

**República de Cuba**  
**Ministerio de Educación Superior**  
**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa**  
**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**  
**Departamento de Metalurgia Electromecánica**

# Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

**Título: Diseño del sistema de bombeo de cola en la planta de Lavadero en la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”**

**Autor:** Evaristo Montero Gómez

**Tutores:** MS.c. Héctor Laurencio Alfonso  
Ing. Ariel Breff Azahares

**Moa - 2010**  
**“Año 52 de la Revolución”**

## DECLARACIÓN DE AUTRIDAD

---

Yo: Evaristo Montero Gómez

*Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del ISMM de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.*

Autor:

Evaristo Montero Gómez

Tutor:

MS.c. Héctor Laurencio Alfonso

Tutor:

Ing. Ariel Breff Azahares

## **Pensamiento**

Ní el entusiasmo, ní la dísciplína, ní el espíritu de sacrificio, ní el trabajo al máximo, pueden concentrarse en una gran obra sí no hay también conocimientos técnicos donde asentarse.

CHÉ

## ***Agradecimientos***

***A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.***

***Tomás, Ever, Marbelis y Héctor.***

***A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el MSc. Héctor Laurencio Alfonso y Ariel Breff Azahares***

***A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que mas lo necesitaba.***

***A mis amigos que siempre creyeron en mi.***

***A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.***

***A la revolucion, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .***

***A todos***

***Muchas Gracias.***

***Dedicatoria***

***Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.***

***A mi madre: Mercedes Gómez Linares.***

***A mis hijos: Yanier y Carlos, que le sirva de  
ejemplo.***

***A mis hermanos: Héctor, Victoria y Carmen.***

***A mí querida y estimada esposa,***

***Mónica Quintero Laó***

***A mis amigos y compañeros de trabajo.***

# ***A nuestra revolución, por las posibilidades que me ofrece.***

## **Resumen**

En el presente trabajo de diploma se realiza un estudio que nos permite obtener la información necesaria para actualizar el estado de la temática en cuanto a la hidrotransportación de fluidos industriales. Además se exponen de las propiedades físico-mecánicas que caracterizan las colas de la empresa comandante Pedro Sotto Alba. Se propone una metodología que permite determinar el régimen de trabajo del sistema de transporte de cola, así como el cálculo y proyección de la nueva variante determinadas para la hidrotransportación de la cola en la planta de Lavadero. Se lleva a cabo la evaluación de los indicadores técnicos – económicos que caracterizan dicho sistema, así como una valoración del impacto medio ambiental provocado por la operación del actual de la transporte de cola.

## **Abstract**

Presently diploma work is carried out a study that allows us to obtain the necessary information to upgrade the state of the thematic one as for the hydro transportation of industrial fluids. They are also exposed of the physical-mechanical estates that you/they characterize the lines of the company major Pedro Sotto Alba. He intends a methodology that allows determining the working regimes of the system of line transport, as well as the calculation and projection of the new variant determined for the hydro transportation of the line in the plant of Laundry. It is carried out the evaluation of the technical indicators - economic that characterize this system, as well as a valuation of the half environmental impact caused by the operation of the current one of the line transport.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>SINTESIS</b>	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS</b>	
1.1 Introducción.	5
1.2 Investigaciones de los fluidos aplicadas al transporte por tuberías.	5
1.3 Comportamiento y propiedades reológicas de los fluidos.	12
1.3.1 Efectos de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas.	14
1.3.2 Comportamiento reológico de las dispersiones (pulpas) minerales.	15
1.4 Clasificación de las tuberías.	16
1.5 Generalidades sobre las bombas.	18
1.6 Evacuación de la cola en la planta de lavadero.	19
1.7 Conclusiones del capítulo I.	21
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1 Introducción.	22
2.2 Descripción de la instalación.	22
2.3 Propiedades físico-mecánicas de la cola.	24
2.4 Metodología para el cálculo de los parámetros de la tubería.	26
2.4.1 Cálculo de la cavitación.	31
2.5 Ecuaciones de semejanza.	32
2.6 Conclusiones del capítulo.	33
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1 Introducción.	35
3.2 Resultados de los criterios de diseño de los flujos en la planta.	35

3.3	Condiciones de operación de los residuales de la planta de Neutralización, Lixiviación y Lavaderos.	38
3.3.1	Flujos de operación de fondo del TK-7 y bombeado a Presa de colas.	39
3.4	Elevación, configuración y longitud de tuberías en las actuales condiciones de operación.	40
3.5	Análisis de los resultados del cálculo hidráulico.	42
3.5.1	Condiciones máximas de operación actual.	44
3.5.2	Condiciones máximas de operación en el futuro	45
3.5.3	Operación en serie de las tres bombas.	46
3.6	Valoración del impacto económico.	46
3.6.1	Problemas ambientales generados en la Planta de Lixiviación y Lavado.	49
3.6.2	Efectos sobre la salud.	49
3.7	Conclusiones del Capítulo III.	50
	Conclusiones Generales	
	Recomendaciones	

# INTRODUCCIÓN

# CAPÍTULO I

# CAPÍTULO II

# CAPÍTULO III

**CONCLUSIONES**

# RECOMENDACIONES

# BIBLIOGRAFIA

# ANEXOS

# ANEXOS



## INTRODUCCIÓN

En nuestro país hoy en día constituye algo primordial el desarrollo de tecnologías que permitan más ahorro de recursos, menos gasto de energía y menos contaminación atmosférica. El incremento de la eficiencia con el uso racional de los recursos que poseemos nos lleva a la búsqueda de productos más competitivos, para sustituir viejos y costosos esquemas tecnológicos.

En la actualidad la búsqueda del ahorro de energía esta destinado para la mejora del aislamiento, técnicas de recuperación de energías residuales, empleo de energía alternativa y otras técnicas que permiten mejorar la eficiencia de los equipos instalados. Sin embargo, no se debe olvidar que desde el comienzo de la era industrial, los ahorros de energía más espectaculares se han conseguidos por modificaciones de los procesos. Son tantas las consideraciones prácticas y análogas que podrían hacerse sobre casi todas las industrias, que llegan afirmar que las mayores posibilidades de ahorro de energía se encuentran en la modificación de los procesos.

En los últimos años se han ido desarrollando diversas iniciativas que tienden a la búsqueda de nuevas formas de explotar las considerables capacidades productivas creadas, dentro de los sectores inmersos en un progresivo desarrollo se encuentra el Ministerio de la industria básica, el cual apunta hacia la renovación tecnológica y organizativa de la producción. Es decir, nuevas estrategias adecuadas a las nuevas condiciones dentro de las cuales el buen manejo de las variables tecnológicas es un factor de gran importancia.

En los años posteriores aumentaron ligeramente los niveles de producción dentro de la recuperación económica, de donde se deriva que, el equipamiento tecnológico y la técnica existente en esta industria, padece de una sobreexplotación por la necesidad de cumplir los planes y compromisos contraídos. Esta situación provoca que en estos momentos sus equipos tengan generalmente muchos años de explotación, estén deteriorados y atrasados con relación a los equipos homólogos existentes en el mercado internacional, que el monto de la inversión necesaria para el mejoramiento tecnológico de sus equipos



sea considerable y que se produzcan importantes interrupciones en el proceso productivo por roturas en su equipamiento.

La situación económica actual en nuestro país se relaciona con los cambios experimentados en la sociedad, así como las relaciones entre plan y mercado. Un papel importante ha jugado también el perfeccionamiento empresarial, siendo uno de los factores que más ha de llevar al desarrollo futuro del país. Los adelantos tecnológicos producidos en los últimos años han motivado el incremento de la importancia que se le concede al estudio del proceso de fabricación de los productos, y como elemento indispensable para el aseguramiento de la cantidad y calidad de la producción, donde se deben de utilizar coordinadamente los hombres, equipos, materiales, energía e información en conjunto con el medio ambiente.

La producción de níquel es fundamental para el desarrollo de la economía cubana, ya que su precio cobra gran auge en el mercado internacional, constituyendo la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, y con ello equipos y aparatos para su desarrollo, lo que permitirá ir incrementando su papel en la economía nacional.

La **Situación Problémica** de la investigación la constituye

La operación del sistema de bombeo de colas desde la planta de Lavaderos hacia la Presa de colas en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, se garantiza con un buen funcionamiento del sistema hidráulico, actualmente este sistema presenta restricciones en el flujo debido al incremento de los regímenes de operación. Esta afectación se hace más crítica cuando la planta de Lixiviación está operando a altas capacidades, ocasionando el incremento del flujo de pulpa del sedimentador 153 – TK - 7 a valores superior a  $0,178 \text{ m}^3/\text{s}$  (2,670 gpm) y además se encuentran descargando los residuales de planta de Neutralización, Lixiviación y Lavaderos con valores de flujo superiores a  $0,056 \text{ m}^3/\text{s}$  (852 gpm) al tanque de cola (153 – TK - 10). Generalmente ocurre que se exceda el nivel del tanque 153 – TK - 10 se incrementa considerablemente y logra exceder la capacidad de almacenamiento y



se desborda. Ante esa situación el personal de operaciones se ve obligado a desconectar flujos de residuales, principalmente de la planta de Lixiviación y estos son vertidos al medio afectando el ecosistema.

El **Problema** a investigar lo constituye: Insuficiente capacidad en el sistema de bombeo de la cola que provoca derrame en el TK - 10 de la planta de Lavaderos, así como averías constantes en las bombas por estar sobrecargada.

Como **Objeto de la investigación** se establece: El sistema de bombeo de cola de la planta de lavaderos.

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

Si se realiza un análisis de la capacidad actual del sistema de bombeo de cola en la planta de lavaderos en la Empresa Pedro Sotto Alba, se podrá diseñar un sistema de bombeo que permita incrementar el trasiego de este fluido y minimizar o reducir el derrame que afecta el medio ambiente.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **Objetivo del trabajo**: Realizar el diseño de un sistema que permita incrementar el bombeo de cola en la planta de lavaderos.

Y se definen los siguientes **Objetivos Específicos**

1. Caracterizar el sistema hidráulico para la identificación de las limitaciones actuales.
2. Exponer los factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones minerales.
3. Realizar el diseño del sistema de bombeo para el incremento de la capacidad del flujo.
4. Comparar el sistema actual que la nueva metodología propuesta.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes



### **Tareas de trabajo**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Realizar la caracterización del sistema hidráulico actual para la identificación de las limitaciones actuales.
3. Establecer la metodología de cálculo para el diseño de la nueva propuesta del sistema de bombeo en la planta de Lavadero.
4. Análisis de los resultados y fundamentación de los cálculos de costo de la nueva propuesta de diseño.



## **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **1.1 Introducción**

El principio de acción del transporte hidráulico, consiste en el desplazamiento de cargas sólidas suspendidas en flujo de agua o de mezclas con partículas muy finas en suspensión, por extensión en cualquier otro líquido.

