

# **Trabajo de Diploma**

**En opción al título de**

## **Ingeniero Mecánico**

**Título:** Modificación del Sistema de  
Bombeo de Cola hasta la Recuperación

**Autor:** Roilberto Lambert Pileta

**Tutores:** Dr. C. Raúl Izquierdo Pupo

**Msc. C. Rodney Martínez Rojas**

**Asesor:** Ing. Mec. Reinolmer Cardoza Noa

## Declaración de Autoridad

Yo: Roilberto Lambert Pileta

Autor del presente trabajo de diploma que lleva como título: *“Modificación del Sistema de Bombeo de Cola hasta la Recuperación de Amoniaco”*, realizado en el actual año 2017, 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.

Para que así conste firmamos la presente

a los \_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del 2017.

---

Firma de Roilberto Lambert Pileta

---

Firma de Raúl Izquierdo Pupo

---

Firma de Rodney Martínez Rojas

## **Pensamiento**

“Nunca consideres el estudio como una obligación,  
sino como una oportunidad para penetrar en el  
bello y maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein

## **Dedicatoria**

- A toda mi familia que me apoyaron de una forma u otra, en especial a mis padres Aleida Pileta Velásquez y Roberto Lambert Matos; a mi hermosa hermanita Alisbet Lambert Pileta y Andris Casa Pileta mi hermano mayor.
- A mis amigos que han sido especiales en todo momento: Leo, Raúl, Mario, Roelis, Heicer, Ivan, Alfredo, y otros muchos con los que he compartido y me han brindado su apoyo.
- A mis compañeros de grupo, que venimos batallando desde el 1er año en el 2012.
- En especial me gustaría agradecer a nuestro eterno Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, por su esfuerzo en construir una patria soberana libre de analfabetismo.

## Agradecimientos

Me arrodillo ante el señor y aunque no practique la religión creo mucho en él, porque gracias a él estamos todos aquí.

Gracias a todas aquellas personas que han influido de una manera u otra a mi formación como futuro profesional de la industria, al claustro de profesores que estuvieron con nosotros durante estos 5 años, un poco duros para ellos, a mis tutores el Dr. C. Raúl Izquierdo Pupo, el Msc. C. Rodney Martínez Rojas y mi asesor en la empresa Ing. Mec. Reinolmer Cardoza Noa.

Una vez más y las que sean necesarias a mis padres que no me dejaron escapar de la universidad con los comentarios de “la cosa está mala pero nosotros luchamos por ustedes”.

Y mis amigos me decían “haz lo que nosotros no pudimos”.

Gracias

Un agradecimiento para los obreros que me guiaron y adentraron en la empresa “Cmtd. Ernesto Che Guevara”.

A la revolución cubana la cual me ha dado la oportunidad de formarme como profesional.

A Todos:

*Muchas Gracias...*

## Resumen

El presente trabajo se realizó la modificación del sistema de bombeo de cola de la UBP Lixiviación y Lavado de la Empresa Productora del Níquel “Ernesto Che Guevara”, donde se analizó la configuración del sistema teniendo en cuenta los accesorios de las tuberías, con vista al análisis de la mejor solución del problema. Para la modificación se plantea eliminar la sección del tramo 2 del sistema de bombeo y sustituir las bombas del tramo 1 por las del tramo 2, obteniendo como resultados generales que para una potencia de 90 kW y número de revoluciones de 1800 rev/min, el punto de trabajo es de 380 m<sup>3</sup>/h con una altura de 37 m, presentando ausencia de cavitación; comparando estos parámetros obtenidos con el caudal 315 m<sup>3</sup>/h y altura 40 m que se necesita. La valoración económica demostró que los cambios realizados producen un ahorro en electricidad de 93 531,151 CUC/año y en mantenimiento de 499,37 CUC/año, lo que demuestra la factibilidad del proyecto.

---

## Summary

The present work was done the modification of the tail pumping system of the UBP Leaching and Washing of the Nickel Production Company " Ernesto Che Guevara", where the configuration of the system was analyzed taking into account the fittings of the pipes, in order to the analysis of the best solution of the problem. For the modification it was proposed to eliminate the second section of the pumping system and to replace the pumps of section one with those of section two, obtaining as a general result that for a power of 90 kW and speed of rotation to the 1800 rev/min, working point was 380 m<sup>3</sup>/h with a height of 37 m, presenting no cavitation. Comparing these parameters obtained with the flow 315 m<sup>3</sup>/h and height 40 m that was needed. The economic valuation showed that the changes made resulted in electricity savings of 93 531,151 CUC by year and maintenance of 499.37 CUC by year, which demonstrates the feasibility of the project.

# Índice

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1.    Introducción .....	5
1.2.    Revisión bibliográfica .....	5
1.3.    Clasificación geológica de los fluidos .....	8
1.4.    Curvas de Flujo .....	10
1.5.    Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de las dispersiones minerales.....	11
1.5.1.    Efectos que puede causar la granulometría.....	11
1.5.2.    Efectos que puede causar la temperatura .....	11
1.5.3.    Efectos que puede causar la concentración de sólidos .....	12
1.5.4.    Efectos que puede causar el pH .....	12
1.6.    Particularidades de las Bombas Centrífugas .....	12
1.7.    Eficiencia del Sistema de Bombeo .....	15
1.7.1.    Elementos que intervienen en la eficiencia de sistemas de bombeo .....	16
1.7.2.    Factores que incrementan la eficiencia en un sistema .....	18
1.8.    Conclusiones del Capítulo .....	20
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
2.1.    Introducción .....	21
2.2.    Caracterización de las bombas utilizadas en el trasiego de cola desde Lixiviación hasta Recuperación .....	21
2.3.    Propiedades físico-mecánicas de la cola a transportar.....	22
2.4.    Gráfico de las curvas características de la bomba PB315/40pc.....	23
2.5.    Configuración y complementos del sistema de tubería.....	23
2.6.    Modificación del sistema de transporte de pulpa .....	24
2.7.    Metodología de cálculo para la evaluación del bombeo de cola.....	26
2.7.1.    Determinación de las propiedades reológicas de la cola .....	26
2.7.2.    Área de la sección transversal de la tubería.....	26
2.7.3.    Velocidad del fluido.....	27
2.7.4.    Número de Reynolds del fluido.....	27
2.7.5.    Factor de fricción.....	27
2.7.6.    Cálculo de las pérdidas totales en las tuberías .....	29
2.7.7.    Altura Estática .....	30
2.7.8.    Coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior .....	30
2.7.9.    Cálculo de la característica exterior de la red .....	31
2.8.    Velocidad específica.....	31
2.9.    Cálculo de análisis de cavitación en bombas centrífugas .....	32



---

2.10. Cálculo del balance energético de la bomba centrífuga .....	33
2.11. Metodología de cálculo para la valoración económica.....	35
2.12. Conclusiones del capítulo.....	36
CAPITULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO	
AMBIENTAL .....	37
3.1. Introducción .....	37
3.2. Análisis de los resultados de la evaluación del sistema de bombeo.....	37
3.2.1. Datos a tener en cuenta para cada tramo de del sistema de bombeo.....	37
3.2.2. Resultados obtenidos para el tramo 1, tramo 2 y la modificación .....	39
3.3. Análisis de la Valoración Económica .....	44
3.3.1. Datos a tener en cuenta para el cálculo de la Valoración Económica .....	45
3.3.2. Resultados de la valoración económica .....	45
3.4. Impacto medio ambiental .....	46
3.5. Conclusiones del capítulo.....	49
CONCLUSIONES GENERALES .....	50
RECOMENDACIONES .....	51
Bibliografía .....	52

## INTRODUCCIÓN

Las bombas han tenido y tienen un papel decisivo en el desarrollo de la humanidad. No es posible imaginar los modernos procesos industriales y la vida en las grandes ciudades sin la participación de estos equipos.

Están presentes en las grandes centrales termoeléctricas, en las empresas de procesos químico y metalúrgico, en las industrias alimenticias, en los equipos automotores, en el suministro de agua y evacuación de residuales, entre otras aplicaciones más específicas.

Las bombas hidráulicas no solo transportan líquidos, sino también sólidos. El transporte hidráulico de sólidos en los procesos industriales, es una tecnología que hace avanzar el proceso entre las distintas fases de solido/líquido. Se conoce que se puede transportar sólidos con características: abrasivas, cortantes, pegajosas, escamosas, espumosa, pueden ser pesados, gruesos, duros, cristalinos, en fin, casi todo tipo de sólidos. Pero hay que tener en cuenta que para poder transportar estos solidos mediante las bombas hidráulicas, estos deben de ser mezclados con algún tipo de líquido, los cuales pueden ser soluciones químicas tales como ácido y cáusticos, alcohol, derivados del petróleo, entre otros, pero el más utilizado en las aplicaciones industriales, principalmente en la minería, es el agua.

En todo el mundo se utilizan estas tecnologías como medio de transporte rápido y seguro, aprovechando al máximo sus utilidades. Cuba no es la excepción, pues cuenta con diversas empresas que se apoyan en el trabajo de estas máquinas para llevar de un lugar a otro las sustancias que se necesiten para conseguir algún objetivo en específico.

Dentro de las empresas de Cuba que utilizan muy constantemente estas máquinas se encuentran la Empresa “Comandante Pedro Sotro Alba” y la Empresa Productora del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, las cuales se encuentran ubicadas en la región del municipio Moa provincia de Holguín. Estas industrias se caracterizan por trabajar la minería como proceso fundamental aunque con métodos diferentes y para diferentes finalidades.

El esquema tecnológico de la Empresa Productora del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido.

Esta tecnología reporta diversas ventajas como son:

- Es un proceso que se realiza en condiciones de presión atmosférica.
- El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplia utilización de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, etc.).
- El esquema amoniacal permite la elaboración de las mezclas de los minerales lateríticos y serpentínicos, mientras que el esquema de lixiviación con ácido sulfúrico permite solamente la elaboración de la fracción laterítica.

La principal deficiencia de este proceso es el bajo porcentaje de extracción del mineral: con un (70 a 76) % de Ni y (25 a 35) % de Co.

La empresa cuenta con 6 Unidades Básicas Productivas (UBP) principales, una de ellas es la UBP Planta de Lixiviación y Lavado. En la UBP antes mencionada la pulpa formada con el mineral reducido en la UBP de Hornos pasa por 3 sistemas paralelos de tres etapas de Lixiviación a contracorriente con el licor carbonato - amoniacal. La Lixiviación se realiza con el licor carbonato – amoniacal en los espesadores por medio de la aireación de la pulpa con aire (en los turboareadores). Luego de la Lixiviación la pulpa se envía al sistema de Lavado (dos en paralelo). El Licor enriquecido en Ni y Co es enviado a la planta de Separación de Cobalto, la pulpa de desecho es enviada a la planta de Recuperación de Amoniaco.

Dentro de este sistema amplio de lixiviación y lavado, se encuentran un subsistema, encargado de retener la cola procesada de los tanques de sedimentadores de lavado (SD-221 A y SD-221 B) en sus propios tanques (TK-231 y TK-323), diluirla un poco más y enviarla a la planta de Recuperación de Amoniaco ( $\text{NH}_3$ ). Este subsistema de recolección consta con cuatro bombas cada una con un consumo de 132 kW y un mecanismo con dos motores de 7,5 kW, lo que aumenta considerablemente el consumo energético de la planta y de la empresa en general, además del gasto en

reparaciones y mantenimiento. Considerando este subsistema prescindible para la planta el mismo es tomado como la situación problémica del proyecto.

### **Problema**

Consumo excesivo de energía eléctrica, producto al implemento innecesario de varias bombas centrífugas en los tanques de retención de cola del Sistema de Bombeo de Cola en la UBP de Lixiviación y Lavado de la Empresa Productora del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”.

### **Objeto de la investigación**

Sistema de Bombeo de Cola en la UBP de Lixiviación y Lavado de la Empresa Productora del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”.

### **Objetivo general**

Modificar el Sistema de Bombeo de Cola en la UBP de Lixiviación y Lavado de la Empresa Productora del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, para disminuir el consumo eléctrico.

### **Campo de acción**

Sistema de Bombeo de Cola.

### **Hipótesis**

Con la modificación del subsistema de retención de cola y la evaluación de las bombas PB-315/40 para la transportación de la misma cola hasta Recuperación de  $\text{NH}_3$  es posible disminuir el costo de mantenimiento y reducir considerablemente el consumo energético.

### **Objetivos específicos**

1. Realizar el análisis de la instalación actual determinando el punto de operación de las bombas con respecto al sistema de tuberías.
2. Justificar la modificación de la instalación para el transporte de cola cumpliendo con la hipótesis planteada.
3. Analizar los resultados haciendo énfasis en la valoración económica de los valores obtenidos para la modificación del sistema.

**Tareas de investigación**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Análisis de las propiedades del fluido que se transporta.
3. Proponer un nuevo diseño del sistema de bombeo que cumpla con los objetivos propuestos, y ayude a erradicar el problema planteado.
4. Desarrollar la metodología de cálculo más adecuada para cumplir con las exigencias de evaluación de la red de hidrotransporte.
5. Análisis de las incidencias económicas, sociales y ambientales del proceso.
6. Realizar la valoración económica, comparando el Sistema actual y la nueva modificación.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla el marco teórico del presente Trabajo de Diploma, partiendo del estudio de las investigaciones realizadas sobre este tema, las cuales nos permiten conocer varias teorías, lo que nos lleva a definir el **objetivo del capítulo**, el cual sería: Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica, con la finalidad de disponer de los elementos básicos necesarios para la solución del problema planteado.

### 1.2. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se orientó en los aspectos que podrían ayudar en el desarrollo del proyecto, principalmente en el transporte hidráulico enfocándose en lo referente a las bombas centrífugas y el estudio del transporte de pulpas, sin dejar atrás la eficiencia y ahorro energético en el proceso.

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

(Evelio, 1999), entre los elementos de las máquinas rotatorias (bombas centrífugas) que más fallan se encuentra los ejes, impulsores y rodamientos; esto se debe en gran medida a la cavitación cuando esta se encuentra en un alto grado.

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

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. (Ibarz *et al*, 2001).

(Turro Breff, 2002), en su tesis doctoral estudia el hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, planteando a partir del sistema de correlaciones derivado del modelo físico propuesto, su novedad para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte, a partir de los resultados de la caracterización realizada y del sistema de ecuaciones producto del modelo físico – matemático.

Otros trabajo referentes al transporte de la pulpa laterítica fueron realizados por (Izquierdo, Turro, K., & Alejandro, 2001), donde los autores hicieron un estudio experimental apoyándose en un instalación a escala semi- industrial donde se muestra en qué medida la utilización del criterio generalizador de Reynolds ( $Re^*$ ) es correcta para la determinación del coeficiente de pérdidas hidráulicas para regímenes de movimiento estructural y transitorio obteniendo que para el mineral laterítico se ajustan perfectamente a la línea  $\lambda = (64 / Re^*)$ , lo que confirma la racionalidad de utilizar el criterio de Reynolds para la generalización de los datos experimentales.

(Darby, 2000), se refiere con frecuencia a la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudo plástico 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 reológicas.

A partir de los trabajos descritos por (Caldyño & S., 2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla, que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos.

