



Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad Metalurgia y Electromecánica

*Modificación del sistema de bombeo de  
los tanques de contacto en La Empresa  
“Comandante René Ramos Latour”.*

*Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico.*

*Yosnelis Sánchez Morejón.*

Moa-2013



Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad Metalurgia y Electromecánica

*Modificación del sistema de bombeo de  
los tanques de contacto en La Empresa  
“Comandante René Ramos Latour”.*

*Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico.*

*Autor: Yosnelis Sánchez Morejón.*

*Tutor: Ing. Yosbel Guerra Gonzáles*

## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

*Yo Yosnelis Sánchez Morejón:*

Autor de este trabajo de Diploma y el tutor, Ing. Yosbel Guerra Gonzáles declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

---

Diplomante: Yosnelis Sánchez Morejón.

---

Tutor: Ing. Yosbel Guerra Gonzáles

## **PENSAMIENTO**

*“... y siempre mediremos, por encima de todo un Técnico y un Científico no por sus conocimientos, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus conocimientos.”*

*Fidel Castro.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A mis tutores por la confianza y ayuda depositada durante la realización de la tesis.*

*A mi padre y a mi hermana que siempre han confiado en mi y se que se sienten orgullosos ya que nunca los he defraudado.*

*A mi madre, hermano y a Tony que siempre me han guiado por el camino correcto.*

*A mis compañeros de estudio por la amistad y firmeza durante todos estos años y por su ayuda cuando la he necesitado.*

*A los profesores que con tanto esfuerzo han llevado a puerto seguro este programa.*

*A mi esposa por estar junto a mí en las noches de desvelo, por dedicarme siempre todo su tiempo con amor y cariño.*

*A la amiga de todos, Ana Roque, gracias por sus sugerencias, indicaciones y su valioso tiempo.*

*A Maramis, Ivette, Silvia, clarita, dayami que sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este trabajo.*

*A mis amigos de siempre que de una forma u otra siempre han estado conmigo.*

*A los nombrados hoy y a quienes imperdonablemente no hemos mencionado...*

*Muchas Gracias.*

## **DEDICATORIA**

*Dedico la culminación de este trabajo:*

*En especial a mi Padre y madre por haberme guiado en la vida y darme una educación basada en valores y principios.*

*A mi hijo que es mi horizonte en todo momento.*

*A mi esposa por su amor incondicional.*

*A mi familia que de ellos siempre he tenido cariño confianza y apoyo.*

**A los profesores que durante estos seis años me han ayudado a formarme como profesional.**

*A todos “les dedico este éxito”*

*Yosnelis Sánchez Morejón*

## **RESUMEN**

El propósito de esta investigación es disminuir las deficiencias del sistema de bombeo del área de tanques de contacto de la empresa René Ramos Latour. Se realizaron los cálculos para independizar el bombeo de las dos plantas existentes en la instalación, determinar el diámetro de la tubería a instalar, la curva característica de la bomba para una frecuencia de rotación de 1600 rpm, la de la red y se hicieron coincidir con el fin de obtener el punto de trabajo de la bomba para la red dada. Los cálculos realizados mostraron que el diámetro de la tubería a instalar debe ser de 200 mm y que se deben instalar cuatro bombas tipo Wilfley por planta, las cuales dos estarían en operación y dos de reserva y se logró independizar el bombeo, es decir cada planta bombea directamente al distribuidor. Logrando con esta nueva propuesta la disminución de las pérdidas por concepto de derrame y consumo de energía.

## **SUMMARY**

The purpose of this research is to decrease the pumping system deficiencies contact tanks area company René Ramos Latour. Calculations were performed in order to separate the pumping of the two plants from the installation, determining the diameter of the pipe to be installed, the characteristic curve of the pump to a rate of rotation of 1600 rpm, the network and were timed in order to obtain the operating point of the pump for the given network. Calculations showed that the diameter of the pipe to be installed shall be 200 mm and four pumps must be installed per floor Wilfley type, which two would be in operation and two wean reserves and pumping was achieved, it each plant pumped directly to the distributor. Achieving this new proposal the reduction of losses on spill and energy

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Antecedentes bibliográficos</b>	<b>6</b>
1.1.1. Investigaciones realizadas para el transporte de pulpas.	6
1.1.2. Estudios relacionados con el transporte de otros fluidos.	7
<b>1.2. Caracterización de la instalación actual</b>	<b>8</b>
1.2.1. Características del equipamiento	9
1.2.1.1. Tanque de Contacto o Mezclador.	9
1.2.1.2. Bomba Centrífuga Morris	10
1.2.1.3. Bomba Centrífuga Wilfley	10
1.2.2. Afectaciones al proceso por el problema de bombeo.	11
<b>1.3. La cavitación en bombas centrifugas</b>	<b>12</b>
<b>1.4. Clasificación reológica de los fluidos</b>	<b>13</b>
1.4.1. Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones de minerales	14
1.4.1.1. Efecto de la concentración de sólido	14
1.4.2.1. Efecto de la granulometría	15
1.4.2.2. Efecto de la temperatura	16
1.4.3. Curvas de flujo	16
<b>1.5. Pérdida de energía hidráulica en tuberías y accesorios</b>	<b>17</b>
<b>1.6. Trabajo de las bombas para las redes.</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	<b>19</b>
<b>2.1. Características de la pulpa</b>	<b>19</b>
2.1.1. Características del sólido que la forma	20
2.1.2. Características del líquido que la forma.	20
<b>2.2. Metodología de cálculo</b>	<b>20</b>

