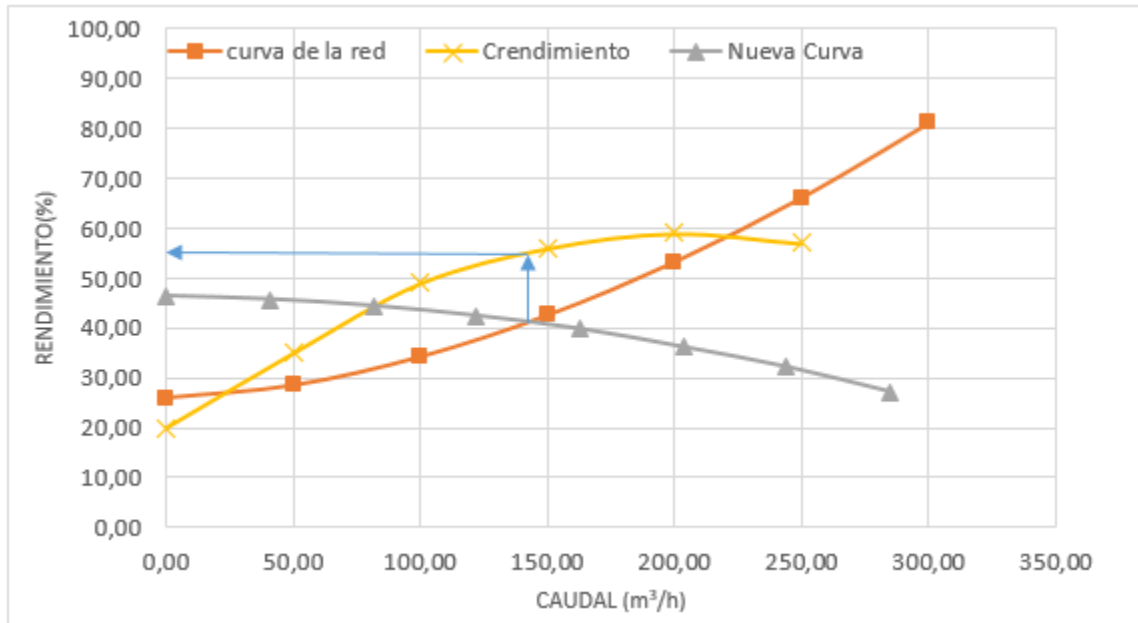


**Figura 3.3.** Punto de trabajo del sistema PA – Re para  $n = 1\ 180$  rev/min



**Figura 3.4.** Punto de Operación contra curva de potencia





**Figura 3.5.** Punto de trabajo contra curva de rendimiento.

En el análisis de las figuras mostradas se determina que los parámetros de operación del sistema PA – Re están dados por un Caudal **Q = 148 m³/h**, una altura **de H = 41 m**, Potencia consumida para las condiciones dadas de **N = 46 kW** y un rendimiento **del 56 %**.

### Análisis de cavitación

Con el cálculo de las alturas netas positiva de succión, disponible y la requerida aplicada a través de la metodología de los cálculos hidráulicos planteada para este tipo de fluido y su instalación, se obtiene los valores de los parámetros cuantitativos de su comportamiento comprobando que no se cumple con la condición de ausencia de cavitación ya que **(NPSH)<sub>r</sub> = 5 m** (Martínez 2004) y **(NPSH)<sub>d</sub> = 2,76 m**,  $NPSH_d \leq NPSH_r$  por lo que las bombas cavitan, lo que provoca pérdidas de capacidad en las bombas, disminución de la velocidad del fluido en la línea y por tanto la sedimentación de sólidos en la misma, así como elevados niveles de gasto de energía y roturas en las bombas.

### 3.3 Análisis de los resultados del Sistema Rebombear a los depósitos (Re – De)

A partir del mes de marzo del año 2017 comienza a trasegarse la cola de forma ininterrumpida para el nuevo embalse con la utilización de las mismas bombas existentes en el pozo de cola, pero para vencer las resistencias locales provocadas por la diferencia de altura y longitud al nuevo dique se instalaron las bombas en conexión en serie. Al emplearse dos bombas por línea quedó afectada la disponibilidad de reserva de bombas para la instalación y por la naturaleza muy abrasiva del fluido trasegado se produjeron afectaciones al proceso tecnológico por concepto de averías en las bombas conectadas en serie.

Para darle solución a la problemática ocasionada por las dificultades en el bombeo con las bombas conectadas en series y evitar afectaciones al proceso metalúrgico la dirección de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” tomó la decisión de ejecutar una estación de rebombear con localización intermedia entre el pozo de cola y el nuevo dique de forma temporal, hasta que se adquirieran las unidades de bombeos ideales a utilizar en el pozo de cola, en la actualidad la instalación se encuentra en operación, aunque faltan trabajos preliminares por implementar para dar por concluida la inversión.

Para la obtención de los resultados de la metodología del cálculo hidráulico se tuvieron en cuenta los siguientes datos, tabla 3.4:

**Tabla 3.4.** Pérdidas Hidráulicas en la línea

Accesorios	Cantidad	Coeficiente de perdida	Resultado
Codo de 90°	12	0,8	9,6
Codo 45°	9	0,4	3,6
Válvulas de bola en succión	1	1,5	1,5
Pérdida a la salida		1	1
Pérdida en la entrada		0,9	0,9