Según lo planteado por (Turiño, 1999), no existe una teoría que permita predecir el comportamiento exacto de una bomba centrífuga cuando manipula un fluido viscoso, pues teóricamente hasta el presente ha sido imposible tener en cuenta la influencia de la viscosidad en los parámetros de trabajo de la bomba y en la forma de sus características.

En la tesis doctoral de (Turro Breff, 2002), demuestra que la composición mineralógica, la concentración y temperatura de las muestras ejercen gran influencia sobre el gradiente hidráulico. Se obtuvo las correlaciones gráficas y expresiones matemáticas que describen el flujo de esas colas por tuberías; así como el factor de fricción para régimen laminar y turbulento. El conjunto de correlaciones obtenidas permitió conformar un modelo matemático aplicado para la metodología de cálculo de las instalaciones de transporte de colas trifásicas en el proceso CARON, que permitió calcular las instalaciones, establecer regímenes racionales de trabajo y seleccionar adecuadamente el equipamiento; así como valorar el trabajo de las existentes.

(Rodríguez C, 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.

(Pérez L. , 2013), investiga sobre la pulpa laterítica donde evalúa el sistema de bombeo luego de haber determinado las propiedades físico – mecánicas de dicha pulpa, trabajó además en las interacciones y los factores que influyen sobre el comportamiento de las dispersiones mineralógicas al igual que en el comportamiento reológico.

(Leyva, 2014), en su investigación determina la influencia que ejerce el porcentaje de sólido en la 2ª velocidad de sedimentación del lodo generado en la Planta Procesadora de Árido. Dentro de los resultados se realiza: un análisis granulométrico, la determinación de la densidad aparente del sólido, la medición de la densidad del lodo, el cálculo del porcentaje de sólido y diseñó un experimento para la realización de pruebas de sedimentación.

Otro de los investigadores es (Ramos, 2015) en su trabajo realiza un estudio de los parámetros de transporte hidráulico de la instalación de bombeo de pulpa laterítica de la fábrica Comandante “Pedro Sotelo Alba” donde basa su atención



en la sedimentación existente en la tubería, calculando las pérdidas hidráulicas en el sistema, también realizó un análisis geológico obteniendo un comportamiento plástico real, cuya curva de flujo está descrita por el modelo geológico de Herschel–Bulle.

Con todos estos trabajos antecedentes se tiene una base de los problemas que se pueden presentar en las instalaciones de bombeo de pulpas así como sus posibles soluciones.

### **1.3. Clasificación geológica de los fluidos**

La reología es la especialidad de la física centrada en el análisis de los principios que determinan cómo se mueven los fluidos. El concepto fue propuesto por el científico estadounidense Eugene Cook Bingham (1878–1945) en la primera mitad del siglo XX.

Lo que hace la reología es estudiar el vínculo existente entre la fuerza que se ejerce sobre un material y la deformación que éste experimenta al fluir. A través de ecuaciones constitutivas, es posible establecer un modelo acerca de la manera de comportarse de estas sustancias. (Gardey, 2015)

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo, (Garcell L. , 2001)

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.

Los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos dependiendo de la variación de la viscosidad, los mismos son:

❖ **De viscosidad independiente del tiempo**

**Sesudo plásticos:** 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  $m < 1$ ):

$$\tau = K \cdot \left[ \frac{\partial V_x}{\partial y} \right]^m \quad (1.1)$$

Donde:

$m$  – índice de flujo ( $m < 1$ )

$K$  – 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:

$$\tau = t_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (2.1)$$

Donde:

$t_0$  = esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

$\mu$  = viscosidad plástica.

**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 ( $t_0$ ), siguen el modelo de Bulkley – Herschel:

$$\tau = t_0 + K \cdot \gamma^m \quad (1.3)$$

### ❖ De viscosidad dependiente del tiempo

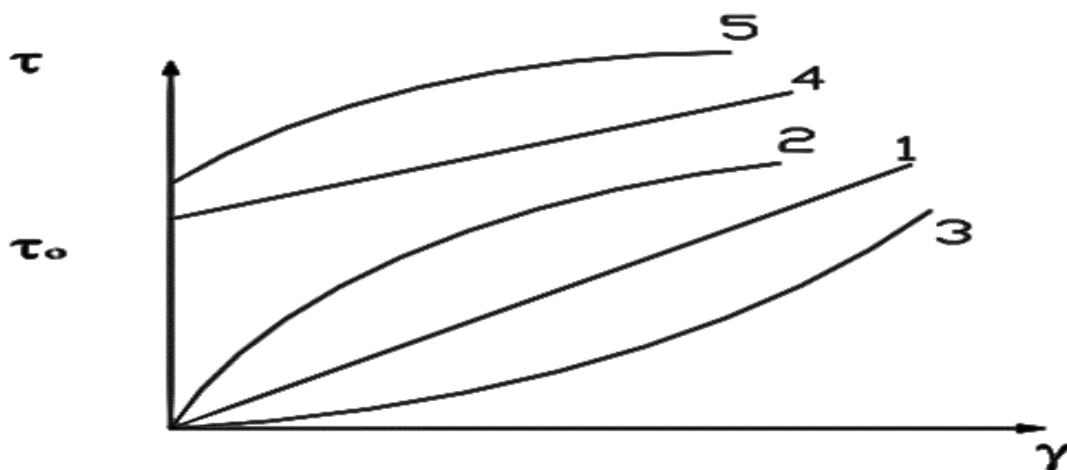
**Tixotrópicos:** La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidas a un gradiente de velocidad determinado, se comportan reológicamente como pseudoplásticos, plásticos ideales y reales.

**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, de manera que al cesar la acción del esfuerzo el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos.

#### 1.4. Curvas de Flujo

Al representar gráficamente (figura 1.1) la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo. (Garcell L. , 2001).



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

Las curvas de flujo son muy importantes en el diseño de equipos, también en la evaluación de instalaciones montadas.

También se puede determinar la caída de presión que se necesita para que un determinado material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro

previamente conocido. Del mismo modo se puede utilizar para clasificar los materiales reológicamente y encontrar un modelo adecuado.

### **1.5. Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de las dispersiones minerales**

Según (Perez L. , 2010) cuando un sólido es dispersado en un líquido, la viscosidad de la suspensión que se forma se incrementa. La dispersión puede exhibir comportamiento newtoniano o no newtoniano, en dependencia de las interacciones físicas y químicas que tiene lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y características de las fases mineralógicas que constituyen el sólido. A continuación se facilita un breve análisis de los factores más importantes que influyen en el cambio de las propiedades reológicas de los materiales a transportar.

#### **1.5.1. Efectos que puede causar la granulometría**

Se confirmó (Garcell A. C., 1992) que las pulpas acuosas de laterita (limonita) preparadas con partículas mayores de 90  $\mu\text{m}$  no logran formar una estructura y muestran un comportamiento newtoniano; en cambio, las preparadas con mezclas de partículas inferiores a 50  $\mu\text{m}$  forman estructuras que comunican a la suspensión propiedades plásticas, pudiendo ajustarse su curva al modelo de los plásticos Bingham. Las pulpas de lateritas industriales muestran una distribución granulométrica en la que predominan las partículas con tamaños inferiores a 43  $\mu\text{m}$ , de ahí el comportamiento típico de los plásticos Bingham de estas suspensiones.

#### **1.5.2. Efectos que puede causar la temperatura**

En la mayoría de los líquidos y suspensiones en general, se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura (Garcell A. C., 1992). Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos, 1- disminución de la viscosidad del medio dispersante; 2- debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

### **1.5.3. Efectos que puede causar la concentración de sólidos**

En trabajos realizados por (Garcell, 1993) y por (Cerpa, 1998) con pulpas de lateritas pudo determinarse que, para concentraciones menores de 18 % en peso de sólidos, estas pulpas exhiben un comportamiento Seudoplástico que es prácticamente independiente de su composición mineralógica. Y para contenidos de sólidos en el orden de 22 % en peso se manifiestan propiedades plásticas, y a medida que se incrementa la concentración hasta 45 %, las viscosidades aumentan, dependiendo cada vez más de la mineralogía del sólido. En estas condiciones, las curvas de flujo, pueden ser ajustadas, en algunos casos, al modelo de Bingham o al de Bulkley – Herschel, en otros.

### **1.5.4. Efectos que puede causar el pH**

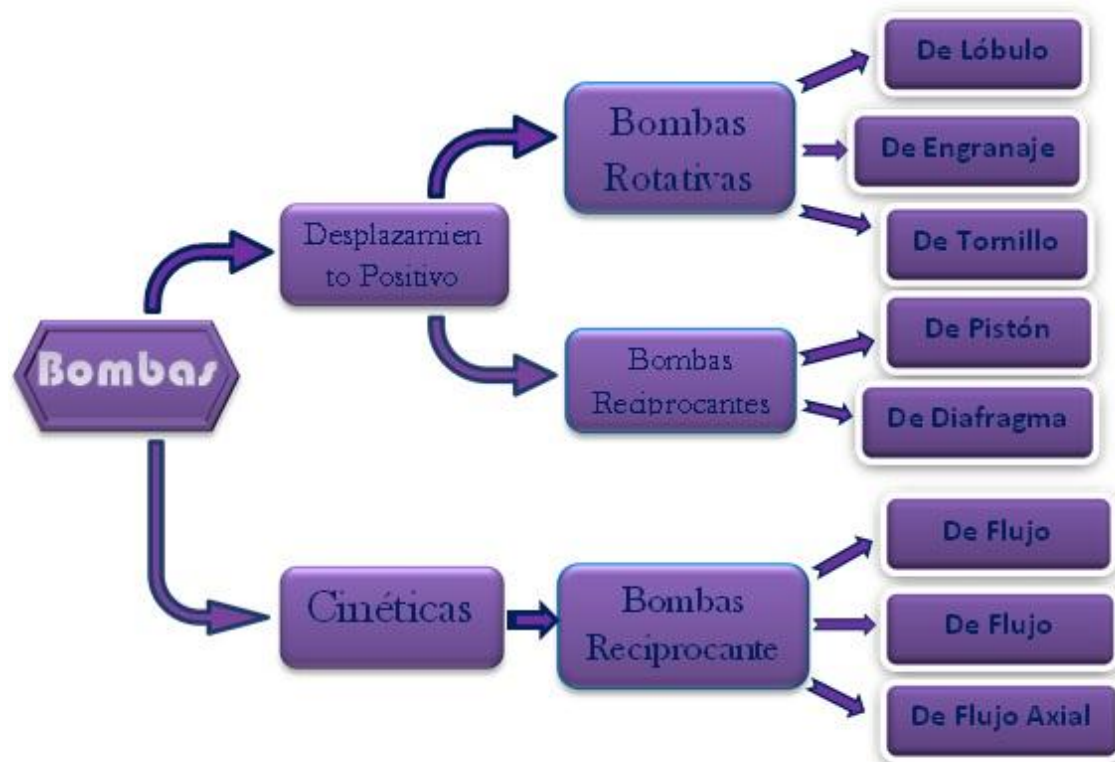
En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoelectrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas.

## **1.6. Particularidades de las Bombas Centrífugas**

Según (Pérez F. , 1983) 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. En la figura 1.2, se muestra la clasificación más general de las Bombas Centrifugas:



**Figura 1.2.** Clasificación de las bombas centrífugas.

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 ( $H_{\text{máx}}$ ), con caudal nulo, y el punto de máximo caudal ( $Q_{\text{máx}}$ ), con altura de elevación nula. Entre estos dos puntos la bomba puede proporcionar cualquier caudal comprendido entre 0 y  $Q_{\text{máx}}$ , a cualquier altura de elevación comprendida entre 0 y  $H_{\text{máx}}$ . (Skelland A. H., 1970)

Según (Rabinovich, 1987), la energía producida por la bomba debe vencer la resistencia que se opone al paso del fluido 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 equipo el tipo de fluido circulante.

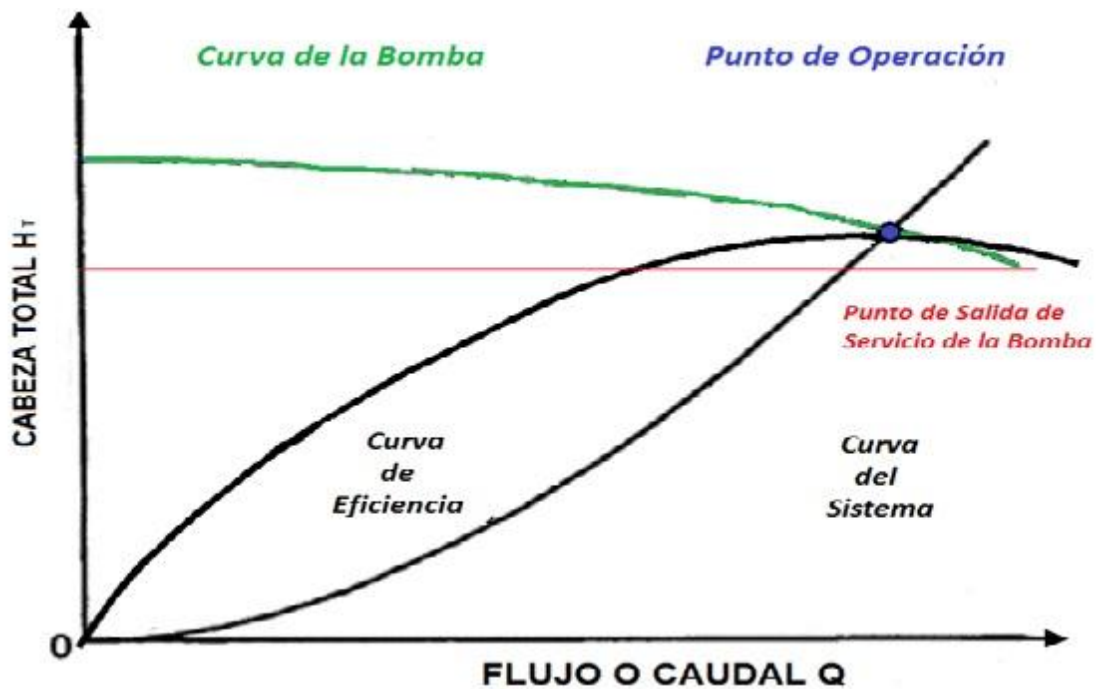
Para determinar el régimen de trabajo de las bombas centrífugas primeramente se debe tener presente las características de la curva de la bomba, que la misma son aportadas por el fabricante, estas se definen como:

- Las de caudal y carga de la bomba, llamadas curvas de la bomba,  $H=f(Q)$ .
- Las de potencia del motor necesario, kW.
- Las de carga positiva neta de aspiración requerida (NPSHr).