2.2.1. Curva característica de la bomba	20
2.2.2. Cálculo de la nueva curva característica para la frecuencia de rotación $n = 1600$ rpm.	21
2.2.3. Cálculo del diámetro de la tubería	22
2.2.4. Cálculos para determinar la curva característica de la red.	23
2.2.5. Cálculo de las pérdidas de carga por fricción	24
2.2.6. Cálculo de las pérdidas de carga por resistencias locales.	25
2.2.7. Calculo económico	26
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>27</b>
<b>3.1. Cálculo de la curva característica de la bomba para <math>n = 1600</math> rpm.</b>	<b>27</b>
3.1.1. Cálculo del caudal de la bomba.	27
3.1.2. Cálculo de la altura de carga.	28
<b>3.2. Calculo del diámetro de la tubería</b>	<b>29</b>
<b>3.3. Cálculos para determinar la curva característica de la red.</b>	<b>29</b>
3.3.1. Cálculo de las pérdidas de carga por fricción	29
3.3.1.1. Cálculo del criterio de Reynolds	30
3.3.1.2. Cálculo de las pérdidas de carga por resistencias locales	30
<b>3.4. Determinación del punto de trabajo de la bomba trabajando para la red dada.</b>	<b>31</b>
<b>3.5. Propuesta de la nueva instalación</b>	<b>33</b>
<b>3.6. Valoración económica.</b>	<b>34</b>
3.6.1. Ahorro por concepto energético.	35
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>39</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS</b>	

## INTRODUCCIÓN

El níquel a partir del año 2000 se convierte en unos de los principales rubros de exportación, representado por la Industria Cubana del Níquel con más de 65 años de creada, la cual se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, lo que permitirá incrementar su aporte a la economía nacional.

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba (1997) se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria Minero Metalúrgica, y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrados de níquel con mayor eficiencia en las inversiones.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo de la producción se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones y el equipamiento tecnológico, para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos de la región oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de extracción minera; lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

El desarrollo de la industria del níquel, exige cada día más de los conocimientos de científicos que nos dan una mayor eficiencia en la producción del níquel cubano. Por ese motivo en estos días se trata de elevar la producción y disminuir la erosión y contaminación del medio ambiente. Para lograr una mejor cultura ambiental debemos conocer la función del lugar en que trabajamos y como estos actúan sobre el medio ambiente.

En la actualidad, en la industria minero metalúrgica se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge el transporte hidráulico debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte.

El desarrollo industrial de las tecnologías en la industria del níquel exige disminuir los consumos de portadores energéticos y que cada una de las instalaciones de las empresas sea más eficiente.

Hoy en día la industria niquelífera cubana se encuentra enfrascada en dos grandes cambios: la modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción por tonelada 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 (Torres, 2003).

Existen actualmente tres fábricas que son las encargadas de toda la producción de níquel más cobalto (Ni + Co) en Cuba, ellas son: las empresas “Comandante “René Ramos Latour” de Nicaro, la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa que obtienen como producto final sinter de níquel mas cobalto (Ni + Co) al igual que la anteriormente mencionada, y la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” que produce sulfuro de níquel más cobalto (SNi + Co) también de Moa.

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.

Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia del proceso tecnológico. Cualquier investigación encaminada a perfeccionar el sistema

de evacuación de pulpas implicaría el análisis de estos factores en el proceso. El orden de la realización de los análisis no está relacionado obligatoriamente con el grado de incidencia, sino con la obtención organizada de los datos que se requieren.

En Cuba la Industria del Níquel desempeña un papel importante dentro de la economía nacional, por ser una de las principales fuentes de ingreso de divisa al país. Insertada en esta rama, está la planta de níquel “Comandante René Ramos Latour”, exigiendo cada día más de la realización de investigaciones para lograr una elevada producción y disminuir la pérdida de productos valiosos.

Siendo la empresa “Comandante René Ramos Latour”, la pionera en la producción de níquel, la cual inicio sus operaciones en 1943, en el nordeste de la provincia de Holguín, la cual fue diseñada para el tratamiento de los minerales lateríticos por el método de lixiviación amoniacal basado en. Proceso “Caron”.