La mezcla de líquido con partículas insolubles se le denomina pulpa. Mediante el transporte hidráulico se puede transportar sólidos no microscópicos. Se emplean en distancias pequeñas, medias y grandes. En pequeñas distancias se emplean para el transporte interno en la industria minero metalúrgica, tanto en diferentes procesos tecnológicos como el transporte de pulpa y de colas. Como transporte externo se utiliza a presión en el acarreo de colas, como gravedad. Se emplean en las minas a cielo abierto para el transporte de escombros en el destape, tanto desde las minas, como hasta termoeléctricas a largas distancias, respectivamente.

#### **Objetivo del capítulo**

Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

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

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

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



cortantes. Estos materiales, desde un punto de vista técnico, son fluidos, ya que pueden deformarse continua e irreversiblemente.

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la hidráulica se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre lo que lo llevó al campo de la hidráulica.

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

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

El transporte por tubería no sólo se aplica a nivel internacional, también en Cuba se utiliza, así por ejemplo en las industrias níquelíferas; en la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba se utiliza para el transporte de pulpas lateríticas por gravedad y a presión. En la Cmdte Ernesto Che Guevara encontramos un caso particular; el sistema de bombeo de cola inaugurado en 1986

Nekrasov (1986), que aborda la temática relacionada con la teoría general de la hidráulica, establece una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con el transporte hidráulico y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas.

Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudoplástico o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por 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 según Darby (2002).

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

Welty (1976) y Bandala, (2001) al efectuar una evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas.

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

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática; de vital importancia en el desarrollo de la investigación de fluidos; trabajos como (De la Paz et al., 2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la de fluidez cómo se deforma el cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, así como la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas.



Steffe et al., (1986); (Ibarz et al., (2001); (Vélez, (2003); (Perona, (2003) y Sablani et al., (2003) realizan trabajos relacionados con flujos de fluidos por tuberías, pero los mismos se basan en fluidos de tipo newtoniano, no así para flujo no newtoniano independientes del tiempo.

Bandala (2001), plantean que en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar y viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes, y/o entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme cuando se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas o láminas imaginarias en movimiento.

Welty et al., (1976), considera que si el flujo en la tubería es turbulento, la variación de la velocidad a través del tubo no queda determinada únicamente por la viscosidad, sino que depende de las características que tenga la turbulencia, de las propiedades reológicas y viscoelásticas de los fluidos no newtonianos. La magnitud del esfuerzo cortante viscoso aumenta debido a los remolinos y vórtices que acompañan a la turbulencia, además con paredes ásperas o rugosas, la turbulencia se incrementa aún más.

Nakayama et al., (1980), evaluó las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, sin embargo hay que plantear que diferentes factores han sido analizados.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro



del conducto, entre otros aspectos (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971); (Foust et al., 1980); (Macedo et al., 2001).

Díaz y Hechavarría (1999) presentan una metodología para el cálculo del diámetro óptimo en régimen turbulento para cualquier tipo de fluido no newtoniano. Plantean que los costos debidos a tuberías y accesorios pueden representar una parte importante de la inversión total de una planta química. En cualquier estado de las condiciones de flujo, un incremento del diámetro de la tubería para usar incrementa los costos fijos para el sistema de tuberías, pero disminuye los costos de bombeo, lo que implica la existencia de un costo óptimo. El valor del diámetro puede determinarse combinando los principios de la dinámica de fluidos con consideraciones acerca del costo. El valor del diámetro óptimo está determinado en el punto para el cual la suma de los costos de bombeo y los costos fijos del sistema de tubería es un mínimo.

En el hidrot transporte el consumo energético depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y ésta, a su vez, depende del diámetro de la conductora, su estado de explotación, el material y tecnología de que está hecho, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades físico mecánicas del material y de sus suspensiones.

Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia del proceso tecnológico. Cualquier estudio encaminado a perfeccionar el sistema de evacuación de pulpas implicaría el análisis de estos factores en el proceso. El orden de la realización de los estudios no está relacionado obligatoriamente con el grado de incidencia, sino con la obtención organizada de los datos que se requieren.

Para poder fundamentar una instalación de este tipo es necesario conocer la velocidad crítica, las pérdidas específicas de cargas, la densidad o concentración



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

El transporte de este fluido consiste en traslado de sustancias de trabajo (combustible) teniendo gran auge en las industrias del níquel. Esta peculiaridad está determinada por las significativas ventajas que este presenta sobre los demás tipos de transporte.

- 1- Garantiza un proceso tecnológico continuo disminuyendo considerablemente el volumen de operaciones principales.
- 2 - Eleva la productividad de trabajo.
- 3 - Posibilitar la automatización de todo el proceso de transportación.
- 4 - Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.

El costo mínimo por esfuerzo realizado por la instalación de bombeo estaría sujeto al incremento del costo por energía que consume la planta sin embargo la experiencia ha demostrado que esto representa un pequeño porcentaje de los otros costos de notable interés por los gastos e inversiones, es decir que aproximadamente 70% de todos los costos es por capital y (10-15%) por costos de energía.

Como indica la lógica y basándose en la naturaleza y el volumen del fluido transportado por unidad de tiempo, las tuberías tienen que ser elaboradas de diversos materiales y de diversos diámetros. En la medida que el diámetro interior de la tubería sea mayor, volumen de fluido por unidad de tiempo podrá trasladar sin que la fricción del fluido, al pasar llegue a ser excesiva.



Para un volumen de fluido trasladado por unidad de tiempo o gasto determinado, resulta que:

- 1 - A mayor diámetro habrá menos fricción entre el fluido y la tubería.
- 2 - A mayor diámetro habrá menos caída de presión del fluido al pasar por la tubería.
- 3 - A mayor diámetro el fluido tendrá menos velocidad.
- 4 - A mayor diámetro la instalación será más costosa.

Los desechos lixiviados (colas) constituyen suspensiones minerales con particularidades no newtonianas poco conocidas que influyen en el proceso de transportación.

Para fundamentar y proyectar una instalación de transporte hidráulico, es necesario determinar la velocidad crítica, las pérdidas específicas de carga, la densidad o concentración de las mezclas, el diámetro del conducto que permita la determinación del régimen racional del trabajo y elegir los equipos adecuados para el caso concreto, lo que están influidos por las propiedades físico – mecánicas de las pulpas. Estos parámetros tienen incidencia en la magnitud de las inversiones, en los gastos de explotación y en la fiabilidad del trabajo de la instalación.

El conocimiento de las propiedades de flujo de las suspensiones que se transportan es de gran importancia para decidir las características de los sistemas de bombeo, redes de tuberías, accesorios y equipos que deben utilizarse según las necesidades tecnológicas, así como los requerimientos medio ambientales, no menos importante que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

Otra forma de aplicación del transporte hidráulico se encuentra en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, donde se utiliza el transporte de pulpas lateríticas por gravedad y a presión. El transporte por gravedad se realiza desde la planta de preparación de pulpa hasta los espesadores de pulpa, con una suspensión de 25 – 30 %de peso en sólido, por una tubería de hormigón de 610 mm de diámetro y 5129 m de longitud. El transporte a presión se realiza desde los espesadotes de



pulpa hasta la planta de lixiviación con ayuda de bombas centrífugas, a través de una tubería de 460 m de longitud y 508 mm de diámetro.

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

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

Izquierdo (1989) sobre la determinación de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de mineral laterítico aplicable a las condiciones del proceso productivo de la Empresa comandante Pedro Soto Alba determinó las propiedades físico – mecánicas de las hidromezclas, formuló el modelo físico – matemático del flujo de las pulpas lateríticas; comprobó que durante el flujo dependiendo de la velocidad de las pulpas y de la concentración del sólido, se presentan los regímenes estructural, transitorio y turbulento, obtuvo las dependencias para determinar el coeficiente de resistencia hidráulica para el movimiento del régimen estructural y las pérdidas hidráulicas durante el movimiento de la hidromezcla en régimen turbulento.

### **1.3 Comportamiento y propiedades reológicas de los fluidos**

En los fluidos Newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos Newtonianos;



la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante y del gradiente de velocidad.

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

1. De viscosidad independiente del tiempo.
2. De viscosidad dependiente del tiempo.
3. Visco – elásticos o de Maxwell

Garcell (2003) plantea que 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.

La diferencia fundamental entre un sólido y un fluido no es más que la manera en que cada uno resiste los esfuerzos cortantes. En el caso del sólido el esfuerzo del sólido es proporcional a la magnitud de la deformación y en el caso del fluido es el esfuerzo cortante proporcional a la razón o a la velocidad angular de la deformación. (Sotto et al; 1985).

Los fluidos no Newtonianos presentan como características fundamentales el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aún cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes.

Cuando un sólido es disperso en un líquido, la viscosidad de las suspensiones resultantes se incrementa. Las dispersiones pueden exhibir características de flujo newtoniano o no newtoniano, dependiendo de las interacciones físicas y químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y de las fases mineralógicas que constituyen el sólido.

En la literatura especializada se han analizado distintos tipos de interacciones, las cuales han sido resumidas por Cheng dentro de tres categorías diferentes:



Interacciones hidrodinámicas entre el fluido y las partículas sólidas dispersas, las cuales incrementan la disipación viscosa en la suspensión

La atracción entre partículas, que dan lugar a la formación de agregados, flóculos y estructura. El contacto partículas – Partículas, el cual es la causa de las interacciones de fricción.

En cada tipo de interacción interviene una variedad de factores que determinan el comportamiento y las características reológicas de la dispersión. Los factores más importantes son:

- a. Tamaño y distribución de tamaño de las partículas.
- b. Forma y flexibilidad de las partículas.
- c. Concentración de la fase dispersa.
- d. Propiedades superficiales de las partículas.
- e. Naturaleza reológicas del líquido dispersante.
- f. Temperatura y pH de la dispersión.
- g. Velocidad de deformación a que es sometido el sistema.
- h. Composición química y mineralógica del sólido.
- i. Composición iónica del medio dispersante.

### **1.3.1 Efectos de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas**

En las dispersiones gruesas, donde las partículas son relativamente grandes, el área superficial total de la fase sólida resulta relativamente pequeña. En estos sistemas el efecto de las propiedades superficiales es prácticamente despreciable. En cambio, en las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeña un papel muy importante. Ello se debe fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado, grandemente, por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, puesto que estas variables influyen sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción de Van

der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas que se producen por el solapamiento de las dobles capas eléctricas que rodean a las partículas (repulsión de Born), y depende del pH.

Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial.

En los trabajos de Cerpa (1999) y Garcell (1990,1993), con pulpas de lateritas. Leong y Boger (1990) con suspensiones de lignito, y de Garcell (1998) con suspensiones de maghemita, se ilustra la relación entre los fenómenos de la Química de Superficies y la Reología. Teniendo en cuenta todo lo hasta aquí explicado, resulta evidente que los efectos de las propiedades superficiales sobre la reología de las suspensiones minerales coloidales es un fenómeno de carácter universal de manera que, los principios que rigen estos procesos pueden ser aplicados independientemente del tipo de mineral que forme la dispersión.

### **1.3.2 Comportamiento reológico de las dispersiones (pulpas) minerales**

Al conformarse la dispersión de un sólido en un líquido trae consigo el aumento de la viscosidad de la dispersión resultante, las que pueden tener un comportamiento newtoniano o no newtoniano en dependencia de la naturaleza y las características de las fases por separado así como de las propiedades de la fase sólida.

