



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Análisis de la instalación de hidrotransporte de Cieno Carbonatado en la planta de Coral de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Diplomante: Yusbel Miranda González.

Tutores: Dr.C. Raúl Izquierdo Pupo.

Ms.C Rodney Martínez Rojas.

Ing. Alejandro Palmero García.

“Año del 50 aniversario del triunfo de la Revolución.”

2009

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Moa, 03 de Julio de 2009

“Año del 50 aniversario del triunfo de la Revolución”

Yo: **Yusbel Miranda González**, autor del Trabajo de Diploma titulado: **Análisis de la instalación de hidrotransporte de Cieno Carbonatado en la planta de Coral de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.** y los tutores **Dr.C Raúl Izquierdo Pupo**, **M.Sc. Rodney Martínez Rojas** e **Ing. Alejandro Palmero García**, certificamos la propiedad intelectual y la calidad del mismo a favor del Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Para que así conste firmamos la presente

Autor: **Yusbel Miranda González** _____

Tutor (es): **Dr.C. Raúl Izquierdo Pupo** _____

Ms.C Rodney Martínez Rojas _____

Ing. Alejandro Palmero García _____



PENSAMIENTO

"La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica."

Aristóteles



AGRADECIMIENTOS

Para lograr triunfar en la vida se requiere de mucho esmero, dedicación y apoyo de personas sinceras y respetuosas, es por eso que agradezco en primer lugar a:

- *La revolución, por permitirme formarme como profesional en estos tiempos de lucha y sacrificio.*
- *Mi madre María Esther González Cruz que ha dado todo para obtener el triunfo y objetivo de mi vida.*
- *Mi hija Erika Solamch Miranda Silva por ser lo más grande de mi vida.*
- *Mi hermano Rosbel Miranda González por todo su apoyo y empeño en darlo todo por mis resultados.*
- *Mi esposa Yennis Matos Domínguez por su amor incondicional.*
- *A mi familia, compañeros de trabajo y amistades que me brindaron su amor y amistad.*
- *A mis Tutores Dr.C. Raúl Izquierdo Pupo, MSc. Rodney Martínez Rojas y Ing. Alejandro Palmero García.*
- *La revolución, por permitirme formarme como profesional en estos tiempos de lucha y sacrificio.*
- *A nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz y a la Revolución Cubana por habernos dado la posibilidad de formarnos como profesionales.*

A TODOS DE CORAZÓN

MUCHAS GRACIAS



DEDICATORIA

Una obra de amor por la que soñamos toda la vida, merece ser dedicada a personas que posean el verdadero sentido de la amistad, el amor, el cariño y el respeto.

- *A la memoria de mi padre Vicente Miranda Barrabia por haberme dado en vida todo el amor, respeto, y su espíritu de vida.*
- *A mi madre María Esther González Cruz por tenerme siempre presente, por su amor y su cariño.*
- *A mi hija (Erika Solamch) quien siempre supo entenderme cuando les faltaba en muchos días por estar cumpliendo con mis estudios.*
- *A mi esposa Yennis Matos Domínguez por su gran apoyo desde que la conocí para terminar mis estudios y por el amor que le profeso.*
- *A mis abuelos por su modestia y preocupación.*
- *A mi hermano gemelo Rosbel Miranda González por su incansable apoyo*
- *A mis tías Orlenis y Magalis por su ternura y disposición ante cualquier necesidad mía.*
- *A Roberto Miranda Barrabia porque a pesar de que este muy lejos lo llevo siempre presente.*
- *A mis tutores Raúl Izquierdo Pupo, Rodney Martínez Rojas y Alejandro Palmero García por su esmero y preocupación en la realización de este Trabajo.*
- *A todo el resto de mi familia, amistades y compañeros de trabajo que de una forma u otra los necesité.*

A todos, muchas gracias.

Resumen

En el presente trabajo se realiza una evaluación del sistema de transporte de Cieno Carbonatado desde la planta de coral hasta la planta de neutralización correspondiente a la Empresa “Pedro Sotro Alba”. Se estableció que el material presenta un comportamiento granulométrico de sistemas altamente polidisperso, con tamaño de partículas menores de 0.046mm y una reología característica de plásticos Bingham para el porcentaje de sólido promedio de transportación de 40 %.

Esta característica del material permitió ajustar y establecer la metodología de cálculo que permita evaluar correctamente las condiciones de trabajo del sistema establecido en un rango de caudal entre (48.1 – 80 m^3/h) y una altura de (71 – 141 m) respectivamente. Y el costo de transportación de un m^3 de Cieno Carbonatado varía en un intervalo de (0.21 – 0.37 USD/m^3), todo esto permite la toma de decisiones para un trabajo eficiente y con la disminución de los costos de portadores energéticos.



Abstract

In this work an evaluation of the system of transport of Carbonated Silt from the coral plant until the neutralization plant corresponding to the Company "Pedro Sotto Alba" is carried out. It settled down that the material presents a behavior granulométric of systems highly polidisperso, with size of particles smaller than 0.046mm and a characteristic rheologic of plastic Bingham for the percent of solid average of transportation of 40%.

This characteristic of the material allowed adjusting and the calculation methodology that allows evaluating the conditions of work of the system settled down in a flow range correctly to settle down among (48.1 - 80) and a height of (71 - 141 m) respectively. And the cost of transportation of an m³ of carbonated Silt varies in an interval of (0.21 - 0.37), all this allows the taking of decisions for an efficient work and with the decrease of the costs of energy payees.



Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I MARCO TEÓRICO	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Trabajos Precedentes sobre los parámetros de hidrot transporte en el flujo de hidromezclas por tuberías.	5
1.3 Análisis y Aplicación del Transporte Hidráulico.	10
1.4 Descripción del Proceso Tecnológico Planta de Coral.	12
1.5 Características constructivas de la instalación de bombeo. Tanque 3(264-TK-3).	14
1.6 Sistemas de flujo en serie y en paralelo.	15
1.7 Propiedades de los fluidos	16
1.8 Curvas de flujo	20
1.9 Ecuación de balance de energía mecánica.	21
1.9.1 Expresiones para el cálculo de la energía cinética, E_c	23
1.9.2 Expresiones para el cálculo de las pérdidas por fricción, ΣF , en tuberías circulares rectas.....	23
1.10 Conclusiones parciales del capítulo.	24
CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Introducción.....	25
2.2 Origen del material a transportar.	25
2.3 Propiedades físico mecánicas y de flujo del Cieno Carbonatado.	26
2.3.1 Análisis químico.....	26
2.3.2 Análisis granulométrico.....	26
2.3.3 Determinación de la densidad del sólido y la pulpa.	28
2.3.4 Determinación del % de sólido y el pH de la pulpa de Cieno Carbonatado	28
2.3.5 Comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado	28
2.4 Metodología de cálculo para la evaluación del sistema de transporte de Cieno Carbonatado por tuberías.....	30
2.4.1 Cálculo de las pérdidas totales en la instalación.....	31
2.4.2 Cálculo de la altura geométrica en la impulsión.....	33
2.4.3 Características de la red.....	33
2.4.4 Cálculo de la potencia y la eficiencia eléctrica de la bomba.....	33
2.5 Conclusiones parciales.	34
CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	35
3.1 Introducción.....	35
3.2 Determinación de la velocidad crítica.	35
3.3 Análisis de las condiciones de trabajo del sistema de bombeo.....	37
3.3.1 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A.....	38
3.3.2 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A + 6B.	40
3.3.3 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A + 6C.	42
3.3.4 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A + 6B + 6C.	44
3.4 Análisis de los resultados obtenidos.....	46
3.5 Valoración Económica.	46
3.6 Impacto medio ambiental.	49
3.7 Conclusiones parciales.	50
CONCLUSIONES.....	51
RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53
ANEXOS.....	58
Anexo 1 Característica del motor y las bombas del sistema.....	58
Anexo 2 Esquema del proceso tecnológico planta de pulpa.....	60
Anexo 3 Resultados de las mediciones del porcentaje de sólido.	61
Anexo 4 Resultados del análisis reológico.	61
Anexo 5 Cálculo del sistema para la bomba 6A.....	62
Anexo 6: Ilustración de bomba de pistón - diafragma - manguera.....	67



Índice de Tablas

<i>Tabla I: Característica de diseño pulpa de Cieno Carbonatado</i>	12
<i>Tabla II: Composición química del Cieno Carbonatado</i>	26
<i>Tabla III: Contenido de Carbonato y Cloruro</i>	26
<i>Tabla IV: Resultado del análisis granulométrico para Cieno Carbonatado</i>	27
<i>Tabla V: Valores de densidad de la pulpa y el sólido de Cieno Carbonatado</i>	28
<i>Tabla VI: Modelos reológicos obtenidos</i>	29
<i>Tabla VII: Coeficientes de resistencia para la línea de succión (Rodríguez 2008)</i>	31
<i>Tabla VIII: Coeficientes de resistencia para la línea de impulsión (Rodríguez 2008)</i>	32
<i>Tabla IX: Comportamiento granulométrico del diámetro medio por clase (Martínez 2009)</i>	35
<i>Tabla X: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A</i>	38
<i>Tabla XI: Curva de la bomba</i>	38
<i>Tabla XII: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno</i>	38
<i>Tabla XIII: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo</i>	39
<i>Tabla XIV: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A + 6B</i>	40
<i>Tabla XV: Curva para cuando el sistema esta trabajando con las bombas 6A y 6B</i>	40
<i>Tabla XVI: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno</i>	40
<i>Tabla XVII: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo</i>	41
<i>Tabla XVIII: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A + 6C</i>	42
<i>Tabla XIX: Curva para cuando el sistema esta trabajando con las bombas 6A y 6C</i>	42
<i>Tabla XX: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno</i>	42
<i>Tabla XXI: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo</i>	43
<i>Tabla XXII: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A + 6B + 6C</i>	44
<i>Tabla XXIII: Curva para cuando el sistema esta trabajando con las bombas 6A + 6B + 6C</i>	44
<i>Tabla XXIV: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno</i>	44
<i>Tabla XXV: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo</i>	45
<i>Tabla XXVI: Resultados de los valores económicos para las variantes</i>	49

Índice de Figuras

<i>Figura 1 1 : Sistemas de flujo en serie (a) y en paralelo (b)</i>	16
<i>Figura 1 2: Placas de los fluidos.</i>	18
<i>Figura 1 3: Curvas de flujo típica: 1- Newtonianos; 2- Seudoplásticos; 3- Dilatantes; 4- Plástico ideal (Bingham); 5- Plástico real.</i>	21
<i>Figura 2 1: Curva de característica sumarias de la pulpa analizada.</i>	27
<i>Figura 2 2: Comportamiento del % de sólido en la pulpa de Cieno Carbonatado.</i>	28
<i>Figura 2 3: Curvas de flujo para la muestra de Cieno Carbonatado a diferente % de sólido.</i>	29
<i>Figura 3 1: Curva Características de la bomba 6A.</i>	39
<i>Figura 3 2: Curva característica del sistema para las bombas 6A + 6B</i>	41
<i>Figura 3 3: Curva característica del sistema para las bombas 6A + 6C</i>	43
<i>Figura 3 4: Curva característica del sistema para las bombas 6A + 6B + 6C.</i>	45



INTRODUCCIÓN

El objetivo esencial de la industria cubana del níquel es el incremento de la producción de los productos de Ni Co, trabajando por su diversificación para lograr mejores precios y consolidar el prestigio de Cuba en ese importante renglón de la economía nacional. Actualmente Cuba produce sulfuro de Ni y Co con un 50% de Ni y 4,5% de Co, níquel sinterizado con un 86% de ni, óxido de níquel en polvo y níquel granular y nodular con un 76% de pureza. Se producirá un sulfuro de Ni y Co enriquecido con un porcentaje de cobalto lo que elevará el valor del producto y servirá para mejorar la calidad del níquel de las plantas.

Una de las formas para hacer cumplir este objetivo lo constituye el perfeccionamiento y aplicación de nuevas tecnologías para la transportación racional de las reservas minerales existentes y a su vez, el estudio y aplicación de un sistema de hidrotransporte de Cieno Carbonatado que garantice la producción continua con alta productividad. 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.

Existen actualmente tres fabricas que son las encargadas de toda la producción de Ni Co en Cuba, ellas son: La Empresa "Comandante Pedro Sotillo Alba", la cual produce sulfuros de Ni Co; y las Empresas "Comandante Ernesto Che Guevara" y "René Ramos Latour", que obtienen como producto final Sinter de Ni más Co.

La empresa mixta cubana canadiense, Comandante "Pedro Sotillo Alba". Moa Níquel SA. utiliza un proceso Hidrometalúrgicos, mediante la lixiviación ácida a presión, único en su tipo en la nación cubana y líder en cuanto a su rendimiento en el mundo. Por su eficiencia significa un valuarte de la economía Cubana.

Además del mineral laterítico, la utilización del Carbonatado de Calcio, (CaCO_3) contenidos en los Cienos Carbonatados, constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la planta de Neutralización para lograr el pH óptimo

del licor lixiviado obtenido a partir de la lixiviación del mineral níquelífero con vista a su posterior procesamiento en el área de Precipitación de Sulfuros.

La pulpa de Cieno Carbonatado es un material de color gris y es extraído de una de las minas más grandes del mundo, situada al oeste de cayo grande de Moa, la cual es sometida a un proceso de beneficio, en la planta de preparación de pulpa de coral en la zona portuaria, las partículas mayores que 20 mesh forman el rechazo, esto se logra por medio de un sistema de cribado, las de menor diámetro son enviadas a los sedimentadores con el objetivo de incrementar el porcentaje sólido hasta el valor de diseño de 40 - 45 % bajo condiciones idóneas, esta pulpa es enviada a la planta de neutralización por medio de un sistema de transporte hidráulico por tuberías para ser almacenada en los tanques de dicha planta.

El transporte hidráulico por tubería juega un rol fundamental en el transporte de pulpas, debido a su efectividad económica y medioambiental respecto a los demás tipos de transporte, el mismo ha tomado mayor auge con el estudio de estos sistemas.

En este tipo de 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 la concentración.

La situación actual del transporte del Cieno Carbonatado, desde la planta de coral hasta la planta de neutralización, se caracteriza por las siguientes **deficiencias**:

- Su elevado consumo energético depende en gran medida por el insuficiente conocimiento de los parámetros adecuados de explotación bajo las condiciones actuales.
- Limitaciones de los métodos existentes para la proyección y cálculo de los parámetros adecuados del hidrot transporte de Cieno Carbonatado.
- Insuficiente conocimiento de las características del material por parte de los operarios de la instalación que impiden una evaluación correcta de la instalación.
- No se garantiza el % de sólido de diseño de la pulpa que se envía al proceso de neutralización, provocando afectaciones en el bombeo, y en el proceso de neutralización.