Esta fábrica metalúrgica consta de de varias plantas de producción y yacimientos mineros aislados topográficamente, agrupados en dos minas fundamentales: Mina Martí la cual quedó en franco agotamiento y se encuentra actualmente en reforestación y la Mina Pinares encargada de suministrar el mineral a la fábrica.

En los últimos años en la planta de Hornos se han presentado algunos problemas relacionado con el consumo de energía y aumento en la contaminación ambiental, donde de alguna manera las bombas (Morris) son contribuyente de estos factores, perturbando la economía de la empresa y dañando el medio ambiente, siendo necesario realizar un análisis encaminado a proponer una sustitución, debido que durante su funcionamiento ocurre la pérdida de muchos elementos valiosos entre los que se encuentran el (Ni) níquel, (Co) cobalto y (NH<sub>3</sub>) amoníaco, llevando consigo afectaciones en el proceso productivo de la empresa.

Por el complejo sistema de instalación que compone esta industria, se ha venido trabajando para incrementar la eficiencia de los equipos que se encargan de ejecutar el proceso de obtención de níquel metálico, para hacerla más productiva y competitiva en el mercado internacional. Dentro de la entidad se pueden encontrar las bombas Morris.

Luego de varios años de explotación las bombas Morris comenzaron a presentar problemas con respecto a las pérdidas de los productos valiosos, esto trajo consigo

que se hicieran varias investigaciones buscando soluciones adecuadas a la problemática en cuestión. Dentro de las alternativas propuestas estuvo el cambio de la bomba Morris por la Wilfley.

Debido a la complejidad de operación en la que interviene la bomba Morris, la situación actual del proceso de bombeo se caracterizó por las siguientes deficiencias:

-Son equipos de grandes dimensiones y altas consumidoras de recursos y de energía eléctrica.

-Altas pérdidas de níquel y amoniaco.

Las causas que originaron esta dificultad se encuentran latentes en el proceso industrial, lo cual conduce a la inexactitud de los proyectos acerca de las bombas Morris derivado de la ausencia de investigaciones científicas sobre este tema.

Dada la situación planteada, se resume que, es necesario que se realice un estudio del comportamiento de las características de la bomba Morris, atendiendo a las propiedades físico – mecánicas , así como, sus principales parámetros de transporte; para una correcta reingeniería del sistema, ya que el actual se caracteriza por una baja eficiencia energética y alto consumo energético en sus sistemas de bombeos y la imposibilidad de un ajuste de las expresiones matemáticas para una correcta evaluación del sistema actual, dado principalmente por el insuficiente conocimiento del material a transportar. Requiriéndose un estudio que permita aportes y mejora de los métodos de cálculo del sistema, objeto de estudio.

A partir de las deficiencias expuestas se declara como **problema científico a investigar**: Deficiencias en el sistema de bombeo de pulpa en el Área de Tanques de Contactos de la empresa “Comandante Rene Ramos Latour”.

Como **objeto de trabajo de la investigación** se plantea:

Sistema de bombeo de pulpa del Área de Tanques de Contactos.

### **Objetivo general.**

Modificar el sistema de bombeo de pulpa en el área de contacto de la empresa “Comandante Rene Ramos Latour”.

### **Hipótesis:**

Si se realizan los cálculos y análisis correspondientes que justifiquen la nueva modificación, se podrán solucionar las deficiencias en el sistema de bombeo de pulpa en el área de tanques de contacto de la empresa “Comandante Rene Ramos Latour”.

### **Objetivos específicos.**

- Realizar los cálculos y análisis correspondientes que justifiquen el funcionamiento de la nueva modificación del sistema de bombeo de pulpa.
- Proponer una nueva instalación de bombeo de pulpa.
- Evaluar el funcionamiento de la nueva instalación desde el punto de vista mecánico y económico.

### **Tareas de la investigación.**

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados en modificaciones de sistemas de bombeo así como la exploración de la problemática mundial, nacional y local de sistemas de bombeo.
- Caracterizar la instalación actual (determinar las deficiencias del sistema de bombeo de pulpa...)
- Proposición de la nueva instalación de bombeo de pulpa del área de tanques de contactos de la empresa “Comandante Rene Ramos Latour”.
- Evaluación de la nueva instalación.
- Realiza una valoración económica que demuestre factibilidad de la nueva propuesta.

### **Aseguramientos:**

1- Materiales de Oficina.

2- Instrumentos de medición.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema expuesto en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

### **1.1. Antecedentes bibliográficos**

#### **1.1.1. Investigaciones realizadas para el transporte de pulpas.**

**Caballero (2008)** realiza una caracterización de las pulpas generadas en los tanques de contacto de la empresa Ernesto Che Guevara para su hidrotransporte, con el objetivo de describir el comportamiento reológico y el modelo matemático que lo describe. Y se comprueba que el parámetro que más influencia presenta sobre el comportamiento reológico es el porcentaje de sólido, no siendo así para la temperatura y el pH en los rangos estudiados.