Para el primer caso (newtoniano), teniendo en cuenta el nivel de complejidad, sus viscosidades pueden estimarse por expresiones dependientes de la fracción volumen del sólido y de la viscosidad de la fase líquida. Por su parte en las dispersiones no newtonianas (de características coloidales), aparecen interacciones entre las fases y partículas que obligan al uso de métodos experimentales para la determinación de sus viscosidades. Las interacciones hidrodinámicas están asociadas a suspensiones de media y bajas concentraciones, mientras que las dos restantes están muy relacionadas con las suspensiones concentradas.



Hasta ahora se han visto los tipos de interacciones presentes en las diferentes suspensiones, pero estas, a su vez se ven afectadas por diversos factores, tales como:

- Concentración de sólidos.
- Composición granulométrica y formas de las partículas.
- Temperatura.
- pH

#### **1.4 Clasificación de las tuberías**

Las tuberías se clasifican atendiendo a su diámetro, con diámetro hasta 12" ó 304 mm, se clasifican por su diámetro interior y por encima de esta medida por su diámetro exterior. Otra clasificación de las tuberías está dada por el tipo de material en dependencia del tipo de fluido a transportar.

La fabricación de las tuberías por su manufactura puede ser, sin costura y con costura. Se fabrican por laminado, trefilado y extrusión, así como por perforado o agujereado. Son más costosas que las que tienen costuras, además permiten la mejor transportación ya que la fricción del fluido al pasar por la tubería, será menor en la medida que el terminado superficial interior sea más alisado. Al ser menor la fricción la pérdida de presión será también menor. Las tuberías con costura se elaboran doblando en círculo una plancha de acero y soldando por resistencia eléctrica, por arco eléctrico, por arco sumergido. La costura puede ser longitudinal o helicoidal.

Dentro de los materiales más comunes para la fabricación de tuberías tenemos:

##### **✓ Tubería de acero de bajo carbono**

Son las más utilizadas debido fundamentalmente a su bajo costo, a que se sueldan con efectividad y rapidez. En la elaboración de estos tipos de tuberías se emplean aceros de bajo carbono ya que por efecto de calentamiento y enfriamiento no adquieren temple por acritud. Son susceptibles a las aguas marinas.



✓ **Tuberías de aceros aleados**

De mayor costo que las de acero al carbono, se utilizan para instalaciones de alta presión, alta temperatura y de alta resistencia a la acción de fluidos corrosivos.

Los elementos de aleación utilizados en los aceros aleados para tuberías son el molibdeno, el vanadio, el cromo, el manganeso, el silicio, el níquel y el titanio. Son susceptibles a las aguas marinas.

✓ **Tuberías galvanizadas**

Estas tuberías se elaboran de acero de bajo carbono y se recubren, tanto por su interior como por su extremo, con una capa de zinc. La capa galvánica de zinc le suministra a la tubería una buena protección contra la oxidación. Estas tuberías que siempre tienen costura deben unirse solamente con accesorios roscados, no deben unirse con soldadura. Son la indicada para transportar agua potable o aguas industriales no corrosivas. Se fabrican hasta diámetro de 150 mm. No son resistentes al agua marina.

✓ **Tuberías de cobre**

Se fabrican generalmente de pequeños diámetros y paredes de poco espesor. Son utilizadas ampliamente para aire, vapor, agua, gasolina, sistemas hidráulicos de frenos. Las tuberías de mayor diámetro se utilizan en canalizaciones empotradas para agua (duran más que las galvanizadas), para fluidos refrigerantes y fluidos corrosivos.

✓ **Tuberías de bronce**

Son de mayor resistencia a la corrosión, pero son de muy alto costos y pequeños diámetros. Se utilizan generalmente en la industria química, en industria marina.

✓ **Tuberías de plásticos**

Se utilizan cada vez más debido a su bajo costo, su fácil instalación, su resistencia a la corrosión y oxidación y a su terminado alisado. Las tuberías de plásticos se unen por medio de pegamentos o cementos plásticos, se utilizan accesorios plásticos especiales para la unión con adhesivos.

Algunas tuberías de plásticos se unen por medio de uniones roscadas estándar.



✓ **Tuberías de aceros inoxidables**

Se utilizan en fábricas de la industria alimenticia y de la industria química.

**1.5 Generalidades sobre las bombas**

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

Durante el funcionamiento de la bomba la energía, recibida por ella del motor se transforma en energía potencial, cinética y, en un grado insignificante, calorífico del flujo del líquido. El funcionamiento de la bomba, acoplada al sistema se encuentra en dependencia de las propiedades hidráulicas de este sistema, llamado red, por lo que el mismo debe mantenerse estable. La energía suministrada a la bomba durante su funcionamiento, sufre cambios de transformación de la energía, parte de la energía mecánica se pierde inevitablemente a causa de las pérdidas hidráulicas, mecánicas y fugas.

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

La curva característica es una función decreciente que tiene dos puntos singulares: el punto de máxima altura de elevación ( $H_{max}$ ), con caudal nulo, y el punto de máximo caudal ( $Q_{max}$ ), con altura de elevación nula. Entre estos dos puntos la bomba puede proporcionar cualquier caudal comprendido entre 0 y  $Q_{max}$ , a cualquier altura de elevación comprendida entre 0 y  $H_{max}$ . (Skelland ,1970)



Steffe y Morgan (1986) plantean que generalmente, las bombas no deben funcionar en los valores extremos o cerca de ellos, aunque hay bombas que si pueden hacerlo. Por ello se deberá escoger el tipo de bomba adecuado.

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

Sablani y Shayya (2003) consideran que para limitar el consumo de energía eléctrica de las bombas, es importante dimensionar adecuadamente los elementos constituyentes de los circuitos (tuberías, válvulas, intercambiadores de calor) de modo que en el circuito primario la pérdida total de presión, al circular el caudal recomendado, alcance un valor máximo entre 4,5 a 8m.c.a. En el circuito secundario, al ser el trazado de tuberías relativamente corto, la caída de presión será como máximo 3 a 3,5 m.c.a.

### **1.6 Evacuación de la cola en la planta de lavadero**

La Empresa Comandante Pedro Sotto Alba fue originalmente puesta en marcha en el año 1960. Desde finales de 1994 funciona como una empresa mixta cubano canadiense. Utiliza un eficiente proceso de lixiviación ácida a presión conocido por hidrometalurgia donde el componente valioso se recupera de la masa sólida mediante el tratamiento por un líquido, en este caso: ácido sulfúrico.

A partir de una minería convencional a cielo abierto, el procesamiento directo del material se hace en una línea de siete plantas. Existen otras plantas e instalaciones que preparan o producen ciertas materias primas y productos intermedios.

Para aprovechar la fuerte demanda sostenida del níquel y el cobalto se realizó un proceso inversionista con el objetivo de incrementar la producción de dicha planta que estaba en 2006 en 33,000 toneladas a unas 46,000 toneladas de Níquel + Cobalto. Las inversiones se previeron simultáneamente en todas las plantas principales y auxiliares, mediante un proceso en dos fases cuya construcción se solapaba.



El proyecto de Expansión se detuvo en 2008 a causa de la suspensión del financiamiento que los accionistas concedieran al proyecto, a raíz de la crisis económica mundial y su impacto en la demanda de níquel que trajo consigo una caída momentánea y estrepitosa de los precios del metal. La continuación de este proyecto se encuentra sujeta a estudios detallados y a los criterios para la selección y continuación de inversiones que utiliza la gerencia.

En el año 2009 los precios del níquel y el cobalto ascendieron de forma paulatina dando lugar a que algunas de las inversiones detenidas durante el proceso de expansión continuara su ejecución para lograr el incremento en la producción hasta 37,000 t/a de sulfuro de Ni + Co.

Uno de los proyectos detenido fue el trasiego de colas desde La Planta de Lavaderos hasta la presa de almacenaje de colas, actualmente este sistema constituye un problema para cumplir con el plan de producción previsto durante el proceso de Expansión.

El sistema de bombeo y tubería fue diseñado para trasegar un flujo de 2 500 gpm y una altura de descarga de la presa de 26 m, actualmente el flujo promedio es de 3500 gpm como promedio y la altura de la presa es de 30 m. Actualmente la planta de lixiviación no puede incrementar su producción por encima de 101,4 t/d de Sulfuros de Ni+Co, dejando de producir 1,748 t/a por limitación en el sistema de bombeo de colas.

Para lograr eliminar la dificultad presentada en el trasiego de colas desde la planta de Lavaderos hasta la presa de almacenaje de colas se pretende analizar la variante de Instalar una bomba reforzadora la cual se localizará en áreas cercana a la presa de almacenaje de colas.

Una vez seleccionada la bomba de acuerdo a los criterios de diseños establecidos por el proceso, se realizará un estimado de costo capital para justificar económicamente la implementación de este proyecto.



## **1.7 Conclusiones del capítulo I**

1. La bibliografía consultada, aporta información sobre el comportamiento de los fluidos, pero son escasas las referencias y en ninguna de ellas se muestran el comportamiento del sistema de bombeo de la cola en la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba"
2. Existe una clasificación generalizada de los diferentes tipos de tuberías que se pueden emplear el transporte de fluidos en dependencia de las características del mismo.
3. Se describe un nuevo diseño de evacuación de cola en la Empresa Pedro Sotto Alba, sin embargo no existen antecedentes de cálculos para acometer esta nueva inversión.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Introducción**

Hoy en días estas industrias se encuentran enfrascada en dos grandes cambios: la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por toneladas de níquel y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica.

En el transporte hidráulico por tuberías, la carga y descarga vienen a ser un proceso continuo que puede ser llevado a cabo automáticamente con un esfuerzo mínimo. Esto hace que se amortice el costo de la instalación.

Estos parámetros poseen incidencia en las inversiones teniendo en cuenta los gastos de explotación y la fiabilidad del trabajo de la instalación.