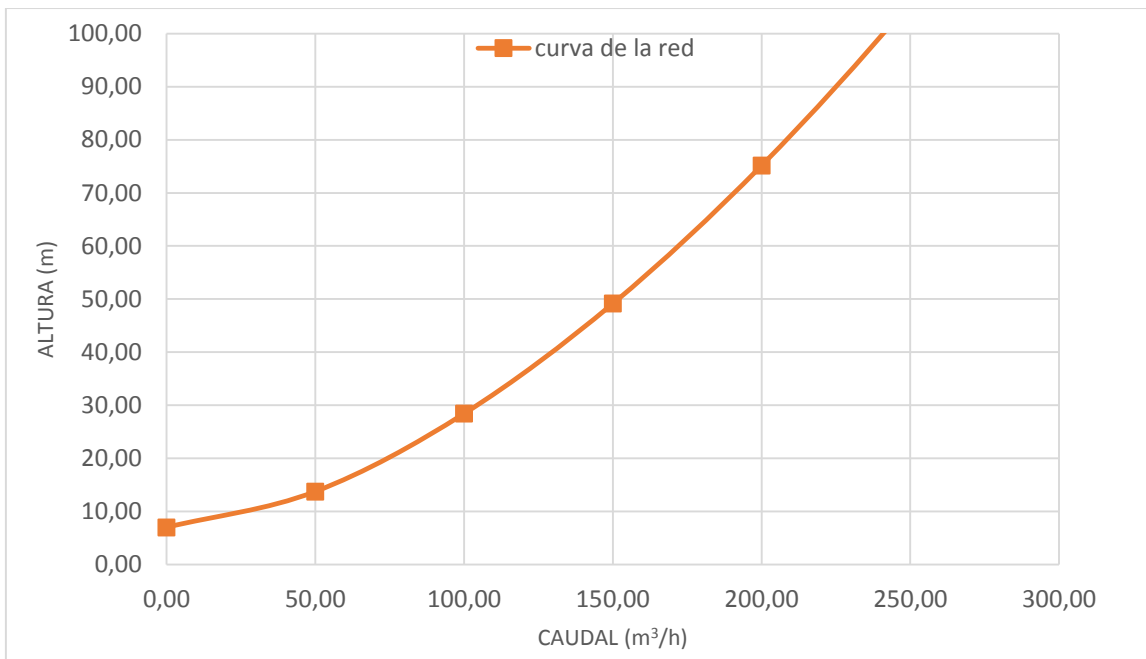
➤ **Datos de la línea**

- Longitud de succión: 2,26 m
- Longitud de descarga: 3 000 m
- Diámetro de succión 0,3 m
- Diámetro de descarga 0,2 m

Según la metodología de cálculo hidráulico establecido en el Capítulo 2, obtenemos los valores de los parámetros (tabla 3.5) que nos permitió construir la curva de la red (figura 3.6):

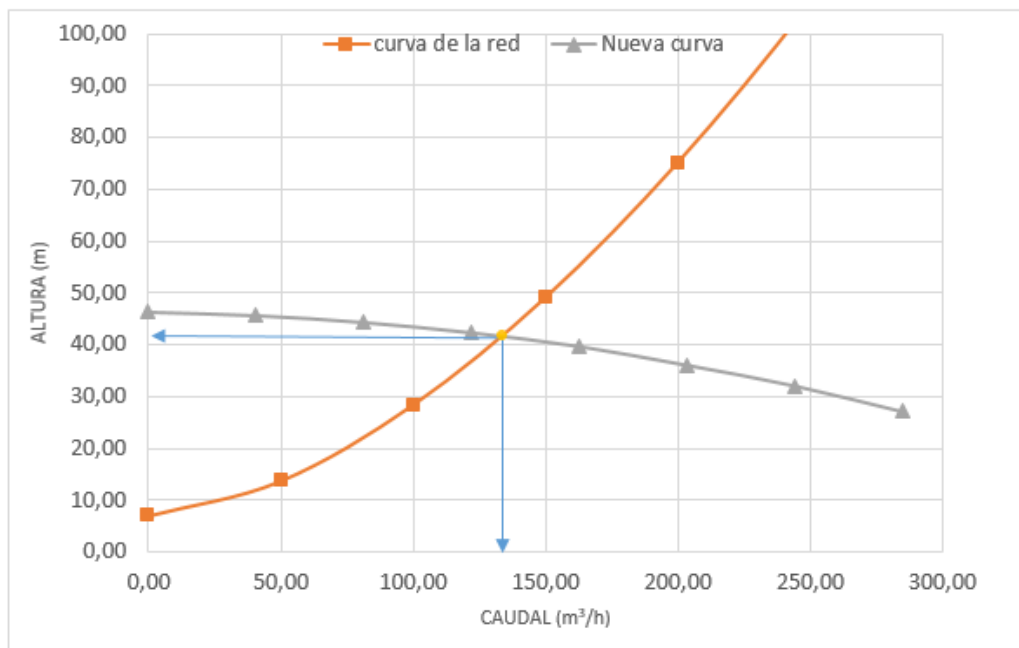
**Tabla 3.5.** Parámetros característico para la determinación de la curva de la red.

Q(m³/s)	Vs(m/s)	Vd(m/s)	Re-s	Re-d	$\lambda_s$	$\lambda_d$	R s	R d	Rt	Hred
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	24,5	858,1	882,6	7,00
0,01	0,20	0,44	1154	2685	0,054	0,044	28,6	34940,2	34968,8	13,75
0,03	0,39	0,88	2983	6940	0,043	0,035	27,7	27737,7	27765,5	28,42
0,04	0,59	1,33	5199	12095	0,037	0,030	27,3	24252,5	24279,9	49,15
0,06	0,79	1,77	7710	17938	0,034	0,027	27,0	22057,3	22084,4	75,16
0,07	0,98	2,21	10468	24353	0,031	0,025	26,9	20497,5	20524,4	105,98
0,08	1,18	2,65	13438	31263	0,029	0,024	26,7	19308,6	19335,4	141,27
0,10	1,38	3,10	16598	38615	0,028	0,023	26,6	18359,8	18386,4	180,79