**Rodriguez (2009)** propone la proyección del nuevo sistema de hidrotransporte desde la Planta de Recuperación de Amoniaco hasta el nuevo depósito de colas en la parte Este de las facilidades metalúrgicas en el Valle del río Yagrumaje. Se hace un análisis de los factores atmosféricos, sismicidad, propiedades del terreno así como el comportamiento reológico de las colas.

**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.

La caracterización reológica de las colas reportada por **Turro (2004)** exhibe un flujo pseudoplástico a concentraciones de 25-40 % y un comportamiento plástico Bingham para valores mayores de 40 %, a todas las temperaturas estudiadas. (28-900°C). En la citada fuente se demuestra que las hidromezclas de las colas constituyen un sistema trifásico con mayores caídas de presión y magnitudes más elevadas de los factores de fricción que los requeridos en los sistemas bifásicos normales, bajo condiciones normales de operación.

**Reynosa L (2012)**. En su investigación evalúa la instalación de bombeo de colas, al depósito, de la empresa comandante Pedro Sotto Alba. Que producto del aumento del flujo de pulpa, se determina que la instalación es capaz de trasegar el caudal que se genera, a través de una comparación de las pérdidas de presión en la red y la presión desarrollada por la bomba. No se tuvo en cuenta la velocidad crítica del flujo para evitar la sedimentación del sólido en la tubería.

### **1.1.2. Estudios relacionados con el transporte de otros fluidos.**

**Camilo R (2010)** en su estudio. ``Evaluación del sistema de calentamiento y bombeo sobre el residuo almacenado en la base de petróleo de la Empresa Puerto Moa``. Caracteriza el transporte de un material que presenta comportamiento no newtoniano y pseudoplástico, como es el caso del petróleo y sus residuos. Además evalúa la instalación para transportar el residuo y ver si esta instalación puede garantizar el bombeo del residual petrolizado sin necesidad de construir otra. Llegó a la conclusión de que la instalación puede utilizarse para el bombeo del residual en condiciones normales de trabajos, con el inconveniente de que debe bajarse su viscosidad.

**Columbie O (2006)** en su trabajo de diploma ``Estudio del transporte de fuel oil desde los tanques (Mazut) de resección hasta la planta de Preparación Mineral

perteneciente a la empresa "Ernesto Che Guevara." realiza un estudio que permitió obtener la información necesaria para actualizar el estado de la temática. Se hace la caracterización de la instalación en cuanto al comportamiento del fluido, selección de los tramos, mediciones y materiales empleados en la instalación. Se propone un procedimiento de cálculo que permite caracterizar cada uno de los tramos seleccionados del sistema actual de la instalación, donde se grafica la altura necesaria en función del gasto del líquido en la tubería de cada uno de los tramos correspondientes. Se establece un análisis comparativo de los resultados en dichos tramos y evaluación de los indicadores técnicos – económicos que caracterizan dicho sistema, así como una valoración del impacto medio ambiental basado en el objeto de estudio.

## **1.2. Caracterización de la instalación actual**

La planta de hornos de reducción cuenta en la actualidad con 11 unidades, 6 en planta vieja y 5 en planta nueva generando un flujo de mineral a las canales del área de contacto entre 80 a 120 t/h, por planta, para garantizar la relación líquido sólido en los contactos se bombea entre 400 a 600 m<sup>3</sup> de licor a las canales descargando estas a dos Tanques de Contactos o (Mezcladores) en cada planta que succionan 4 bombas centrifugas del tipo Wilfley, en planta vieja, estas bombas a través de líneas individuales de 200 mm de diámetro descargan en los tanques de contacto de planta nueva donde junto con la pulpa que se forma en estos tanques son succionados por 4 bombas tipo Morris conectadas cada una a una red de 350 mm de diámetro y longitud que varían de 186 a 196 m hasta la caja distribuidora se encuentra a 22 m por encima del nivel de las bombas.

El área de contacto de la planta nueva se ha convertido en una de las fuentes de mayor pérdida de (Ni) níquel y (NH<sub>3</sub>) amoníaco de la empresa por deficiencias reiteradas en las bombas Morris, y si tenemos en cuenta el tonelaje procesado por la planta de Hornos, la utilización de una sola bomba es muy poca capacidad, pero dos son mucha y constantemente las bombas cavitan. De ahí el deterioro prematuro de las mismas y por ende en consumo de materiales de mantenimiento.

Debido a la complejidad de operación en la que interviene las bombas Morris, la situación actual del proceso de bombeo se caracterizó por las siguientes deficiencias:

- Son equipos de grandes dimensiones y altas consumidoras de recursos y de energía eléctrica.
- Altas pérdidas de níquel y amoníaco en el sistema operativo.