Las curvas características se construyen normalmente mediante pruebas realizadas con agua, por lo que sus datos se deben recalcular si se van a bombear líquidos con otras propiedades físicas. El modo de proceder, en el caso de las bombas centrífugas, para el empleo de estas curvas es el siguiente:

1. Conocer el fluido a bombear, la temperatura de bombeo y las propiedades físicas del fluido (densidad y viscosidad) a dicha temperatura.
2. Establecer el caudal volumétrico a desarrollar ( $m^3/h$ ).
3. Conocer la carga de la bomba, para lo que hay que determinar previamente las alturas totales de impulsión y aspiración.
4. Con la carga y el caudal que se precisan se ha de acudir a la curva  $H=f(Q)$  y, fijando estas dos magnitudes, determinar el diámetro del rodete, que en caso de no resultar un valor exacto nos llevaría a escoger el valor mayor más cercano.
5. Con el diámetro de rodete determinado y el caudal, en la curva de potencia se determina el consumo de la bomba. El valor leído en la curva ha de incrementarse en un 15% como margen de seguridad.
6. Finalmente y en la curva de NPSHr se determina dicho valor, para el caudal desarrollado.

Un sistema de bombeo funciona donde se produce la intercepción de la curva de la red con la de la turbomáquina, encontrándose el punto de operación en la convergencia de las dos curvas. Las características de la máquina y de la red son funciones del caudal. Por tanto, el régimen de trabajo de la instalación está determinado por las raíces del sistema de ecuaciones de cada curva característica. (A. Laurencio, 2004)



**Figura 1.3.** Curva Característica del Sistema.

La capacidad y la presión necesarias de cualquier sistema de bombeo se pueden definir con la ayuda de una gráfica llamada curva del sistema (*figura 1.3*). Del mismo modo la gráfica de variación de la capacidad frente a la variación de la de presión para una bomba en particular, define la curva característica de funcionamiento de la bomba.

### 1.7. Eficiencia del Sistema de Bombeo

Es necesario tener conocimiento acerca de la eficiencia del sistema de bombeo, así conocemos las condiciones en que operan los equipos, además de las pérdidas o ganancias que se puede tener con la instalación o modificación del sistema en el cual se requiera trabajar. La eficiencia es evaluada mediante la medición de parámetros, tales como: factor de potencia, tensión eléctrica, gasto de operación, nivel estático, nivel dinámico, potencia activa y aparente, corriente entre otros.

Las bombas centrífugas se diseñan para operar eficientemente a una carga, un gasto y una velocidad específica. A este punto de operación, se le conoce como: "punto de mejor eficiencia". Considerando el costo de la energía, es más eficiente operar la bomba en este punto. Los equipos a menudo no operan en estas condiciones, debido a cambios en la operación del sistema y a la



dificultad de igualar las condiciones de operación con el punto de mejor eficiencia de la bomba. Al operar el equipo fuera de este punto, se requiere de un esfuerzo adicional en algunas partes de la bomba y puede ocasionar daños en esta. Por otra parte, operar los equipos a una mayor capacidad respecto al punto de óptima eficiencia puede provocar mayores daños, ejemplo de ello es mayor la torsión, flexión o desviación de la flecha, la carga neta positiva de succión requerida puede ser mucho mayor que la disponible, ocasionando erosión, ruido, vibración debido a las altas velocidades del líquido, y sobre todo dando partida a la aparición del fenómeno de la cavitación. (Batista, 2016)

#### **1.7.1. Elementos que intervienen en la eficiencia de sistemas de bombeo**

Existen factores que inciden directamente en la eficiencia de un equipo de bombeo (Batista, 2016), en general estos corresponden a la fabricación del diseño del equipo, entre los principales se tienen los siguientes:

- *Pérdidas volumétricas*: estas pérdidas son indicativas de una circulación de flujo del lado de alta presión al de baja presión del impulsor, aunque en general, estas pérdidas son pequeñas, pueden tomar importancia bajo condiciones de desgaste o desajuste de la bomba.
- *Pérdidas hidráulicas*: constituyen la diferencia entre la carga que podría obtenerse de la energía disponible en el impulsor y aquella que realmente se desarrolla, las más importantes son por choque de entrada, generadas por el cambio de dirección del líquido y por fricción del líquido, al fluir.
- *Pérdidas mecánicas*: se deben principalmente a la fricción de cojinetes, empaques o sellos y la fricción del disco generada entre los lados del impulsor y el líquido.
- *Caracterización del líquido*: las condiciones del fluido a manejar, tienen consecuencias sustantivas sobre la operación de las bombas centrífugas. Ya que pueden afectar la construcción del equipo, y por lo tanto, el rendimiento y la potencia. Entre las más importantes tenemos la corrosión, temperatura a manejar, tamaño de las partículas en el líquido y uso al que se destinará, entre otras.
- *Condiciones de instalación*: existen condiciones de instalación que influyen en la eficiencia del equipo de bombeo, por lo que podemos citar las siguientes:

- \* *Pérdidas en motor y acoplamiento:* Aunque son externas a las bombas, es conveniente saber que estos componentes influyen en la eficiencia global. Aquí nos referimos a su rendimiento y diseño, sin embargo, es importante aclarar que el montaje apropiado del conjunto motor-bomba es necesario, para asegurar la máxima eficiencia, por lo que una deficiente alineación impone cargas adicionales sobre cojinetes y flexión en una o varias de las flechas del conjunto, ocasionando pérdidas de eficiencia y un mayor consumo de energía debido a la fricción y al desbalance mecánico; lo cual provoca vibraciones dañinas a los quipos, afectando la eficiencia global.
- \* *Pérdidas en la bomba:* Las vibraciones, ruido, movimientos y desbalance del equipo tienen consecuencia en la operación hidráulica, ya que se afectan tolerancias y cargas, reduciendo la capacidad real del mismo, requiriendo para ellos una mayor potencia y como consecuencia disminuye la eficiencia. Se conoce que la causa raíz de que los niveles de vibración y ruido sean demasiado altos está relacionada con una desalineación del eje, lubricación inadecuada, un montaje incorrecto, y disposiciones de rodamientos inapropiados o un enfriamiento ineficaz. Los altos niveles de vibraciones aumentan el consumo de energía y pueden causar averías prematuras de los equipos y elevados costos de mantenimiento, lo cual incluye con frecuencia paros imprevistos.
- \* *Alineación:* La correcta alineación de la bomba y el motor, es de suma importancia para conseguir una operación mecánica libre de problemas; por lo que esta se debe verificar de acuerdo con las recomendaciones del propio impulsor.
- \* *Impulsores:* Se deben ajustar los impulsores antes de poner en marcha la bomba. Una bomba nueva se debe operar con los impulsores ajustados a la mitad del juego lateral de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, esto es con el objetivo de que las gravillas o arena presentes en el agua, no provoquen un desgaste excesivo en la bomba lo cual afectaría la bomba, especialmente a los impulsores. Una vez que el agua deje de salir con gravillas o arena, los impulsores se podrán ajustar a su posición de trabajo más eficiente. Por otra parte, las bombas que poseen

un impulsor de acero inoxidable resultan ser menos eficientes que las de bronce.

- \* *Sobredimensionamiento*: El sobredimensionamiento de los equipos, es producto de un mal cálculo, falta de previsión y en algunos casos de información pobre, lo cual ocasiona que se disponga de equipos que no cumplan con las características que requiere el sistema hidráulico. Estos también producen desventajas que ocasionan pérdidas en la eficiencia del sistema, obteniéndose con ellos gastos de energía innecesarias.

### **1.7.2. Factores que incrementan la eficiencia en un sistema**

Para mantener, prever y controlar la eficiencia, podemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- ♦ Selección del equipo de bombeo (motor-bomba) apropiado, teniendo en cuenta el conocimiento pleno del sistema.
- ♦ Acabado de la superficie de los impulsores.
- ♦ Selección adecuada de la velocidad específica de succión.
- ♦ Control de líquidos viscosos.
- ♦ Control de concentración de grandes volúmenes de sólidos.
- ♦ Control del tamaño de sólidos.
- ♦ Control de fricción en cojinetes, empaques o sellos.
- ♦ Montaje apropiado del equipo (bomba-motor).
- ♦ *Corregir desbalances.*
- ♦ *Reducir vibraciones.*
- ♦ *Alineación del equipo en forma programada.*
- ♦ *Controlar la temperatura de operación del motor.*
- ♦ *Evitar recortes de impulsores.*
- ♦ *Controlar la velocidad del equipo.*
- ♦ *Controlar la presión del fluido.*
- ♦ *Evitar tensiones mecánicas en tuberías.*
- ♦ *Reposición de grasas adecuadas.*
- ♦ *Verificar el cebado de bomba y tuberías.*

- ♦ *Evitar entrada de aire.*
- ♦ *Cambiar sellos.*
- ♦ *Controlar el abatimiento del nivel dinámico.*
- ♦ *Control del peso específico del fluido que impulsa la bomba.*
- ♦ *Nivelación de la flecha.*
- ♦ *Verificar presión de succión y descarga.*

### **1.8. Conclusiones del Capítulo**

- Se realizó un profundo análisis bibliográfico de los trabajos existentes que abordan el tema de los sistemas de bombeo de pulpa, así como bibliografías especializadas en el tema.
- En el capítulo se abordaron temas como la clasificación reológicas de los fluidos, los principales aspectos que se deben de conocer de las bombas centrífugas, así como la eficiencia de los sistemas de bombeo; con el propósito de encaminar la investigación y lograr los objetivos propuestos.

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

Es de vital importancia que una instalación cumpla con las exigencias del proceso tecnológico del cual forma parte, para ello es de gran valor la selección adecuada de los equipos que la forman. Dentro de los parámetros que garantizan el buen funcionamiento de una determinada instalación se encuentra los parámetros constructivos y de funcionamiento de los equipos, así como el consumo energético que estos disponen, ya que una instalación que consuma más de lo que puede producir no es factible, ni recomendable.

Lo que nos lleva definir los **objetivos fundamentales** del capítulo los cuales serían: aplicar las metodologías de cálculo de los parámetros de la instalación que se quiere modificar, además de evaluar y comparar el consumo energético de la instalación que se encuentra actualmente y de la nueva modificación.

Para realizar esta tarea es necesario conocer las características de las maquinas con que se está trabajando, así como el fluido que manejan.

### 2.2. Caracterización de las bombas utilizadas en el trasiego de cola desde Lixiviación hasta Recuperación

En la Planta de Lixiviación y Lavado, dentro del proceso se encuentran los sedimentadores de lavado SD-221 A y SD-221 B, con el objetivo de transportar hidráulicamente la cola que estos procesan es necesaria la utilización de 2 bombas centrífugas PB-315/40CP, (figura 2.1) cada tanque.



**Figura 2.1.** Imagen de la Bomba Centrífuga PB-315/40CP.

**Tabla 2.1.** Características de las Bombas

<b>Actuales Bombas de Pulpa de los SD-221A y B (Modelo: PB-315/40CP)</b>			
Caudal	Q	0,0875	m <sup>3</sup> /s
Altura	H	40	m
Número de revoluciones	n	1780	rev/min
Potencia	N	90	kW
Tensión		440	V
Frecuencia		60	Hz
<b>Actuales Bombas de los tanques de retención de Pulpa Tk-231 y TK-232 (Modelo: PB-315/40CN)</b>			
Caudal	Q	0,0875	m <sup>3</sup> /s
Altura	H	43,9	m
Número de revoluciones	n	1800	rev/min
Potencia	N	132	kW
Tensión		440	V
Frecuencia		60	Hz
Corriente		67,03	A

**2.3. Propiedades físico-mecánicas de la cola a transportar**

Las características de cola que se requiere transportar son de mucha importancia para el posterior cálculo a realizar, con el objetivo de conocer si la bomba puede hacer su labor correcta y eficientemente. Las características de la cola, así como la del líquido y sólido que la forma se puede observar y analizar en la tabla 2.1 a continuación:

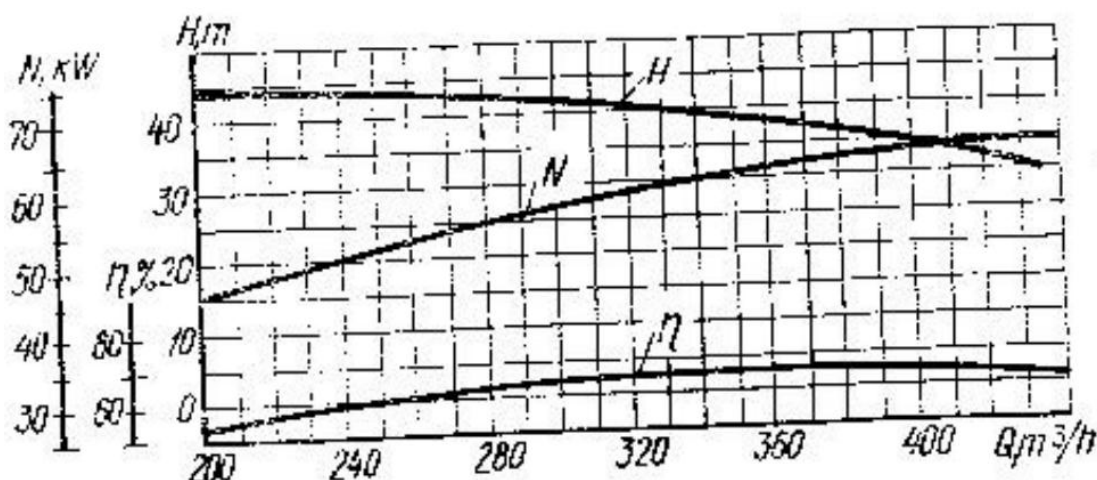
**Tabla 2.1.** Características de la Cola a transportar

<b>Características de la Cola (Producto Terminado)</b>		
<b>Producto</b>	<b>Cola</b>	<b>U/m</b>
Sólido	65	%
Líquido	35	%
Densidad	1600 a 1700	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad Cinemática	0,00000219	m <sup>2</sup> /s
Viscosidad Plástica	0,003723	Pa·s
Temperatura	45	° C
<b>Características del Líquido que forma la Cola</b>		
<b>Líquido (Solución de Carbonato Amoniacal)</b>	<b>Valores</b>	<b>U/m</b>
<b>CONCENTRACIÓN</b>	NH <sub>3</sub> ≥ 25	g/l
	Co <sub>2</sub> ≥ 17,5	g/l
	Ni ≤ 0,15	g/l
	Co ≤ 0,03	g/l
Densidad	1,025	t/m <sup>3</sup>
Temperatura	40	° C
pH	8 a 9	-

Viscosidad	1	cP
Conductividad Eléctrica	> 20	mS/m
<b>Características del Sólido que forma la Cola</b>		
<b>Sólido (Mineral Reducido)</b>	<b>Valores</b>	<b>U/M</b>
Densidad	3,8 a 4,17	t/m <sup>3</sup>
Tamaño Medio de Partículas	(85%-200) ; (7%+100)	
Configuración	Aristas Vivas	
Composición Química	Ni ≤ 0,33	%
	Fe ≥ 42	%
	CO = (0,03 a 0,09)	%

#### 2.4. Gráfico de las curvas características de la bomba PB315/40pc

La fig 2.2, muestra las curvas características de la bomba PB315/40PC obtenidas su catálogo industrial, en la misma haciendo coincidir los valores de las curvas con el caudal correspondiente se puede conocer el punto de trabajo óptimo de la bomba, es decir a cierta capacidad o caudal, se conoce la altura, potencia, y rendimiento.