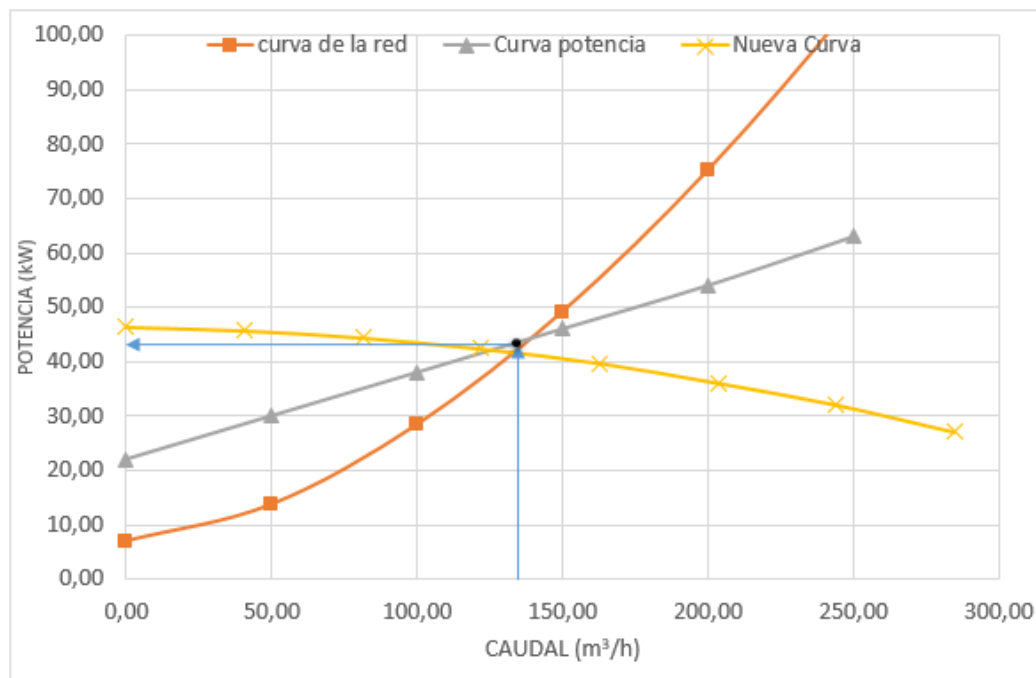


**Figura 3.6.** Curva de la Red para el sistema Rebombeo nuevo depósitos (Re - De)

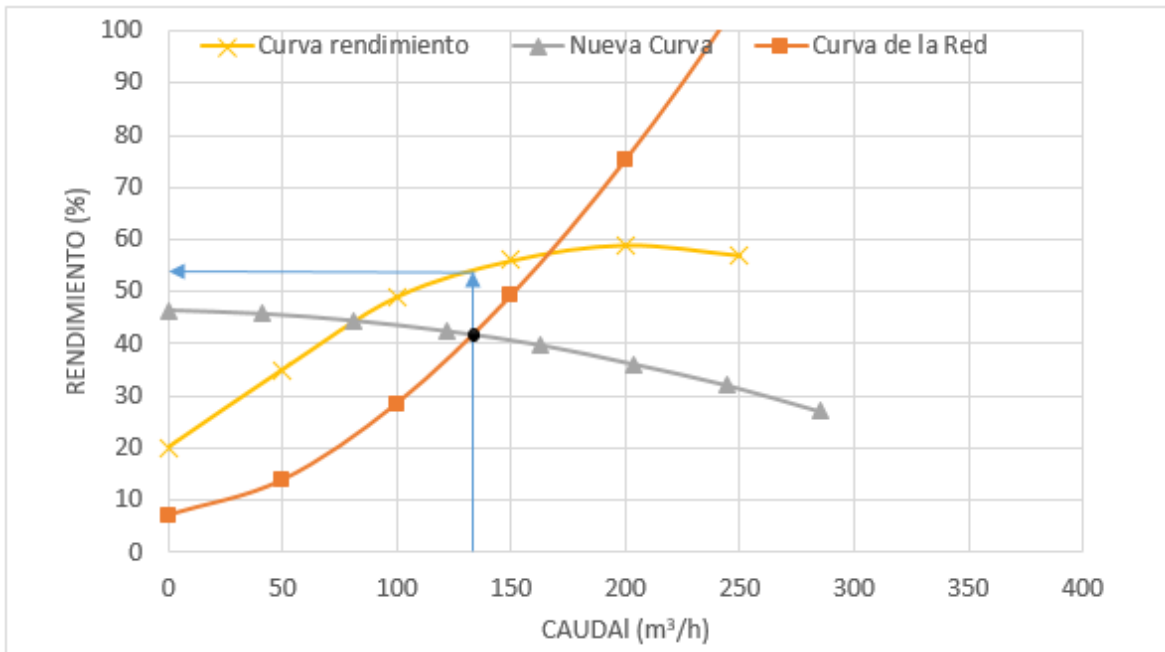
Los parámetros operacionales del sistema Re – De se muestran en las figuras 3.6; 3.7; 3.8.



**Figura 3.6** Punto de trabajo de la instalación



**Figura 3.7.** Punto de Operación contra curva de potencia



**Figura 3.8.** Punto de trabajo contra curva de rendimiento.

Las figuras 3.6 – 3.8 muestran que el punto de trabajo del sistema de Rebombear hasta los nuevos depósitos se caracterizan por un **Caudal  $Q = 140 \text{ m}^3/\text{h}$** , una altura  **$H = 41 \text{ m}$** , una potencia de consumo del motor  **$N = 43 \text{ kW}$**  y un rendimiento de un **54 %**

### Análisis de la cavitación

Mediante el cálculo del NPSHd y el NPSHr a través de la metodología de los cálculos hidráulicos planteada en el capítulo 2 para este tipo de fluido y la instalación, se obtiene los valores de  **$(\text{NPSH})_r = 5 \text{ m}$**  (Según Martínez 2004) y  **$(\text{NPSH})_d = 3,77 \text{ m}$** , por lo que  **$(\text{NPSH})_d \leq (\text{NPSH})_r$** , **las bombas cavitan**, lo que provoca pérdidas de capacidad en las bombas, disminución de la velocidad del fluido en la línea y por tanto la sedimentación de sólidos en la misma, así como, elevados niveles de gasto de energía y roturas en las bombas.