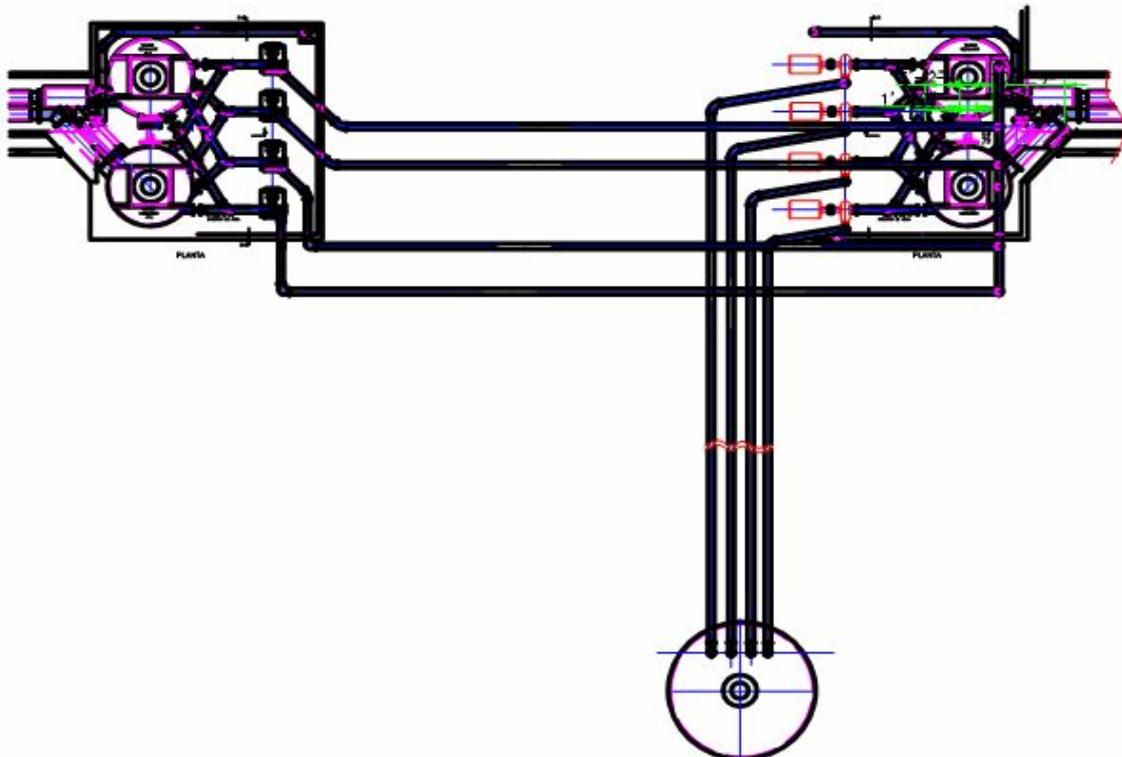


Figura 1.1. Esquema de la instalación actual.

## 1.2.1. Características del equipamiento

### 1.2.1.1. Tanque de Contacto o Mezclador.

Tiene la función de recibir la pulpa que transita en las canales compuesta por amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y la composición de mineral reducido proveniente de la planta de hornos.

### Datos técnicos

Diámetro.....3,9 m  
Altura.....3,3 m  
Capacidad.....40 m<sup>3</sup>  
Cantidad..... 2 por planta

### **1.2.1.2. Bomba Centrífuga Morris**

#### **Datos Técnicos**

Modelo: 8GA-23

Caudal: 800 m<sup>3</sup>/h.

Altura de Carga: 41 m

Frecuencia de rotación: 880 rpm

Potencia: 150Kw

Polea Motriz: SK-C

Polea Conducida: SK-C

Rodamiento: No 22328

Voltaje: 2300 V

Peso de un motor: 1000 Kg

Peso total de una bomba, incluyendo el motor: 4500 kg

### **1.2.1.3. Bomba Centrífuga Wilfley**

#### **Datos Técnicos**

Modelo: K5

Caudal: 290 m<sup>3</sup>/h.

Altura de Carga: 36 m

Frecuencia de rotación: 1800 rpm

Potencia: 55Kw

Voltaje: 440 V

Corriente: 116 A

Polea con adaptador cónico

Usa 4 correas en V. C-110

Diámetro polea motor: 9"

Diámetro polea conducida: 340

Peso de un motor: 300 Kg

Peso total de una bomba: 800 Kg

### 1.2.2. Afectaciones al proceso por el problema de bombeo.

En investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones del Níquel, se detectó que las operaciones de la planta, en el área de los contactos se vio regida por el caudal que se podía bombear con una Morris y no por los parámetros de operación del área, afectando esto en lo fundamental las densidades que se manifestaron en valores superiores a 1200 g/l, debido a la disminución del licor introducido en los tanques para formar la pulpa, siendo esta una de las causas de las bajas extracciones en primera etapa. También se incrementó considerablemente la cantidad de agua incorporada al sistema por el concepto de lavado de líneas (70 m<sup>3</sup>) al averiarse las bombas Morris con mucha regularidad, esto se puede apreciar en la figura 1.2. Esto repercutía directamente en la concentración de (NH<sub>3</sub>).