**Figura 2.2.** Curva Característica de la Bomba PB315/40CP.

#### 2.5. Configuración y complementos del sistema de tubería

En este epígrafe se analizará la configuración de la red de tuberías que presenta el sistema de bombeo analizado, tanto del presente como de la modificación. Para esta tarea fue necesario recorrer la planta de lixiviación y lavado hasta la planta de recuperación de amoníaco, y ver las características del tramado de tuberías, así como sus accesorios, los datos se encuentran en la tabla 2.2 a continuación:

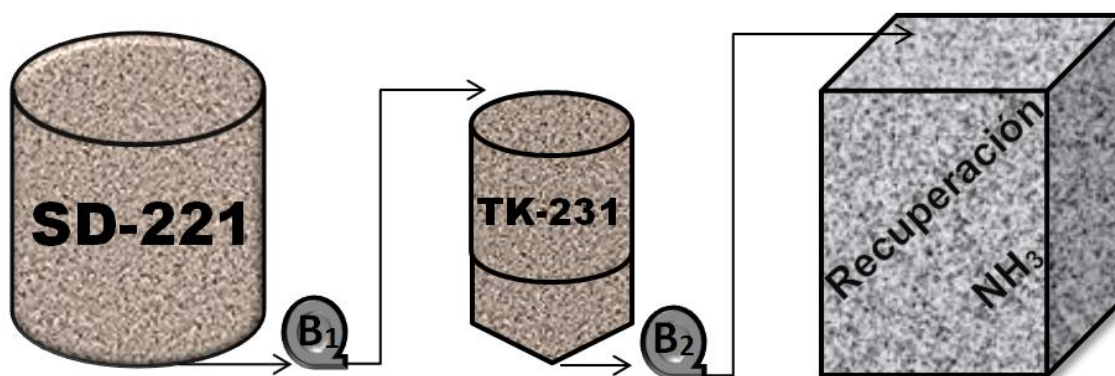


**Tabla 2.2.** Datos sobre la configuración y accesorios del sistema de tuberías (general) presente en el sistema de bombeo:

Denominación	Cant.	Coef. de Resistencia
Entrada		0,78
Codo 90 °	20	0,75
Codo 45 °	5	0,35
Uniones en T	2	1,8
Expansión	3	0,19
Flujometro	2	0,15
Válvula Sander	1	0,015
Válvula de Bola	1	0,04
Salida		1

## 2.6. Modificación del sistema de transporte de pulpa

La fig 2.1 muestra un esquema donde se puede apreciar cómo está conectado el sistema de transporte de pulpa que se encuentra trabajando actualmente en la Planta de Lixiviación y Lavado. En primera instancia se encuentran los tanques de Sedimentación SD-221A y SD-221B, ambos con 2 bombas (PB-315/40CP de 90 kW y 1740 rpm) cada uno, las cuales trasiegan la pulpa procesada hasta los recolectores TK-231 y TK-232, quienes cuentan con 4 bombas (PB-315/40CP de 132 kW y 1800 rpm), con el propósito de diluir la pulpa recibida y enviarla a la Planta de Recuperación de Amoniaco ( $\text{NH}_3$ ).



**Figura 2.1:** Esquema de la instalación de transporte de pulpa (Actual).

Producto a las frecuentes averías y el alto consumo energético que viene presentando este sistema en la fase intermedia del proceso, donde se encuentran los tanques recolectores de cola (TK-231-232), se hace necesario la búsqueda de una vía que amortigüe estos problemas y saque adelante la planta y consigo la empresa en general.

Con el análisis de los problemas establecidos se ha decidido plantear una ruta que permita la corrección de los mismos, se trata de realizar una modificación en el sistema, como se puede apreciar en la figura 2.2. Esta transformación se basa en eliminar los tanques de recolección de cola (TK-231-232) y trasegar la pulpa directo desde los sedimentadores (SD-221A y B) hasta la Planta de Recuperación de  $\text{NH}_3$ , para esta solución sería necesaria la dilución de la pulpa en este último proceso de lavado (sedimentadores), la implementación de 2 uniones donde se puedan conectar 2 líneas de tubería a una y la utilización de las bombas (PB-315/40CP de 132 kW y 1800 rpm) que trabajan en los tanques de recolección de cola, ya que al tener mayor potencia y numero de revoluciones se espera que consigan trasegar la cola eficientemente, además de que la empresa no cuenta con otras bombas de mayores prestaciones que puedan sustituirlas.



**Figura 2.1:** Esquema de la instalación de transporte de pulpa (Modificado).

Es necesario conocer que la primera parte del sistema cuenta con 4 líneas de transporte una por cada bomba instalada, mientras que en el segundo tramo solo transportan el fluido 2 líneas de mayor diámetro. Conociendo la información anterior es precisa la implementación de algún tipo de unión que permita conectar el primer tramo con el segundo.

Con la intención de verificar si las bombas que se quieren utilizar en la nueva modificación son eficientes es necesario utilizar las metodologías de cálculo cursadas en la carrera, esta vía de cálculo será utilizada en la evaluación del primer y segundo tramo de la instalación que se encuentra actualmente, además de para la modificación que se plantea.

## 2.7. Metodología de cálculo para la evaluación del bombeo de cola

El cálculo hidráulico de la instalación con bomba centrífuga contiene 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.

Es necesario realizar una evaluación de la instalación, cuando se transportan fluidos no newtonianos plásticos Bingham donde hay presentes partículas sólidas; si se aumenta considerablemente el valor de la velocidad de la cola, las pérdidas de carga o presión van a crecer y llegar a valores que pueden ser inadecuados desde el punto de vista de la ingeniería.

### 2.7.1. Determinación de las propiedades reológicas de la cola

Para el análisis de la metodología se proponen varios modelos que solo incluyen las variables  $t$ ,  $pH$  y  $C$  (Turro, 2002). Los modelos descodificados obtenidos son:

*Para el esfuerzo cortante:*

$$\tau_0 = 0,41 - 0,27 \cdot t - 0,001 \cdot pH + 0,44 \cdot C \quad (2.1)$$

*Para la viscosidad plástica:*

$$\mu_p = 0,01 - 0,005 \cdot t - 0,008 \cdot pH + 0,01 \cdot C \quad (2.2)$$

Donde:

$t$  = Temperatura del fluido; [°C].

$C$  = Concentración de sólidos; [%].

$pH$  = Grado de acidez o basicidad; [1 ÷ 14].

### 2.7.2. Área de la sección transversal de la tubería

La determinación de la sección circular de la tubería por donde circula el fluido, se puede realizar según la expresión siguiente:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} ; [m^2] \quad (2.3)$$

### 2.7.3. Velocidad del fluido

La velocidad representa el gasto que tiene el líquido que pasa a través de la sección de flujo de una corriente líquida y se determina por la expresión que se muestra a continuación:

$$v = \frac{Q}{A} ; [m/s^2] \quad (2.4)$$

Donde:

$Q$  =Gasto;  $[m/s]$ .

$D$  = Diámetro de la tubería;  $[m]$ .

### 2.7.4. Número de Reynolds del fluido

El número de Reynolds ( $R_e$ ) permite establecer el régimen de trabajo según la naturaleza reológica del fluido, y se define para los Plásticos Bingham en función del caudal, se representa como sigue (Turro, 2002).

$$R_e = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu_p} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu_p} ; [adm] \quad (2.5)$$

Donde se conoce:

$Q$  = Caudal que se necesita transportar;  $[m^3/s]$ .

$D$  = Diámetro de la tubería;  $[m]$ .

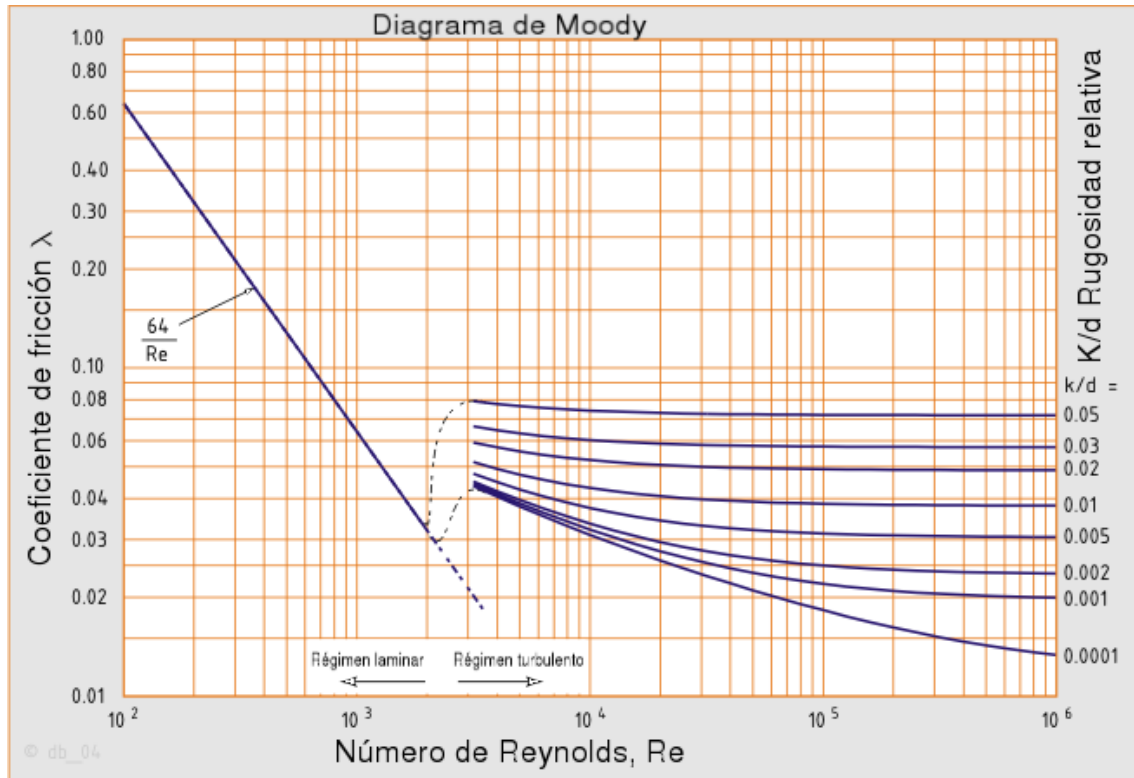
$\mu_p$  = Viscosidad plástica;  $[Pa \cdot s]$ .

$\rho$  =Densidad de la pulpa;  $[kg/m^3]$ .

*Régimen Laminar*  $2300 < (R_e) < 2300$  *Régimen Turbulento* .

### 2.7.5. Factor de fricción

Para el cálculo del factor de fricción lo determinamos auxiliándonos por el diagrama de Moody (fig 2.2), para tuberías rugosas según el número de Reynolds.



**Figura 2.2:** Diagrama de Moody.

El factor de fricción depende del número de fanning y éste depende del número de Reynolds y de la rugosidad del material construido; se puede calcular por la expresión siguiente:

$$f = \left[ (f_L^\beta) + (f_T^\beta) \right]^{1/\beta}; [adm] \quad (2.6)$$

$$f_L = \frac{64}{Re}; [adm] \quad (2.7)$$

$$f_L = \frac{10^C}{Re^{0,193}}; [adm] \quad (2.8)$$

$$C = -1,378 \cdot (1 + 0,146 \cdot e^{-2,9 \cdot 10^{-5} \cdot H_e}); [adm] \quad (2.9)$$

$$H_e = \frac{D^2 \cdot \rho_p \cdot \tau_0}{(\mu_p)^2}; [adm] \quad (2.10)$$

$$\beta = 1,7 + \frac{4000}{Re}; [adm] \quad (2.11)$$

Para:

$f$  = Factor de pérdidas por cortante o por fricción de Fanning.

$H_e$  = Numero de Hedstom.

### 2.7.6. Cálculo de las pérdidas totales en las tuberías

Las tuberías poseen coeficientes de pérdidas según las resistencias locales que tenga, para esto se definen en la *tabla 2.2* expuesta anteriormente, los valores tomados en cuenta para las pérdidas en la succión e impulsión:

#### ❖ *En la impulsión:*

- Cálculo de las pérdidas por rozamiento en la tubería de impulsión, (Darcy):

$$h_1 = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} ; [m] \quad (2.12)$$

- Cálculo de las pérdidas locales en la tubería de impulsión, (Nekrasov 1968):

$$h_2 = \Sigma \xi_{impl} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} ; [m] \quad (2.13)$$

$$\Sigma \xi_{impl} = \Sigma \xi_{val} + \Sigma \xi_{cod} + \Sigma \xi_{union} + \Sigma \xi_{exp} + \Sigma \xi_{red} + \Sigma \xi_{acc} + \xi_{desc} ; [adm] \quad (2.14)$$

Donde:

$L$  = Longitud de la tubería en la impulsión;  $[m]$ .

$\Sigma \xi_{impl}$  = Sumatoria de las pérdidas en la impulsión según la cantidad de accesorios y su coeficiente de resistencia.

$\xi_{entr}$  y  $\xi_{desc}$  = Coeficientes de pérdidas en la entrada y descarga de las tuberías respectivamente; *tabla 2.2*.

$\Sigma \xi_{val}$  = Sumatoria de los coeficientes de perdida en las válvulas; *tabla 2.2*.

$\Sigma \xi_{cod}$  = Sumatoria de los coeficientes de perdida en los codos; *tabla 2.2*.

$\Sigma \xi_{union}$  = Sumatoria de los coeficientes de perdida en los diferentes tipos de unión; *tabla 2.2*.

$\Sigma \xi_{exp}$  = Sumatoria de los coeficientes de perdida en las expansiones; *tabla 2.2*.

$\Sigma \xi_{red}$  = Sumatoria de los coeficientes de perdida en los reducidos; *tabla 2.2*.

$\Sigma \xi_{acc}$  = Sumatoria de los coeficientes de perdida en otros accesorios; *tabla 2.2*.

El factor  $\xi$  es adimensional y su valor depende del tipo de accesorio y diámetro del mismo; se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio.

Algunos fabricantes pueden proporcionar su factor  $\xi$ , por lo tanto, deberá utilizarse ese valor, pero en el caso de no contar con esta información es conveniente utilizar las fórmulas para el cálculo del factor  $\xi$ .

### **Pérdidas totales en la impulsión**

$$h = h_1 + h_2 ; [adm] \quad (2.15)$$

#### **❖ En la Succión:**

Para el caso de las perdidas en la succión se utilizan las ecuaciones utilizadas en la impulsión, solo cambia la cantidad de accesorios y sus coeficientes respectivamente.

### **Pérdidas totales dinámicas:**

$$h_{din} = h_{succ} + h_{impl} ; [adm] \quad (2.16)$$

#### **2.7.7. Altura Estática**

$$\Delta Z = H_{impl} + H_{succ} ; [m] \quad (2.17)$$

$H_{impl}$  = Altura de Impulsión; [m].

$H_{succ}$  = Altura de Succión; [m].

### **Pérdidas totales del sistema**

$$h_t = h_{din} + \Delta Z ; \quad (2.18)$$

#### **2.7.8. Coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior**

##### **• En la Succión**

$$R_s = \left( f \cdot \frac{L_s}{D} + \Sigma \xi_s \right) \cdot \frac{8}{\pi \cdot g \cdot D^4} ; [s^2/m^5] \quad (2.19)$$

##### **• En la Impulsión**

$$R_i = \left( f \cdot \frac{L_i}{D} + \Sigma \xi_i \right) \cdot \frac{8}{\pi \cdot g \cdot D^4} ; [s^2/m^5] \quad (2.20)$$

- *Coeficiente Total*

$$R_c = R_s + R_i ; [s^2/m^5] \quad (2.21)$$

Donde:

$g$  = Aceleración de la gravedad;  $[m/s^2]$ .