- Inestabilidad en los niveles de la planta de Neutralización.

Todos estos factores provocan dificultades en el sistema de transporte por tuberías, dado que es una hidromezcla de comportamiento complejo (suspensiones en fluidos no newtonianos), insuficientemente estudiados en la actualidad.

Dada la situación planteada, se resume que, es necesario que se realice un estudio del comportamiento de la instalación de bombeo del Cieno Carbonatado, ya que el actual se caracteriza por una baja eficiencia energética y alto consumo energético por el insuficiente conocimiento de los parámetros adecuados del sistema y la imposibilidad de una correcta evaluación del mismo, dado principalmente por el uso inadecuado e irracional de sistema de bombeo por lo que se requiere un estudio que permita aportes y mejoras de los métodos de cálculo del sistema objeto de estudio.

A partir de las deficiencias expuestas se declara como **problema:**

Insuficiente conocimiento de los parámetros adecuados de explotación de la instalación actual, para mantener un óptimo nivel de Cieno Carbonatado en la planta de Neutralización que permita una disminución de los costos por transportación del material.

Sobre la base del problema se establece el objeto de estudio, la hipótesis y el objetivo del trabajo.

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

El sistema de bombeo de Cieno Carbonatado que suministra dicho material a la Empresa Pedro Sotto Alba.

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

Estableciendo los parámetros adecuados de explotación mediante el cálculo de los parámetros tecnológicos, bajo las condiciones actuales de trabajo y las características reológicas y de flujo del material a transportar, se logrará un trabajo más eficiente y control de los consumos de portadores energéticos e índices económicos durante el funcionamiento de la instalación.

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

Determinar los parámetros y régimen de trabajo de la instalación bajo las condiciones actuales, que permita un adecuado control de la alimentación de Cieno Carbonatado a la planta de neutralización.

Objetivos específicos:

- Relacionar las principales propiedades físico-mecánicas y reológicas de la hidromezcla de Cieno Carbonatado.
- Realizar un cálculo verificativo del sistema de bombeo objeto de estudio teniendo en cuenta las condiciones de trabajo de las distintas bombas.
- Establecer las peculiaridades de explotación acorde a las condiciones reales de trabajo de las bombas.
- Desarrollar la evaluación de la explotación de la instalación a partir de criterios técnicos – económicos que permitan recomendar mejoras en la eficiencia del transporte del Cieno Carbonatado.

Tareas a desarrollar:

- Establecer el estado del arte de las teorías existentes sobre la temática a tratar que permita un desarrollo del trabajo a realizar.
- Establecer la metodología de cálculo tomando como referencia mediciones reales de la instalación.
- Calcular los parámetros de trabajo de la instalación a partir de las características del material que permitan establecer las mejoras para lograr eficiencia en la explotación de la instalación.
- Valorar económicamente la aplicación de los resultados obtenidos.

CAPITULO I MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

La necesidad de determinar con más precisión los parámetros para la transportación por tuberías de mezclas concentradas es evidente durante la manipulación de los materiales en operaciones y procesos tecnológicos en diferentes ramas de la economía nacional.

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 medioambientales, no menos importante que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

Como **objetivo** del capítulo:

Realizar el análisis de los distintos aspectos relacionados con la temática a tratar, con la finalidad de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

1.2 Trabajos Precedentes sobre los parámetros de hidrot transporte en el flujo de hidromezclas por tuberías.

“La teoría de los fluidos deberá basarse necesariamente en la experimentación” (D’Alambert 1744), demostró que no existe resistencia al movimiento de un cuerpo cuando éste se mueve a través de un fluido ideal (no viscoso o invíscido), pero es obvio que esta conclusión no puede aplicarse a los cuerpos que se mueven a través de fluidos reales. Esta discrepancia entre la teoría y el experimento, que se denominó la paradoja de D’Alambert, ha sido ya resuelta. No obstante, demuestra con claridad las limitaciones de la teoría de esa época para la resolución de problema sobre fluidos.

En Cuba no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después de la revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico de nuestro país.

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. La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales en que se ensayo, se encuentra como deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

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

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.

En su trabajo, Barreto (1979), sobre la base de las investigaciones teórico experimental y el análisis de otros autores determinó los parámetros y estableció los regímenes racionales de hidrotransporte de minerales de hierro y concentrados. Elaboró las recomendaciones sobre la modelación de las suspensiones, selección de los regímenes efectivos y la metodología para la determinación de los parámetros de materiales sólidos de alta densidad en flujos de alta densidad (hasta 40 % de sólido por volumen).

Se encuentra como dificultad de los tres trabajos anteriormente descritos, que los autores, no determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus investigaciones; lo cual dificultaría el ajuste de estas condiciones a otras condiciones de los fluidos estudiados.

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,

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama et al. (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia (t_0) en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee et al. (1994), determinaron de forma experimental la pérdida de presión (ΔP) en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo pseudoplástico generalizado (Re) y los diferentes grados de abertura (δ).

Suárez (1998), hace referencia a la elaboración del modelo físico – matemático del movimiento de suspensiones de serpentinita blanda por tuberías, basado en los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas, la determinación de las regularidades de la variación de los coeficientes de resistencia hidráulica en dependencia de la concentración másica en el intervalo de 40 a 80 % en régimen laminar; la determinación de las pérdidas específicas de presión para el movimiento de dichas suspensiones en régimen turbulento; la determinación de las ecuaciones para la obtención de la velocidad crítica y la velocidad límite de caída de los granos de serpentinita dura.

Izquierdo (1989), en su trabajo 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.

Con el objetivo de determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido, Izquierdo et al. (2001), modeló el hidrot transporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y las propiedades reológicas de la hidromezcla. Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (l) y el número generalizado de Reynolds (Re).

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

Díaz y Hechavarría, (1999) Se 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.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de bombas centrifugas se han reportado numerosos trabajos que han colaborado en el desarrollo de esta esfera de la ciencia.

El método más simple de los parámetros de funcionamiento (Carga, Flujo, Potencia y Eficiencia) y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

Roque (1989), desarrollo investigaciones experimentales en relación con el bombeo de soluciones azucaradas de naturaleza no newtonianas, en equipos centrifugos y propuso

coeficientes de corrección que permiten pronosticar la curva característica de estos equipos de bombeo en función de las propiedades reológicas de los fluidos ensayados.

Trabajos realizados por Garcell (1991,1993, 1998, 2001) sobre pulpas de minerales lateríticos, limoníticos y serpentiniticos permite establece que la pulpa concentrada utilizada industrialmente por la empresa “Pedro Soto Alba”. Moa Nickel SA contiene un elevado por ciento de partículas muy finas, lo que aporta cierta plasticidad, comprobando que se puede clasificar como sólidos en suspensión con un comportamiento de fluidos no newtonianos, los cuales han sido pocos estudiados en la actualidad.

Se han realizado otras investigaciones en los cuales el Cieno Carbonatado constituye el objeto de estudio, se establecen las características físico - químicas de la hidromezcla de Cieno Carbonatado para la evaluación del sistema de bombeo en la planta de Neutralización. Hernández (2003); se aporta el gráfico que relaciona el factor de fricción en función del número de Reynolds y Hedstron. Jiménez (2005). Partiendo de la caracterización del Cieno Carbonatado donde se evalúa además la instalación existente para la transferencia de la pulpa desde el puerto hasta la planta de Neutralización.

Sin embargo en los trabajos anteriormente descritos, no se determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus investigaciones; lo cual dificulta el ajuste de estas condiciones a nuevas condiciones de transporte de los fluidos estudiados.

La variedad de las propiedades físico – mecánicas de estas mezclas confiere propiedades específicas a los flujos en su movimiento por tuberías u otros dispositivos de transporte similares. Caballero (2008) establece un comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado así como algunas propiedades que describen dicho material.

Martínez (2009) obtiene modelos físico – matemático del movimiento de las suspensiones de Cieno Carbonatado y su comportamiento en el movimiento de estas por tuberías, a partir del análisis experimental de las propiedades físico - químicas y mecánicas, composición granulométrica, mineralógica y comportamiento reológico y factores que influyen sobre este.

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 medioambientales, no menos importante que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

De lo explicado anteriormente se observa, que la solución teórica de los principales problemas del hidrot transporte es posible obtenerla solo de las ecuaciones de la hidrodinámica. De igual forma, en relación con la complejidad de obtención de hidromezclas, se puede utilizar la teoría semiempírica, la que se fundamenta sobre diferentes representaciones del movimiento del flujo de las hidromezclas y de la variación de la influencia de las partículas en el perfil de distribución de velocidades. Por ello, el segundo aspecto encuentra su aplicación práctica y ha obtenido desarrollo en trabajos realizados por la mayoría de los investigadores.

1.3 Análisis y Aplicación del Transporte Hidráulico.

Alcanzar la fiabilidad y rendimiento óptimo en el transporte de materiales, hidromezclas, gases, líquidos puros, etc. Se hallará siempre en la máxima prioridad del hombre en la búsqueda de una forma de traslado (transporte) más rápido y efectivo, con la garantía de bajos costos, alta productividad, máxima seguridad operacional y baja peligro ambiental.

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.

Este tipo de transporte es especialmente efectivo y tiene gran aplicación en la industria, en el laboreo a cielo abierto, para la mecanización de los procesos básicos de extracción y elaboración de materias primas, traslado y colación de los escombros de rocas estériles y las colas del material beneficiado, en la industria metalúrgica 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 eléctricas y puertos marítimos.

La efectividad en la utilización y las perspectivas en el desarrollo de este género de transporte se confirma también con el aumento de los trabajos investigativos sobre la formación de complejos de transporte hidráulico magistrado de materiales áridos de gran nomenclatura, entre los que se encuentran países como Rusia y Estados Unidos.

La efectividad del hidrotransporte principal crece debido a la imposibilidad de cambio por otro tipo de transporte (por ejemplo, hidrotransporte de materiales áridos de fracciones finas homogeneizada) la posibilidad de simplificar la longitud de la vía del transporte por tubería en comparación con el ferroviario y el automotor debido al relieve del lugar ante gastos no elevado en la preparación homogeneización de los materiales áridos con una productividad anual de la instalación hidráulica. la ausencia poca desarrollada del circuito de ferrocarril y carretera, la necesidad tecnológica de mezclar los materiales en agua (por ejemplo la sal), y ante la ausencia de reserva de trabajo.

El hidrotransporte de materiales sólidos en comparación con el transporte ferroviario, los transportadores y la vía automotriz poseen las siguientes ventajas:

- Permite operación continua y comando remoto
- Menores costos de operación
- Costos de inversión competitivos
- Requiere mínima mano de obra, alta productividad
- Mínimo impacto ambiental
- Posibilita desarrollar trazados sinuosos
- Se comporta bien en varios desniveles
- Aceptable a cualquier topografía
- Mínimo efecto en condiciones climáticas adversas
- Para gran variedad de producto de la industria minera
- En algunos casos permite alejar la planta del yacimiento

El sistema debe ser capaz de:

Transportar máximo de tonelaje desde del depósito y no ser el cuello de botella

Ser flexible para operar en todo el rango de operación del depósito

Su diseño debe permitir operar bajo todas las condiciones

Debe de contar un sistema de instrumentación y comunicación confiables que permitan detectar de forma rápida embaucamientos y filtraciones

Los sistemas de tuberías deben tener sistema stand – by para determinar la manutención y prevenir los problemas de erosión y corrosión.

Las desventajas del hidrotransporte principal pertenecen a la necesidad de tener suficiente reserva de agua y la dependencia de la capacidad de tráfico de la tubería,

gastos de energía, desgaste de la tubería debido a la granulometría y propiedades del material a transportar, sin embargo, estas desventajas son compensadas por las ventajas del hidrotransporte, y no constituyen de importancia para las operaciones mineras. La principal desventaja es que el rendimiento de la tubería es constante.

Una peculiaridad del hidrotransporte principal es la necesidad de triturar, deshidratar y secar el material a transportar si estos procesos no son parte componentes de la tecnología de la producción, esto conlleva al encarecimiento del proceso sin embargo en este caso disminuye el gasto de energía en la transportación de materiales de transportación de dispersión fina por tubería. Otra peculiaridad del transporte principal de materiales áridos es la considerable disminución de los gastos capitales específicos y el gasto en bombeo.

De esta manera, en el futuro inmediato en la evolución de industria nos será de vital importancia la renovación y aplicación del transporte hidráulico debido a las numerosas ventajas reporta esta forma de transporte con respecto a los demás.

1.4 Descripción del Proceso Tecnológico Planta de Coral.

El objetivo de esta planta es formar una pulpa de Cieno Carbonatado con un sólido entre 40 y 45 % según se muestra en la tabla I, donde el contenido de arena debe ser menor del 17 % y cloruro menor de 700 ppm. Además sirve de almacenaje para mantener un suministro estable a la planta de Neutralización. Ver anexo 2

Parámetros	Diseño
Densidad (kg/m ³)	1300 – 1400
% de sólido	35 – 48
% de arena	≤17
Cloruro (ppm)	500 - 600
Carbonato de calcio %	≥87
Composición granulométrica(-325 mesh) %	≤76
pH	8 - 9

Tabla I: Característica de diseño pulpa de Cieno Carbonatado

Fuente: Datos técnicos planta de Cieno

El Cieno Carbonatado se extrae de las formaciones coralinas del fondo del mar en la Bahía de Moa. El proceso de minado se realiza con grúas que utilizan palas de cubos bivalvas como medio de extracción, las que depositan el Cieno Carbonatado sobre las patanas que lo trasladan hasta la planta de preparación de pulpa de Cieno Carbonatado. Una vez en esta, se descarga el mineral en un depósito, que tiene capacidad para 800 TM ó se alimenta directamente al embudo de la lavadora, esta descarga ó alimentación se realiza con una grúa situada en tierra.