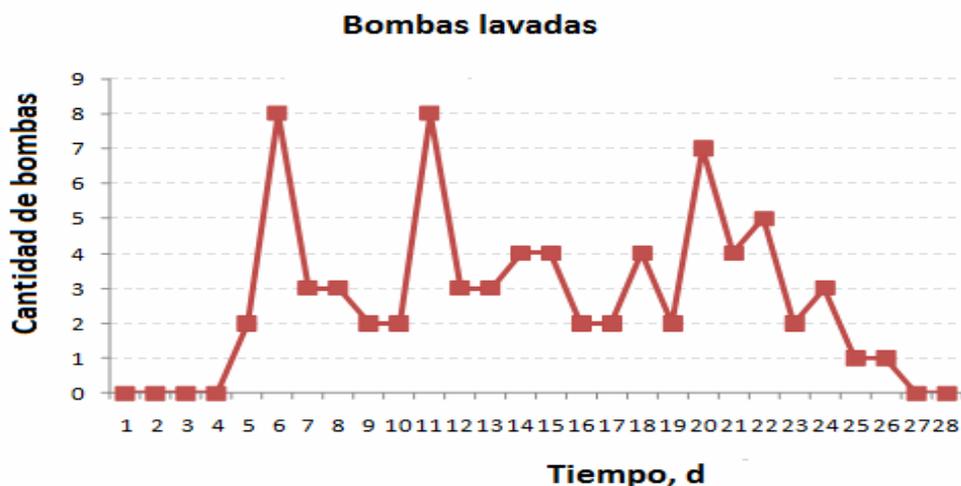


Figura 1.2 Bombas lavadas

En la figura se muestra la cantidad de bombas Morris lavadas en el transcurso de 28 días de trabajo en el área de tanques de contacto.

### 1.1.3 Pérdidas por derrame en el área de contactos.

En el área de tanques de contacto se analizan las pérdidas de Níquel (Ni) y Amoníaco (NH<sub>3</sub>) durante el período de Enero – Agosto, causadas por los derrames causados por las bombas Morris ver Figura 1.3.

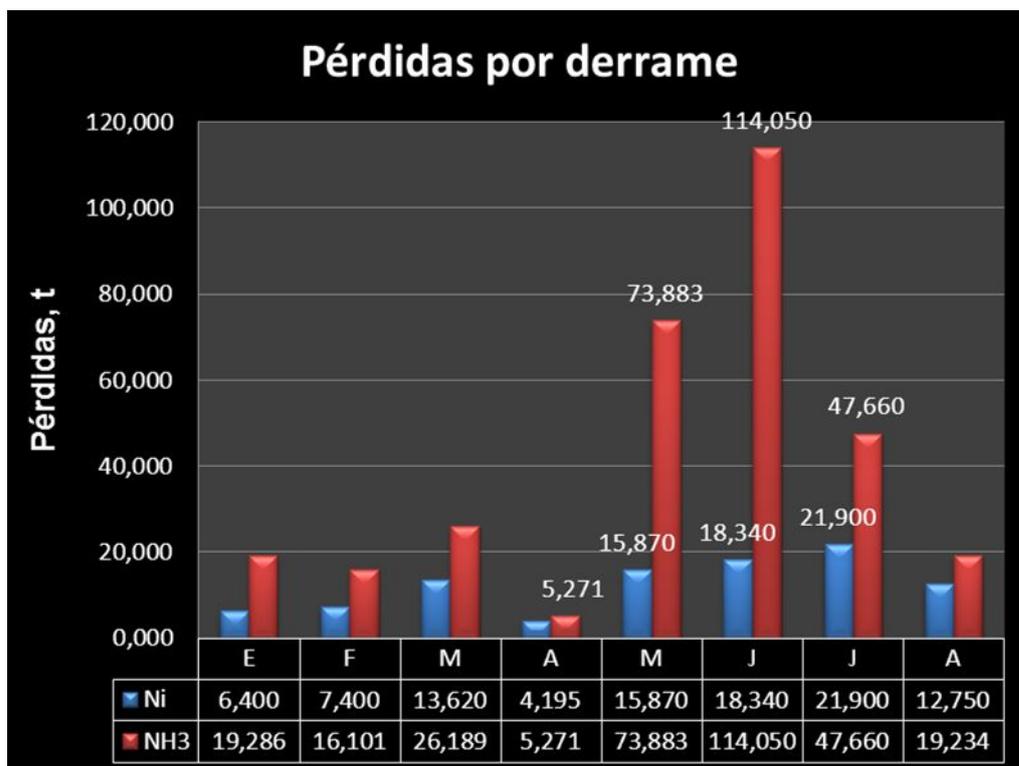


Figura 1.3 Pérdidas por derrame.