### 3.4 Análisis del Sistema desde Planta de Recuperación hasta los depósitos (PA – De)

Estas modificaciones realizadas al sistema de trasiego de desecho lixiviado (colas) incluyendo el rebombeo fueron realizadas por la ineficacia e ineficiencia del sistema anterior que no incluía rebombeo y se bombeaba directo desde la Planta de Recuperación a los nuevos depósitos. Por lo que en este trabajo de tesis se incluye la evaluación del sistema PA – De que nos permita determinar las posibles causas que conllevaron a la realización de una inversión costosa al realizar una estación de rebombeo.

Para la evaluación del sistema PA – De, se obtienen los resultados a partir de la metodología del cálculo hidráulico, teniéndose en cuenta los siguientes datos, tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Pérdidas hidráulicas en la línea

Accesorios	Cantidad	coeficiente de perdida	Resultado
Codo de 90°	41	0,8	32,8
Codo de 45°	31	0,4	12,4
Válvulas de bola	2	1,5	3
Pérdida a la salida		1	1
Pérdida en la entrada		0,9	0,9

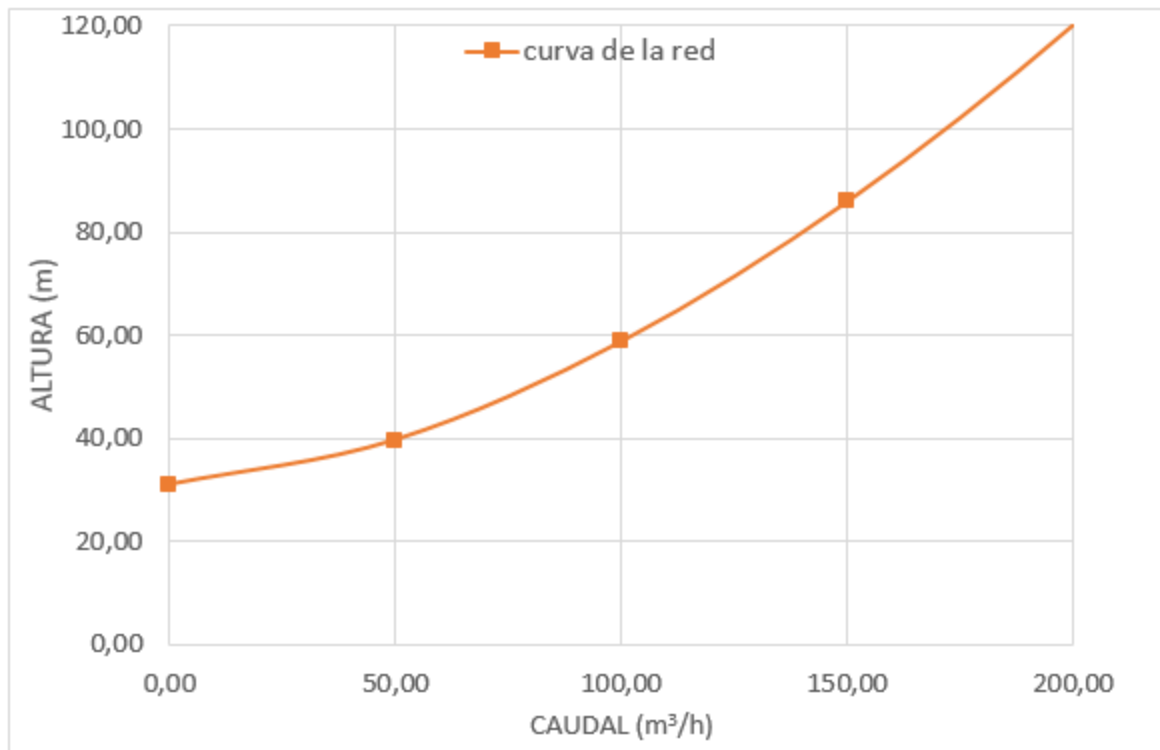
#### ➤ Datos de la línea

- Longitud de succión: 0,86 m
- Longitud de descarga: 3 980 m
- Diámetro de succión 0,3 m
- Diámetro de descarga 0,2 m

Según la metodología de cálculo hidráulico establecida en el Capítulo 2, obtenemos los valores de los parámetros (tabla 3.7) que nos permitió construir la curva de la red (figura 3.9):