El Cieno Carbonatado que se alimenta al embudo entra en contacto con el agua inyectada por los spray, pasa a través de una criba fija que deja pasar las partículas menores de 152.4 mm y cae por gravedad a la lavadora de paletas; en este equipo es donde se define la eficiencia de la planta. Después de formada la pulpa en la lavadora se descarga a una zaranda vibratoria de doble paño donde el tamizado es ayudado por agua a presión (entre 30 y 40 lb/pulg), la malla superior es de 0.25 pulg. y la inferior es de 0.833 mm, después del tamizado se obtiene por una parte el rechazo (representa aproximadamente el 10 % del Cieno Carbonatado procesado) y por otro lado la pulpa de Cieno Carbonatado con un sólido entre 10 y 20 % (siempre debe buscarse los valores más bajos dentro de este rango), ésta pulpa es bombeada hacia el espesador #1; toda el agua utilizada en los equipos señalados anteriormente es proveniente del reboso del espesador #1.

Para lograr bajar la concentración de cloruro de sodio y subir el porcentaje de sólido a los valores establecidos existen dos sedimentadores con el sistema de lavado a contra corriente.

Antes de ser alimentada la pulpa al sedimentador #1, entra en contacto con el agua de reboso del sedimentador #2 en la caja de alimentación de este espesador, de aquí se alimenta al sedimentador por un tubo que descarga en la parte superior y central del mismo, en éste tubo es donde ocurre el proceso de lavado.

Del fondo del sedimentador #1 se extrae la pulpa espesada y se bombea a la caja de alimentación del sedimentador #2 donde se le adiciona agua cruda para efectuar la última etapa de lavado de la misma forma que se hizo en el sedimentador anterior, después de

espesada la pulpa se bombea a un tanque (TK-3) que alimenta el sistema de bombeo encargado de transportar por tuberías dicho material, hasta la planta de neutralización de la Empresa Pedro Sotto Alba ubicada a 4km de distancia.

1.5 Características constructivas de la instalación de bombeo. Tanque 3(264-TK-3).

En este se recibe la pulpa con un 40% de sólido proveniente del sedimentador 2 y sirve como un tanque colector para las bombas de transferencia. En el tanque esta montado un agitador para evitar que la pulpa se sedimente, posee una capacidad máxima de 11500 Galones dejando 2 pies libres por debajo del borde superior.

Líneas fundamentales (diámetros).

- Línea de succión de las bombas 6A de transferencia (0.150 m)
- Línea de succión de las bombas 6B y 6C de transferencia (0.100 m)
- Línea de transferencia de coral (0.150 m)

Todas estas líneas son de acero al carbono.

Bombas para la transferencia de coral hacia la planta de Neutralización (264 - PU 6A 6B y 6C).

Estas bombas son de desplazamiento positivo (reciprocantes) de diafragma, de doble succión y doble descarga conectadas en paralelos y son diferenciadas por su capacidad, , cuyo flujo se subdivide en corrientes de diversos flujos máscicos, están destinadas para bombear Cieno Carbonatado hacia la planta de neutralización en pequeños caudales y altas presiones (Q desde 16 hasta 43 m^3/h y $\Delta P \sim 50 - 350$ atmósferas y mayores) en algunos casos estas son utilizadas con variador de velocidad en el motor como la 264 – PU 6A.

En este tipo de bomba la acción de bombeo es producida por el movimiento de un émbolo, pistón o diafragma dentro de un cilindro (ver anexo 6). El líquido comenzado a bombear entra al cilindro a través de una o más válvulas de succión y es entonces forzado a salir a través de una o más válvulas de descarga por contacto directo con el émbolo, pistón o diafragma. En especial las bombas reciprocantes de diafragma se usan para líquidos agresivos o viscosos, ya que en este tipo de máquinas el material a

transportar no entra en contacto con el émbolo. El diafragma suele ser de goma o de acero especial.

Las características técnicas de estas bombas se relacionan en el anexo 1

Características más generales de las bombas de desplazamiento positivo.

A velocidades determinadas la descarga es constante e independiente de la carga de bombeo.

La carga de bombeo puede aumentarse (dentro de los límites que los materiales de construcción de la bomba lo permitan) con solo aumentar la potencia del motor que la mueve manteniendo el flujo constante.

Para regular el flujo se debe hacer mediante una recirculación, pues no admiten estrangulación del fluido.

1.6 Sistemas de flujo en serie y en paralelo.

Se dice que un sistema de tuberías de diferentes diámetros o características está en serie, es decir cuando la línea es única y el flujo másico se mantiene constante en toda su extensión. Por el contrario se dice que una línea de tubería está en paralelos cuando de alguna manera el flujo se subdivide en corrientes de diversos flujos másicos, tal como se muestra, a manera de ejemplo, en la figura 1.1

Para las tuberías en serie se cumple que:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_T \quad (1.1)$$

$$\Sigma F_T = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 \dots + \Sigma F_n$$

Los sistemas de tubería en serie generan ecuaciones que pueden ser resueltas algebraicamente

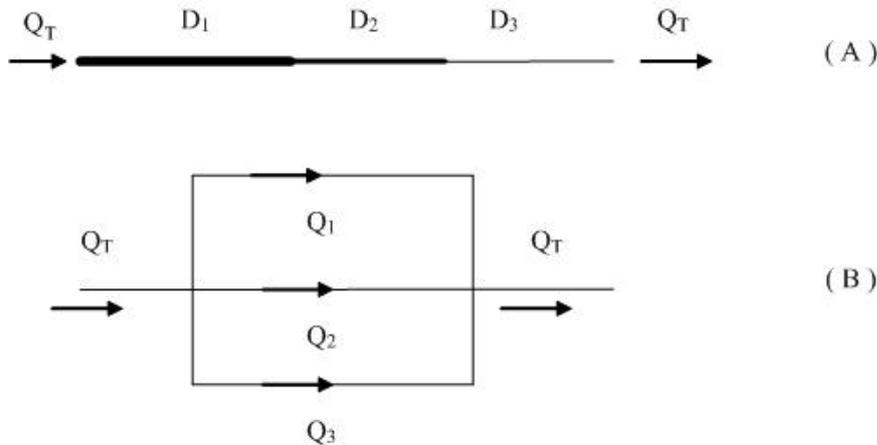


Figura 1 1: Sistemas de flujo en serie (a) y en paralelo (b)

Para las tuberías en paralelo:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = Q_r$$

$$\Sigma F_T = \Sigma F_1 = \Sigma F_2 = \Sigma F_3 \tag{1.2}$$

Los sistemas de tuberías en paralelo generan sistemas de ecuaciones que deben ser resueltas de forma simultánea por cálculos matriciales o de determinantes.

1.7 Propiedades de los fluidos

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 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.

Los fluidos son sustancias que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma.

Densidad de un fluido:

La densidad de una sustancia se define como su masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

La unidad de medida en el S.I. de unidades es kg/m^3 , también se utiliza frecuentemente g/cm^3 .

Peso específico:

Peso específico se define como su peso por unidad de volumen, se encuentra relacionado con la densidad por:

$$Y = \rho \cdot g \quad (1.4)$$

En los líquidos puede considerarse constante para las variaciones ordinarias de presión.

Se pueden calcular a través de la ecuación de estado de los gases $PV = nRT$ como

$$P = \rho \cdot R \cdot T$$

$$Y = \frac{P \cdot g}{R \cdot T} \quad (1.5)$$

Volumen específico:

Es el volumen por unidad de masa y es por lo tanto el recíproco de la densidad.

$$V = \frac{1}{\rho} \quad (1.6)$$

Gravedad específica:

Se suele designar como SG y se define como la relación de la densidad del fluido entre la densidad del agua a una temperatura dada. Normalmente esa temperatura es 4°C , y a esta temperatura la densidad del agua es 1000 kg/m^3 .

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (1.7)$$

Viscosidad de un fluido:

Es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

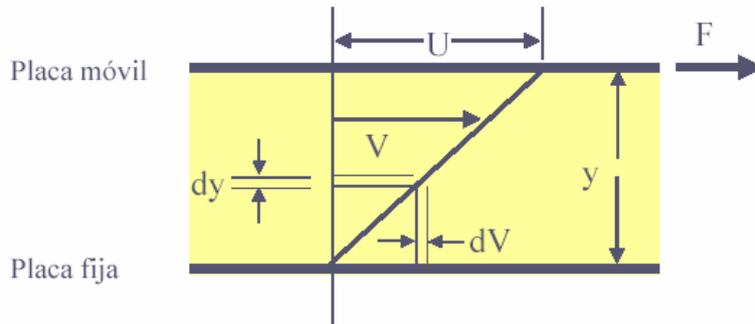


Figura 1 2: Placas de los fluidos.

Otro coeficiente de viscosidad, llamado viscosidad cinemática, viene definido por

$$v = \frac{\text{viscosidad..Abosoluta}}{\text{densidad}} \qquad v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\gamma/g} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \qquad (1.8)$$

Gasto: es la cantidad de líquido que pasa a través de la sección viva del flujo en la unidad de tiempo. Dicha cantidad de puede medir en unidad de volumen, de peso o de masa, por lo que existen: el gasto volumétrico Q, el gasto en peso G, y el gasto en masa M.

$$Q = A \cdot V \rightarrow \text{Gasto volumétrico} \left[\frac{m^3}{s}; \frac{1}{s} \right] \qquad (1.9)$$

$$G = Q \cdot \gamma \rightarrow \text{Gasto en peso} \left[\frac{N}{s}; \frac{K_{gf}}{s} \right] \qquad (1.10)$$

$$M = \rho \cdot Q \rightarrow \text{Gasto en masa} \left[\frac{K_g}{s} \right] \qquad (1.11)$$

La forma más usada de determinar el gasto es:

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}; \frac{l}{\text{min}}; \frac{m^3}{h} \qquad (1.12)$$

El criterio de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot D}{v} \qquad (1.13)$$

V - es la velocidad del fluido

D - diámetro de la tubería

Transición de régimen laminar a turbulento en fluidos no newtonianos.

En los fluidos no newtonianos, el número de Re crítico donde culmina el régimen laminar es $Re_{cr} = 2100$. El régimen de transición se extiende hasta 4000.

La región de transición también se extiende a valores mayores de Re en la medida que el número de He se incrementa.

Modelos reológicos de flujo.

El término reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. La reología es la ciencia del flujo y la deformación; estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, substancias asfálticas y materiales cristalinos.

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

Newtonianos: Cuando cumplen con la ley de Newton, que plantea que la viscosidad es una constante de proporcionalidad que relaciona los esfuerzos cortantes friccionales con el gradiente de velocidad.

No newtonianos: Cuando no cumplen con esta ley y la viscosidad es una función del gradiente de velocidad.

Para expresar la relación existente en estado estacionario entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad se han propuesto varias relaciones empíricas (Modelos reológicos). Existen en la literatura una gran variedad de modelos propuestos. Los más difundidos son los siguientes:

Modelo de Oswalds de Waele

$$\tau_{yx} = K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.14)$$

Esta expresión se conoce también como Ley de potencia; se utiliza para describir el comportamiento de fluidos seudo plásticos y dilatantes. En esta ecuación, n es el índice de flujo, el cual es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material..

K es el índice de consistencia y constituye una medida del grado viscoso del material.

Modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta_p \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) \quad (1.15)$$

Donde: η_p es la viscosidad plástica y τ_0 es el esfuerzo cortante inicial.

Este modelo se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos ideales.

Modelo de Bulkley - Herschell

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.16)$$

Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales.

τ_0 , K y n tienen los mismos significados descritos en los dos modelos anteriores.

Viscoelásticos ó de Maxwell

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

1.8 Curvas de flujo

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*.

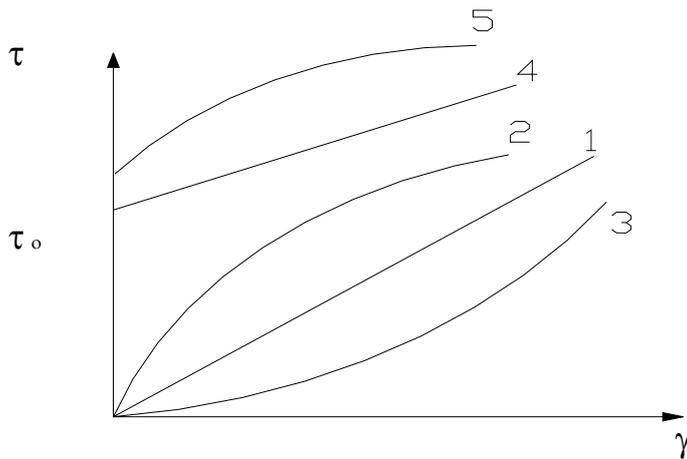


Figura 1 3: Curvas de flujo típica: 1- Newtonianos; 2- Seudoplásticos; 3- Dilatantes; 4- Plástico ideal (Bingham); 5- Plástico real.

Figura 1.3 Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, para determinar si un equipo ya construido (con el fin de transportar o elaborar un material determinado) puede ser usado con otro material diferente: para clasificar los materiales reológicamente y encontrar el modelo adecuado, para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin producciones **batch** y que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro.

1.9 Ecuación de balance de energía mecánica.

Es conocido que el diseño de sistemas de tuberías requiere conocer la relación entre los gradientes de presión, $\Delta P / L$, requeridos para lograr flujos volumétricos, Q , en un intervalo de diferentes diámetros, D , del tubo, a distintas temperaturas de operación y diferentes propiedades físicas de los fluidos.

Las relaciones existentes entre las variables antes mencionadas dependen, fundamentalmente, de los requerimientos energéticos para el transporte del fluido a través del conducto y de sus características químicas – físicas.

Una de las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos se expresa mediante la ecuación de balance de energía mecánica aplicada al sistema de flujo en cuestión. En la mayoría de los textos de Ingeniería Química, el balance de energía mecánica para condiciones estacionarias de flujo se conoce como ecuación de Bernoulli, y se ilustra sus aplicaciones para el caso particular del flujo newtoniano.

En el caso específico del flujo de suspensiones minerales no newtonianas también se aplica el balance de energía mecánica en un sistema de flujo, al cual entra el fluido por un plano (1) y sale por un plano (2):

$$\frac{Z_1 g}{g_c} + \frac{P_1}{\rho} + Ec_1 = \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{P_2}{\rho} + Ec_2 + W_s + \sum F \quad (1.17)$$

Donde:

Zg - es la energía potencial para una altura vertical referida a un plano horizontal de referencia tomado arbitrariamente, m^2 / s .

$\frac{P}{\rho}$ - es la energía de presión hidrostática, m^2 / s^2 .

Ec- es la energía cinética media por unidad de masa, m^2 / s^2 .

W_s - es el trabajo por unidad de masa (como trabajo hecho por una bomba sobre el fluido), m^2 / s^2 .