En la figura se puede apreciar las pérdidas por derrame en el área de tanques de contacto (punto 12), por averías en las bombas Morris. Donde las mayores pérdidas se encuentran en los meses de Mayo y Junio, alcanzando valores, de Níquel 15.870 y 18.340 t y amoníaco 73.883 y 114.050 t respectivamente.

### 1.3. La cavitación en bombas centrifugas

La cavitación o aspiraciones en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la

conservación de la constante de Bernoulli. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que los componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o cavidades. Las burbujas formadas viajan a las zonas de mayor presión e implosionan, el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, comprimiéndose bruscamente las burbujas y produciendo una estela de gas y un arranque de metal de la superficie en la que se origina este fenómeno.

Existen varios factores que intervienen en la cavitación, entre ellos:

- Cantidad de aire disuelto en el líquido.
- Respuesta del material a la velocidad de erosión por cavitación y su acabado superficial.
- Altura de aspiración de la instalación para un caudal (Q), altura (H) y una frecuencia de rotación dada (n).
- Altura neta de succión (NPSH).

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

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

- Newtonianos
- No newtonianos

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

Los fluidos no Newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, y por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras

condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no Newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos.

#### **1.4.1. Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y las propiedades reológicas de las dispersiones de minerales.**

Cuando un sólido es dispersado en un líquido, la viscosidad de la suspensión realmente se incrementa. La dispersión puede exhibir características de flujo newtoniano o no newtoniano, dependiendo de las interacciones físicas y químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido, así como la naturaleza y características de las fases.

En la literatura especializada se analizan diversos tipos de interacciones:

- Interacciones hidrodinámicas entre el líquido y las partículas sólidas dispersas, las cuales incrementan la disipación viscosa en el líquido.
- La atracción entre las partículas, que dan lugar a la formación de flóculos, agregados y estructuras.
- El contacto partícula – partícula, el cual es la causa de las interacciones de fricción.

Además de estas interacciones existe un número de factores que ejercen gran influencia sobre la reología de las suspensiones.

##### **1.4.1.1. Efecto de la concentración de sólido**

En general en las dispersiones diluidas el comportamiento es newtoniano dada la poca interacción de la partícula al estar alejada una de otra. En cambio, en las suspensiones concentradas la estadidad de la cercanía entre las partículas es grande lo que contribuye a la floculación y a la formación de estructura, por consiguiente a la aparición de comportamiento no newtoniano.

En estudio realizado con anterioridad con pulpa se pudo determinar que para concentraciones menores a un 18 % en peso de sólido, las curvas de fluido obtenidas prácticamente son independientes de su composición y exhiben un comportamiento seudoplástico.

Para concentraciones alrededor del 22 – 23 % en peso de sólido, el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas y a medida que se aumenta la concentración de sólido hasta 45 %, la viscosidad aumenta dependiendo cada vez más de la composición, y el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo Bingham, en algunos casos. O al de Bulkley – Herschel, en otros.

**Tabla 2.2:** Valores de los parámetros de los modelos reológicos de Oswald de Waele y de Bingham, para la pulpa a la temperatura de 23 °C

Concentración de sólido (%)	Parámetros - Reológicos			
	<b>K</b> (Pa.s)	n (adimen)	o (Pa)	p (Pa.s)
30%	0,092609	0,64	-	-
35%	0,1037132	0,63	-	-
40%	-	-	0,477077	0,020144
45%	-	-	0,5269659	0,022396
50%	-	-	1,1104501	0,035627
60%	-	-	9,146822	0,036244

#### 1.4.1.2. Efecto de la granulometría.

En el trabajo realizado por Garcell L. R. se pudo confirmar que las pulpas preparadas con partículas mayores de 90 µm no logran formar una estructura y muestran un comportamiento newtoniano. En cambio, las preparadas con mezclas de partículas inferiores a 50 µm forman una estructura que brinda a la suspensión propiedades plásticas, pudiendo ajustarse su curva de flujo al modelo de los plásticos Bingham.

En general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas cuyas partículas poseen propiedades magnéticas en que ocurre lo contrario, como es el caso de las pulpas.

La clasificación granulométrica realizada a las pulpas muestra que las partículas de tamaño menor de los 44  $\mu\text{m}$  son mayoritarias, y constituyen más del 85 % del volumen de la fase sólida de la mayoría de las muestras investigadas. Este tamaño de partícula puede alcanzar valores de concentración comprendidos entre el 91 y 05 % en peso, influyendo grandemente en el comportamiento de las pulpas en los procesos de sedimentación.

#### **1.4.1.3. Efecto de la temperatura**

Se han efectuado muy pocos estudios acerca del efecto de la temperatura en el caso de suspensiones, uno de ellos es el realizado por Cerpa A. donde de acuerdo con los resultados obtenidos se confirman que el esfuerzo cortante y la viscosidad, así como los demás parámetros reológicos, disminuyen al aumentar la temperatura.