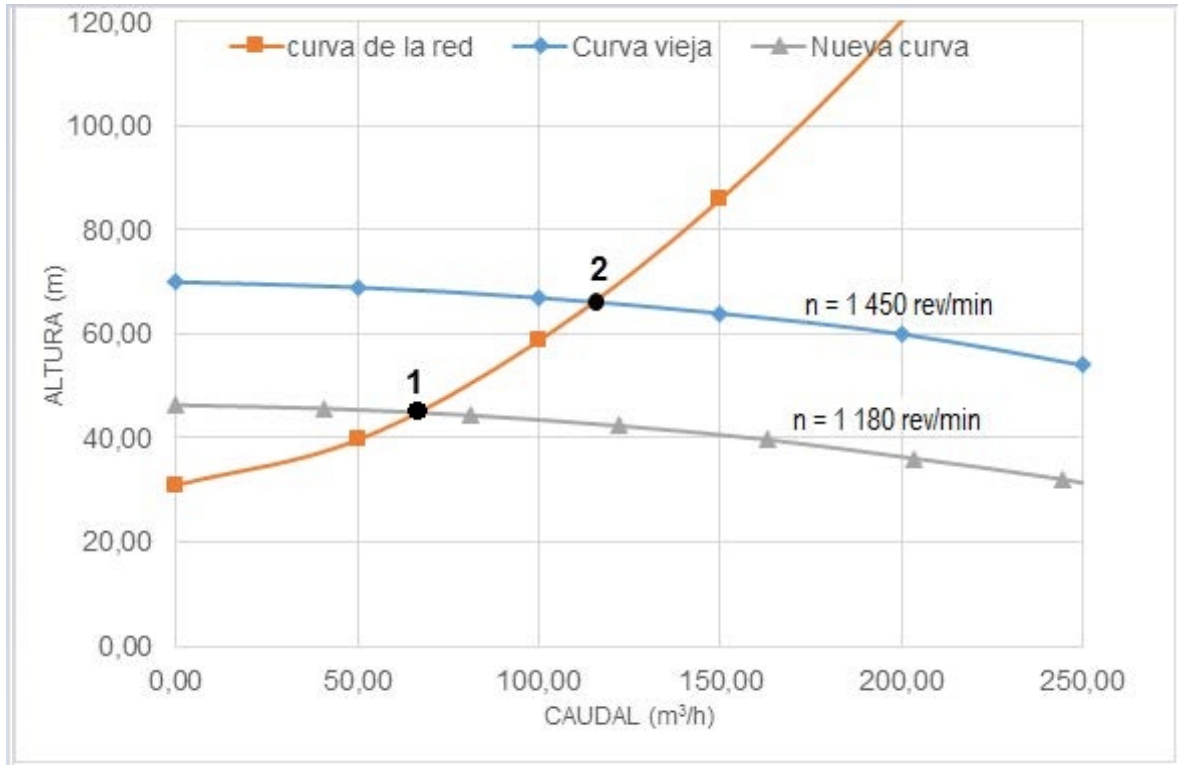
**Tabla 3.7.** Parámetros característicos para la determinación de la curva de la red.

Q(m <sup>3</sup> /s)	Vs(m/s)	Vd(m/s)	Re-s	Re-d	$\lambda_s$	$\lambda_d$	Rs	Rd	Rt	Hred
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	9,190	2589,8	2599,0	31,00
0,01	0,20	0,44	1154	3505	0,054	0,041	10,779	44889,7	44900,5	39,66
0,03	0,39	0,88	2983	9061	0,043	0,032	10,443	35950,6	35961,1	58,75
0,04	0,59	1,33	5199	15791	0,037	0,028	10,281	31625,0	31635,3	85,92
0,06	0,79	1,77	7710	23420	0,034	0,026	10,178	28900,6	28910,8	120,23
0,07	0,98	2,21	10468	31794	0,031	0,024	10,106	26964,7	26974,8	161,09
0,08	1,18	2,65	13438	40816	0,029	0,022	10,050	25489,1	25499,2	208,08
0,10	1,38	3,10	16598	50414	0,028	0,021	10,006	24311,5	24321,5	260,89



**Figura 3.9.** Curva de la Red para el sistema PA - De

El análisis del punto de operación del sistema PA – De se muestra en la figura 3.10. en la misma se incluye la determinación de los parámetros operacionales del sistema para los números de revoluciones 1 180 rev/min y 1 450 rev/min siendo este último el indicado por diseño.



**Figura 3.10.** Punto de trabajo para las condiciones del sistema PA -De

La figura 3.10 muestra que los parámetros operacionales del sistema PA – De para el numero de revoluciones actuales de la bomba de  $n = 1\,180\text{ rev/min}$ , va a estar dado por un **Caudal  $Q = 71\text{ m}^3/\text{h}$  y una altura de 42 m**, mostrando que el caudal obtenido es insuficiente comparado con los del sistema con rebombeo.

Una vez obtenido este resultado se realiza el análisis del sistema con el número de revoluciones por diseño de las bombas de  $n = 1\,450\text{ rev/min}$  obteniendo que en este caso el caudal para el sistema sería de  **$Q = 120\text{ m}^3/\text{h}$  para una altura de 64 m**. Al comparar estos resultados con los de la bomba a  $n = 1\,180\text{ rev/min}$ , se aprecia que el caudal y la altura obtenida, seria adecuadas para el trasiego de colas hacia los nuevos depósitos.



Los parámetros operacionales del sistema PA – De se muestran en las figuras 3.11; 3.12.