$\Sigma \xi_t$  = Sumatoria de las pérdidas.

### 2.7.9. Cálculo de la característica exterior de la red

La característica de la red exterior de la instalación de hidrot transporte se calcula de la siguiente manera (González, 2012):

$$H_{red} = \Delta Z + R_c \cdot Q^2 ; [m] \quad (2.22)$$

Donde:

$\Delta Z$  =Altura estática;  $[m]$ .

$Q$  = Caudal transportado;  $[m^3/s]$ .

$R_c$  =Coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior de la instalación de transporte hidráulico;  $[s^2/m^5]$

### 2.8. Velocidad específica

La velocidad específica es un coeficiente basado en los criterios de semejanza que caracteriza las máquinas de flujo comparándolas con una máquina hipotética que entrega un gasto de  $0,075 \text{ m}^3/\text{s}$  con una carga de 1 m a su máxima eficiencia. 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: Lentas:  $n_s \leq 80 ; \frac{D_2}{D_1} = 2,2 - 3,5$

- Normales:  $n_s = 80 - 150 ; \frac{D_2}{D_1} = 2,2 - 3,5$
- Rápidas:  $n_s = 150 - 300 ; \frac{D_2}{D_1} = 1,8 - 1,3$
- Diagonales o helicoidales:  $n_s = 300 - 600 ; \frac{D_2}{D_1} = 1,3 - 1,1$
- Axiales o de hélice:  $n_s = 600 - 1200 ; \frac{D_2}{D_1} = 1$



De tal forma, la velocidad específica ( $n_s$ ) se calcula empleando la ecuación siguiente:

$$n_s = 3,56 \cdot \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}; [rev/min] \quad (2.23)$$

Donde:

$n$  = Número de revoluciones;  $[rev/min]$ .

$H$  = Altura;  $[m]$ .

## 2.9. Cálculo de análisis de cavitación en bombas centrífugas

El defecto que más afecta de forma general a las máquinas de flujo es la cavitación y para determinar si la bomba cavita o no, es necesario utilizar la metodología expuesta por (Perez, 2000). Es preciso tener en cuenta que el parámetro  $(NPSH)_d$  debe ser comparado con  $(NPSH)_r$ , el cual está determinado por las características del tramo de succión del sistema, esta comparación debe resultar  $(NPSH)_d \geq (NPSH)_r$ .

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

El  $(NPSH)_d$  está en función de la instalación independiente del tipo de bomba.

$$NPSH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} + H_{succ} - \Sigma h_{succ} - H_v; [m] \quad (2.24)$$

Donde:

$P_{atm}$  = Es la fuerza ejercida por la atmósfera por unidad de superficie;  $[Pa]$ .

$H_v$  = Tensión del vapor a la temperatura que trabaja el líquido;  $[m]$

$H_{succ}$  = Altura de succión.  $[m]$ .

$\Sigma h_{succ}$  = Pérdidas en la succión;  $[m]$ .

$\gamma$  = Peso específico;  $[N/m^3]$ .

El  $(NPSH)_r$ , 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 2.25.

$$NPSH_r = 10 \cdot \left( \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{C} \right)^{3/4} ; [m] \quad (2.25)$$

Donde:

$C$  = coeficiente de velocidad específica en la succión;  $[rev/min]$ .

$Q$  = caudal que se necesita transportar;  $[m^3/s]$ .

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. Su valor corresponde a las siguientes correlaciones empíricas:

- Para Bombas con el rodete en voladizo:

$$C = 880 \cdot \log n_s^{3/4} \quad (2.26)$$

- Bombas con el rodete entre apoyos:

$$C = 800 \cdot \log n_s^{3/4} \quad (2.27)$$

## 2.10. Cálculo del balance energético de la bomba centrífuga

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

- **Gasto que debe entregar el impulsor.**

A la hora de diseñar una bomba es necesario tener en cuenta las fugas. En la práctica se consideran entre 2 y 5 %. Por lo que el gasto que debe entregar el impulsor para garantizar el flujo deseado es:

$$Q_c = (1,02 \div 1,05) \cdot Q ; [m^3/s] \quad (2.28)$$

- **Rendimiento volumétrico**

Las pérdidas volumétricas (fugas) están condicionadas por el paso de líquido a través de las holguras entre el impulsor y el cuerpo de la máquina. Depende en sumo grado del estado de las empaquetaduras.

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_c} ; [\%] \quad (2.29)$$

- **Potencia consumida por la bomba.**

Para determinar la potencia útil de la consumida por la Bomba se emplea la ecuación 2.20, la cual relaciona la densidad de la pulpa, el gasto volumétrico, la aceleración de la gravedad y la altura desarrolla la bomba.

$$N_u = \frac{\rho_{cola} \cdot Q \cdot g \cdot H_d}{1000} ; [kW] \quad (2.30)$$

Donde:

$H_d$  = Altura de impulsión; [m].

1000-para que el cálculo salga en kW

- **Potencia útil que se le entrega al eje de la bomba**

Es la potencia que le entrega el motor eléctrico al eje de la bomba para realizar su funcionamiento:

$$N_{eje} = \frac{\rho_{cola} \cdot Q \cdot g \cdot H_d}{1000 \cdot \eta} ; [kW] \quad (2.31)$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia de la Bomba por catálogo.

- **Potencia real que consume el motor**

$$N_m = (1,05 \div 1,1) \cdot N_{eje} ; [kW] \quad (2.32)$$

- **Rendimiento total de la bomba**

$$\eta_t = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{N_{mec} \cdot 1000} ; [\%] \quad (2.33)$$

## 2.11. Metodología de cálculo para la valoración económica

En el presente trabajo se analiza la valoración económica del consumo de energía en la explotación de cualquier instalación a escala industrial, con el fin de reducir los gastos.

### Gasto de consumo de energía eléctrica por iluminación

$$g_{ilm} = N_i \cdot T_a \cdot T_{pi} ; [CUC/año] \quad (2.34)$$

Para:

$N_i$  = Potencia consumida por iluminación;  $[kW]$

$T_{pi}$  = Cantidad de horas de operación en el año;  $[h]$ .

### Gastos por consumo de agua

$$g_{agua} = P_a \cdot Q_a ; [CUC/año] \quad (2.35)$$

$Q_a$  = Caudal de agua utilizado en el sistema,  $[m^3/año]$ .

$P_a$  = Precio del  $m^3$  de agua,  $[CUC/año]$ .

### Gastos de salario del personal directo en la instalación

$$g_s = t_a \cdot t_n \cdot K_{ss} \cdot K_{dr} \cdot K_{pc} ; [CUC/año] \quad (2.36)$$

$$K_{pc} = 1 + \frac{c}{100}$$

Donde:

$t_a$  = Tarifa salarial del operario,  $[CUC/h]$ .

$t_n$  = Tiempo de trabajo del operario en la instalación,  $[h/año]$ .

$K_{ss}$  = Coeficiente de seguridad social.

$K_{dr}$  = Coeficiente de descanso distribuido.

$K_{pc}$  = Coeficiente de pago complementario.

$c$  = Porcentaje de pago complementario.

**2.12. Conclusiones del capítulo**

- Se expusieron las propiedades del fluido a trasegar así como las características principales de las bombas que se encuentran en el sistema y la cantidad de accesorios con que cuentan las líneas de tuberías.
- Se plantearon las metodologías de cálculo del hidrotransporte y valoración económica para determinar los parámetros de la instalación con el objetivo de comprobar si es posible y factible la nueva modificación que se requiere.

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

### 3.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones desarrolladas que han permitido proyectar la modificación del sistema de bombeo de colas desde la Planta de Lixiviación y Lavado hasta la Planta de Recuperación de Amoniaco. Es necesario determinar y analizar el régimen de trabajo de las bombas para así lograr una correcta operación del sistema y así disminuir los consumos innecesarios de energía.

**El objetivo de este capítulo** de forma concreta, es mostrar y comparar los resultados obtenidos para esta investigación, así como la valoración económica y medioambiental para la instalación.

### 3.2. Análisis de los resultados de la evaluación del sistema de bombeo

Para realizar el análisis y comparación de los resultados obtenidos en la evaluación del sistema de bombeo de cola desde la Planta de Lixiviación y Lavado hasta la Planta de Recuperación de Amoniaco, se utilizó la misma metodología para los 2 tramos de la Instalación y para la modificación en que se ha trabajado en la solución del problema que se ha planteado.

#### 3.2.1. Datos a tener en cuenta para cada tramo de del sistema de bombeo

##### ❖ *Para el tramo 1*

En el sistema de bombeo el tramo 1 está compuesto por dos tanques de sedimentación y lavado (SDK-221 A y B) con una capacidad de 10000 m<sup>3</sup> cada uno, dos bombas PB-315/40CP por tanque, las cuales tienen un consumo de 90 kW y un numero de revoluciones de 1740 rev/min, además de la línea de 425,67 m y diámetro 200 mm; la cantidad de accesorios y sus respectivos coeficientes de fricción se muestran en la *tabla 3.1* a continuación:

**Tabla 3.1.** Coeficientes de pérdidas locales para la línea del Tramo 1

Accesorios en la línea de Impulsión de Ø 200 mm	Cantidad succión	Cantidad Impulsión	Coeficiente de resistencia $\xi$
Entrada	1	1	0,78
Codo 90°	1	10	0,75
Codo 45°	-	1	0,32
Unión en T	-	2	0,72

<b>Continuación de la Tabla 3.1</b>			
Válvula Sander	-	1	0,015
Caja de transferencia	1	-	1
Descarga	1	1	1

### ❖ **Para el tramo 2**

En el sistema de bombeo el tramo 2 está compuesto por los tanques recolectores TK-231 y 232, cuatro bombas PB-315/40CP las cuales tienen un consumo de 132 kW y un número de revoluciones de 1800 rev/min, además de la línea de 856,47 m y diámetro 250 mm; la cantidad de accesorios y sus respectivos coeficientes de fricción se muestran en la tabla 3.2 a continuación:

**Tabla 3.2.** Coeficientes de pérdidas locales para la línea del tramo 2

<b>Accesorios en la línea de Impulsión de Ø 250 mm</b>	<b>Cantidad succión</b>	<b>Cantidad Impulsión</b>	<b>Coeficiente de resistencia <math>\xi</math></b>
Entrada	1	1	0,78
Codo 90°	1	14	0,75
Codo 45°	-	4	0,32
Expansión	-	3	0,19
Reducción	-	2	0,065
Valvula de Bola	-	2	0,04
Flujometro	-	4	0,15
Caja de transferencia	-	-	1
Descarga	1	1	1

### ❖ **Para la Modificación**

Para la modificación se propone eliminar los tanques de recolección de cola (TK-231-232) y trasegar la pulpa directo desde los sedimentadores (SD-221A y B) hasta la Planta de Recuperación de  $\text{NH}_3$ , para ello sería necesario utilizar las Bombas que trabajan en el Tramo 2 con una potencia de 132 kW y 1800 rev/min, y utilizar un modelo de unión tipo **Y** (anexo 1) con el propósito de conectar dos líneas de tuberías a solo una, además de una expansión de 200 a 250 mm y por ultimo una válvula de bola en cada entrada de la unión tipo Y.

También habría que implementar los dos flujómetros presentes en el tramo 2 y moverlos hacia la salida en la bomba. En conclusión, la línea tendría una longitud de 1012,5 m donde la cantidad de accesorios y sus respectivos coeficientes de fricción se muestran en la tabla 3.3 a continuación:

**Tabla 3.3.** Coeficientes de pérdidas locales para la línea de la modificación

Accesorios en la línea de Impulsión de Ø 250 mm	Cantidad succión	Cantidad Impulsión	Coeficiente de resistencia $\xi$
Entrada	1	1	0,78
Codo 90°	1	20	0,75
Codo 45°	-	5	0,32
Unión en T	-	2	0,72
Unión en Y	-	1	0,43
Expansión	-	3	0,19
Reducción	-	2	0,065
Válvula de Bola	-	6	0,04
Flujómetro	-	4	0,15
Válvula Sander	-	1	0,015
Caja de transferencia	1	-	1
Descarga	1	1	1

Con la tabla 3.3 se concluye la muestra de los datos que se necesitan para el cálculo del sistema de bombeo, los cuales se pueden analizar en el epígrafe a continuación.

### 3.2.2. Resultados obtenidos para el tramo 1, tramo 2 y la modificación

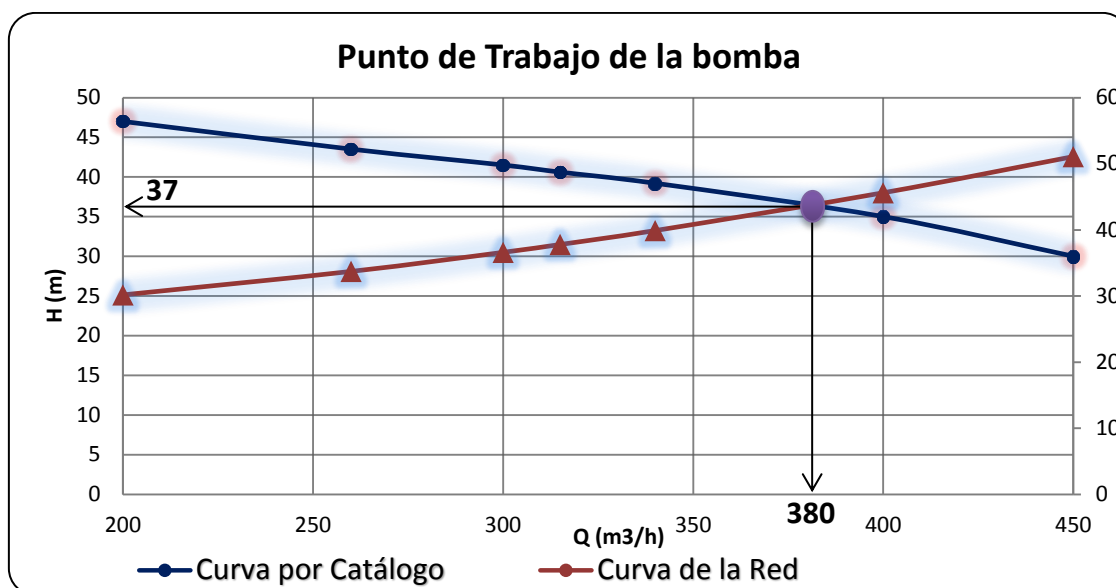
Teniendo en cuenta los datos mostrados en el epígrafe anterior para cada tramo del sistema, se pueden observar los resultados procedentes de la metodología implementada por (Martinez, 2009), con la ayuda de la herramienta de cálculo Microsoft Excel.