$\sum F$ - es la energía mecánica convertida a energía térmica como resultado de las fricciones del fluido, m^2 / s^2 .

$$\sum F = \frac{\Delta P_f}{\rho} + \left(\begin{array}{l} \text{pérdidas por fricción por unidad} \\ \text{de masa debido a los efectos de} \\ \text{entrada, de accesorios, de equipos, etc.} \end{array} \right) \quad (1.18)$$

El término $(\Delta P_f / \rho)$ se refiere a los tramos de tuberías rectas, y por lo general, es el componente dominante en la mayoría de los sistemas de tuberías, excepto en aquellos casos en los que esos tramos sean cortos y el número de accesorios y válvulas sea grande.

Para el flujo no newtoniano, los términos E_c y ΣF dependen de la naturaleza reológica del fluido, y, por tanto, de los parámetros característicos del modelo reológico que describe la curva de flujo.

El término W_s , para el caso de las bombas, se expresa como:

$$W_s = \frac{\Delta P_b}{\rho} = \frac{P_d - P_s}{\rho} \quad (1.19)$$

Siendo ΔP_b el incremento de presión que da la bomba en la descarga, P_d , en relación con la presión de succión, P_s .

1.9.1 Expresiones para el cálculo de la energía cinética, E_c

El término de energía cinética promedio por unidad de masa puede ser estimado mediante la expresión siguiente:

$$E_c = \frac{\langle v \rangle^2}{2\alpha g_c} \quad (1.20)$$

El coeficiente α es un factor de corrección para los perfiles de velocidad:

1.9.2 Expresiones para el cálculo de las pérdidas por fricción, ΣF , en tuberías circulares rectas.

El término de pérdidas por fricción, ΣF , puede estimarse mediante la definición siguiente

$$\Sigma F = \frac{1}{2} \langle v \rangle^2 e_v \quad (1.21)$$

en la que e_v (adimensional) es el factor de pérdidas por fricción, el cual es una función del número de Reynolds y de las relaciones geométricas del sistema de flujo.

Para el flujo por tuberías rectas circulares,

$$e_v = 4f \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1.22)$$

Donde f es el coeficiente de fricción o de Fanning.

Combinando las expresiones (1.21) y (1.22), se obtiene:

$$\sum F = 2f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{g_c} \quad (1.23)$$

En algunos textos, la ecuación (1.22) suele escribirse expresándola en términos de un factor de fricción de Fanning $f' = 4f$:

$$e_v = f' \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1.24)$$

En ese caso, la ecuación (1.23) toma la forma siguiente:

$$\sum F = f' \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{2g_c} \quad (1.25)$$

1.10 Conclusiones parciales del capítulo.

Se han realizado trabajos sobre transporte de materiales que se comportan como fluidos no newtonianos, estableciendo las metodologías a partir las características del material a transportar.

Se exponen los fundamentos teóricos, que permiten desarrollar los objetivos planteados en la investigación.

CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción.

Los conocimientos sobre la composición y propiedades de la pulpa de Cieno Carbonatado utilizado industrialmente en las empresas “Pedro Soto Alba”. Moa Nickel SA, contribuyen a la selección de métodos adecuados de evaluación y toma de decisiones en la solución de problemas asociados al transporte del fluido en estudio.

En tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer los métodos y procedimientos para el cálculo evaluación y proyección del sistema objeto de estudio

2.2 Origen del material a transportar.

El yacimiento de Cieno Carbonatado de la bahía de Moa es un depósito compuesto por sedimentos clásticos friables cuaternarios, de carácter biodetrítico y terrígeno que se caracterizan en su conjunto por un elevado contenido de carbonato de calcio. El cual supera el 80% en condiciones naturales, el mismo alcanza entre el 88 y 90 %, luego de ser beneficiado el mineral en la planta de procesamiento.

Se establece dos tipos litológicos útiles de este material. Nedved (1966). El primero, de color gris claro, con alta plasticidad y poco arenoso, con fuerte olor a H_2S , en el prevalecen las partículas menores de 0.08 mm que pasan la malla 200 mesh (entre 50 y 90 %) y las partículas gruesas sobre mallas 200 mesh no sobrepasan el 10 %. El segundo tipo de color gris oscuro, menos plástico, con incremento de las partículas gruesas (abundantes conchas) carece de de olor a H_2S y aumenta el contenido de partículas gruesas sobre mallas 20 mesh hasta 30%.

El Cieno Carbonatado, como ya se ha dicho es minado en la bahía y transportado hasta la planta de coral establecida en áreas aledañas al puerto de Moa. En dicha planta es sometido a un proceso de beneficio para la utilización del material menor de 20 mesh, y el resto constituye el rechazo que es almacenado en depósitos cercano a dicha planta.

2.3 Propiedades físico mecánicas y de flujo del Cieno Carbonatado.

Por lo reflejado anteriormente, conocemos que el yacimiento de Cieno Carbonatado de la bahía de Moa es un depósito compuesto por un elevado contenido de carbonato de calcio, el cual supera el 80% en condiciones naturales, por lo tanto, es necesario determinar las propiedades físico - mecánicas y de flujo de este material.

2.3.1 Análisis químico.

Los resultados del análisis químico de la muestra de Cieno Carbonatado según Caballero (2008) y Martínez (2009) fueron realizados utilizando el método (ICP) plasma inductivamente acoplado en un Espectrómetro de Emisión Óptica. Con el objetivo de determinar el comportamiento de los diferentes elementos químicos que componen el material estudiado como lo muestra la tabla 2.1

Tabla 2.1 Composición química del Cieno Carbonatado

Muestra	% Ni	% Fe	% Mg	% Mn	% Ca	% Al	% Na
M - 3	0,113	1,16	1,72	0,027	30,74	0,479	0,111

Tabla II: Composición química del Cieno Carbonatado

Se comprueba que existe un predominio del elemento Calcio con un 30 %, denotando la importancia de este material para la neutralización del licor ácido.

Por la importancia que reviste el seguimiento del contenido de cloruros para la transportación de la pulpa por tuberías, debe garantizarse que su valor sea inferior al rango de 500-600 ppm con el objetivo de evitar procesos corrosivos. Como se observa en la tabla 3.2 la muestra que se transporta tiene un valor inferior a dicho rango.

Muestra	Cloruro (Cl)	Carbonato (CaCO ₃)
M-3	397.07 ppm	87.93 %

Tabla III: Contenido de Carbonato y Cloruro.

2.3.2 Análisis granulométrico.

Con el fin de determinar la composición granulométrica del material se realiza el análisis de cribado (vía húmeda) de las muestras estudiadas. Caballero (2008) y Martínez (2009) Se obtienen los siguientes resultados

No de mallas (mesh)	Diámetro (mm)	Peso (g)	% en peso	Retenido	Cernido
20	- 0,890 + 0,850	3,5	1,36	1,36	100,00
50	- 0,850 + 0,300	10,72	4,19	5,55	98,63
100	- 0,300 + 0,150	15,55	6,07	11,63	94,44
200	- 0,150 + 0,075	24,08	9,41	21,04	88,36
325	- 0,075 + 0,046	27,23	10,64	31,68	78,95
-325	- 0,046 + 0	174,78	68,31	100,00	68,31
	Total	255,86	100,00		0.00

Tabla IV: Resultado del análisis granulométrico para Cieno Carbonatado.

La clasificación por clases de tamaño realizada a la muestra M-3 de la pulpa de Cieno Carbonatado demuestra que estas pulpas forman sistemas polidispersos, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,046mm, constituyendo el 68.31 % en peso de las fases sólidas en la muestra. Como puede apreciarse en la figura 2.2 existe un predominio de las fracciones finas de forma general

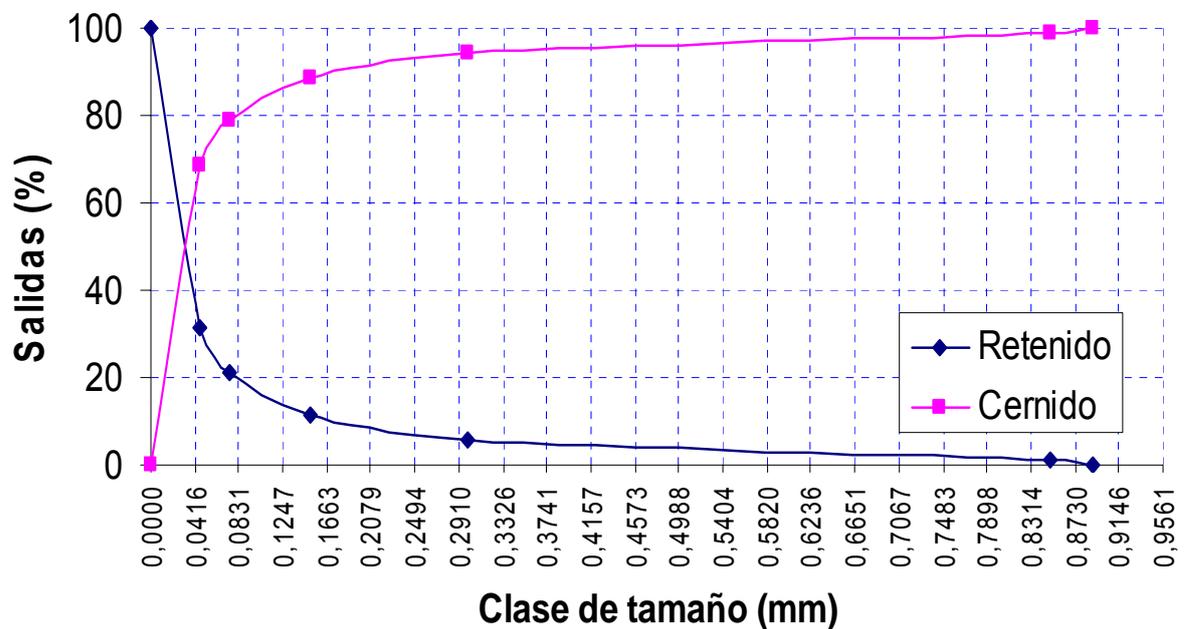


Figura 2 1: Curva de característica sumarias de la pulpa analizada.

Es importante destacar que aproximadamente el 50% de la fracción menor de 0.046 mm está constituida por la fracción menor de 0.038 mm. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los **sistemas coloidales**. Del análisis se derivó que las muestras de sólido constituyen **sistemas altamente polidispersos**.

2.3.3 Determinación de la densidad del sólido y la pulpa.

A continuación en la tabla 3.4 se relacionan los valores de la densidad del sólido y de la pulpa de Cieno Carbonatado obtenidos al aplicar el método del picnómetro y el método volumétrico respectivamente. Caballero (2008)

Densidad, (Kg/m ³)	
Sólido	Pulpa
3015	1310

Tabla V: Valores de densidad de la pulpa y el sólido de Cieno Carbonatado.

2.3.4 Determinación del % de sólido y el pH de la pulpa de Cieno Carbonatado

Para la confección de la data ver anexo 3 que permite determinar el comportamiento del porcentaje de sólido se realizaron mediciones durante veinte días, como se observa en el gráfico de la figura 2.2 el valor del % de sólido se manifiesta de forma irregular, el cual varía en un rango entre 38 y 51%. Caballero (2008).

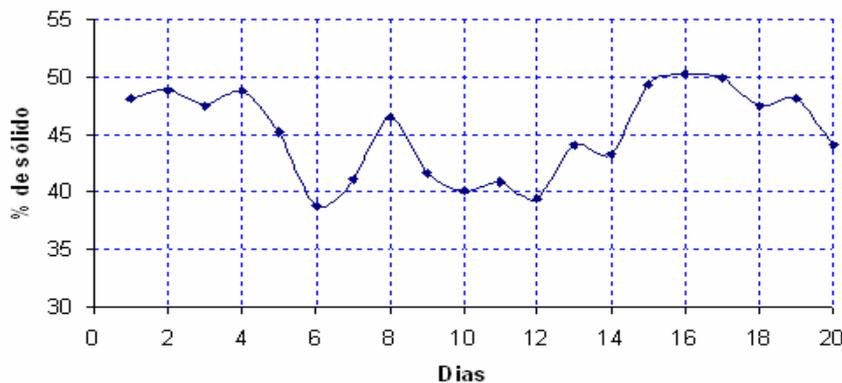


Figura 2 2: Comportamiento del % de sólido en la pulpa de Cieno Carbonatado.

2.3.5 Comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado

Los resultados del análisis reológico (ver anexo 4) de la pulpa de Cieno Carbonatado se obtuvieron, según Martínez(2009), mediante un reómetro rotacional, se tuvo en cuenta el porcentaje de sólido de la pulpa, se comprueba su efecto sobre el comportamiento de las curvas de flujo, las cuales fueron obtenidas graficando los valores de esfuerzo cortante (τ)

en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), estas curvas permitirán clasificar reológicamente las pulpas y obtener el modelo reológico que la caracteriza.

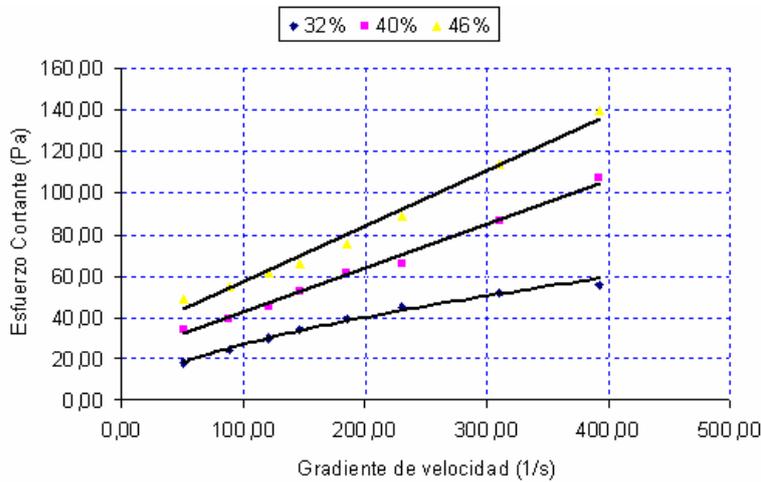


Figura 2 3: Curvas de flujo para la muestra de Cieno Carbonatado a diferente % de sólido.

La ecuación obtenida para el mejor ajuste de una pulpa con 32% de sólido sugiere un comportamiento seudoplástico, cuya curva está descrita por modelo reológico de Ostwald de Waele. En el caso de las pulpas con 40 y 46% de sólido manifiestan un comportamiento de plástico ideal o **Plásticos de Bingham** dado por su ecuación de ajuste, el cual está representado por el modelo reológico de plástico de Bingham.