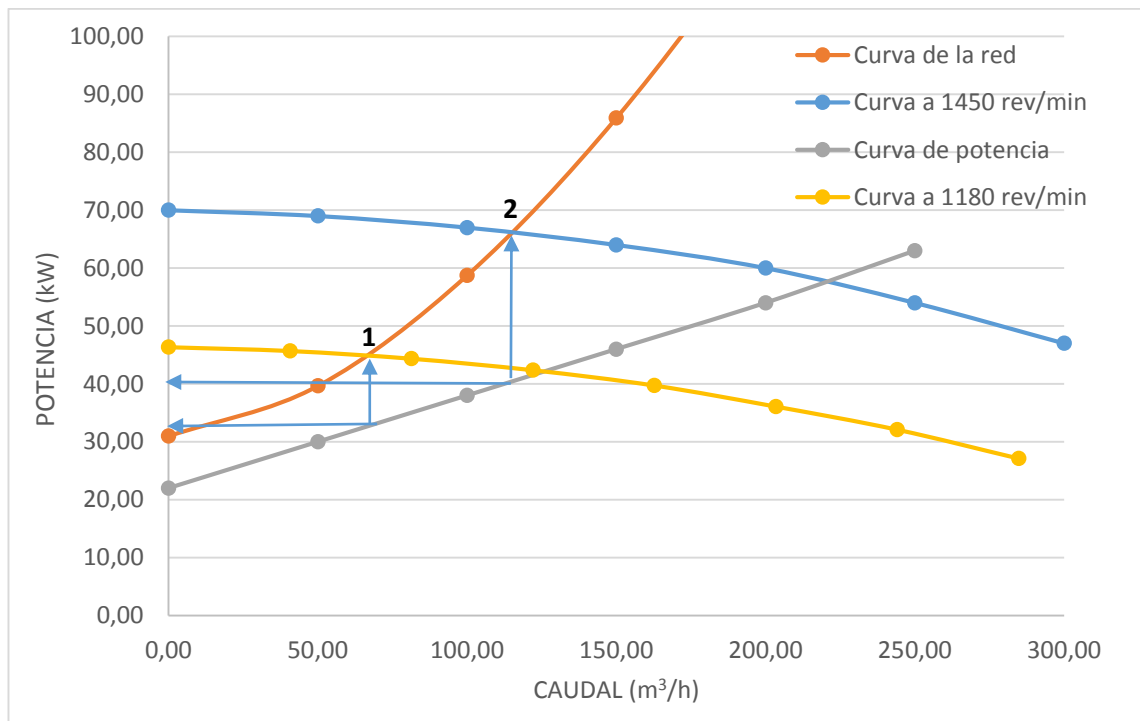


Figura 3.11. Puntos de trabajo contra curva de potencia

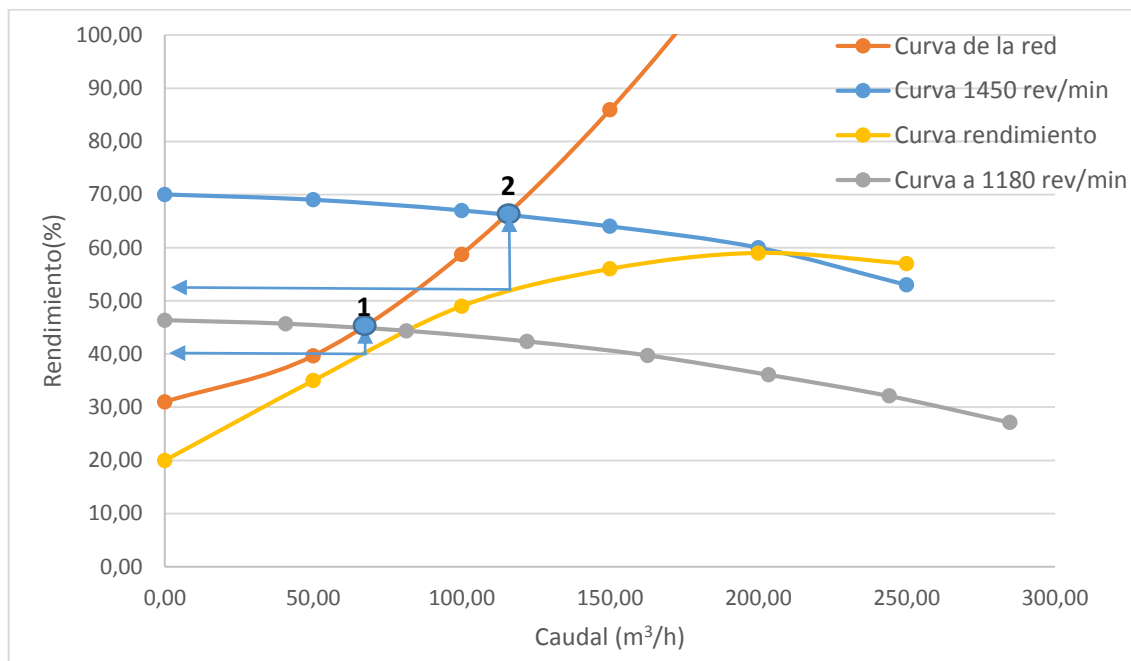


Figura 3.12. Puntos de trabajo contra curva de rendimiento

Las figuras 3.11 y 3.12 muestran el punto de trabajo contra las curvas de rendimiento y potencia del sistema (PA – De), el punto 1 con una potencia de consumo del motor **N = 32 kW** y un rendimiento de un **40 %**, el punto 2 tiene una potencia **41 kW** y un rendimiento de un **52 %**.

### 3.5 Valoración técnico económicas

Luego de haber analizado las características técnicas de los equipos instalados actualmente en la instalación objeto de estudio, obtenemos los resultados en cuanto a costo de bombeo mostrados en la tabla 3.8

Tabla 3.8. Resultados del costo de bombeo para los sistemas analizados

Sistemas de trasiego de cola	Costo de bombeo (CUC/año)
PA – Re	34 836,5
Re – De	31 401,5
<b>Costo del sistema con rebombeo</b>	<b>66 238,0</b>
PA – De (para n =1 180 rev/min)	17 310,05
PA – De (para n =1 450 rev/min)	28 832,06

Con la valoración de los resultados obtenidos podemos apreciar que el costo de bombeo para el sistema con rebombeo asciende a 66 238 CUC/año, mientras que con el sistema sin rebombeo para n = 1 180 rev/min existe una diferencia de **48 927,95 CUC/año**, aunque aparenta haber un ahorro significativo por este concepto económico, técnicamente no era factible al ser ineficaz el sistema.

Pero al analizar el costo de bombeo del sistema con rebombeo y el costo que representaría el sistema si se le instalaran motores con un número de revoluciones n = 1 450 rev/min, el ahorro sería de 37 405,94 CUC/año, siendo esta variante factible tanto económica como operacional, ya que la misma cumple con condiciones adecuadas de trasiego de los desechos lixiviados.

### 3.6 Recomendaciones para evitar la Cavitación en Bombas Centrifugas.

Es de vital importancia evitar el fenómeno de la cavitación en las bombas, ya que la misma causa daños irreversibles a la bomba, disminuyendo su capacidad de trabajo, aumentado el nivel de vibraciones del equipo entre otras, a continuación, planteamos algunas sugerencias para evitar la cavitación:

- ✓ No trabajar a velocidades más altas que las recomendadas por el fabricante.
- ✓ Evitar que la temperatura del fluido sea mayor a la del diseño del sistema.
- ✓ Siempre el NPSHd debe ser mayor que el NPSHr para evitar este fenómeno.
- ✓ Evitar la entrada de aire por la tubería de succión, la empaquetadura, o el sello mecánico.