**Tabla 3.4.** Resultados obtenidos para el tramo 1, 2 y la modificación para el punto de trabajo de la bomba

Parámetros	Ecu	Tramo 1	Tramo 2	Modificación
Esfuerzo cortante [ $Pa$ ]	2.1	16,852	16,852	16,852
Viscosidad Plástica [ $Pa \cdot s$ ]	2.2	0,00372	0,00372	0,00372
Velocidad del Fluido [ $m/s^2$ ]	2.4	3,361	2,151	2,151
Número de Reynolds	2.5	30699,93	20358,898	20358,898
Factor de Fricción	2.6	0,0196	0,0195	0,0192

La tabla 3.4 muestra algunos de los parámetros evaluados en la realización del cálculo hidráulico, valores como el esfuerzo cortante y la viscosidad plástica tienen vital importancia en el proceso ya que estos definen según la reología del fluido al Reynolds y el factor de fricción esencialmente, los cuales son medidas que pueden cambiar drásticamente el resultado de la operación.





**Figura 3.1.** Representación del Punto de Trabajo de la Bomba PB315/40CP

La fig 3.1 muestra el grafico donde se cruzan la curva de la bomba, establecida por el fabricante, y la curva de la de altura o de la red como también se conoce, la cual es calculada por la metodología establecida en el capítulo 2.

**Tabla 3.5.** Parámetros de las pérdidas en las tuberías para los tramos 1,2 y modificación

Parámetros	Ecu	Tramo 1	Tramo 2	Modificación
<b>En la Succión</b>				
Pérdidas por rozamiento	2.12	0,00284	0,00116	0,00116
Pérdidas locales	2.13	136,031	47,758	55,718
Sumatoria de las pérdidas	2.14	1,75	1,5	1,75
Pérdidas totales	2.15	136,034	47,760	55.795
<b>En la Impulsión</b>				
Pérdidas por rozamiento	2.12	0,303	0,249	0,295
Pérdidas locales	2.13	861,659	469,931	685,322
Sumatoria de las pérdidas	2.14	11,085	14,760	21,525
Pérdidas totales	2.15	861,962	470,181	685,617

La tabla 3.5 muestra los resultados que se obtuvieron al calcular las perdidas en las tuberías teniendo en cuenta la cantidad de accesorios y sus coeficientes de rozamiento para los tramos 1 y 2 además de la modificación, tanto en la succión como en la impulsión.

**Tabla 3.6.** Continuación de la Tabla 3.4.

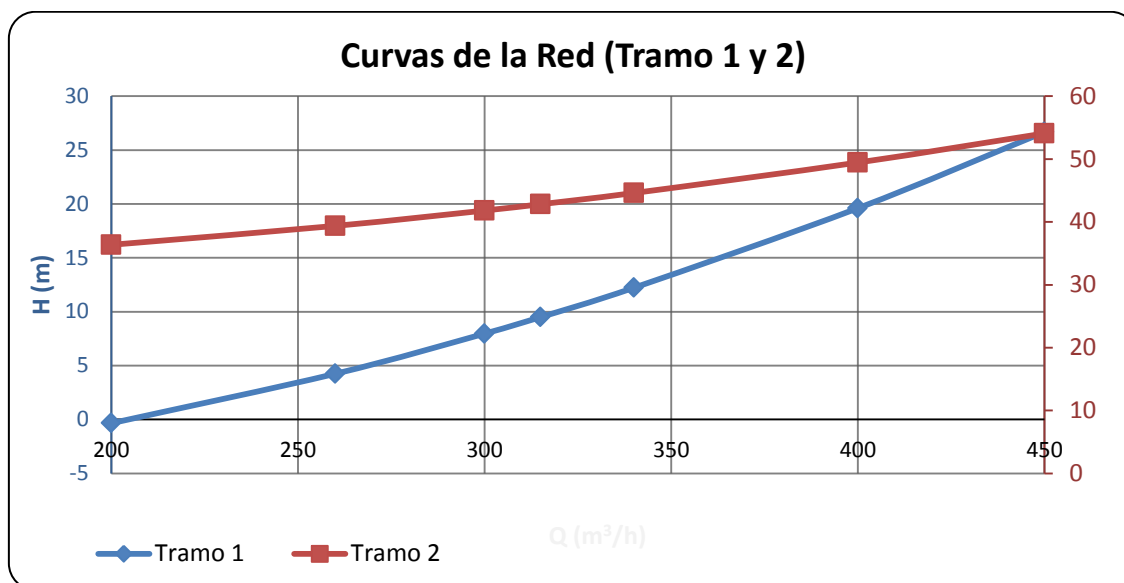
Parámetros	Ecu	Tramo 1	Tramo 2	Modif
Altura Estática [m]	2.17	-7	35	25
Coeficiente Generalizado de Resistencia de la Red ( <i>succión</i> )	2.19	0,698	2,878	2,866
Coeficiente Generalizado de Resistencia de la Red ( <i>impulsión</i> )	2.20	2154,425	1410,625	1665,465
Coeficiente Generalizado de Resistencia de la Red ( <i>total</i> )	2.21	2155,123	1413,113	1668,331
Altura de la Red [m]	2.22	17,012	39,894	43,588
Velocidad Especifica	2.23	423,079	130,893	130,893
<b>Condición de ausencia de cavitación</b>				
NPSHd	2.24	12,910	5,910	12,910
NPSHr	2.25	4,315	5,203	5,203
<b>Balance Energético</b>				
Rendimiento Volumétrico	2.26	95,238	95,238	95,238
Potencia consumida por Bomba	2.27	14,082	70,414	70,414
Potencia que Entrega al Eje	2.28	21,019	105,095	105,095
Potencia Real del Motor	2.39	22,070	110,350	110,350
Rendimiento Total de la Bomba	2.33	63,810	63,810	63,810

La anterior tabla es la continuación de la Tabla 3.4 donde se exponen los resultados más significativos del cálculo hidráulico, uno de estos valores es la velocidad específica la cual se encuentra entre 80 y 150 (para las 3 fases), lo que indica que son bombas de velocidad normal. Queda también comprobado el funcionamiento de la bomba según los criterios de diseño del fabricante a través de la condición de ausencia de cavitación siendo el *NPSHd* mayor que el *NPSHr*, lo que demuestra que trabaja en una zona segura indicando así un funcionamiento favorable de explotación. Aunque en las tablas anteriores solo se encuentren los valores para el punto de trabajo de la bomba, es necesario aclarar que el cálculo se realizó para un rango de caudal entre 200 y 450 m<sup>3</sup>/h, los cuales se tuvieron en cuenta para la confección de las gráficas que se mostraran en el siguiente epígrafe.

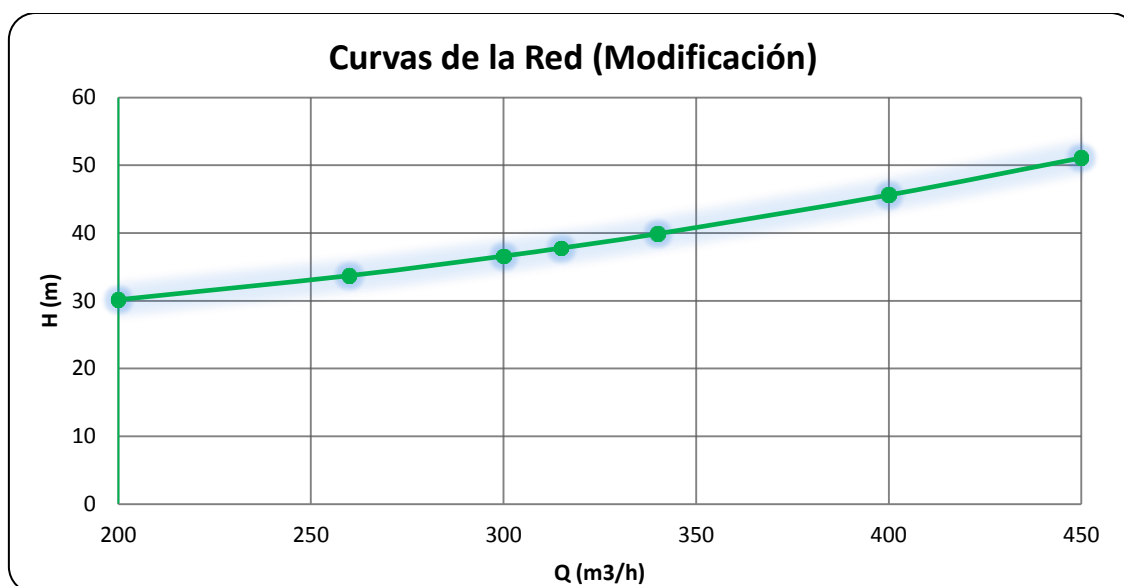
**Tabla 3.6.** Altura de la Red en los Tramos 1,2 y la Modificación

Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m) Tramo 1	H (m) Tramo 2	H (m) Modificación
200	-0,348384755	36,36146001	30,14916982
260	4,241229764	39,37086742	33,70209699
300	7,966122329	41,81327718	36,58562282
315	9,500163068	42,81914675	37,77315938
340	12,22316806	44,60461944	39,88110077
400	19,60646098	49,44584006	45,59667926
450	26,67380218	54,07989132	51,06767219

La tabla 3.6 muestra la altura de la red calculada con diferentes caudales dentro del rango del catálogo (fig. 2.2 capítulo anterior), lo que permite confeccionar con la ayuda de la herramienta de cálculo Excel realizar un nuevo gráfico que se ajuste a las condiciones que se han establecido.



**Figura 3.1.** Curva de Altura de la Red para el Tramo 1 y 2.



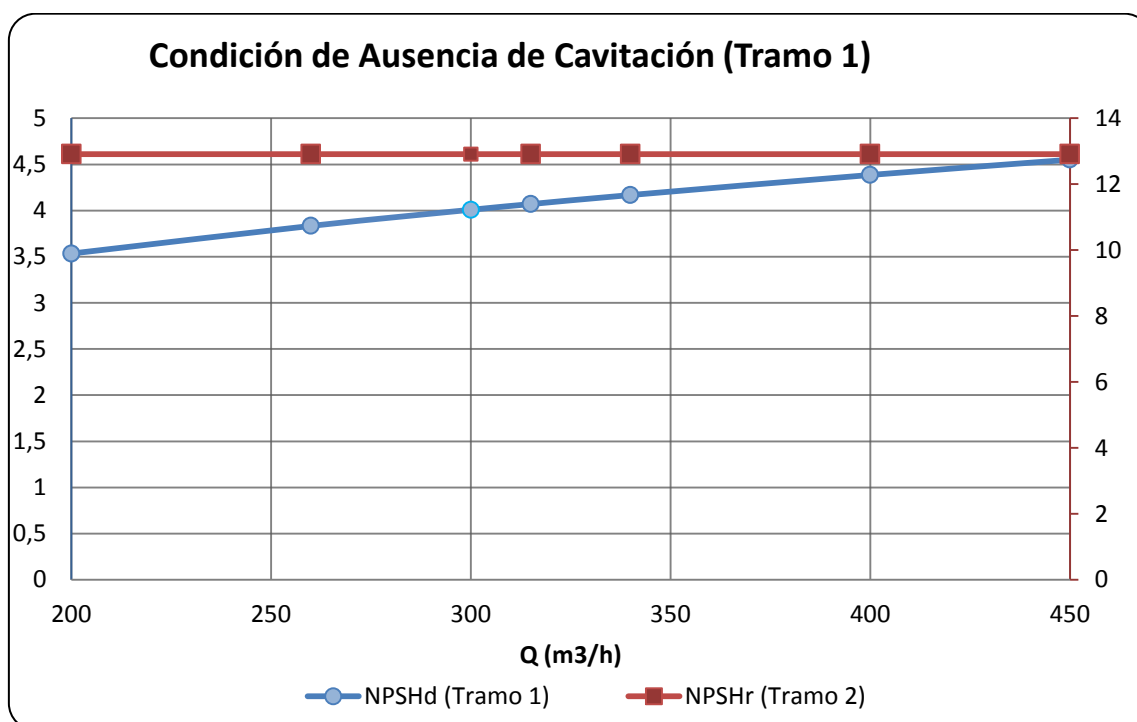
**Figura 3.2.** Curva de Altura de la Red para la Modificación

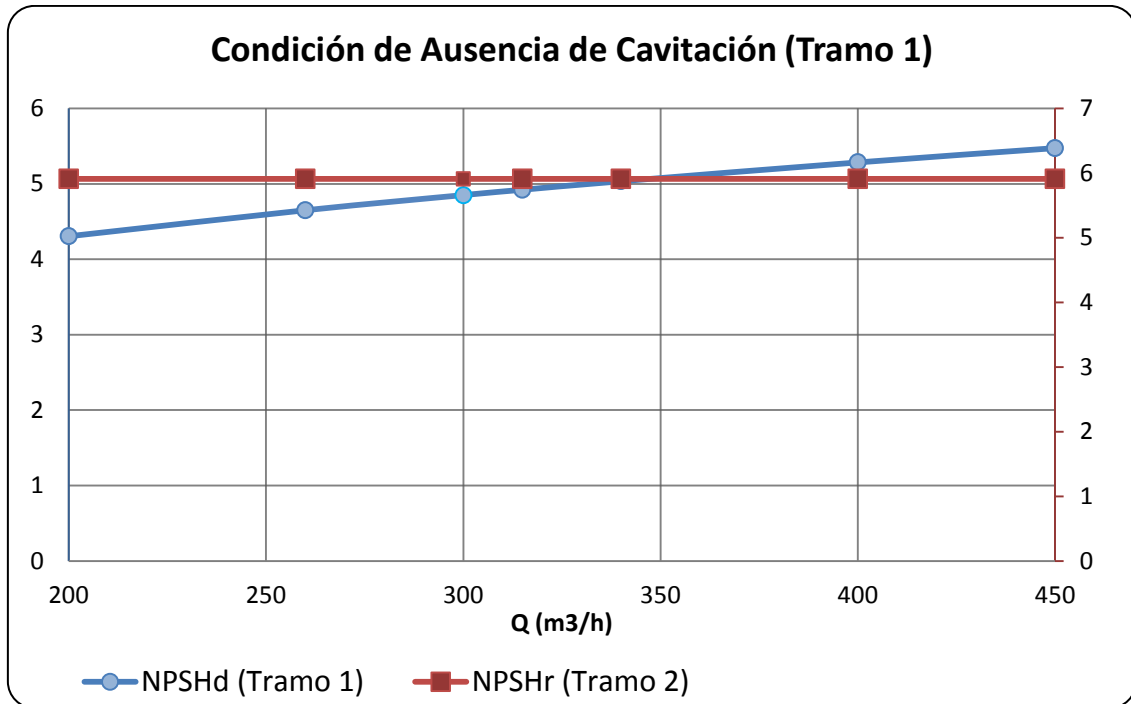
La fig 3.1 y 3.2 muestran los gráficos de la curva de la red de las bombas correspondientes, para el tramo 1, con un caudal de 380 m³/h se tiene una altura de 49,012 m y para el tramo 2 y la modificación con el mismo caudal, se tiene 39,893 y 43,588 m respectivamente.