Porcentaje de sólido, (%)	Modelo matemático obtenido por regresión	Modelo reológico	Índice de regresión (R ²)
32	$y = 1.9723 \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)^{0.5675}$	$\tau_{xy} = k \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$	0.9927
40	$y = 20.826 + 0.02136 \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)$	$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy}\right)$	0.9931
46	$y = 29.576 + 0.0273 \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)$	$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy}\right)$	0.9885

Tabla VI: Modelos reológicos obtenidos

2.4 Metodología de cálculo para la evaluación del sistema de transporte de Cieno Carbonatado por tuberías.

➤ Área de la sección circular de la tubería.

$$A = \frac{3.14 \cdot D^2}{4} \quad (2.1)$$

Donde:

D Diámetro de la tubería

➤ Velocidad media de transportación del cieno.

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

Donde:

Q Caudal transportado por las bombas

La velocidad media de transportación debe ser mayor que la velocidad adecuada de funcionamiento $V_m \geq V$ para evitar la sedimentación de las partículas dispersantes.

➤ Número de Reynolds.

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:

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_c}{\pi \cdot D \cdot \mu_p} \quad (2.3)$$

Para $Re > 4000$ **Régimen turbulento**

➤ Número de Hedston.

Valor que interviene en el cálculo de los factores de fricción, así como las tensiones cortantes y está dada por la ecuación (Skelland 1970)

$$He = \frac{D^2 \cdot \rho_c \cdot \tau_0}{\mu_p^2} \quad (2.4)$$

Para el cálculo del factor de fricción.

$$f = \left[(f_L^\beta) + (f_T^\beta) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{Coeficiente de fricción} \quad (2.5)$$

$$f_L = \frac{64}{Re} \quad (2.6)$$

$$f_T = \frac{10^C}{Re^{0.193}} \quad (2.7)$$

$$C = -1.378(1 + 0.146 \cdot e^{-2.9 \cdot 10^{-5} \cdot He}) \quad (2.8)$$

$$\beta = 1.7 + \frac{4000}{Re} \quad (2.6)$$

El *factor de fricción* se determina por la siguiente ecuación

$$\lambda_c = 4 \cdot f \quad (2.9)$$

2.4.1 Cálculo de las pérdidas totales en la instalación.

Se calcula las pérdidas locales en la succión para ello se tiene en cuenta los accesorios que hay en ese tramo, factor de fricción, coeficiente de rugosidad de la tuberías y la velocidad del flujo

➤ **Pérdidas en la succión.**

Pérdidas por rozamiento en la tubería

$$h_{rozsucc} = \xi_{rozsucc} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.10)$$

$$\xi_{rozsucc} = \lambda_c \cdot \frac{Ls}{D} \quad (2.11)$$

Pérdidas locales en la succión.

Accesorios en la línea de Succión	Cantidad	Coeficiente de resistencia
Válvula de cuña	1	0.0379
Coeficiente de entrada		0.78

Tabla VII: Coeficientes de resistencia para la línea de succión (Rodríguez 2008).

$$h_{loccsucc} = \sum \xi_{succ} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.12)$$

$$\Sigma \xi_{succ} = \xi_{vál} + \xi_{ent}$$

Pérdidas totales en la tubería de succión.

$$\Sigma h_{succ} = h_{locsucc} + h_{rozsucc} \quad (2.13)$$

Pérdidas en la impulsión.

Pérdidas por rozamiento en la tubería de impulsión.

$$\xi_{rozimp} = \lambda_c \cdot \frac{L_t}{D}$$

(2.14)

$$h_{rozimp} = \xi_{rozimp} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.15)$$

Pérdidas locales en la tubería de impulsión.

Accesorios en la línea de Succión	Cantidad	Coefficiente de resistencia ξ
Válvula de cuña	4	0.038
Codos de 90°	15	0.75
Codos de 45°	17	0.40
Coefficiente de salida		1

Tabla VIII: Coeficientes de resistencia para la línea de impulsión (Rodríguez 2008).

$$\Sigma \xi_{imp} = \xi_{vál} + \xi_{codos} + \xi_{sal} \quad (2.16)$$

$$h_{locimp} = \Sigma \xi_{imp} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.17)$$

Pérdida total en la tubería de impulsión.

$$\Sigma h_{imp} = h_{locimp} + h_{rozimp} \quad (2.18)$$

Pérdida total en el sistema.

$$\Sigma h_t = \Sigma h_{succ} + \Sigma h_{imp} \quad (2.19)$$

Pérdidas totales por accesorios en el sistema.

$$\Sigma \xi_t = \Sigma \xi_{imp} + \Sigma \xi_{succ} \quad (2.20)$$

2.4.2 Cálculo de la altura geométrica en la impulsión.

Para determinar la altura geométrica que desempeña las bombas, nos remitimos a los planos geodésicos del terreno donde aparece como nivel 0-0 el mar

$$H_{imp} = 38.7096 \cdot m \quad H_{succ} = 4.2005 \cdot m$$

$$\Delta Z_x = H_{imp} - H_{succ} \quad (2.21)$$

2.4.3 Características de la red.

La característica de la red exterior de la instalación de hidrotransporte se recomienda calcular por la ecuación: Según (Alexandro. 1986).

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

Donde:

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

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

2.4.4 Cálculo de la potencia y la eficiencia eléctrica de la bomba.

Cálculo de la potencia útil de la bomba.

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

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

Donde:

Q_t y ΔP_t Son el caudal y la caída de presión de la bomba en el punto de trabajo.

ρ_c - densidad de la pulpa de Cieno Carbonatado para un 40 % de sólido

Potencia del motor

$$N_m = \frac{N_b}{\eta_b} \quad (2.26)$$

Donde: $\eta_b = 0.90$ - rendimiento de la bomba

Potencia total del sistema

$$N_t = N_b + N_m \quad (2.27)$$

Rendimiento mecánico

$$\eta_m = \frac{N_t - N_m}{N_t} \quad (2.28)$$

Potencia eléctrica

$$N_{elec} = \frac{N_m}{\eta_m} \quad (2.29)$$

Donde: $\eta_m = 0.91$ - rendimiento del motor

Consumo de energía del motor kW al año

$$E = N_m \cdot T \quad (2.30)$$

Donde $T = 8640h$ Tiempo de trabajo del motor en un año

2.5 Conclusiones parciales.

1. El análisis de las características físico mecánicas del Cieno Carbonatado, demostró que este material se comporta como un material altamente polidisperso compuesto por partículas menores de 0.046mm
2. La reología nos muestra que las pulpas de Cieno tienen un comportamiento de Plástico Bingham.
3. A partir de las características del material, se establece la metodología de cálculo para la evaluación del sistema actual objeto de estudio.

CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción.

Para proyectar y explotar con efectividad el equipamiento de las instalaciones de hidrotransporte es necesario seleccionar correctamente el equipamiento de bombeo para las condiciones correctas de explotación de la instalación, determinar y analizar el régimen de trabajo de las bombas para así lograr una correcta operación del sistema.

A partir de este planteamiento el objetivo de este capítulo es:

Analizar los resultados obtenidos del cálculo de la instalación objeto de estudio para una evaluación de la misma.

3.2 Determinación de la velocidad crítica.

Podemos considerar la velocidad crítica 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 velocidad crítica se obtiene a partir de la de la característica granulométrica del material analizado.

No de mallas (Mesh)	Diámetro (mm)		Peso (g)	dm x Clase
20	-0,890	+0,850	3,5	0,87
50	-0,850	+0,300	10,72	0,575
100	-0,300	+0,150	15,55	0,225
200	-0,150	+0,075	24,08	0,1125
325	-0,075	+0,046	27,23	0,0605
-325	-0,046	+0,000	174,78	0,023
Total			255,86	

Tabla IX: Comportamiento granulométrico del diámetro medio por clase (Martínez 2009)

El diámetro medio de la partícula se determina por la siguiente fórmula.

$$d_{CP} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i \cdot dm}{G} \quad (3.1)$$

Donde:

$$d_m = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \text{Diámetro medio de cada clase.} \quad (3.2)$$

$$G = \sum g_i = 255.86g \quad \text{Peso total de la muestra.} \quad (3.3)$$

$$d_{CP} = 0.08344 \cdot mm = 0.00008344 \cdot m$$

Como el $d_{CP} < 0.015 \cdot m$

$k_d = 0.32$ Coeficiente empírico corregido, que depende del diámetro medio de las partículas (d_{CP})

El grosor hidráulico se calcula de la siguiente forma.

Para $d_{CP} \geq 0.015 \cdot m$

$$W = 3.12 \cdot \sqrt{d_{CP}} \cdot \sqrt[4]{(\rho_s - 1)^3} \quad (3.4)$$

Para $d_{CP} < 0.015 \cdot m$

$$W = 79.7 \cdot \sqrt{d_{CP}} \cdot \sqrt[4]{(\rho_s - 1)^3} \quad (3.5)$$

Donde $\rho_s = 3,323T / m^3$ y es la densidad del sólido.

Como el diámetro medio de la partícula es menor que 0.015mm entonces el grosor hidráulico se calcula por fórmula (3.5).

$$W = 0,0023m / s$$

Determinación de la velocidad crítica por las (indicaciones metodológicas para el cálculo técnico económico de los sistemas de transporte por tuberías).

$$V_{crit} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w} \cdot \sqrt{\rho_s - 1} \cdot \sqrt[6]{S} \quad (3.6)$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Aceleración de la gravedad.

$D = 0,150m$ Diámetro de la tubería.

w – Grosor hidráulico.

ρ_s – densidad del sólido. $3.619T/m^3$

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

$$V_{crit} = 0.564 \frac{m}{s}$$

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

$$V = (1.1 - 1.2) \cdot V_{crit} \quad (3.7)$$

$$V = 0.64 \frac{m}{s}$$

3.3 Análisis de las condiciones de trabajo del sistema de bombeo.

Para el análisis del sistema de bombeo de Cieno Carbonatado se debe saber que la estación cuenta con un tanque y tres bombas FELUWA de desplazamiento positivo con diafragma y bomba de pistón. Conectadas en paralelo a una tubería de diámetro $0.150m$. Estas se identifican por 6A, 6B y 6C con una capacidad de $47m^3/h$, $16m^3/h$, y $21m^3/h$ respectivamente.

Se busca el punto de trabajo más eficiente del sistema para el cual se logra mantener los niveles de Cieno Carbonatado entregado a los tanques de alimentación de la planta de neutralización. Trabajando en varias condiciones

1. Trabajando solo la bomba 6A.
2. Trabajando dos bombas (6A y 6B).
3. Trabajando dos bomba (6A y 6C).

4. Trabajando las 3 bomba (6A, 6B y 6C).

3.3.1 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A.

Según la metodología establecida en el capítulo II se realiza el cálculo de las diferentes condiciones de trabajo del sistema objeto de estudio. Ver el anexo 5

Parámetros	Resultados
Caudal de las bombas 6A	$Q = 47 \text{ m}^3/h = 0.01305 \text{ m}^3/s$
Velocidad Media	$V = 0.736 \text{ m/s}$
Número de Reynolds	$Re = 6771$
Factor de fricción	$\lambda = 0.043$
Pérdida total en la succión	$\Sigma h_{suc} = 0.04 \cdot m$
Pérdida total en la impulsión	$\Sigma h_{imp} = 34.208 \cdot m$
Pérdida total en el sistema	$\Sigma h_t = 34.208 \cdot m$
Pérdida total por accesorios en el sistema	$\Sigma \xi_t = 20.02$
Altura geométrica en la línea de impulsión	$\Delta Z_x = 34.509 \cdot m$
Altura de carga de la red	$H_{red} = 69.8 \text{ m}$

Tabla X: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A.

Característica de la red para el sistema trabajando con la bomba 264-PU-6A

$$Q = 0 \dots 60 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$Q(\text{m}^3/h)$	49,9	48,4	48,1	47,7	47,4	47	46,8	46,5	46,7	46,6	46,8	46,9	46,9	42,9	3	0,7
$P(\text{bar})$	0,2	4,5	9,9	16,3	22,2	32,2	31,9	37,5	38,4	38,6	39	38,8	39,7	46,7	57,1	56,2
$H(m)$	2,03	45,9	100	166	226	328	325	382	391	393	397	396	404	476	582	573

Tabla XI: Curva de la bomba.

$Q(\text{m}^3/h)$	0	10	20	30	40	50	60
$H_{red}(m)$	34.509	36.109	40.909	48.909	60.909	74.509	92.109

Tabla XII: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno.

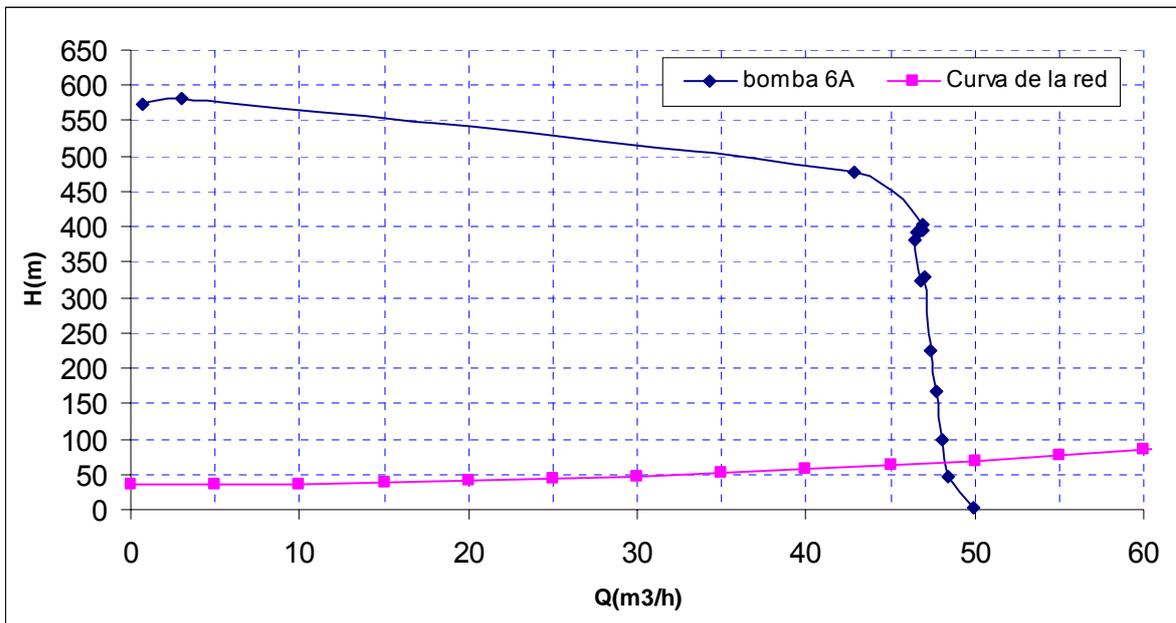


Figura 3 1: Curva Características de la bomba 6A.