#### Para incrementar el NPSH disponible se recomienda las siguientes acciones

- ✓ Subir el nivel del líquido en el tanque.
- ✓ Bajar la bomba.
- ✓ Reducir las pérdidas por fricción en la tubería de succión.
- ✓ Utilizar una bomba reforzadora.
- ✓ Subenfriar el líquido.

#### Para reducir el NPSH requerido se recomienda:

- ✓ Operar a velocidades más bajas.
- ✓ Impulsor de doble succión.
- ✓ Ojo de impulsor más grande.
- ✓ Colocar una bomba de tamaño más grande.
- ✓ Colocar un inductor (impulsor axial) antes del impulsor convencional.
- ✓ Colocar varias bombas pequeñas en paralelo.

### 3.7 Valoración ambiental

La planta de níquel de Punta Gorda “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante varios años de explotación ha producido un gran impacto negativo sobre el medio ambiente.

Debido a problemas tecnológicos y al manejo ambiental inadecuado durante todo el periodo de explotación, se han originado afectaciones medioambientales severas 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.

El principal impacto que produce la instalación de bombeo de cola hacia los alambiques en la planta es la erosión del polvo de cola, gases amoniacales, condensados, vibraciones, ruidos y otros componentes nocivos para la salud del hombre.

Efecto ambiental de la cola y las medidas para eliminar los daños que esta produce

1. Derrame en las tuberías por salidero de cola a causa de roturas, provocando emisión de gases tóxicos al personal de operación y mantenimiento.
2. Sedimentación de polvo de cola en lugares donde se ha averiado el sistema, afectando la salud de los trabajadores.
3. Constantes averías de las bombas en el sistema de bombeo hacia los alambiques, provocando inmediaciones y desprendimientos de gases calientes en la instalación.
4. Los operadores que participan en el sistema de bombeo de cola están expuestos a los gases tóxicos por los constantes escapes de cola desde el tanque de retención de la cola hasta el dique.

Medidas constructivas para eliminar estos problemas.

1. Dar mantenimiento y conservación de todo el puente de tuberías principalmente en las uniones y sellos.
2. Mantener la cultura industrial, eliminando toda la sedimentación de polvo de cola derramado en la planta.
3. Pasar por chequeo médico periódicamente para conocer el estado de salud de todo el personal de la planta.
4. Corregir todos los salideros de pulpa de cola en toda la instalación (principalmente en la salida de las bombas).

**Medidas para la protección del medio ambiente en el dique de cola.**

1. Determinar las características que presentan los materiales del dique para efectuar la siembra. Si los materiales son fértiles, semifértiles o rocas tóxicas o simplemente rocas, sobre esa base buscar la posibilidad de siembra.
2. No depositar materiales contaminantes dentro del depósito, si se hace lo contrario, hacer el estudio y por ende se debe tener el control dentro de la cola para proteger su extracción y conservación.
3. Tener las coordenadas de los objetos que se van quedando dentro de las colas, ejemplo (Tubos que puedan crear problemas a la hora de la extracción).
4. Si hay un cambio de tecnología que provoque un cambio en la composición de las colas hay que caracterizarlo técnicamente, se debe conocer las permeabilidades del dique y de la cola a investigar.

**3.8 Conclusiones del Capítulo**

- ✓ A partir de la metodología planteada en el capítulo se realiza la obtención de los parámetros operacionales del sistema de trasiego de desechos lixiviados bajo las condiciones actual hacia los nuevos depósitos y se realiza el análisis del sistema sin tener en cuenta el rebombeo
- ✓ El análisis demuestra que el sistema sin rebombeo PA – De no cumple con parámetros operacionales adecuados para el trasiego de dicho material hacia los nuevos depósitos lo que provocaba ineficacia en el sistema.
- ✓ Se establecen la valoración económica a partir de los costos de bombeo del sistema.
- ✓ Las principales afectaciones al medio ambiente son provocadas por el ruido y los vertidos de cola con sus concentraciones de amoníaco correspondiente, producidos por roturas en elementos mecánicos presentes en las bombas, aunque se conoce que el nivel de ruido en la instalación es aceptable.

### Conclusiones generales

- ✓ Se establece a partir de la caracterización reológica, que las suspensiones de desechos lixiviados mantienen un comportamiento de los fluidos no newtonianos y que para concentraciones de sólido inferiores a 40 % se puede clasificar como un fluido típico de los materiales **Seudoplásticos**, permitiendo establecer la metodología de cálculo apropiada para la evaluación de estos sistemas que mantienen **una concentración de sólido alrededor del 35 %**.
- ✓ Se logró trazar la curva de la red satisfactoriamente a 1 180 rev/min, lo que permitió establecer los parámetros operacionales reales del sistema, encontrando que hasta el rebombeo (PA – Re) se trabaja con **un caudal de 148 m<sup>3</sup>/h, a una altura de 41 m, una potencia 46 kW, con una  $\eta = 56 \%$** , y desde el rebombeo a los nuevos depósitos (Re – De) **un caudal de 140 m<sup>3</sup>/h, una altura de 41 m, una potencia de 43 kW y un rendimiento de 54%**.
- ✓ Se determina que los parámetros operacionales del sistema PA – De (un **Caudal Q = 71 m<sup>3</sup>/h y una altura de 42 m**) no cumplían con condiciones adecuadas para el trasiego de dicho material a 1 180 rev/min.
- ✓ Si se establece que el sistema de bombeo Planta – Depósito (Pa – De) trabaje con motores a 1 450 rev/min, se lograría parámetros operacionales adecuados de un caudal alrededor de los **120 m<sup>3</sup>/h para una altura de 64 m**. Demostrándose que la inversión el cambio de motores hubiera sido una solución técnica a la ineficacia del sistema, comparada con la construcción del sistema de rebombeo.
- ✓ Se demostró que otra de las causas de la ineficiencia del sistema es el trabajo bajo el régimen cavitacional, provocado por las condiciones de succión en el pozo de cola y las altas temperaturas a las que son transportadas dichas suspensiones.
- ✓ Se demuestra que, por concepto de costo de bombeo la instalación actual consume 66 238 CUC/año con motores a 1 180 rev/min, comparada con un sistema directo PA – De con motores a 1 450 rev/min para un consumo de bombeo de 44 708,62, el ahorro estaría en 21 529,38 CUC/año.