**Tabla 3.6.** Condición de Ausencia de Cavitación en los Tramos 1,2 y la Modificación

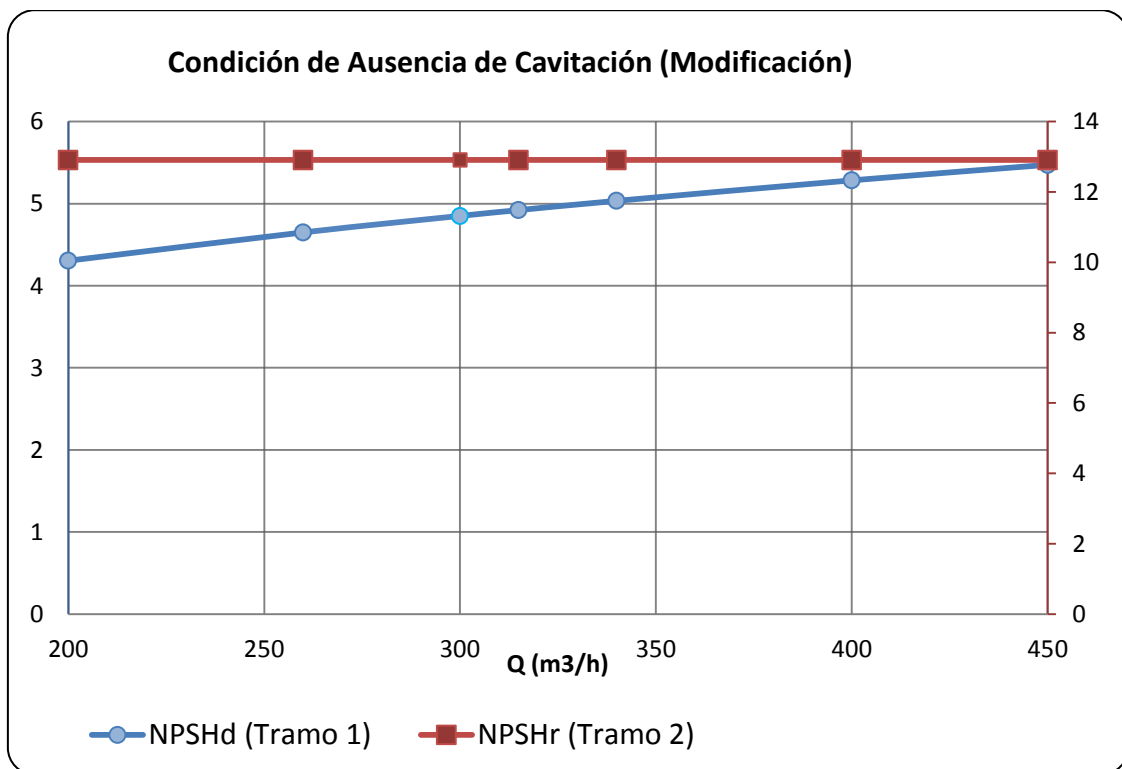
Tramo 1			Tramo 2		Modificación	
Q (m <sup>3</sup> /h)	NPSHr	NPSHd	NPSHr	NPSHd	NPSHr	NPSHd
200	3,533	12,910	4,305	5,910	4,305	12,910
260	3,833	12,910	4,649	5,910	4,649	12,910
300	4,008	12,910	4,851	5,910	4,851	12,910
315	4,069	12,910	4,922	5,910	4,922	12,910
340	4,168	12,910	5,034	5,910	5,034	12,910
400	4,385	12,910	5,284	5,910	5,284	12,910
450	4,550	12,910	5,473	5,910	5,473	12,910

Los valores obtenidos en la tabla 3.6 corresponden a los parámetros que se tienen en cuenta para comprobar si el sistema puede o no presentar ausencia de cavitación, y conociendo la condición de que el *NPSHd* debe ser mayor que *NPSHr*, se llega a la conclusión de que el sistema de bombeo no cavita en ninguna de las etapas, ya sea tramo 1y 2, como la modificación. A continuación, en la fig 3.3, 3.4 y 3.5, se muestran los gráficos con las curvas correspondientes que definen la condición de cavitación para cada tramo.

**Figura 3.3.** Curvas que definen la ausencia de cavitación para el Tramo 1.



**Figura 3.4.** Curvas que definen la ausencia de cavitación para el Tramo 2.



**Figura 3.5.** Curvas que definen la ausencia de cavitación para el Modificación.

### 3.3. Análisis de la Valoración Económica

Es importante en toda investigación evaluar la incidencia económica que poseen los procesos analizados, a fin de encontrar si es rentable su

funcionamiento y que acciones pueden realizarse para reducir los costos económicos.

Efectuado el procedimiento descrito en el epígrafe 2.8 del capítulo 2, respecto al costo unitario de transportación de cola, ya sea directo e indirecto.

### 3.3.1. Datos a tener en cuenta para el cálculo de la Valoración Económica

Para el cálculo de la valoración económica se deben tener en cuenta una serie de parámetros y coeficientes los cuales se muestran en la tabla 3.7 a continuación:

**Tabla 3.7.** Datos para la Valoración Económica

Indicadores Técnicos Económicos	Simb	Valor	Unidad
Tarifa de corriente eléctrica	$T_a$	0,048	kW/h
Potencia consumida por el motor	$N_m$	90 y 132	kW
Tiempo de trabajo de la bomba en un año	$t$	8760	h
Cantidad de horas de operación en el año	$T_{pi}$	4380	h
Tarifa salarial del personal directo a la instalación	$t_a$	2496	CUC/año
Tiempo de trabajo del operario en la instalación	$t_n$	2496	h
Coeficiente de descanso distribuido	$k_{dr}$	1,091	-
Coeficiente de pago complementario	$k_{pc}$	1,03	-
Coeficiente de seguridad social	$k_{ss}$	1,1	-
Coeficiente de pérdida	$k_p$	1,04	-
Coeficiente de pérdida	$K_p$	4,16	-

### 3.3.2. Resultados de la valoración económica

Después de conocer los datos que se requieren para realizar el cálculo de la valoración económica se puede realizar una comparación entre los gastos más representativos del sistema para los tramos 1, 2 y la modificación.

**Tabla 3.8.** Gastos en los tramos 1, 2 y modificación

Gastos	ecu	Valor		Unidad
		T-1 + T-2	Modificación	
Por iluminación	2.34	20,183	10,091	CUC/año
Por mantenimiento	-	1350	850.63	CUC/año
Por salario del operador	2.36	5861,688	4100,553	CUC/año
Anual de la instalación	2.37	7950,003	4096,267	CUC/año

El sistema ya modificado consta con 4 bombas de 132 kW, de ellas solo 2 en funcionamiento, y las otras de repuesto, al sustituir las bombas antiguas de 90 kW por las de 132 kW que había en el tramo 2, tomando las dos bombas en funcionamiento, se puede apreciar que disminuye el consumo a 84 kW. El consumo de energía promedio en MW para el 2016 fue de 127,108 CUC. Teniendo en cuenta que las bombas trabajan 24 h, el consumo diario sería de 2,016 MW y anual 735,84 MW, este consumo al multiplicarlo por el consumo promedio del año 2016 responde a la ganancia por ahorro de energía de 93531,151 CUC/año. También se tienen en cuenta parámetros como gastos por iluminación, mantenimiento, consumo de agua y salario de los trabajadores directos al sistema, donde todos estos gastos de los tramos 1 y 2 juntos (7950,003 CUC), exceden el gasto total de estas últimas medidas en 3853,736 CUC con respecto a la instalación modificada (4096,267 CUC).

### **3.4. Impacto medio ambiental**

Se entiende por impacto ambiental el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. Técnicamente, es la alteración de la línea de base, debido a la acción antrópica o a eventos naturales (Kramer, 2012).

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.

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

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

### ***Efecto ambiental de la cola***

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

### ***Afectaciones a la salud por el amoníaco***

- El amoníaco, tanto el líquido como el vapor es fuertemente irritante para la piel, los ojos y las vías respiratorias.
- El amoníaco es muy tóxico y la exposición a altas concentraciones puede producir quemaduras, cegueras y hasta la muerte.
- El líquido produce quemaduras graves, parecidas a las quemaduras cáusticas y estas varían de acuerdo con la concentración del amoníaco y del tiempo que se permanezca expuesta al mismo.
- Cuando el amoníaco líquido se pone en contacto con la piel, produce congelación rápida e intensa en la zona afectada.
- La ingestión del amoníaco líquido origina una acción corrosiva severa en la boca, la garganta y el estómago.
- El amoníaco gaseoso tiene una gran acción irritante en cualquier tejido húmedo; la taquipnea y la taquicardia (agitación de la respiración y los latidos del corazón respectivamente), son algunos de los efectos originados por la irritación de las vías respiratorias; pudiendo llegar hasta detener la respiración.

### ***Medidas de seguridad***

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



- Hay que situar duchas y lavaderos de ojos y cuerpo convenientemente para que cualquier obrero afectado se aplique grandes cantidades de agua rápidamente.
- También es necesario utilizar los equipos de protección cuando se requieren.
- Instruir adecuadamente a los trabajadores respecto a los métodos de manipulación del amoníaco con el objetivo de prevenir el contacto directo del líquido a una exposición imprevista del gas.

### ***Medidas constructivas para eliminar estos problemas***

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

### ***Ruido***

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

A esta investigación le es de vital importancia la zona costera cercana a la empresa, la cual ha recibido durante varios años, el vertimiento de estos contaminantes sin tratar, eliminando la posibilidad de explotación por otros sectores como la pesca y la recreación, por solo citar dos ejemplos. El compromiso de cuidar el medio ambiente no se exige debemos de llevarlos todos, conociendo que en este cuidado radica el futuro de nuestra salud y la de nuestras familias.

### 3.5. Conclusiones del capítulo

- Con la implementación de la metodología de cálculo correspondiente se pudo llegar a la conclusión de que la bomba es una bomba de velocidad normal, una altura de 43,588 m, un Reynolds de 245599,41 para un régimen turbulento, y un *NPSHd* de 12,91 ofreciendo una condición de no cavitación.
- La valoración económica arroja que es muy factible la nueva modificación pues se puede obtener un ahorro de 93531,151 CUC/año.
- Se realizó un análisis del impacto medioambiental donde se argumentó sobre los principales efectos de la planta de lixiviación y lavado que afectan el medio ambiente, y algunas de las posibles tareas que se pudieran realizar para erradicar algunos de estos problemas.

## CONCLUSIONES GENERALES

- La instalación actual cuenta con bombas muy parecidas, solo la diferencian la potencia del motor que las impulsan, por lo que su punto de trabajo sería muy similar, alrededor de los 380 m<sup>3</sup>/h de caudal para una altura de 37 m aproximadamente.
- Conociendo que el sistema consume mucha energía eléctrica, se plantea hacer una modificación que permita eliminar un sector de la instalación con el objetivo de disminuir los costos por consumo energético y mantenimiento.
- El sobreconsumo de energía de la instalación actual se analizó en la tesis y se propone un nuevo diseño con el cual se logra un ahorro de electricidad de 93531,151 CUC/año, cumpliendo así con el principal objetivo de la tarea y de la empresa.

**RECOMENDACIONES**

- Es recomendable que la empresa implemente esta nueva modificación en el sistema, en aras de reducir los costos por consumo energético y mantenimiento de la planta y en general de la institución.
- Se deberían implementar proyectos como este en otros sectores de la empresa donde ocurren problemas similares, y hacer uso de las nuevas tecnologías existentes en el mundo.
- Sería aconsejable diluir la cola, hasta el nivel en que salía desde el tramo 2 del sistema.

## Bibliografía

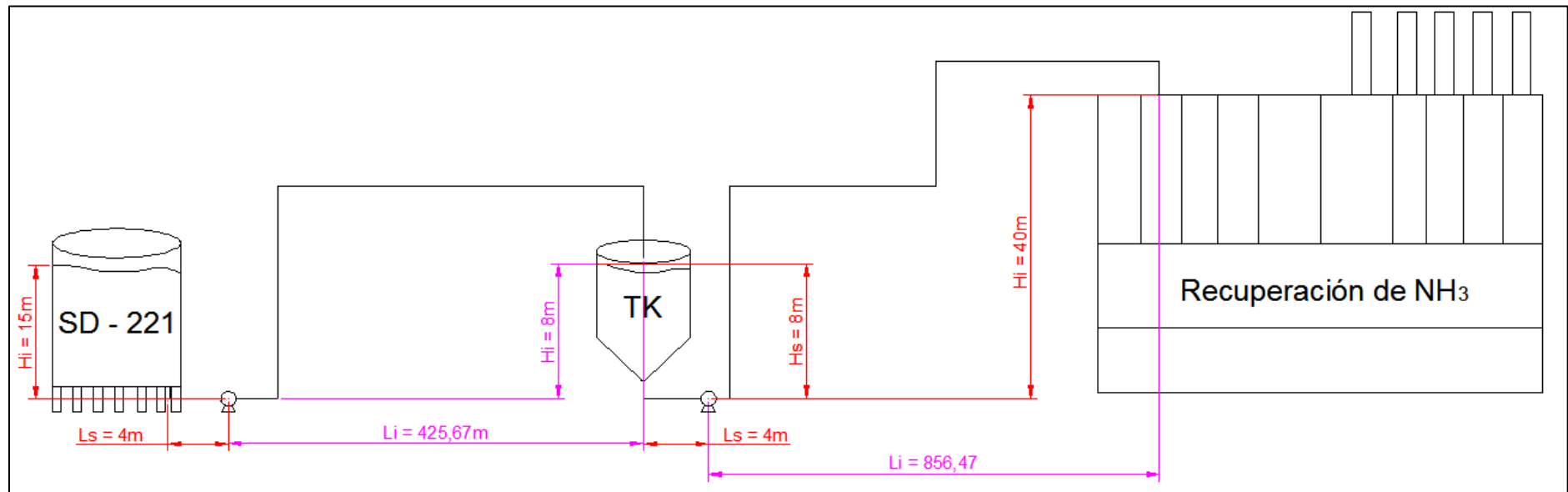
- A. Ibarra, J. y. (2001). *Transporte de alimentos fluidos através de tuberías*. Mexico: Universidad de las Americas, Puebla.
- A. Laurencio, H. R. (2004). *Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas de transporte de hidromezclas de alta densidad, en el proceso carbonato amoniacal*. Moa: Trabajo de Diploma.ISMM.
- Agüera, A. S. (2004). Operaciones básicas de Fluidos (Notas de Clase). *Flujo de Fluidos por Tuberías*. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- 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.
- Caldyño, & S., V. (2004). Estudio experimental de las mezclas agua-sedimentos, orientado al cálculo de flujo de lodos. Mexico: Morelos.
- Cerpa, A. (1998). Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. *Evento de Metalurgia 98*.
- Churchill. (1977). *Chemical Engineering*.
- Darby. (2000). Laminar and turbulent pipe flows of non-Newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomenon.
- Darby, R. (2001). Take the mystery out of non-newtonian fluids. *Chemical Engineering*, 9(3) 66-73.
- Evelio, M. P. (1999). *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. La Habana: CEIM.
- 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: ISMM.
- Garcell, A. C. (1992). Caracterización reológica de las pulpas de limonita de Moa. *Tecnología Química*, 1, 63-68.
- Garcell, L. (1988). *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Ciudad de La Habana: E. P y Educación .
- Garcell, L. (1993). Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de MOA, en periodos de sedimentación normal y crítica.