Según la figura 3.1 se obtiene el punto de trabajo de la bomba la cual se encuentra trabajando para un caudal de $Q_t = 48.1\text{m}^3/\text{h}$ y $H_t = 71\text{m}$

Parámetros	Resultados
Caída de presión	$\Delta P_t = 9.124 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Potencia bomba	$N_b = 12.19\text{kW}$
Potencia del motor	$N_m = 13.65\text{kW}$
Potencia total del sistema	$N_t = 25.74\text{kW}$
Rendimiento mecánico	$\eta_m = 0.474$
Potencia eléctrica	$N_{elec} = 14.89\text{kW}$
Consumo de energía	$E = 117 \cdot 10^3 \text{ kW/año}$

Tabla XIII: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo.

3.3.2 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A + 6B.

Parámetros	Resultados
Caudal de las bombas 6A y 6B	$Q = 59 \text{ m}^3/\text{h}$
Velocidad Media	$V = 0.928 \text{ m/s}$
Número de Reynolds	$Re = 8536$
Factor de fricción	$\lambda = 0.0299$
Pérdida total en la succión	$\sum h_{suc} = 0,021 \cdot m$
Pérdida total en la impulsión	$\sum h_{imp} = 39.434 \cdot m$
Pérdida total en el sistema	$\sum h_t = 39.455 \cdot m$
Pérdida total por accesorios en el sistema	$\sum \xi_t = 54.488$
Altura geométrica en la línea de impulsión	$\Delta Z_x = 34.509 \cdot m$
Altura de carga de la red	$H_{red} = 72.8 \cdot m$

Tabla XIV: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A + 6B

Característica de la red para el sistema trabajando con la bomba 264-PU-6A y 6B

$$Q = 0 \dots 70 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$Q(\text{m}^3/\text{h})$	62,3	60,5	60,1	59,6	59,2	58,7	58,5	58,1	58,4	58,2	58,5	58,6	58,6	53,6	3,7	0,9
$P(\text{bar})$	0,2	4,5	9,9	16,3	22,2	32,2	31,9	37,5	38,4	38,6	39	38,8	39,7	46,7	57,1	56,2
$H(\text{m})$	2,03	45,9	100	166	226	328	325	382	391	393	397	396	404	476	582	573

Tabla XV: Curva para cuando el sistema esta trabajando con las bombas 6A y 6B

$Q(\text{m}^3/\text{h})$	0	10	20	30	40	50	60	70
$H_{red}(\text{m})$	34.509	36.109	40.909	48.909	60.909	74.509	92.109	112.91

Tabla XVI: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno

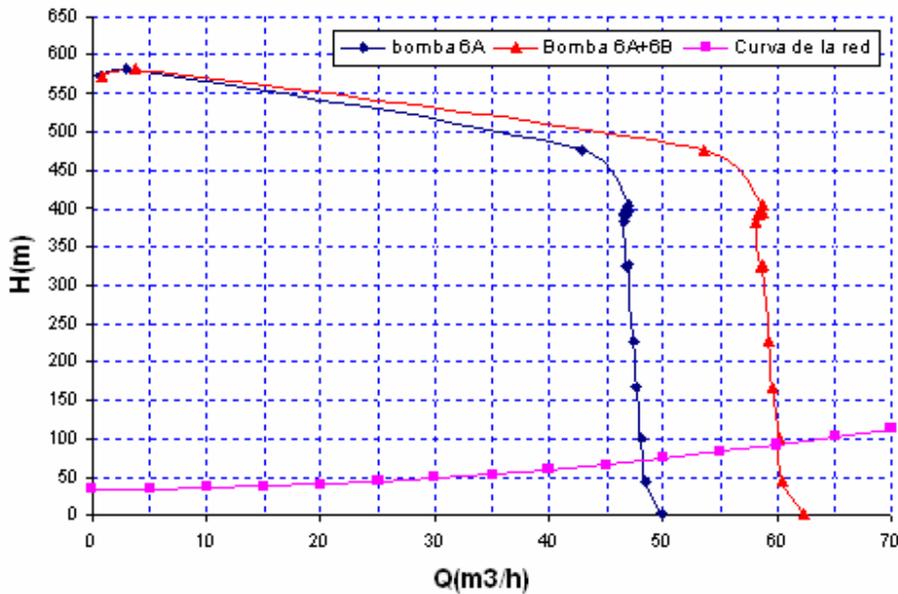


Figura 3 2: Curva característica del sistema para las bombas 6A + 6B

Según la figura 3.2 se obtiene el punto de trabajo de la bomba la cual se encuentra trabajando para un caudal de $Q_t = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ y $H_t = 93 \text{ m}$

Parámetros	Resultados
Caída de presión	$\Delta P_t = 1.195 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Potencia bomba	$N_b = 19.92 \text{ kW}$
Potencia del motor	$N_m = 22.13 \text{ kW}$
Potencia total del sistema	$N_t = 42.05 \text{ kW}$
Rendimiento mecánico	$\eta_m = 0.474$
Potencia eléctrica	$N_{elec} = 24.32 \text{ kW}$
Consumo de energía	$E = 191 \cdot 10^3 \text{ kW/año}$

Tabla XVII: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo.

3.3.3 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A + 6C.

Parámetros	Resultados
Caudal de las bombas 6A y 6B	$Q = 64 m^3/h$
Velocidad Media	$V = 1.007 m/s$
Número de Reynolds	$Re = 9259$
Factor de fricción	$\lambda = 0.028$
Pérdida total en la succión	$\sum h_{suc} = 0,023 \cdot m$
Pérdida total en la impulsión	$\sum h_{imp} = 42.995 \cdot m$
Pérdida total en el sistema	$\sum h_t = 43.018 \cdot m$
Pérdida total por accesorios en el sistema	$\sum \xi_t = 54.488$
Altura geométrica en la línea de impulsión	$\Delta Z_x = 34.509 \cdot m$
Altura de carga de la red	$H_{red} = 79.565 \cdot m$

Tabla XVIII: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A + 6C.

Característica de la red para el sistema trabajando con la bomba 264-PU-6A + 6C

$$Q = 0 \dots 70 \frac{m^3}{h}$$

$Q(m^3/h)$	62,3	60,5	60,1	59,6	59,2	58,7	58,5	58,1	58,4	58,2	58,5	58,6	58,6	53,6	3,7	0,9
$P(bar)$	0,2	4,5	9,9	16,3	22,2	32,2	31,9	37,5	38,4	38,6	39	38,8	39,7	46,7	57,1	56,2
$H(m)$	2,03	45,9	100	166	226	328	325	382	391	393	397	396	404	476	582	573

Tabla XIX: Curva para cuando el sistema esta trabajando con las bombas 6A y 6C.

$Q(m^3/h)$	0	10	20	30	40	50	60	70
$H_{red}(m)$	34.509	36.109	40.909	48.909	60.909	74.509	92.109	112.91

Tabla XX: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno.

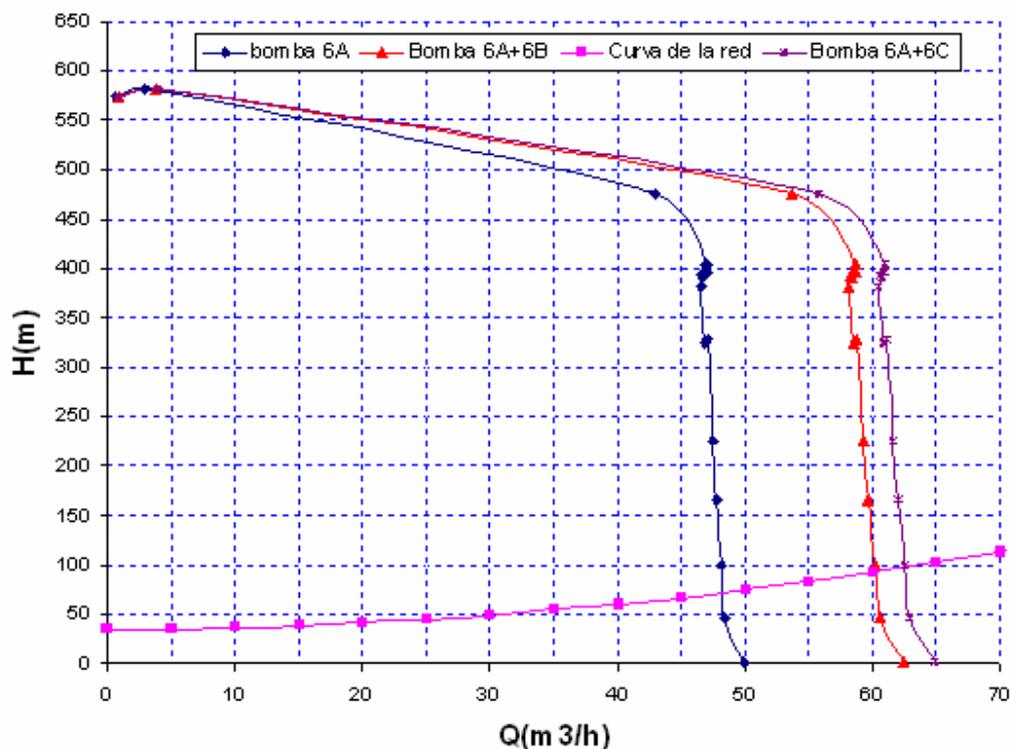


Figura 3 3: Curva característica del sistema para las bombas 6A + 6C

Según la figura 3.1 se obtiene el punto de trabajo de la bomba la cual se encuentra trabajando para un caudal de $Q_i = 62.5 m^3/h$ y $H_i = 97m$

Parámetros	Resultados
Caída de presión	$\Delta P_i = 1.247 \cdot 10^6 Pa$
Potencia bomba	$N_b = 21.64kW$
Potencia del motor	$N_m = 24.05kW$
Potencia total del sistema	$N_t = 45.69kW$
Rendimiento mecánico	$\eta_m = 0.474$
Potencia eléctrica	$N_{elec} = 26.42kW$
Consumo de energía	$E = 207.8 \cdot 10^3 kW/año$

Tabla XXI: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo.

3.3.4 Cálculo de la instalación para el funcionamiento de las bombas PU 6A + 6B + 6C.

Parámetros	Resultados
Caudal de las bombas 6A y 6B	$Q = 80 m^3/h$
Velocidad Media	$V = 1.258 m/s$
Número de Reynolds	$Re = 11570$
Factor de fricción	$\lambda = 0.022$
Pérdida total en la succión	$\sum h_{suc} = 0,029 \cdot m$
Pérdida total en la impulsión	$\sum h_{imp} = 54.622 \cdot m$
Pérdida total en el sistema	$\sum h_t = 54.652 \cdot m$
Pérdida total por accesorios en el sistema	$\sum \xi_t = 54.488$
Altura geométrica en la línea de impulsión	$\Delta Z_x = 34.509 \cdot m$
Altura de carga de la red	$H_{red} = 89.223 \cdot m$

Tabla XXII: Resultado de las condiciones de trabajo para las bombas 6A + 6B + 6C

Característica de la red para el sistema trabajando con la bomba 264-PU-6A + 6B y 6C.

$$Q = 0 \dots 70 \frac{m^3}{h}$$

$Q(m^3/h)$	84,8	82,3	81,7	81,0	80,5	79,9	79,6	79,0	79,3	79,2	79,5	79,7	79,7	72,9	5,1	1,19
$P(bar)$	0,2	4,5	9,9	16,3	22,2	32,2	31,9	37,5	38,4	38,6	39	38,8	39,7	46,7	57,1	56,2
$H(m)$	2,03	45,9	100	166	226	328	325	382	391	393	397	396	404	476	582	573

Tabla XXIII: Curva para cuando el sistema esta trabajando con las bombas 6A + 6B + 6C.

$Q(m^3/h)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$H_{red}(m)$	34.509	36.109	40.909	48.909	60.909	74.509	92.109	112.91	136.909	164.109

Tabla XXIV: Altura de la carga en la impulsión para el trabajo con Cieno.

Según la figura 3.4 se obtiene el punto de trabajo de la bomba la cual se encuentra trabajando para un caudal de $Q_i = 81\text{m}^3/\text{h}$ y $H_i = 141\text{m}$

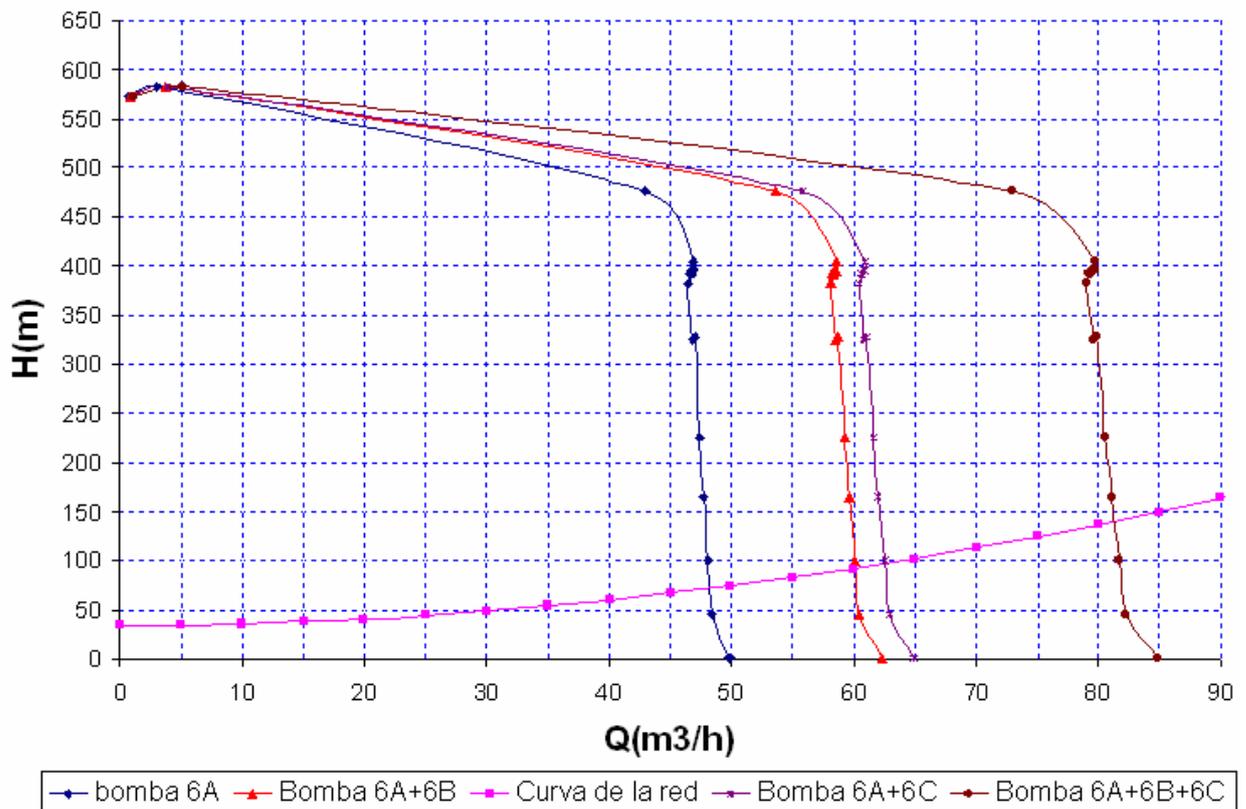


Figura 3 4: Curva característica del sistema para las bombas 6A + 6B + 6C.