#### **En este capítulo se plantea como objetivo**

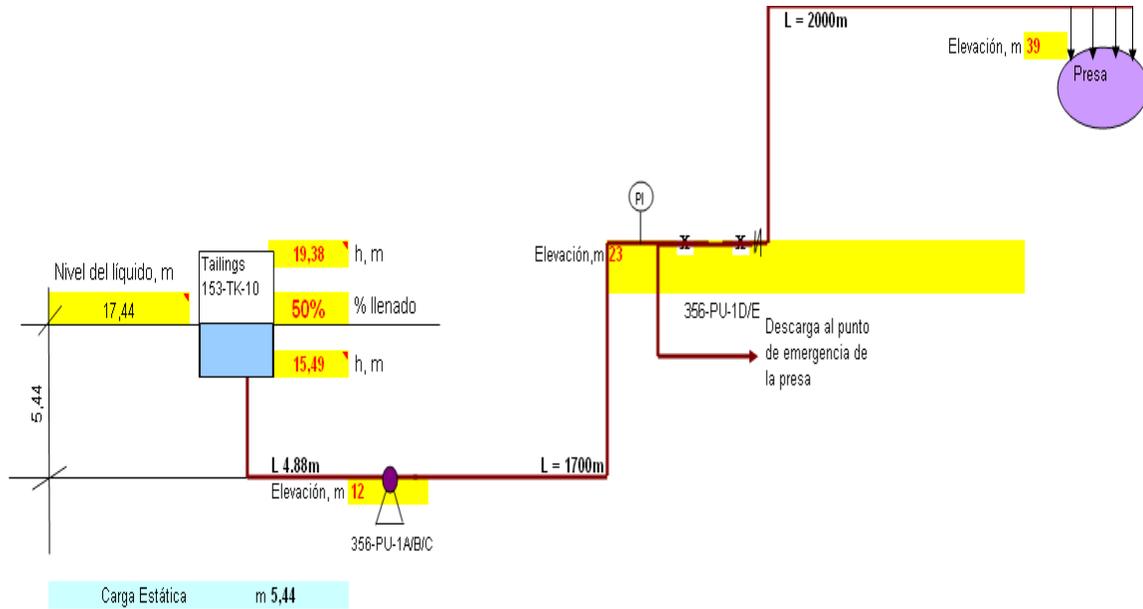
Fundamentar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los cálculos de diseño.

### **2.2 Descripción de la instalación**

Para poder fundamentar una instalación de transporte hidráulico es necesario conocer la velocidad crítica, las pérdidas específicas de cargo, la densidad o concentración de la mezcla y el diámetro del conducto que permite determinar el régimen rotacional de trabajo y la selección de los equipos adecuado para el caso correcto.

Los materiales encontrados en la industria minera, que ha sido y están siendo transportados de forma pastosa incluyen minerales de hierro concentrados colas, níquel mineral de cobre, cola, lana de oro o fango mineral.

La instalación objeto de estudio que aparece en la figura 2.1, es una variante de instalación para el bombeo de cola.



**Figura 2.1.** Instalación actual de bombeo para la cola.

Para la propuesta de la nueva instalación se requiere de un conjunto de dispositivos y accesorios, los cuales aparecen relacionados en las tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4, en correspondencia con su ubicación en cada tramo de tubería.

**Tabla 2.1.** Accesorios necesarios para el tramo 1.

Tramo 1		
Succión 356PU 1A/B/C	cantidad	K
Y (T flujo desviado 90 <sup>0</sup> )	1	0,72
válvula mariposa 18"	1	0,30
Codos 90	1	0,36
reducido 18X16	1	0,0043
junta de expansión (red 16x10)	1	0,1182
total		1,50
l/d		125,2

**Tabla 2.2.** Accesorios necesarios para el tramo 2.

Tramo 2		
Descarga	cantidad	K
junta de expansión (red 8x14)	1	0,4247
reducido 14X18	1	0,0930
Codos 90	3	1,08
válvula mariposa 18 "	1	0,30
Y (T flujo desviado 90 <sup>0</sup> )	1	0,72
total		2,62
		218,14

**Tabla 2.3.** Accesorios necesarios para el tramo 3.

<b>Tramo 3</b>		
Y (T flujo desviado 90 <sup>0</sup> )	1	0,72
Válvula mariposa 18"	1	0,30
Codos 90	1	0,36
reducido 18X16	1	0,0043
junta de expansión (red 16x10)	1	0,1182
total		<b>1,50</b>
l/d		125,2

**Tabla 2.4.** Accesorios necesarios para el tramo 4.

<b>Tramo 4</b>		
Spigots	10	2,4
total		2,40
l/d		200,0

### **2.3 Propiedades físico-mecánicas de la cola**

La cola es un producto residual de la planta de lixiviación y lavado, de color grisáceo. Todos los fluidos que se transportan producen incrustaciones a lo largo de la explotación del sistema de bombeo. Claro, hay algunos fluidos como la cola, laterita, petróleo y otros que poseen mayor efecto en los sistemas de bombas, debido a su composición granulométrica.

Basado en algunas de las investigaciones realizadas tanto en el instituto como en la misma industria Pedro Sotto Alba podemos decir que:

- La pulpa tiende a asentarse rápidamente perdiendo su humedad y formando una capa prácticamente impermeable que permite formar diques con ellos sin que se produzcan filtraciones apreciables.
- La resistencia mecánica es muy alta pues en los diques construidos se pueden mover libremente todo tipo de equipos sin que ocurran deslizamientos.
- La cola por su granulometría es de fácil arrastre por el viento, lo que provoca una alta contaminación en zonas donde se deposita.
- En tanque donde esta se almacena se observaran las incrustaciones provocado por la misma.



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

Para conocer la característica de la red para trabajo con hidromezclas debemos tener en cuenta el comportamiento de plástico ideal del fluido y las siguientes especificaciones:

- Líquido..... Licor ácido
- Densidad..... 1600 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad plástica.....0,0195 Pa.s
- Conductividad del líquido..... > 20 mS/cm

**Características del sólido que la forma**

- Sólido..... Mineral lixiviado
- Densidad real..... 3,8 t/m<sup>3</sup>
- Tamaño medio de las partículas... (80% -200; 20% +100) Mesh
- Configuración..... Aristas vivas

En la Tabla 2.5, se muestran los datos de la composición química correspondiente al mineral estudiado.

Composición química de los residuos lixiviados en las plantas de lixiviación.

**Tabla 2.5.** Composición química de la cola.

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

Según los datos de la composición química, los elementos predominantes, son el hierro y la sílice con valores medio de 47,6% y 12,45% respectivamente. En

general, se observa poca variabilidad en las composiciones químicas de las muestras analizadas

#### **2.4 Metodología para el cálculo de los parámetros de la tubería**

Las pérdidas durante el movimiento del agua pura en una línea recta producto al rozamiento, es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo y a la longitud de la tubería por donde se traslada e inversamente proporcional al diámetro de la misma.

Estas condiciones hay que tenerlas en cuenta a la hora de hacer una valoración de una instalación, cuando se transportan fluidos no newtonianos y hay presentes partículas sólidas, donde 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 para la regulación de muchos de estos parámetros hay que tener en cuenta leyes de afinidad y semejanza para las máquinas.

La velocidad media representa el gasto que tiene el líquido que pasa a través de la sección de flujo de una corriente líquida.

Para la determinación de la velocidad crítica se recomienda utilizar la ecuación que se muestra a continuación.

$$V_{crit} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w} \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[6]{S} \quad (2.1)$$

$D$  = 457 mm Diámetro de la tubería.

$w$  – Grosor hidráulico.

$\rho_s$  – densidad del sólido. 3,619 t/m<sup>3</sup>

$S$  = 0,40 – concentración de peso en sólido expresado en coeficiente.

La velocidad adecuada para el funcionamiento normal se escoge entre los límites.

$$V = (1,1 - 1,2) \cdot V_{crit} \quad (2.2)$$

Para que las partículas fluyan bien por la tubería y no se sedimente tiene que cumplirse que  $V > V_{crit}$

El área de la sección de la tubería se determina en función de los parámetros geométricos de esta, particularmente el diámetro de la tubería. La determinación de la sección circular de la tubería por donde circula el fluido, se puede realizar según la expresión siguiente

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

Donde:

D - Diámetro de la tubería (m)

El número de Reynolds ( $Re$ ), que permite establecer el régimen de trabajo del flujo y válida para fluidos plásticos Bingham según la naturaleza reológica del fluido se determina por la ecuación.

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_c}{\pi \cdot D \cdot \mu_p} \quad (2.4)$$

Donde:

$\mu_p$  - Viscosidad plástica del fluido.

$\rho_c$  - Densidad del líquido.

Para  $Re > 4000$  estamos en presencia de régimen turbulento.

Las velocidades críticas como la velocidad media del flujo para la cual es inminente la sedimentación de las partículas sólidas del mineral que se transporta en el líquido. La clasificación de la velocidades en sobre críticas, cercana a la velocidad crítica y menores que esta, tiene ventajas prácticas. Para el primer caso las partículas se mantienen en completa suspensión, sin sedimentación.

En el segundo caso estas velocidades serán considerablemente menores y las partículas se mantendrán suspensas si van en el líquido.

En el tercer caso las partículas precipitan en su mayoría y se arrastran por la parte inferior de la tubería; debido a los inconvenientes que trae consigo, este régimen no se utiliza.

Las pérdidas por fricción a través de equipos situados en una red hidráulica; por ejemplo, intercambiadores de calor, torres de absorción, en este caso se determinan mediante la ecuación:

$$\sum F = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (2.5)$$

Siendo  $\rho$  la densidad del fluido y  $\Delta P$  la caída de presión que experimenta éste al pasar por el equipo, por ejemplo, la caída de presión de un líquido a través de los tubos o de la coraza de un intercambiador de calor. El valor, así determinado del  $\sum F$  que provoca el equipo se adiciona a las pérdidas por fricción de las tuberías y accesorios para obtener la magnitud total de dichas pérdidas.

En el caso de las válvulas y otros accesorios (codos, reducciones y expansiones), se acostumbra expresar las pérdidas por fricción, que estas provocan en el sistema de flujo, mediante una longitud equivalente a un tubo recto.

$$\sum F = 2f \left( \frac{L + \sum Le}{D} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{g_c} \quad (2.6)$$

Siendo  $\sum Le$  la suma de las longitudes equivalentes de todos los accesorios y válvulas que se hallan en el tramo de la red hidráulica que se investiga. Por lo general, los valores de  $Le$  que se dan en la literatura se refieren a líquidos newtonianos en régimen turbulento.

El Valor que interviene en el cálculo de los factores de fricción, así como las tensiones cortantes se denomina Número de Hedston (Skelland 1970).

$$H_e = \frac{D^2 \cdot \rho_c \cdot \tau_o}{\mu_p^2} \quad (2.7)$$

Donde:

$\tau_o$  - esfuerzo cortante inicial

El cálculo del 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.

$$f = \left[ (f_L)^\beta + (f_T)^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.8)$$

$$f_L = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.9)$$

$$f_T = \frac{10^C}{\text{Re}^{0.193}} \quad (2.10)$$

El factor de fricción se determina por la siguiente ecuación.

$$\lambda_c = 4 \cdot f \quad (2.11)$$

Para calcular las pérdidas locales en la succión se tienen en cuenta los accesorios que hay en ese tramo, factor de fricción, coeficiente de rugosidad de la tubería y la velocidad del flujo

Las pérdidas en la succión, consideradas también las pérdidas por rozamiento en la tubería, son las pérdidas que tienen en cuenta la manera en que el fluido se transporta por las tuberías.

$$h_{\text{rozsucc}} = \xi_{\text{rozsucc}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.12)$$

$$\xi_{\text{rozsucc}} = \lambda_c \cdot \frac{L_s}{D} \quad (2.13)$$

Donde:

v - velocidad del flujo.

$L_s$  - longitud de la tubería.