- Garcell, L. (2001). *Flujo por Tuberías de suspensiones minerales*. Facultad de Ingeniería Química: Universidad de Oriente.
- Gardey, J. P. (2015). *Definición.de*. Recuperado el 16 de 3 de 2017, de Definición.de: <http://definicion.de/reologia/>
- Gonzalez. (2012). Análisis de los parámetros de operación del bombeo para agua tecnológica en la Empresa Plásticos Cajimaya.
- Guerrero, O. (1995). Ecuación Modificada de Colebrook-White. *Ingeniería Hidráulica de México*, Vol. X, pp. 43-48, Enero-Abril.
- Guzman, V., & Villacreses-Zambrano. (2006). Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio. (pág. 182). Trabajo de Dipolma: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Hidra, S. (s.f.). *Software Hidra*. Recuperado el 5 de 2017, de <http://hidrasoftware.com>
- Izquierdo, P., Turro, K., A. y., & Alejandro. (2001). Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural. *Minería Geología*, 53-59.
- Kramer, G. (2012). *Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible*.
- Laplace, D. (21 de 2 de 2017). *Laplace*. Recuperado el 2 de 6 de 2017, de [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Propiedades\\_del\\_agua](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Propiedades_del_agua)
- Leyva. (2014). *Influencia del porcentaje de sólidos en la sedimentación del lodo*. Moa.
- Martínez, R. R. (2009). Caracterización de las propiedades físico mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tuberías. Tesis en Opción al título en Electromecánica. ISMM. Moa.
- Pérez. (2000). Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas.
- Pérez, F. (1983). *Equipos de Bombeo*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Pérez, L. (2006). Efecto de la granulometría y de las propiedades superficiales sobre la reología de suspensiones concentradas de laterita. *Tecnología Química Vol XXXVI, No 1*.
- Pérez, L. (2010). Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas (Tesis Doctoral). Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- Pérez, L. (2013). Evaluación del sistema de bombeo de la pulpa de la Planta de Espesadores en la Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba.

- Perez, R. (2004). *Cavitación y materiales de construcción en las Bombas centrifugas*.
- PumpLine. (s.f.). *PumpLine*. Recuperado el 5 de 2017, de <http://PumpLine.Com>
- Rabinovich, E. Z. (1987). *Hidráulica*. Moscu, URSS: MIR.
- Ramos, F. (2015). *Evaluación de los parámetros de transporte de la pulpa lateritica*. ISMM, Moa: Tesis de Grado.
- Rd, A. R. (2014). *LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd*. Recuperado el 12 de 5 de 2017, de <http://www.LMNOeng.com>
- Resource, C. (2007). *ocwus*. Recuperado el 10 de 5 de 2017, de <http://ocwus.com>
- Rodriguez C. (2009). Tesis en Opcion al Titulo de Master en Electromecánica.
- Skelland. (1970). *Non Newtonian Flow and Heat Transfer*. La Habana: E. Revolucionarias.
- Skelland, A. H. (1970). *Newtonian Flow and Heat Transfer*. La Habana: Instituto Cubano del Libro.
- TLV. (2017). *TLV Compañia Especialista en Vapor*. Recuperado el 5 de 2017, de <http://TLV.com>
- ToolBox, T. E. (s.f.). *The Engineering ToolBox*. Recuperado el 5 de 2017, de <http://TheEngineeringToolBox.com>
- Turiño, L. (1999). Determinación aproximada de las características de funcionamiento de una Bomba Centrífuga., (págs. 58-73). Centro Azucar.
- Turro Breff, A. (2002). *Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal*. Moa, ISMM: Tesis en Opcion al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.

## Anexo 1

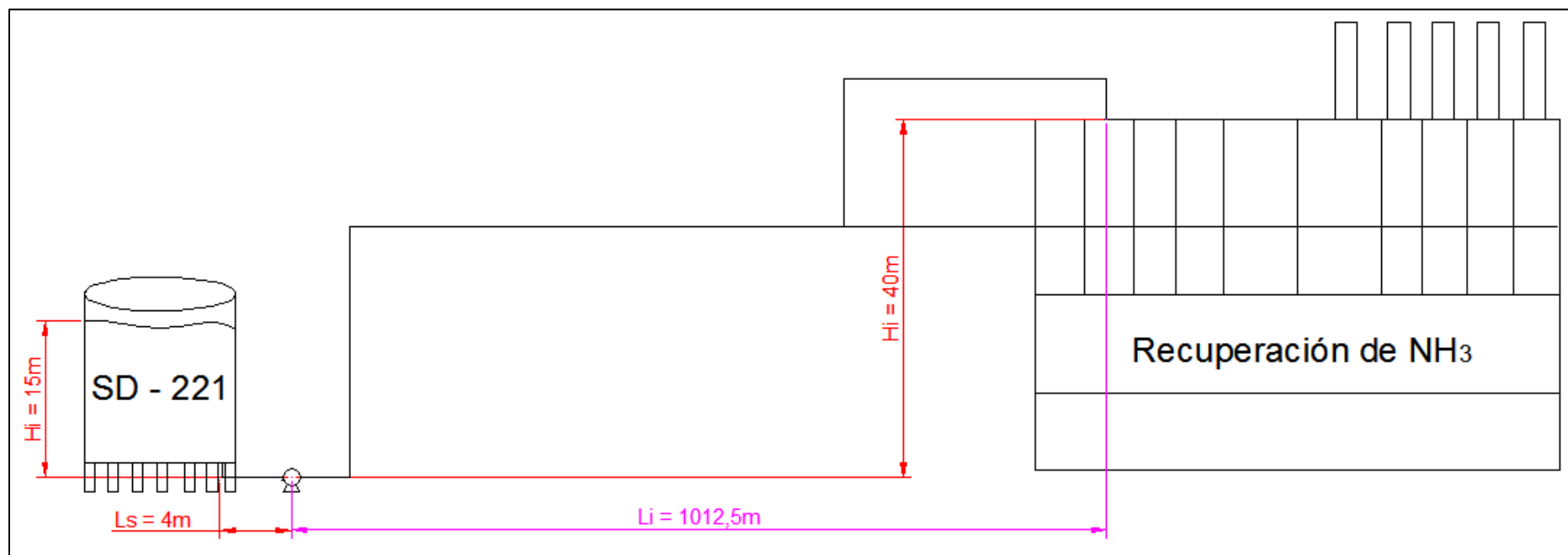
Figura 1. Esquema de la instalación actual





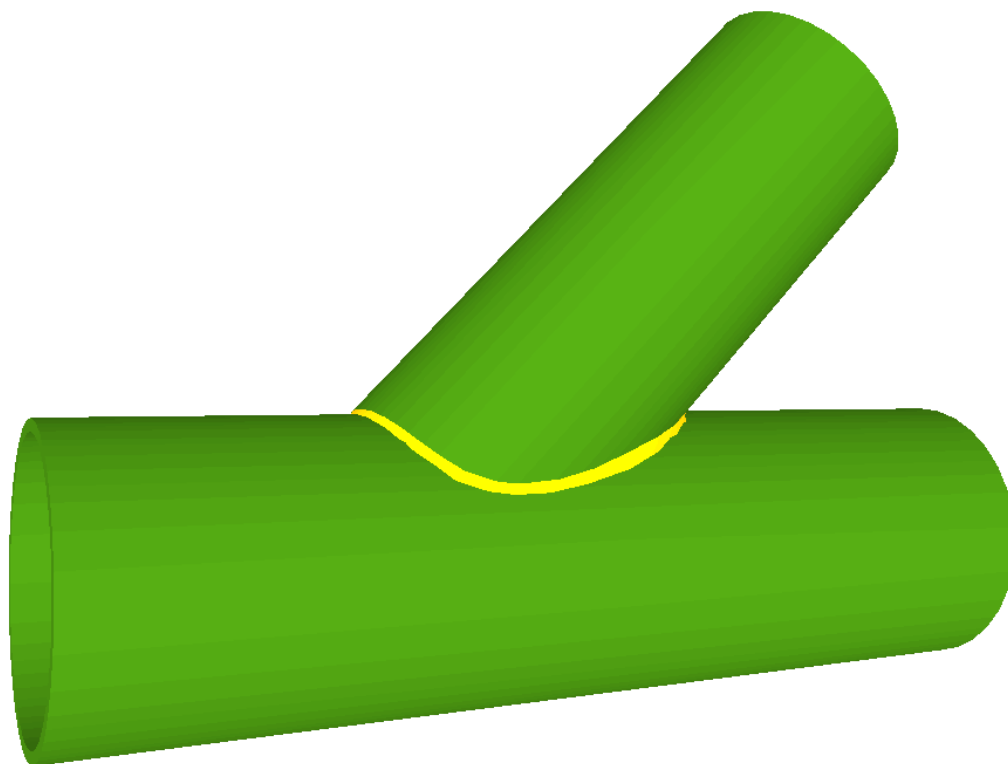
## Anexo 2

**Fifura 2.** Esquema de la instalación modificada



### Anexo 3

**Figura 3.** Tipo de unión que se plantea utilizar en la modificación para unir dos líneas a una.



## Anexo 4

**Tabla 1.** Resultados obtenidos gracias a la herramienta Excel para el tramo 1 del sistema

Q (m3/h)	Q (m3/s)	v (m/s2)	$R_e$	$f$	$\xi h_{imp}$	$\xi h_{succion}$	$\Sigma \xi_e$	perd tot	$H_{red}$	$R_c$	$n_s$	NPSHd	NPSHr
200	0,05555556	1,7692852	16157,856	0,019284	330,49873	26,8703148	12,835	356,97902	-0,34838475	0,69808904	306,934356	12,91006	3,53397926
260	0,07222222	2,3000708	21005,213	0,019284	558,542854	45,410832	12,835	608,12454	4,24122976	0,69808904	349,95901	12,91006	3,83367703
300	0,08333333	2,65392675	24236,774	0,01928403	743,621547	60,4581599	12,835	811,95213	7,96612233	0,69808904	375,916204	12,91006	4,00835807
315	0,0875	2,7866242	25448,6229	0,01928403	819,843412	66,6551746	12,835	895,89544	9,50016307	0,69808904	385,19956	12,91006	4,06981993
340	0,09444444	3,00778485	27468,3548	0,01928403	955,14133	77,6552097	12,835	1044,89935	12,2231681	0,69808904	400,193439	12,91006	4,16803041
400	0,11111111	3,53857042	32315,7116	0,01928403	1321,99492	107,481259	12,835	1448,91606	19,606461	0,69808904	434,07073	12,91006	4,38542028
450	0,125	3,98089172	36355,1755	0,01928403	1673,14982	136,030969	12,835	1835,64376	26,6738022	0,69808904	460,401535	12,91006	4,55040589

**Tabla 2.** Resultados obtenidos gracias a la herramienta Excel para el tramo 2 del sistema

Q (m3/h)	Q (m3/s)	v (m/s2)	$R_e$	$f$	$\xi h_{imp}$	$\xi h_{succion}$	$\Sigma \xi_e$	perd tot	$H_{red}$	$R_c$	$n_s$	NPSHd	NPSHr
200	0,05555556	1,13234253	12926,2846	0,01928403	135,37228	11,0060809	12,835	182,715967	36,36146	2,48777492	94,9601205	5,91005996	4,30501901
260	0,07222222	1,47204529	16804,17	0,01928403	228,779153	18,6002768	12,835	286,709985	39,3708674	2,48777492	108,271196	5,91005996	4,6499968
300	0,08333333	1,69851312	19389,4192	0,01928403	304,587386	24,7636623	12,835	371,110655	41,8132772	2,48777492	116,301897	5,91005996	4,85088309
315	0,0875	1,78343949	20358,8983	0,01928403	335,807862	27,3019595	12,835	405,869796	42,8191467	2,48777492	119,174005	5,91005996	4,92153359
340	0,09444444	1,92498231	21974,6839	0,01928403	391,225889	31,8075739	12,835	467,569145	44,6046194	2,48777492	123,812849	5,91005996	5,03439311
400	0,11111111	2,26468507	25852,5693	0,01928403	541,489119	44,0243237	12,835	634,863869	49,4458401	2,48777492	134,29389	5,91005996	5,28406508
450	0,125	2,5477707	29084,1404	0,01928403	685,322166	55,7182847	12,835	794,999584	54,0798913	2,48777492	142,440181	5,91005996	5,47342262

**Tabla 3.** Resultados obtenidos gracias a la herramienta Excel para la modificación del sistema

Q (m3/h)	Q (m3/s)	v (m/s2)	$R_e$	$f$	$\xi h_{imp}$	$\xi h_{succion}$	$\Sigma \xi_e$	perd tot	$H_{red}$	$R_c$	$n_s$	NPSHd	NPSHr
200	0,05555556	1,13234253	12926,2846	0,01928403	135,37228	11,0060809	12,835	176,50251	30,1491698	2,86578745	94,9601205	12,91006	4,30501901
260	0,07222222	1,47204529	16804,17	0,01928403	228,779153	18,6002768	12,835	281,039242	33,702097	2,86578745	108,271196	12,91006	4,6499968
300	0,08333333	1,69851312	19389,4192	0,01928403	304,587386	24,7636623	12,835	365,880375	36,5856228	2,86578745	116,301897	12,91006	4,85088309
315	0,0875	1,78343949	20358,8983	0,01928403	335,807862	27,3019595	12,835	400,820915	37,7731594	2,86578745	119,174005	12,91006	4,92153359
340	0,09444444	1,92498231	21974,6839	0,01928403	391,225889	31,8075739	12,835	462,842255	39,8811008	2,86578745	123,812849	12,91006	5,03439311
400	0,11111111	2,26468507	25852,5693	0,01928403	541,489119	44,0243237	12,835	631,010041	45,5966793	2,86578745	134,29389	12,91006	5,28406508
450	0,125	2,5477707	29084,1404	0,01928403	685,322166	55,7182847	12,835	791,981458	51,0676722	2,86578745	142,440181	12,91006	5,47342262

## Anexo

### Balance energético para la bomba del tramop 1

$\eta_v$	$N_b$	$N_{eje}$	$N_m$	$\eta_t$
95,2380952	7,412	11,0626866	11,6158209	0,63809524
95,2380952	9,6356	14,3814925	15,1005672	0,63809524
95,2380952	11,1179956	16,5940232	17,4237244	0,63809524
95,2380952	11,6739	17,4237313	18,2949179	0,63809524
95,2380952	12,6004	18,8065672	19,7468955	0,63809524
95,2380952	14,824	22,1253731	23,2316418	0,63809524
95,2380952	16,677	24,8910448	26,135597	0,63809524

### Balance energético para la bomba del tramop 2 y modificación

$\eta_v$	$N_b$	$N_{eje}$	$N_m$	$\eta_t$
95,2380952	37,06	55,3134328	58,0791045	0,63809524
95,2380952	48,178	71,9074627	75,5028358	0,63809524
95,2380952	55,5899778	82,9701161	87,1186219	0,63809524
95,2380952	58,3695	87,1186567	91,4745896	0,63809524
95,2380952	63,002	94,0328358	98,7344776	0,63809524
95,2380952	74,12	110,626866	116,158209	0,63809524
95,2380952	83,385	124,455224	130,677985	0,63809524