Parámetros	Resultados
Caída de presión	$\Delta P_t = 1.812 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Potencia bomba	$N_b = 40.27 \text{ kW}$
Potencia del motor	$N_m = 44.47 \text{ kW}$
Potencia total del sistema	$N_t = 85.01 \text{ kW}$
Rendimiento mecánico	$\eta_m = 0.474$
Potencia eléctrica	$N_{elec} = 49.17 \text{ kW}$
Consumo de energía	$E = 384.2 \cdot 10^3 \text{ kW/año}$

Tabla XXV: Cálculo de la potencia y la eficiencia del sistema para esta condición de trabajo.

3.4 Análisis de los resultados obtenidos.

En dependencia de las demandas de suministro de Cieno Carbonatado en la planta de Neutralización, se ponen en funcionamiento la cantidad de bombas necesaria para mantener el nivel de los tanques existentes en la planta de neutralización.

Asumiendo que la demanda de Cieno Carbonatado actualmente es de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ se logra mantener el nivel necesario con operar las bomba PU - 6A + 6C con un caudal de operación de $62 \text{ m}^3/\text{h}$, en caso de que aumentara la demanda o disminuyera, se utilizarían las bombas en dependencia de la necesidad, que puede ser solo una, dos o tres bombas.

3.5 Valoración Económica.

Gasto de la explotación de la instalación para transportar un m^3 de Cieno Carbonatado a 4.220 Km. de distancia.

$$G_{\text{exp}} = \frac{G_b}{Q_c \cdot L_t}$$

$Q = 371520 \text{ m}^3/\text{año}$ Caudal transportado por una bomba (6A) en un año.

$L_t = 4220 \text{ m}$ Longitud de la instalación.

G_b Gasto anual de explotación de una bomba.

$$G_b = V + F$$

V - Gasto unitario variable.

$$V = g_{\text{elect}} + g_{\text{mant}} + g_{\text{agua}} + g_s$$

Gastos por consumo de energía eléctrica.

$$g_{\text{elect}} = \frac{T \cdot N_m \cdot K_p \cdot t_{pu}}{\eta}$$

$T = 0.14 \text{ kW/h}$ - tarifa de corriente eléctrica.

$N_m = 13.65kW$ - potencia consumida por el motor de las máquinas.

$K_p = 1.04$ - coeficiente de pérdida.

$t_{pu} = 8640h$ - tiempo trabajo de una bomba.

$\eta = 0.91$ - rendimiento del motor.

$g_{elec} = 18870USD/año$

$g_{mant} = 39161.25USD/año$ - gastos anual por mantenimiento

g_{agua} - gastos por consumo de agua.

$$g_{agua} = P_a \cdot Q_a \quad (4.4)$$

$$P_a = 0.25USD/m^3 \quad Q_a = 5200m^3/año$$

$$g_{agua} = 1330USD/año$$

g_s - gastos por salarios de los operadores de la instalación

$$g_s = t_a \cdot t_n \cdot k_{ss} \cdot k_{dr} \cdot k_{pc} \quad (4.5)$$

$t_a = 3.23USD/año$ - tarifa salarial del personal directo de la instalación

$t_n = 8700h$ - tiempo de trabajo del operario en la instalación

$K_{ss} = 0.388$ - coeficiente de seguridad social

$$k_{ss} = 12\% \cdot t_a$$

$k_{dr} = 1.0909$ - coeficiente de descanso distribuido

$k_{pc} \approx 1$ - coeficiente de pago complementario

$$k_{pc} = 1 + \frac{C}{100}$$

$$g_s = 11980USD/año$$

$$V = 528447.8USD/año$$

F - Gastos fijos globales.

$$F = g_{amort1} + g_{amort2} + g_{spi} \quad (4.6)$$

$$g_{amort1} = \frac{N_g \cdot I}{100} \cdot n \quad \text{- gastos por amortización de las bombas} \quad (4.7)$$

$I = 8048.07USD$ - valor inicial de las máquinas

$N_g = 5\%$ - tasa de amortización de las máquinas

$$g_{amort1} = 402.35USD/año$$

$$g_{amort2} = \frac{N_{gt} \cdot I_t}{100} \quad \text{- gastos por amortización de tuberías y soportes} \quad (4.8)$$

$I_t = 597000USD$

$N_{gt} = 3\%$ - tasa de amortización de las tuberías y soportes

$$g_{amort2} = 17910USD/año$$

$g_{spi} = 1006USD/año$ - gasto por salario del personal indirecto

$$F = 18928.07USD/año$$

$$G_b = 547375.87USD/año$$

$$G_{exp} = 17748.79USD$$

Indicadores	6A	6A + 6B	6A + 6C	6A + 6B +6C
Gastos por consumo de energía eléctrica	18870	48650	64420	146300
Gastos por mantenimiento	39161	50513	55545	60975.5
Gastos por consumo de agua	1300	1300	1300	1300
Gastos por salarios de los operadores	11980	11980	11980	11980
V gasto unitario variable	71310	112400	133200	220600
Gastos por amortización de las bombas	402.35	618.25	618.25	908.28
Gastos por amort. de tuberías y soportes	17910	17910	17910	17910
Gastos por salario del personal indirecto	1006	1006	1006	1006
F gasto fijos globales	19320	19530	19530	19820

G b	90630	131930	152730	240400
Gasto por transportar un m ³ de Cieno Carbonatado (USD / m ³)	0.21	0.30	0.312	0.37

Tabla XXVI: Resultados de los valores económicos para las variantes.

Los resultados de la valoración económica nos permiten ver el comportamiento del costo por transportar un m³ de Cieno Carbonatado, para el funcionamiento de las bombas en las distintas condiciones, lo que permitirá tener un control de dicho costos a partir de la demanda existente en la planta de neutralización.

3.6 Impacto medio ambiental.

Los sistemas de hidrotransporte para el Cieno Carbonatado son regulados bajo los requerimientos ambientales dispuestos en la Ley 81 y se materializan a través de un programa de mantenimiento planificado y financiado por la empresa encaminada a restaurar los tramos defectuosos de tuberías y soportes de este sistema, los cuales evitan procesos de derrames y como consecuencia contaminación del medio ambiente.

En la actualidad se construyen sistemas de drenajes para la evacuación de las cargas líquidas en los pipe rack, evitando el impacto visual del entorno y de los suelos respectivamente.

En los sistemas de hidrotransporte existen válvulas de seguridad, para evitar escapes y sobrecargas en las líneas, además un sistema de inspección visual por turnos de operación que garantiza la toma de decisiones rápidas ante un incidente en estos sistemas.

3.7 Conclusiones parciales.

- Se comprobó que la velocidad media de transportación para todos los casos es mayor que la velocidad crítica lo que demuestra que las partículas en suspensión existentes en la hidromezcla no sedimentarán.
- Se estableció el punto de trabajo de las diferentes condiciones de funcionamiento del sistema que permitirá la toma de decisiones en dependencia de la demanda de Cieno Carbonatado.
- Los Costos por transportar un metro cúbico de Cieno Carbonatado para las bombas 6A, 6A + 6B, 6A + 6C, 6A + 6B + 6C son 0.21, 0.30, 0.312 y 0.37 CUC respectivamente.

CONCLUSIONES

- Se comprueba que el Cieno Carbonatado tiene un comportamiento reológico de Plástico Bingham para el un porciento de sólido de 40% siendo este el porciento con que se transporta dicho material.
- El cálculo de los parámetro de trabajo de la instalación nos arrojo los siguiente resultados:

	Condiciones de trabajo de las bombas			
Parámetros	6A	6A + 6B	6A + 6C	6A + 6B +6C
$Q_t (m^3/h)$	48.1	60	62.5	81
$H_t (m)$	71	93	97	141

- Para mantener la demanda promedio actual de Cieno Carbonatado a la planta de neutralización se debe trabajar con las bombas 6A + 6C.
- Los costos de transportación de un m^3 de Cieno Carbonatado para las condiciones de trabajo analizadas son:

Indicadores	6A	6A + 6B	6A + 6C	6A + 6B +6C
G b	90630	131930	152730	240400
Gasto por transportar un m^3 de Cieno Carbonatado (USD / m^3)	0.21	0.30	0.312	0.37

Como se está trabajando con las bombas 6A + 6C esto reportaría un ahorro de 87670 USD/año con respecto a la condición de trabajo de las bombas 6A + 6B +6C

RECOMENDACIONES

- Se tenga en cuenta los resultados obtenidos en el trabajo para el control de los parámetros adecuado de funcionamiento del sistema.
- Que se ponga en funcionamiento solo la condición de trabajo necesaria para mantener la demanda de la planta de neutralización, que permita una disminución en los consumos de energía.
- Lograr una concentración de sólido presente en el Cieno Carbonatado entre (40 y 45%) de peso en sólido.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andreiev, S.E. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Editorial pueblo y educación, 1980.
2. Ávila Jiménez N. E., Becerra Lotero C., Iza Mustafá Y., Sanz Uribe J. R., Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería pvc de 88 mm., Scientia et Técnica, Universidad Tecnológica de Pereira, Año XII, No 34, ISSN 0122-1701, Mayo de 2007.
3. 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.
4. Caballero. Y.N. Caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su perfeccionamiento en el hidrot transporte. Tesis de diploma. ISMM.2008
5. Campos, G.M. Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande. Holguín. 2001.
6. Caldiño V. I., Salgado M. G. Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. (2004).
7. Castillo. D. Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado. 1988.
8. Cerpa, A.; Garcell. L .R Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. La Habana: Informe al evento Metalurgia 98, 1998.
9. CEPRONIQUEL. Proyecto de extracción del fango coralino al sur de Cayo Moa Grande. 2000.

10. CESIGMA. División América. Proyecto de explotación del yacimiento de Cienos Carbonatados al sur de Cayo Moa Grande. 1997.
11. Costa N. E., Fenómenos de transporte, Editorial Alambra S.A., Madrid, 1984
12. Darby R., Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids, in Flow Dynamics and Transport Phenomena.
13. 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
14. Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1990.
15. 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.
16. Garcell, L., Características reológicas y mineralógicas de las pulpas limoníticas de Moa en períodos de sedimentación crítica. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería Química., 1984.
17. 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.
18. 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.
19. Garcell, L. Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales. Revista Tecnología Química, 1984.
20. Garcell, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.



21. García E.J. y. Steffe J.F., Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow. Journal of Food Process Engineering: 9, 93-120, 1987.
22. Hernández, L. R. Cálculo verificativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
23. Iakovlev, S.V y Dalkov Y.M., Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p
24. Ibarz A., J. Vélez y G. Barbosa. Transporte de Alimentos Fluidos a Traves de Tuberías. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
25. 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.
26. Jiménez. D.Y. Cálculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de neutralización de la Empresa "Pedro Soto Alba". Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2005.
27. Karassik, I., Carter, R., Bombas centrifugas. Selección operación y mantenimiento, Editorial Revolucionaria, La Habana, 1968.
28. 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.
29. Manual de operaciones de las plantas de Coral.
30. Martínez, R.R. Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de diploma. ISMM.2004.

31. Martínez, R.R. Caracterización de las propiedades físico mecánicas y de flujo del Cieno Carbonatado para el mejoramiento de su transporte por tuberías. Tesis de maestría. ISMM. 2009
32. Menéndez, H.M Conferencia sobre la naturaleza de los Cienos Carbonatados y los factores minero – ambientales que se tienen en cuenta durante el minado en la bahía de cayo Moa. Empresa Comandante Pedro Soto Alba, Moa Níkel S.A. Moa 2001.
33. Menéndez, H.M. Explotación racional del yacimiento de Cienos Carbonatados en la bahía de Moa. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2001
34. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada., Pipe Transportation of Minced Fish Paste. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980).
35. Nápoles. E. Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande. 1992.
36. Nedved. M. Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande. 1966.
37. Otero J. L., Fenómenos de transporte en metalurgia extractiva, Editorial Alambra, España, Madrid, ISBN 84-205-1784-4, 1989.
38. Pakrovskaya, V.I., El transporte hidráulico en la industria minera. Moscú: Niedra, 1985, 192 p.
39. Perona P., An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
40. Pérez. B.R. Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de las menas y concentrados en flujos de alta concentración. Tesis de Doctorado. Krivoi Rog, 1970.
41. Rodriguez T. H. Temas de flujos de fluidos. Universidad de oriente. 2008.



42. Roque, D., Método de recálculo de la característica de funcionamiento de las bombas centrífugas que manipulan soluciones azucaradas, Memorias del VI encuentro Nacional de Jefes de Maquinarias. MINAZ. Santa Clara, 1989.
43. Steffe J.M. y R.G. Morgan., Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods. Food Technology. Dic.: 78-85, 1986.
44. Suárez F.M. Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
45. Suárez, M.; De la Cruz, R.K. Relación entre las características granulométricas, reológicas y coloidesquímicas en suspensiones de laterita y de Cieno Carbonatado. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. 2005.
46. Turro, B.A. Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002.
47. Turro, B.A. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (Colas) del proceso industrial CARON. Revista tecnología química. Volumen XXIII, No 2, 2003.
48. 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.