Las pérdidas locales en la succión tienen en cuenta cuando el líquido encuentra un codo, una válvula en estrechamiento o ensanchamiento brusco, entre otras resistencias provocadas por accesorios y se calcula por la expresión:

$$h_{\text{locsucc}} = \sum \xi_{\text{succ}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.14)$$

$$\sum \xi_{\text{succ}} = \xi_{\text{vál}} + \xi_{\text{ent}} \quad (2.15)$$

Las pérdidas totales en la tubería de succión se encuentran mediante la suma de las pérdidas locales en la succión y las pérdidas por rozamiento en la tubería.

$$\sum h_{succ} = h_{locsucc} + h_{rozsucc} \quad (2.16)$$

Las pérdidas por rozamiento en la tubería de impulsión, tienen en cuenta la manera en al que el fluido se desplaza a través de la tubería.

$$\xi_{rozimp} = \lambda_c \cdot \frac{L_t}{D} \quad (2.17)$$

Donde:

$L_t$  - longitud total de la tubería de impulsión

$$h_{rozimp} = \xi_{rozimp} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.18)$$

Las pérdidas locales en altanería de impulsión tienen en cuenta todos los accesorios con los que cuenta la tubería.

$$\sum \xi_{imp} = \xi_{vál} + \xi_{codos} + \xi_{sal} \quad (2.19)$$

$$h_{locimp} = \sum \xi_{imp} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.20)$$

Las pérdidas locales por accesorios en el sistema se determinan mediante la suma de las pérdidas locales en la tubería de impulsión y las pérdidas locales en la tubería de succión.

$$\sum \xi_t = \sum \xi_{imp} + \sum \xi_{succ} \quad (2.21)$$

La característica de la red exterior de la instalación de hidrotransporte se calcula:

$$H_{red} = \Delta Z_x + R_c \cdot Q^2 \quad (2.22)$$

Donde:

$R_c$  - coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior de la instalación de transporte hidráulico.

$$R_c = \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2} \left[ \left( \lambda_c \cdot \frac{L_t}{D} \right) + \sum \xi_t + 1 \right] \quad (2.23)$$

El Cálculo de la potencia y la eficiencia eléctrica de la bomba, es la potencia que utiliza la bomba para cumplir el trabajo que se demanda.

$$N_b = Q_t \cdot \Delta P_t \quad (2.24)$$

$$\Delta P_t = H_t \cdot g \cdot \rho_c \quad (2.25)$$

Donde:

$Q_t$  y  $\Delta P_t$  - son el caudal y la caída de presión de la bomba en el punto de trabajo.

$\rho_c$  - densidad de la cola.

El cálculo de la potencia y búsqueda de la eficiencia eléctrica y de la bomba para cola es expresado por la ecuación.

$$N_{vcola} = H_{cola} \cdot \rho_{Cola} \cdot g \cdot Q_{cola} \quad (2.26)$$

$\rho_{Cola}$ : Densidad de la cola.

$g$ : Es la aceleración de la gravedad.

$\eta$ : Este valor se busca de acuerdo con el punto de trabajo de la bomba.

#### 2.4.1 Cálculo de la cavitación

El defecto que más afecta de forma general a las máquinas de flujo es la cavitación, para determinar el comportamiento de este en el sistema y para que la misma no cavite debe de cumplir con:  $NSPH_{dis} \geq NSPH_{req}$

La expresión de la  $NSPH_{dis}$ .

$hT$  - Es la tensión del vapor a una temperatura determinada.

Para determinar el  $NPSH_{req}$  se utiliza la expresión: (Cameron 1977)

$$NPSH_{req} = \left( \frac{rpm \sqrt{gpm}}{S} \right)^{1.33} \quad (2.27)$$

Es la presión de un líquido que a esa temperatura se halla en equilibrio con su vapor en un depósito cerrado.  $NSPH_{req} = 5$

El valor de la tensión de vapor de la cola para (50-70°C) esta determinado por  $h_t = 2,03$  m.

$$NSPH_{dis}(Q2) = P_{atm} - H_{suc} - hT - \sum hs(Q2) \quad (2.28)$$

Donde

$P_{atm}$  – Es la fuerza ejercida por la atmósfera por unidad de superficie a 35 °C.

$h_{vp}$  – Tensión de vapor a una temperatura determinada.

$h_t$  – Altura de succión.

$\sum h_{succ}$  – Perdidas en la succión

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

## 2.5 Ecuaciones de semejanza

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

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

**Para expresar en forma de ecuaciones estas relaciones, llamaremos:**

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

Las ecuaciones de semejanzas son fundamentales para obtener nuevas curvas de la bomba en función del gasto y el número de revoluciones del motor (Cameron 1977)



$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} \quad (2.29)$$

$$H_2 = H_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (2.30)$$

$$N_2 = n_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad (2.31)$$

Es necesario variar el diámetro del impelente de la bomba para obtener el punto de trabajo en relación con el gasto que requiere para el bombeo de efluentes. Para ello utilizamos la siguiente expresión: Cameron (1977)

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad \text{Para el impelente} \quad (2.32)$$

## 2.6 Conclusiones del capítulo

- ✓ Considerando los elementos a emplear en la instalación y las de las características del material, se establece la metodología de cálculo para la evaluación del sistema actual objeto de estudio.
- ✓ La metodología de cálculos propuesta permitirá establecer un nuevo diseño para el trasiego de cola en la Empresa Pedro Sotillo Alba y evitar el derrame de cola y residuales a la "zanja"
- ✓ El cálculo de la instalación permitirá la selección de tuberías, equipamiento de bombeo y accesorios para instalaciones hidráulicas a partir de la propiedad del fluido.

## **CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

La pulpa de fondo del sedimentador 153 – TK – 7 compuesta por una solución de flujo de reboso y sólidos lavados sin lixiviar se bombea al tanque 153 – TK - 10. En este tanque ocurre la dilución de la pulpa de colas con las soluciones de los sumideros (de la planta de neutralización, Lixiviación y Lavaderos), el retorno de la presa de colas (TPR) y agua de proceso. Ésta se bombea por medio de las bombas 356-PU-01A/1B/1C hacia la Presa de colas a través de una tubería de descarga de HDPE de 457,2 mm (18") de diámetro exterior desde las bombas hasta el punto de entrada a la presa, luego de 16" para finalmente disminuir su diámetro a 102 mm (4") en varios espigot que descargan directamente a la presa.

La dilución permite el flujo y la distribución uniforme de los sólidos en el punto de descarga de la Presa de colas. La ubicación del punto de descarga se cambia periódicamente con el objetivo de mantener una distribución uniforme de sólidos dentro de la Presa de colas. En la Presa de colas se recupera el retorno de la presa de colas (TPR) y se bombea nuevamente al espesador 153 – TK - 07 de Lavaderos.

#### **El objetivo del capítulo es**

Realizar la valoración de los resultados y explicar los fundamentos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

### **3.2 Resultados de los criterios de diseño de los flujos en la planta**

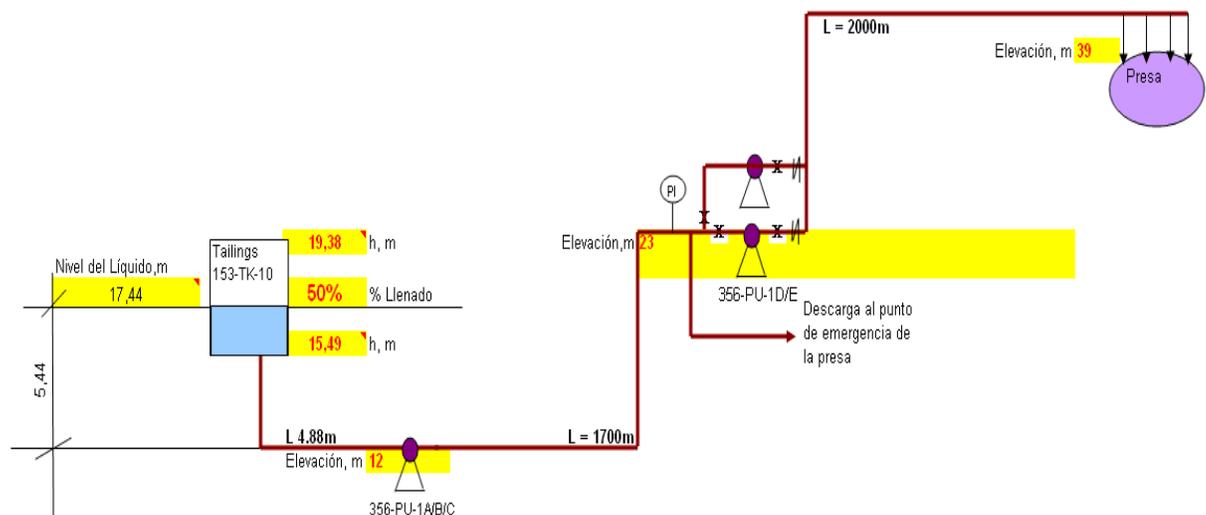
En la tabla 3.1 se resumen los criterios de diseño para los flujo de pulpa de fondo del 153-TK-7 y residuales de la planta de neutralización, lixiviación y lavaderos. Los mismos fueron tomados del Balance de Masa para un ritmo productivo de 37 k t/a.

El flujo de pulpa varía en dependencia de la cantidad de dilución. Observe la correlación entre el %wt sólidos y el flujo de pulpa. En la operación actual está en el rango de 27 a 33%.

**Tabla 3.1.** Criterios de diseño para el flujo de pulpa, sólidos y residuales para condiciones actuales y futuras.

	Operación actual (37 k t)			Operación futura (49 k t)		
	Diseño	Mínimo	Máximo	Diseño	Mínimo	Máximo
Flujo de sólidos del TK-7, t/h	380,7	416,5	416,5	430	473	473
Gravedad específica, sólidos	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74	3,74
Densidad de la pulpa, %wt sólidos	43 %	48 %	41 %	45 %	47 %	40 %
Gravedad específica, pulpa	1,46	1,55	1,44	1,45	1,54	1,43
Flujo de pulpa del TK-7,gpm	2 670	2 457	3 103	2 901	2 882	3 650
Flujo de residuales	852	744	1 101	852	744	1 101
Gravedad específica, pulpa	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Flujo total de pulpa a Presa de colas,gpm	3 522	3 201	4 204	3 754	3 626	4 751
Densidad de la pulpa, %wt sólidos	35 %	40%	33 %	37 %	40 %	33 %
Gravedad específica, pulpa	1,35	1,43	1,32	1,35	1,43	1,33

En la figura 3.1, se puede observar la propuesta del nuevo diseño de la línea de tubería para descarga de la cola basado en los criterios de diseño de elevación, configuración y longitud de tuberías.