**Recomendaciones**

Las recomendaciones que se proponen abarcan desde soluciones inmediatas e intermedias hasta soluciones a largo plazo que prevén la reprojeción completa de la instalación y la adquisición de equipos idóneos:

1. Se recomienda si es posible elevar el nivel de la cola en el pozo entre 5.5 y 7 m para aumentar la altura de succión, y bajar la temperatura de la cola para una disminución en la tensión de vapor, todo esto para evitar el fenómeno de la cavitación en la instalación.
2. Adquirir nuevos motores a 1 450 rev/min e instalarlos en el bombeo, para convertir el rebombeo en reserva.
3. Adquirir las unidades de bombeo adecuadas para el trasiego de la cola en el pozo y mantener la estación de rebombeo para casos de emergencia.
4. Realiza las operaciones de limpieza de las tuberías con el agua de alta presión, durante las operaciones en el pozo y en la estación de rebombeo.

## Referencias Bibliográficas

1. Álvarez, (2003) *Guía para el diseño de sistemas de tuberías*.
2. Anónimo (2017) *Manual de operaciones de la UBP recuperación de amoniaco - cobalto de la Emp. Comandante Ernesto Che Guevara, Moa*.
3. Bandala M. "Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos". Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
4. Batista, L.M. (2016) *Operación eficiente de los sistemas de bombeo para las pulpas lateríticas en la Empresa Pedro Sotto Alba. Moa: Trabajo de Diploma, ISMM*
5. Costa, G.M. et.al. A comprehensive Moessbauer study of highly substituted aluminum maghemite. *Geochemical Society*, 1984.
6. Darby R. "Laminar and turbulent pipe flows of not Newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena". Año 2002.
7. Díaz A. "Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento". *Tecnología Química*. 19(3) 22 – 36, 1999.
8. Díaz A. y Hechavarría T. "Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento". *Tecnología Química*. 19(3) 22 – 36, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 9 de diciembre de 2012]
9. Fernández, J. P. (2015) *Manual de operaciones de la planta de Lixiviación y lavado de la Emp. Comandante Ernesto Che Guevara, Moa*.
10. Gamez. (2016). *Evaluación del sistema de bombeo de cola en la Planta de Recuperación de Amoniaco de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, Holguín; ISMMM*
11. Garcell, L. *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía, 2003.



12. Góngora B. Eidier. *“Evaluación del sistema de bombeo para el transporte de las colas de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, de Moa”*. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad de Oriente, 2011.
13. Lakovlev, s.v; y.m. dalkov. Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p.
14. Ibarz A., Vélez J. y Barbosa G. *“Transporte de Alimentos Fluidos a Través de Tuberías”*. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
15. Leyva. (2014). *Influencia del porcentaje de sólidos en la sedimentación del lodo*. Moa
16. Martínez, L.A. Proyección de un sistema de hidrotransporte de pulpa abrasiva (cola) desde la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” hasta el nuevo depósito de cola. Trabajo de diploma. ISMM 2004.
17. Nekrasov, B. *“Hidráulica”*, editorial PAZ, Moscú. (1986)
18. Pakrovskaya. *Transporte hidráulico de sólidos*, 1985.<sup>1</sup>
19. Pérez M. O. *“Determinación de los parámetros técnico económicos racionales para el transporte de petróleo por tuberías”*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Electromecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 2013
20. Polier, (2016). *Evaluación del sistema de bombeo de cola en la Planta de Recuperación de Amoniaco de la Emp. Comandante Ernesto Che Guevara*. Moa
21. Rabinovich E. Z. *“Hidráulica”*. Ed. MIR, Moscú, URSS, 1987.
22. Ramos, F. (2015). *Evaluación de los parámetros de transporte de la pulpa laterítica*. ISMM, Moa; Tesis de Grado
23. Reyes De la Cruz Jorge L., Ruiz Chavarría G. y Hernández S. Z. *“Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas”*. <http://www.lajpe.org>, Año 2010.
24. Rodríguez (2016). *Análisis de cavitación en bombas que trasiegan carbonato de níquel en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Moa

25. Rodríguez T. Héctor L. *“Flujo de fluidos”*. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 7 de Julio de 2009.
26. Software profesional para cálculo y gráficos especializados, Excel, 2016.
27. Steffe J. M. y Morgan R. G. *“Pipeline Design and Pump Selection for Non – Newtonian Fluid Foods”*. Food Technology, Diciembre 1986. p. 78 – 85.
28. Turro, B. A. *“Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal”*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154.
29. Vega, Gusman, C; J, Villacreses-Zambrano, A, J. 2011: Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio. Dr.C. David Matamoros (Tutor). Trabajo de Diploma. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 182p.
30. Vennard J. K. y Street R. L. *“Elementos de mecánica de los fluidos”*. Editorial Revolucionaria, La Habana, 1986.
31. Welty J. Wicks. *“Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer”*. Ed. J. Wiley and Sons, Nueva York, EUA., 1976.

**Anexo 1:** Imagen de Instalación de bombeo de cola



## Anexo 2. Coeficiente de pérdidas locales

	Pérdida en codo 90° ( $\xi_c 90$ )	Pérdida en codo 45° ( $\xi_c 45$ )	Pérdida en válvula ( $\xi_v$ )	Pérdida en la entrada ( $\xi_e$ )	Pérdida en la salida ( $\xi_s$ )	Pérdida en Te ( $\xi_T$ )	Pérdida en reducido ( $\xi_s$ )
valor	0,8	0,4	1,5	0,9	1	1,8	0,0043

## Anexo 3. Instalaciones objetos de estudio