ANEXOS

Anexo 1 Característica del motor y las bombas del sistema.

PU-6A

Características del motor:

- Tensión: 440 V
- Potencia: 110 Kw
- frecuencia: 60 Hz
- Velocidad de rotación: 1182 rpm

Característica de la bomba:

- Bomba de desplazamiento positivo (pistón), con diafragma. Tipo:ZGL 100/200 -K 200 -2 SM 460 HD. Feluwa.
- Presión de trabajo: 39 bar
- Capacidad: 43 m³/h.
- Potencia absorbida por el eje motriz: 19.3-38.6 Kw.

PU - 6B.

Características del motor:

- tensión: 440 V
- Potencia: 30 Kw
- Velocidad de rotación:1200 rpm

Características de la bomba:

- Bomba de desplazamiento positivo (pistón), con diafragma. Tipo:ZGL 50/135 -K 180 -2 SM 460 HD. Feluwa.
- Presión de trabajo: 35 bar
- Capacidad: 16 m³/h.

PU - 6C.

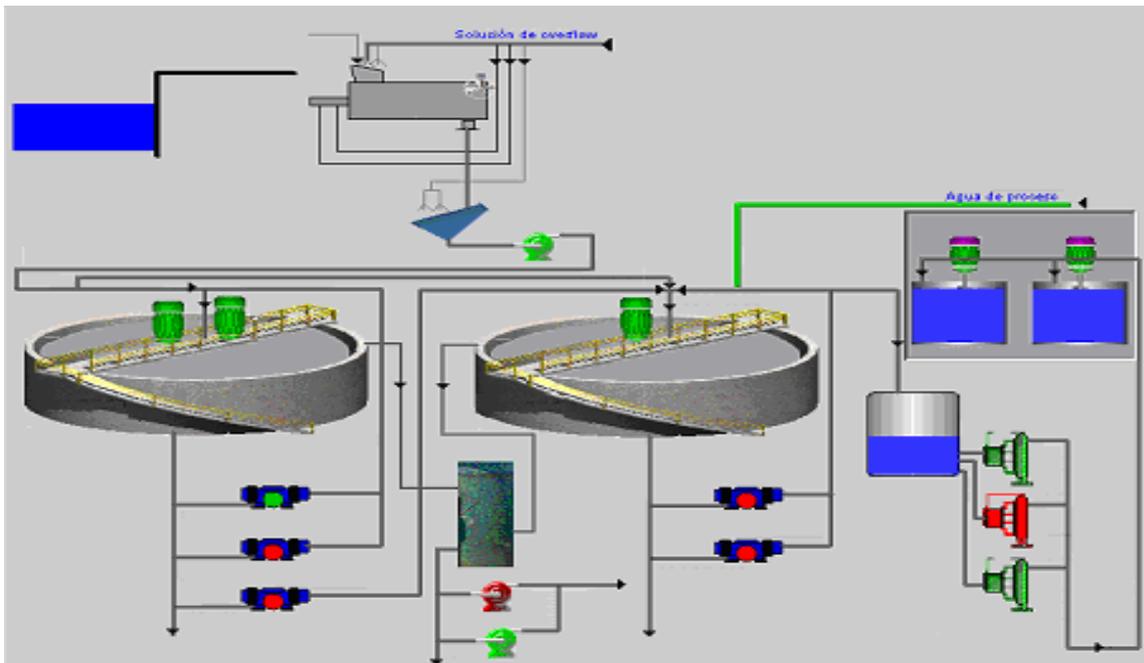
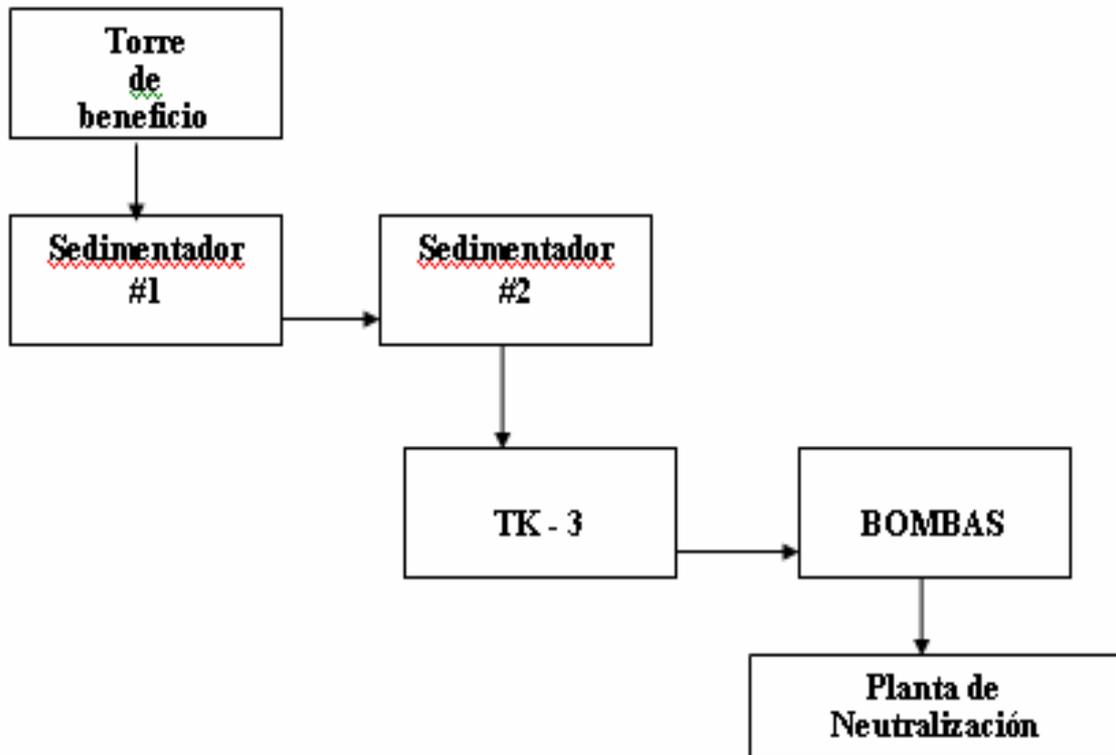
Características del motor:

- tensión: 440 V
- Potencia: 32/46 Kw
- Velocidad de rotación: 840/1630 rpm

Características de la bomba:

1. Bomba de desplazamiento positivo (pistón), con diafragma. Tipo: ZGL 50/135 -K 180 -2 SM 460 HD. Feluwa.
- Capacidad: 10 – 21 m³/h.
 - Presión de trabajo: 35 bar

Anexo 2 Esquema del proceso tecnológico planta de pulpa.



Anexo 3 Resultados de las mediciones del porcentaje de sólido.

Dias	Fechas	% Sólido	
		Secado	Volumétrico
1	24/04/2008	48,05	48,6
2	25/04/2008	48,85	49,4
3	28/04/2008	47,51	47,6
4	29/04/2008	48,76	51,5
5	30/04/2008	45,22	48,6
6	02/05/2008	38,79	44,5
7	03/05/2008	41,07	42,2
8	05/05/2008	46,47	48,6
9	07/05/2008	41,64	42,6
10	08/05/2008	40,04	41,5
11	09/05/2008	40,83	45,3
12	15/05/2008	39,39	48,5
13	16/05/2008	44,05	47,7
14	17/05/2008	43,21	51
15	20/05/2008	49,28	49,5
16	21/05/2008	50,19	50,8
17	26/05/2008	49,9	50,5
18	27/05/2008	47,49	49,8
19	29/05/2008	48,06	49,01
20	30/05/2008	44,01	46,5

Anexo 4 Resultados del análisis reológico.

	% de Sólido		
	32%	40%	46%
γ (1/s)	τ	τ	τ
50,73	18,30	34,00	48,40
87,79	24,00	39,40	54,90
120,95	29,90	44,80	61,40
146,20	34,00	52,50	66,30
185,30	39,50	61,85	75,64
229,90	44,80	66,30	88,40
311,25	51,70	86,55	113,65
392,36	55,40	106,81	139,50

Anexo 5 Cálculo del sistema para la bomba 6A

Velocidad media de transportación del cieno

$$V_m = \frac{Q}{A} = \frac{0.01305 \frac{m^3}{s}}{0.018m^2} = 0.736 \frac{m}{s} \quad (1)$$

Esto demuestra que la velocidad media de transportación es mayor que la velocidad adecuada de funcionamiento $V_m \geq V$ evitándose de esta forma la sedimentación de las partículas durante el movimiento de la pulpa

Numero de Reynolds

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

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_c}{\pi \cdot D \cdot \mu_p} \quad (2)$$

$Re = 6771$ Como $Re > 4000$ entonces estamos en presencia de un régimen turbulento

Número de Hedston

Valor que interviene en el cálculo de los factores de fricción, así como las tensiones cortantes y esta dada por la ecuación (Martínez 2009)

$$He = \frac{D^2 \cdot \rho_c \cdot \tau_0}{\mu_p^2} \quad (3)$$

$$He = 1345 \cdot 10^3$$

Para el cálculo del factor de fricción

$$f = \left[(f_L^\beta) + (f_T^\beta) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{Coeficiente de fricción} \quad (4)$$

$$f_L = \frac{64}{Re} = 0.00945$$

$$f_T = \frac{10^C}{Re^{0.193}} = 0.0061$$

$$C = -1.378(1 + 0.146 \cdot e^{-2.9 \cdot 10^{-5}} \cdot He) = -2.707 \cdot 10^5$$

$$\beta = 1.7 + \frac{4000}{Re} = 2.291$$

$$f = 0.011$$

El factor de fricción se determina por la siguiente ecuación

$$\lambda_c = 4 \cdot f \quad (5)$$

$$\lambda_c = 0.043$$

Cálculo de las pérdidas totales en la instalación

$$L_s = 2.2 \cdot m \quad \text{Longitud en la succión}$$

$L_t = 4222 \cdot m$ Longitud total en la tubería de impulsión

Se calcula las pérdidas locales en la succión para ello se tiene en cuenta los accesorios que hay en ese tramo, factor de fricción, coeficiente de rugosidad de la tuberías y la velocidad del flujo

Pérdidas en la succión.

Pérdidas por rozamiento en las tuberías.

$$\begin{aligned} \xi_{rozsucc} &= \lambda_c \cdot \frac{L_s}{D} & h_{rozsucc} &= \xi_{rozsucc} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \\ \xi_{rozsucc} &= 0.636 & h_{rozsucc} &= 0.018 \cdot m \end{aligned} \quad (6)$$

Pérdidas locales en la succión

Tabla 3.2: Coeficientes de resistencia para la línea de succión (Rodríguez 2008)

Accesorios en la línea de Succión	Cantidad	Coeficiente de resistencia
Válvula de cuña	1	0.0379
Coeficiente de entrada		0.78

$$\begin{aligned} h_{locsucc} &= \sum \xi_{succ} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} & (7) \\ h_{locsucc} &= 0.023 \cdot m \end{aligned}$$

$$\sum \xi_{succ} = \xi_{vál} + \xi_{ent} = 0.818$$

Pérdidas totales en la tubería de succión

$$\begin{aligned} \Sigma h_{succ} &= h_{locsucc} + h_{rozsucc} \\ \Sigma h_{succ} &= 0.04 \cdot m \end{aligned} \quad (8)$$

Pérdidas en la impulsión

Pérdidas por rozamiento en la tubería de impulsión

$$\begin{aligned} \xi_{rozimp} &= \lambda_c \cdot \frac{L_t}{D} & h_{rozimp} &= \xi_{rozimp} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \\ \xi_{rozimp} &= 1.22 \cdot 10^3 & h_{rozimp} &= 33.678 \cdot m \end{aligned} \quad (9)$$

Pérdidas locales en la tubería de impulsión

Tabla 3.3: Coeficientes de resistencia para la línea de impulsión (Rodríguez 2008)

Accesorios en la línea de Succión	Cantidad	Coeficiente de resistencia ξ
Válvula de cuña	4	0.038
Codos de 90°	15	0.75
Codos de 45°	17	0.40
Coeficiente de salida		1

$$\xi_{vál} = 4 \cdot 0.038 = 0.151$$

$$\xi_{codo} = (15 \cdot 0.75) + (17 \cdot 0.40) + 1 = 19.05$$

$$\begin{aligned} \Sigma \xi_{imp} &= \xi_{vál} + \xi_{codos} + \xi_{sal} & h_{locimp} &= \Sigma \xi_{imp} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \\ \Sigma \xi_{imp} &= 19.202 & h_{locimp} &= 0.53 \cdot m \end{aligned} \quad (10)$$

Pérdida total en la tubería de impulsión

$$\begin{aligned} \Sigma h_{imp} &= h_{locimp} + h_{rozimp} \\ \Sigma h_{imp} &= 34.208 \cdot m \end{aligned} \quad (11)$$

Pérdida total en el sistema
sistema

Pérdida totales por accesorios en el
sistema

$$\begin{aligned}
 \Sigma h_t &= \Sigma h_{succ} + \Sigma h_{imp} & \Sigma \xi_t &= \Sigma \xi_{imp} + \Sigma \xi_{succ} \\
 \Sigma h_t &= 34.248 \cdot m & \Sigma \xi_t &= 20.02
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Cálculo de la altura geométrica en la impulsión

Para determinar la altura geométrica que desempeña las bombas, nos remitimos a los planos geodésicos del terreno donde aparece como nivel 0-0 el mar

$$\begin{aligned}
 H_{imp} &= 38.7096 \cdot m & H_{succ} &= 4.2005 \cdot m \\
 \Delta Z_x &= H_{imp} - H_{succ} \\
 \Delta Z_x &= 34.509 \cdot m
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

3.3.1 Características de la red

La característica de la red exterior de la instalación de hidrotransporte se recomienda calcular por la ecuación: Según (Alexandro. 1986)

$$H_{red} = \Delta Z_x + R_c \cdot Q^2
 \tag{14}$$

Evaluando en mathcad se obtiene la curva de trabajo de la red.

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

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2} \left[\left(\lambda_c \cdot \frac{L_T}{D} \right) + \Sigma \xi_t + 1 \right] \\
 R_c &= 0.016 \frac{hr^2}{m^5}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Anexo 6: Ilustración de bomba de pistón - diafragma - manguera.