**Figura 3.1.** Diseño de la línea de tubería para descarga de la cola

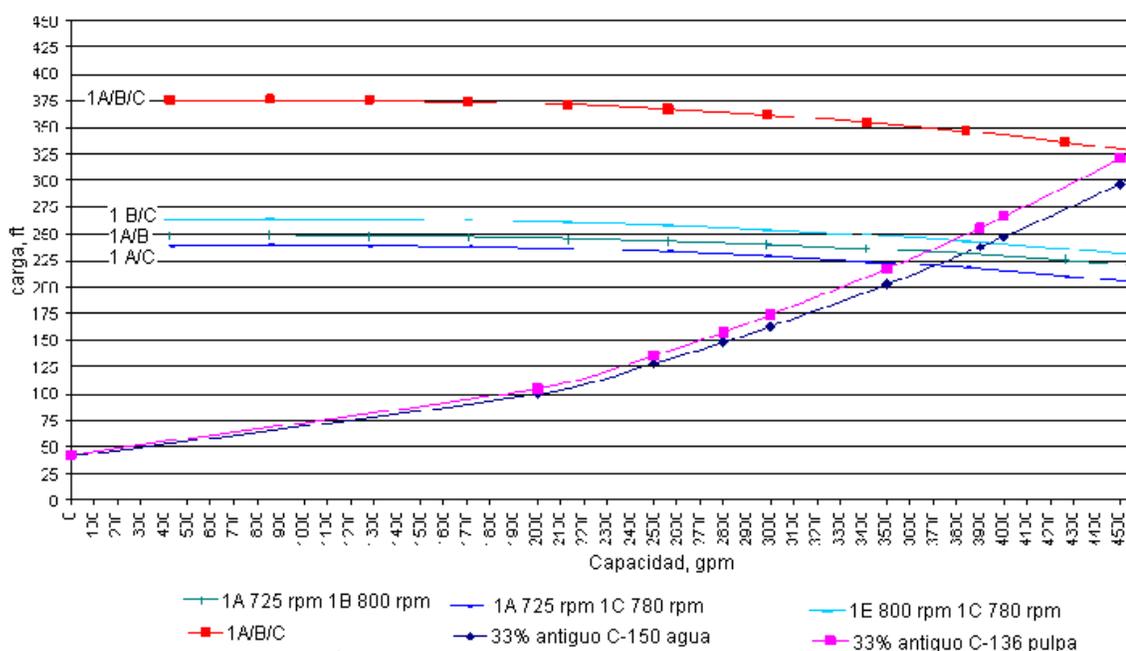
En la tabla 3.2, se representan los valores de elevación de diseño original, actual y futura en la Presa de colas.

**Tabla 3.2.** Elevación en la Presa de colas

	Diseño Original	actual	Pronóstico (según Knight Piésold)				
			2009	2010	2011	2012	2013
Elevación en presa, m	25	26	28	30.5	33	36	39

En la configuración de la tubería de descarga incluía en el diseño original una línea de HDPE fija con 2 300 mm de largo y 457,2 mm de diámetro que se extiende desde las bombas de colas hasta la estación de control del flujo en la base de la Presa de colas y una línea de colas de HDPE de 406 mm con una longitud de 1 750 mm y una elevación de descarga de 25 metros.

Con los datos obtenidos se realizó la curva del sistema para las condiciones del diseño inicial para el sistema de bombeo a la presa de cola, la cual aparece en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Curvas de las bombas y el sistema para las condiciones de diseño original.

Según los resultados mostrados en la figura anterior, se justifica la necesidad modificación del sistema de hirotransporte debido a la incapacidad del sistema por diseño para operaciones futuras.

### **3.3 Condiciones de operación de los residuales de la planta de Neutralización, Lixiviación y Lavaderos**

Los residuales provenientes de Neutralización y Lavaderos no cuentan con medidores de flujos instalados en línea. Sin embargo con el consumo de corriente de las bombas de Neutralización (174 – PU - 6A/B) y con el cálculo de la potencia consumida, se estiman los valores de flujo (constante). Estos valores de flujo se encontraban según los cálculos en 220 gpm como promedio y 325 gpm como máximo. Luego del paro reciente de planta, donde se eliminó el flujo de agua de enfriamiento (por fuera de la coraza) del enfriador de H<sub>2</sub>, que se vertía en su totalidad a la zanja, estos flujos de residuales han disminuido. Por tanto para los objetivos de este informe se consideran estos flujos en 150 gpm como promedio y 200 gpm como máximo.

El flujo de residuales de Lavaderos es intermitente y se encuentra en 120 gpm como promedio y 127 gpm como máximo.

Los residuales de la planta de Lixiviación fueron recopilados del programa Citect. Se procesaron los valores de flujos cada dos minutos de un día de operación, teniendo en cuenta la operación por separado de 4 trenes en operación y 1 de fin de campaña y con los 5 trenes en operación.

En la tabla 3.2, se encuentran los valores de flujos de operación de los residuales provenientes de la planta de Neutralización, Lixiviación y Lavaderos.

**Tabla 3.2.** Flujos de operación de los residuales provenientes de la planta de Neutralización, Lixiviación y Lavaderos

	Flujo de Residuales de los sumideros, gpm					
	Neutralización	Lavaderos	Lixiviación		Total 5 trenes	Total 4 trenes
			5 trenes	4 trenes		
Promedio	150	120	594	631	864	901
Máximo	200	127	774	751	1,101	1,078

### 3.3.1 Flujos de operación de fondo del TK-7 y bombeado a Presa de colas

En la tabla 3.3 se resumen los valores promedios mensuales de operación de los flujos de pulpa y sólidos del TK-7 y a presa de colas. Los mismos fueron recopilados del programa Citect procesando los valores de flujos cada dos minutos, desde noviembre 2008 hasta abril 2009.

**Tabla 3.3.** Flujos promedios de Fondo del TK-7 y bombeado a Presa de colas.

	nivel TK-10	Flujo de Fondo del TK-7				Flujo a Presa de colas		
		pulpa TK-7	% sól TK-7	SG pulpa	sólido seco TK-7	pulpa a presa	% sól presa	sólido seco presa
Nov-08	67%	2483	41	1,4	338	3288	34	337
Dic-08	68%	2580	43	1,5	366	3356	36	360
Ene-09	67%	2488	43	1,5	357	3317	35	352
Feb-09	62%	2503	42	1,5	348	3303	35	343
Mar-09	70%	2527	43	1,5	361	3350	35	357
Abr-09	72%	2331	42	1,5	321	3271	33	320

En la tabla 3.4 se resumen los valores máximos mensuales de operación de los flujos de pulpa y sólidos. Los mismos fueron recopilados del programa Citect procesando los valores de flujos cada dos minutos, desde noviembre 2008 hasta abril 2009.

**Tabla 3.4.** Flujos máximos de fondo del TK-7 y bombeado a Presa de colas.

	Nivel TK-10	Flujo de Fondo del TK-7				Flujo a Presa de colas	
		pulpa TK-7	% sól TK-7	SG pulpa	sólido seco TK-7	pulpa a presa	sólido seco presa
Nov-08	100%**	3000*	45	1,5	468	4906	497
Dic-08	100%**	3000*	47	1,5	490	4752	478
Ene-09	100%**	3000*	48	1,5	502	4446	493
Feb-09	100%**	3000*	45	1,5	464	4690	490
Mar-09	100%**	3000*	46	1,5	477	4329	481
Abr-09	100%**	3000*	46	1,5	470	4287	884

\* El rango del transmisor indicador de flujo es de 0 - 3000 gpm. El 2% del tiempo de operación, se trabaja con valores superiores a 3,000 gpm y no son registrados.

\*\* El indicador de nivel muestra los valores superiores al 100% sin embargo no se registran estos valores. Por encima de 100 % el tanque rebosa y se bota a la zanja.

El porcentaje del tiempo de operación para diferentes flujos de fondo del TK-7 aparece reflejado en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** % del tiempo de operación para diferentes flujos de fondo del TK-7.

Flujos de fondo TK-7	Nov-08	Dic-08	Ene-09	Feb-09	Mar-09	Abr-09	Promedio
>3000	4%	0%	2%	6%	2%	1%	2%
>2670 y < 3000	32%	42%	32%	30%	28%	27%	32%
Total	36%	42%	34%	36%	30%	28%	36%

El incremento de los regímenes de operación de la planta de Lixiviación, provoca el incremento del flujo de fondo del 153-TK-7. Como se observa en la tabla 3.5, el flujo de fondo del TK – 7 ha operado el 36 % del tiempo (como promedio) con flujos superiores a 2 670 gpm (valor de diseño para lo operación actual de 37k t) y por tanto con flujos de sólidos superiores a 380.7 t/h. Esto provoca un incremento en el nivel del Tanque de colas (153-TK-10) y en ocasiones el desbordamiento del mismo.

Esta afectación se hace más crítica cuando se encuentran descargando, al Tanque de colas, los residuales de las plantas de: Neutralización, Lixiviación y Lavaderos con valores de flujos superiores a 852 gpm.

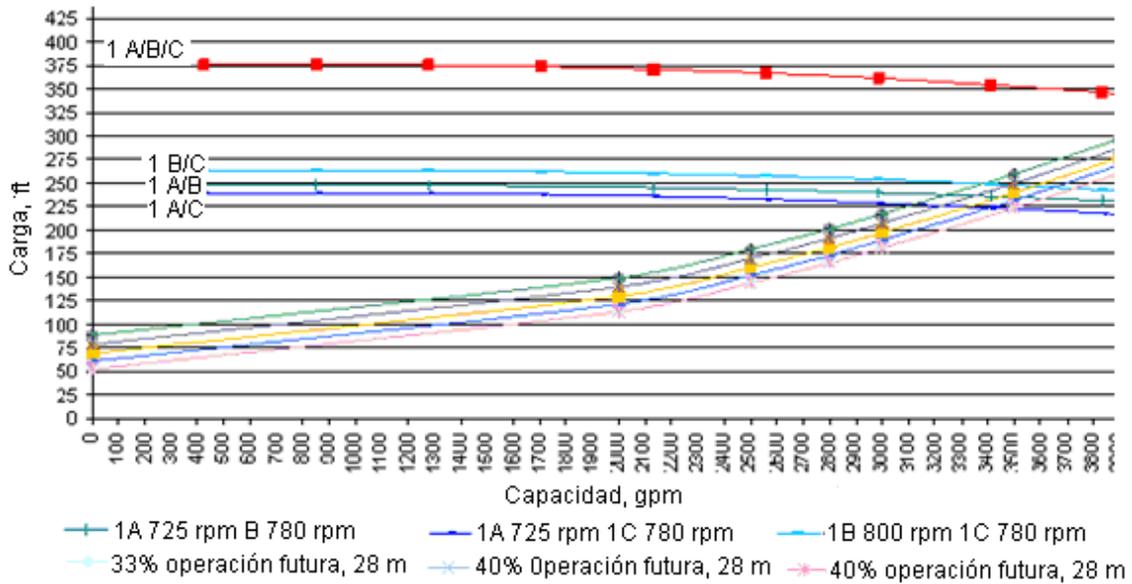
Para mitigar esta situación el personal de Operaciones se ve obligado a cortar los residuales de la planta de Lixiviación vertiéndose los mismos a la zanja.

### **3.4 Elevación, configuración y longitud de tuberías en las actuales condiciones de operación**

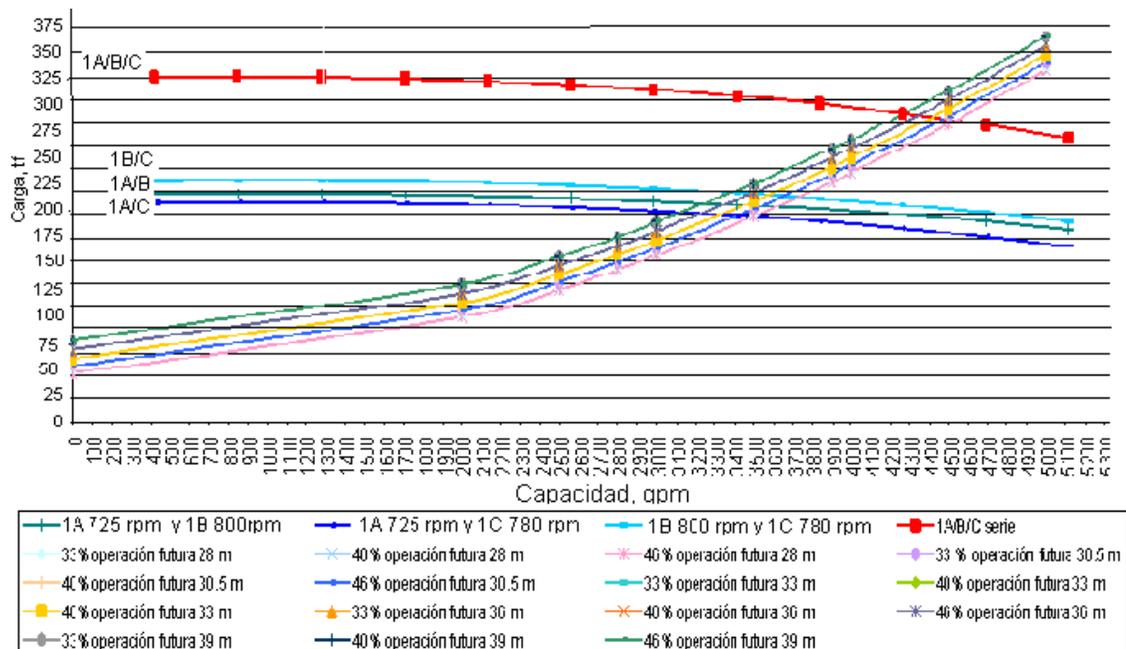
Actualmente la configuración de la tubería incluye una línea de HDPE fija con 1,750 metros de largo y 457 mm de diámetro que se extiende desde las bombas de colas hasta la estación de control del flujo en la base de la Presa de colas, una línea de colas de HDPE de 406 mm con una longitud máxima de 3,500 metros y spigots de 1 m de longitud de 102 mm de diámetro que

descargan directamente a la presa. Una elevación de descarga en la presa de 26 metros. Y con pronósticos de incrementar esta elevación.

Las curvas del sistema para las condiciones actuales y futuras aparecen en las figuras 3.2 y 3.3.



**Figura 3.2.** Curvas de las bombas y el sistema para las condiciones actuales de operación



**Figura 3.3.** Curvas de las bombas y el sistema para las condiciones futuras de operación

### 3.5 Análisis de los resultados del cálculo hidráulico

En la tabla 3.6 el resumen con los criterios de diseño para el cálculo del sistema hidráulico actual.

**Tabla 3.6.** Criterios de diseño para el cálculo hidráulico.

Fluido	Pulpa de colas		
Temperatura, ° C	38		
Gravedad específica pulpa 33 % sol	1,313		
Gravedad específica pulpa 40 % sol	1,406		
Gravedad específica pulpa 46 % sol	1,498		
Cantidad de spigot abiertos (operación normal), u	8		
Elevación de las bombas (356-PU-1A/B/C), m	12		
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
	Bombas- Pto control	Pto control- Presa	spigots
Diámetro nominal, inch	18	16	4
Diámetro interior, inch	14,532	12,915	4,224
Material	HDPE	HDPE	manguera
Longitud diseño, m	2,300	1,750	-
Longitud (operación normal), m	1,700	1,100	1
Longitud (operación máxima), m	1,700	3,500	1
Longitud (operación máxima futura), m	1,700	2,000	1
Longitud ( Pto de emergencia),m	1700	50	1
			Total
			4,050
			2,800
			5,200
			3,700
			1,750

Según la curva del sistema como se mostró en la figura 3.2, en condiciones normales de operación actual, descargando a una distancia de 2,800 m desde la descarga de las bombas hasta la Presa de colas, y 26 m de elevación en la presa se obtienen los resultados que aparecen en la tabla 3.7

**Tabla 3.7.** Operación normal.

B/C			A/B			A/C		
Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi
4,429	233	132	4,322	224	128	4,162	212	121

El flujo requerido para la operación, según diseño es de 3,522 gpm. Con todas las combinaciones se obtienen flujos superiores al deseado. La mejor

combinación del sistema lo brinda la operación en serie de las bombas 356-PU-1 B/C brindando un flujo de  $0,295 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,429 gpm), se refleja en la figura 3.2.

El flujo mínimo requerido para la operación es de  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201 gpm). Con todas las configuraciones se obtienen flujos superiores al deseado.

El flujo máximo requerido para la operación es de  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204 gpm). Solo con las combinaciones B/C y A/B se garantizan este flujo.

Según se muestra en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3:

- 1- Para las condiciones normales de operación actual, con todas las combinaciones en serie de las bombas (B/C, A/B, A/C), se garantizan las condiciones de diseño  $0,234 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,522) y mínimas de operación  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201 gpm). Obteniéndose un flujo máximo de  $0,295 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,429 gpm), con la combinación en serie de las bombas B/C. Elevación en la presa de 26 m.
- 2- Para las condiciones normales de operación actual, la combinación en serie de las bombas A/C no garantizan el flujo máximo requerido de  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204 gpm). Elevación en la presa de 26 m.

Condiciones de operación, descargando al punto de emergencia

Según la curva del sistema, en condiciones de operación descargando al punto de emergencia (considerado el punto más cercano), 1,750 m desde la descarga de las bombas hasta la Presa de colas, y 26 m de elevación en la presa se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 3.8.** Operación punto de emergencia.

B/C			A/B			A/C		
Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi
5,727	201	114	5,635	197	112	5,383	184	105

El flujo de diseño requerido para la operación, según diseño es de 3,522 gpm. Con todas las combinaciones se obtienen flujos superiores al deseado. La mejor combinación del sistema lo brinda la operación en serie de las bombas 356-PU-1 B/C brindando un flujo de  $0,381 \text{ m}^3/\text{s}$  (5,727 gpm). (Ver figura 3.2)

Como se puede observar en la tabla 3.3.3.2.2 con todas las combinaciones en serie de las bombas se garantizan los flujos requeridos para la operación, mínimo  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201 gpm) y máximo  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204 gpm).

1. Para las condiciones de operación actual, descargando en el punto de emergencia, con todas las combinaciones en serie de las bombas (B/C, A/B, A/C), se garantizan las condiciones de diseño  $0,234 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,522 gpm), mínimo  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201 gpm) y máximo  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204 gpm) de operación. Obteniéndose un flujo máximo de  $0,381 \text{ m}^3/\text{s}$  (5,727 gpm), con la combinación en serie de las bombas B/C. Elevación en la presa de 26 m.

### 3.5.1 Condiciones máximas de operación actual

Según la curva del sistema que se muestra en la figura 3.2, en condiciones máximas de operación actual, es decir descargando a una distancia de 5,200 m desde la descarga de las bombas hasta la Presa de colas, y 26 m de elevación en la presa se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9.** Operación máxima actual

B/C			A/B			A/C		
Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi
3,128	252	143	3,023	240	136	2,936	230	131

Como se puede observar en la tabla 3.9 con ninguna de las combinaciones en serie de las bombas se garantizan los flujos requeridos para la operación, diseño  $0,234 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,522 gpm), mínimo  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201 gpm) y máximo  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204 gpm).

Para las condiciones máximas de operación actual, con ninguna configuraciones en serie de las bombas (B/C, A/B, A/C), se garantizan las condiciones de diseño  $0,234 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,522 gpm), mínimo  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201gpm) y máximo  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204gpm) de operación. Obteniéndose un flujo máximo de  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,128 gpm) con la configuración en serie de las bombas B/C. Elevación en la presa de 30 m.

### 3.5.2. Condiciones máximas de operación en el futuro

Actualmente por condiciones de operación y los trabajos dentro de la presa de colas cuando se tienen que descargar al punto más alejado este se encuentra a una distancia de 3,500 m (desde el punto de control al punto más alejado de la presa).

Para el año próximo se espera que esta longitud disminuya de 3,500 m a 2,000m, para los cálculos hidráulicos se asume este nuevo valor.

Según la curva del sistema que aparece en la figura 3.3, en condiciones futuras de operación, y descargando a una distancia de 3,700 m desde la descarga de las bombas hasta la Presa de colas y variando la elevación en la presa según cronograma, se obtienen los resultados que aparecen en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10.** Operación futura.

Operación Futura	B/C			A/B			A/C		
	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi	Flujo, gpm	carga, ft	Presión descarga, psi
28 m (2009)	3,730	245	139	3,617	234	133	3,496	223	127
30,5 m (2010)	3,654	246	140	3,537	235	134	3,416	224	127
33 m (2011)	3,578	247	140	3,456	236	134	3,334	225	128
36 m (2012)	3,483	248	141	3,356	237	135	3,234	226	129
39 m (2013)	3,386	249	142	3,253	238	135	3,130	228	129

Como se puede observar en la tabla 3.10 para la operación futura de 39 m de elevación en la presa, con ninguna de las configuraciones en serie de las bombas se garantizan los flujos requeridos para la operación, diseño  $0,234 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,522 gpm), mínimo  $0,213 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,201 gpm) y máximo  $0,280 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,204 gpm). Sin embargo en el año 2010 aunque se obtienen mayores flujos que en el año 2009 no es suficiente pues solo se garantizarán los flujos de diseño y mínimo con las bombas B/C y A/B.

Si se considera que adicionalmente para producciones futuras los flujos se incrementarán, diseño  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,754 gpm), mínimo  $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$  (3,626 gpm) y máximo  $0,316 \text{ m}^3/\text{s}$  (4,751 gpm) se concluye que a partir del año 2010. El sistema actual no brindará los flujos requeridos para la operación.

### 3.5.3. Operación en serie de las tres bombas

El flujo de operaciones en sistema está compuesto por tres bombas en serie, las combinaciones de las mismas aparecen en la tabla 3.11.

**Tabla 3.11.** Operación en serie de las tres bombas.

	Configuración en serie A/B/C		
	Flujo,gpm	Carga,ft	Presión descarga psi
Operación normal	5,440	319	181
Operación Pto emergencia	7,076	275	157
Operación máxima actual	3,864	351	200
Operación futura 28 m ( 2009)	4,615	337	192
Operación futura 30.5 m (2010)	4,553	339	193
Operación futura 33 m (2011)	4,491	340	193
Operación futura 36 m (2012)	4,415	341	194
Operación futura 39 m (2013)	4,339	343	195

Como se puede observar en la tabla 3.11 con las tres bombas operando en serie se obtienen mayores flujos de operación, sin embargo la presión de descarga se incrementa por encima de la presión de diseño de la línea (150 psi). Por tanto esta variante no se recomienda.

### 3.6 Valoración del impacto económico

Se realizó un estimado del costo capital para la inversión del sistema de bombeo de colas de la empresa Comandante "Pedro Sotto Alba" con el objetivo de analizar la factibilidad económica financiera de las variante propuesta.

El estimado tuvo una precisión de  $\pm 15\%$ , incluyendo el costo total de equipos y materiales, de construcción y montaje, otros (seguros y fletes, cargos aduanales, ingeniería y proyecto, gastos de la construcción, ajuste y puesta en marcha y capital de trabajo para el inicio de las operaciones) y contingencias.

En la tabla 3.12 se muestra el estimado del costo capital para la variante propuesta:

Tabla 3.12. Costo capital

Denominación	USD
Equipos	\$51,090,
Instalación	84,120,
Tuberías	
Instrumentación	154,500,
Eléctrica	165,320,
Civil y trabajo en el sitio	7,620,
Estructura y Construcción	4,210,
Insulación y pintura	2,000,
<b>Total de costo directo</b>	<b>468,860,</b>
Ingeniería	39,760,
Otros gastos	89,030,
<b>Total de otros gastos</b>	<b>128,790,</b>
Contingencia	113,840,
<b>Total de gastos capitales</b>	<b>711,490,</b>

### Costo de Operación

El costo de operación mostrado en la tabla 3.12 fue calculado sobre la base del consumo del equipo durante los 360 días al año en operación a un costo de 130,38 USD/mW-h, los costos de operación se muestra en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Costo de operación

Materia prima	Unidad	Cantidad	Variante II
Energía eléctrica 130,38 USD/mW-h	kW/h	223,71	255,506
Costo de mantenimiento	USD/año		83,898
Costo total de Operación	USD		339,404

### Fundamentos para el análisis económico

Este proyecto se justifica sobre la base del cumplimiento de regulaciones medioambientales y mantenimiento de la estabilidad en el bombeo de colas hacia la presa de almacenaje de colas para evitar disminución en la producción de Sulfuros de Ni+ Co.

El análisis económico se realizó sobre las siguientes bases:

- ✓ Evitar una pérdida de producción de aproximadamente 1,748 toneladas de Sulfuros de Ni+Co cada año.

- ✓ Disminución de las emisiones de aguas residuales a la zanja de los pozos colectores en las diferentes plantas y del tanque de almacenaje de colas.
- ✓ Incremento en los gastos de operaciones de \$339,404 USD/año
- ✓ Vida útil: 5 años
- ✓ Precio del Níquel: 6,50 \$/lb.
- ✓ Precio del Cobalto: 17,00 \$/lb.

### **Resultados del Tratamiento Económico**

En las tablas 3.14 y se muestra el resumen de los indicadores de rentabilidad para la variante analizada sobre las bases explicada en el fundamento económico.

**Tabla 3.14 Indicadores de rentabilidad**

	Tasa Interna de Retorno	Tiempo de Recuperación de la Inversión	Valor Actualizado Neto	
	%	Años	15%	25%
Montaje de un sistema de bombeo	414,20%	0,45	22,117	16,859

Los sistemas de bombas provocan irregularidades de tipo medio ambiental. Las bombas a pesar de transmitir ruido, vibraciones cuando caen en el fenómeno de cavitación generan gases que de por si son tóxicos los cuales afectan directamente a el ser humano.

### **Algunas de las razones generales de este problema son:**

- Un sistema de distribución de agua u otro fluido en deterioro, siempre resulta en pérdidas en los sistemas estas serán mínimas en dependencia de la eficiencia de la instalación.
- Falta de control de erosión en las cuencas de los ríos y cuerpos de agua, en particular en aquellos casos en que el cuerpo de agua sirve como fuente de abasto a las comunidades. Esto se traduce en turbidez en nuestros cuerpos de agua afectando a su vez la operación de las plantas de filtración.

- Deforestación desmedida a causa de procesos de construcción sin control ambiental alguno
- Plantas de filtración y sistemas de bombeo deteriorados trabajando en exceso de su capacidad y por encima de su capacidad de diseño.

Los sistemas que transportan hidromezclas cuando surgen salideros en la línea provocan gran contaminación al medio circundante, las sustancias que se transportan en las industrias de por si son toxicas y corrosivas que afectan el medio ambiente directa o indirectamente.

### **3.6.1 Problemas ambientales generados en la Planta de Lixiviación y Lavado**

- La limpieza de los canales de contacto descarga a la canalización de la planta, la cual descarga al mar.
- Este residual arrastra en ocasiones metales disueltos, y de mineral reducido con níquel y cobalto potencialmente solubles, los cuales constituyen elementos contaminantes al medio.
- Los sistemas de tanque de contacto, turboareadores y sedimentadores constituyen un gran número de focos contaminantes de ácidos al área de trabajo.
- Los gases como resultado del sistema de aspiración (turbos, sedimentadores, tanques de contacto) se envían a las torres de absorción de la propia planta y los gases de este sistema salen a la atmósfera a través de una chimenea metálica, en ocasiones con alto contenido de ácidos.
- Los derrames de grasas, residuos de petróleo que acompañan al mineral reducido y las colas, se bombean a la cólera sin previo tratamiento, con la contaminación pertinente.

### **3.6.2 Efectos sobre la salud**

Existe una amplia información en la literatura sobre la toxicidad y efecto del ácido. Se ha determinado que es peligrosa la permanencia de una hora, en una atmósfera que contengan concentraciones de  $H_2SO_4$ , originándose reflejos respiratorios violentos e inmediatos, tos y detención de la respiración. La respuesta fisiológica del ser humano a concentraciones menores ha sido menos



estudiada, sobre todo en la gama de valores umbrales aceptables. La mayor parte del ácido retenido es absorbido por las vías respiratorias superiores.

Otras investigaciones de origen soviético han demostrado que la concentración de ácido en umbral que no afecta a los biopotenciales de la corteza cerebral es la de  $0,2 \text{ mg/m}^3$ , que puede considerarse como la concentración máxima admisible en el aire, ya que su inhalación crónica demostró ser toxicológicamente inactiva.

Puede deducirse de lo que precede que la exposición a concentraciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de 500 ppm es fisiológicamente indeseable, y que posiblemente el límite superior aceptable, haya de limitarse a 100 ppm, aunque este valor necesite una investigación más profunda.

### **3.7. Conclusiones del Capítulo III**

- ✓ Se determinaron las características tanto de la red como de la bomba analizadas en cuestión, así como el punto de operación de cada una de ellas.
- ✓ El diseño propuesto permite garantizar las condiciones del flujo de la cola para condiciones futuras, según el nivel de elevación de fluido que se quiera bombear.



### **Conclusiones Generales**

- ✓ El sistema de bombeo en la planta de lixiviación y lavado requiere de una nueva modificación para el trasiego hasta la presa de almacenaje de cola, actualmente este sistema constituye un problema para cumplir con el plan de producción previsto.
- ✓ El nuevo diseño propuesto incluye una bomba reforzadora que permite cumplir con la asignación de servicio para el bombeo de la cola hasta la presa de almacenaje hasta una altura máxima de 39 m de altura.
- ✓ El cálculo del diseño propuesto permite evitar una pérdida de producción de aproximadamente 1,748 toneladas de Sulfuros de Ni+Co cada año y disminuir el incremento en los gastos de operaciones que asciende a \$339,404 USD/año.
- ✓ Los desechos de la pulpa vertido al medio ambiente traen consigo serias afectaciones al ecosistema, daña la salud del hombre ya que provoca alteraciones ecológicas



### **Recomendaciones**

- ✓ No dejar que la velocidad de transportación de la cola caiga por debajo de la velocidad crítica, para evitar la sedimentación de las partículas en las líneas, lo que provoca la obstrucción de estas.
- ✓ Para una futura ampliación de la producción de la fábrica; se debe situar una estación de rebombeo, aumentando el flujo de cola transportada y de esta forma disminuir el exceso de presión en las líneas.
- ✓ Valorar esta alternativa de ubicación de un nuevo depósito de cola, teniendo en cuenta la situación actual del depósito que esta en explotación.



## **Bibliografías**

1. Bandala M. Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001. Bayvel, L. y Orzechowsky, Z., Liquid Atomization, Taylor & Francis Ed., 1993.
2. Cameron Hidraulic Data 1977.
3. Costa N. E., Fenómenos de transporte, Editorial Alambra S.A., Madrid, 1984.
4. Darby R., Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids, in Flow Dynamics and Transport Phenomena.
5. De la Paz N. Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida. Centro de Investigación y Desarrollo de Medicamentos, Rev Cubana Farm 2002; 36(1):21-7
6. Díaz A., Hechavarría T., Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos. Método generalizado. Régimen turbulento, Tecnología química vol. xix, no. 3, 1999.
7. Garcell, P.L. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Trabajo investigativo. Facultad de Ingeniería química. Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella. Santiago de Cuba. 1993.
8. Garcell, P.L. Estudio reológico de las suspensiones de limonita de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Facultad de tecnología química. Santiago de Cuba. 1990.
9. Garcell, L. Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales. Revista Tecnología Química, 1984.
10. Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.
11. Ibarz A., J. Vélez y G. Barbosa. Transporte de Alimentos Fluidos a Través de Tuberías. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las América, Puebla, México 2001.
12. Izquierdo, P.R. Investigación de los parámetros y elaboración de los regímenes racionales del transporte hidráulico de lateritas utilizadas en las condiciones de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1989.



13. Iakovlev, S.V y Dalkov Y.M., Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p
14. Leong, Y.K; D.V. Boger: Surface Chemistry Effects on Concentrated Suspension Rheology. Journal. Colloid Interface Sci, 1990, 136 (1): 249 – 258.
15. Macedo C., Martínez J. y Vélez. J., Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto Para el Manejo de Fluidos Newtonianos. Información Tecnológica: 12 (6), 169-176, 2001.
16. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada, Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 1980.
17. Nekrasov, B. Hidráulica. Editorial Mir. 1968. 435 p.
18. Pakrovskaya, V.I. Intensificación del transporte hidráulico Leningrado : Instituto de minas de Leningrado ,1985.
19. Perona P. An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
20. Rabinovich E.Z. Hidráulica. Ed. MIR, Moscú, URSS. pp. 115–191 1987.
21. Sablani S.S. y W.H. Shayya. Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids: 57, 327-335 2003.
22. Skelland, A.H.P. Non-Newtonian Flow and Heat. Transfer. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
23. Steffe J.M. y R.G. Morgan. Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods. Food Technology. Dic.: 78-85 1986.
24. Welty J.R., R.E. Wilson y Wicks C.E., Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer, Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA. pp. 202 - 219, 1976.
25. Vennard K.: "Elementos de mecánica de los fluidos". México. Edición revolucionaria, 1986.
26. Vélez J., Apuntes de Ingeniería de Alimentos I. Universidad de las Américas, Puebla México. Inéditos, 2003.