En general, la disminución de los parámetros reológicos y, por tanto, de la viscosidad, al aumentar la temperatura, es el comportamiento típico esperado en la mayoría de los líquidos y suspensiones.

- La temperatura influye en el tiempo de servicio de la instalación y en las propiedades del material. Esta se mide con un termómetro o termopar ubicado en la succión de la bomba, de tal forma que permita comprobar que el fluido a transportar llegue con los valores indicados, realizando 6 mediciones por un período de 3 meses.

#### **1.4.2. 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.

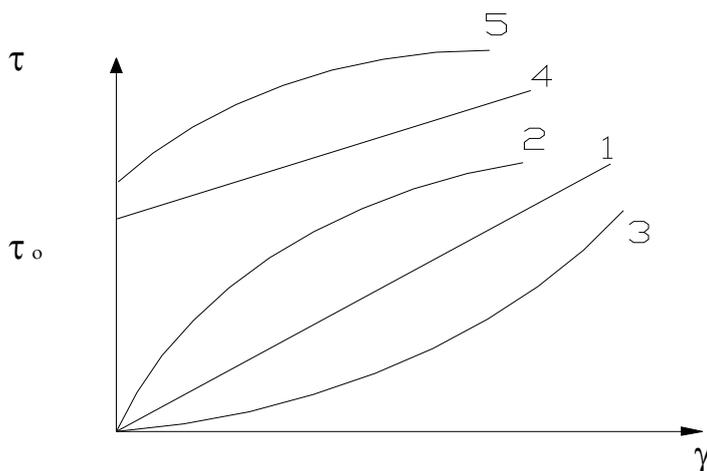


Figura 1.3: Curvas de flujo típica: 1- Newtonianos; 2- Seudoplásticos; 3- Delatantes; 4- Plástico ideal (Bingham); 5- Plástico real.

(Garcell, 2003)

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

### 1.5. Pérdida de energía hidráulica en tuberías y accesorios

Las pérdidas de energía en tuberías y canales se producen como resultado de la fricción entre el líquido y las paredes de la tubería y entre las capas de líquido propiamente dicho, como resultado de lo cual, parte de la energía hidrodinámica se convierte en calor, que se trasmite al medio circundante a través de las paredes de la tubería o canal. Se distinguen las pérdidas en los tramos rectos y en tramos donde el sentido de movimiento o la velocidad del fluido cambian bruscamente. En estos tramos quedan delimitadas las denominadas resistencias locales (codos, válvulas, platillos de orificio para la medición del gasto, etc.).

### **1.6. Trabajo de las bombas para las redes.**

Al elegir la bomba, es necesario tener en cuenta las características de la red, es decir, de la tubería y aparatos, por donde se transporta el líquido. La característica de la red expresa la dependencia entre el caudal de líquido (Q) y la altura de elevación (H), necesaria para transportar el líquido por la red dada. La altura de elevación se puede definir como la suma de la altura geométrica de carga (Hg) y de las pérdidas de carga (hp).

### **Conclusiones parciales**

En este capítulo se hizo una revisión bibliográfica del tema.

Se analizó del fenómeno de cavitación, características de la instalación actual la cual está sobre diseñada para los volúmenes de pulpa actual, por lo que se decidió elaborar una variante que satisfaga las alternativas tecnológicas requeridas.

Las pérdidas de níquel y amoníaco por concepto de derrame se incrementaron por la situación presentada en las bombas Morris.

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.**

En la realización de cualquier investigación es de vital importancia la utilización de las metodologías y métodos apropiados para lograr una mayor veracidad de los resultados esperados. Los métodos y materiales empleados en el objeto de estudio permiten detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos que están presentes en la investigación. Definir los materiales y métodos que se utilizarán en cualquier investigación es de suma importancia pues estos definirán el cumplimiento de los objetivos trazados para dicha investigación, es necesario establecer los lineamientos a seguir para llegar a obtener los resultados.

### **2.1. Características de la pulpa**

La pulpa es un producto de una mezcla de mineral reducido y  $(\text{NH}_3)$  amoníaco el cual se somete al proceso de Lixiviación, de color negro grisáceo.

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

Basado en algunas de las investigaciones realizadas tanto en centros de investigaciones como en la misma industria “Comandante René Ramos Latour” podemos decir que:

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

El tanque o Mezclador donde esta se almacena se observaran las incrustaciones provocado por la misma.

La pulpa que es bombeada posee características peculiares tales como es la densidad de la misma, así como el gran por ciento de amoniaco presente.

Concentración.....NH<sub>3</sub> – 57 a 65 g/L; CO<sub>2</sub> –30 g/L; Ni - 1.14 g/L;  
Co – 1.0 a 1.04 g/l.

Densidad..... 1,14 kg/L o 1140 g/L

Temperatura..... 36 a 40 °C

PH..... 8 ÷ 9

Viscosidad.....1 cP

Relación sólido líquido.....0.263/5 (por cada 0.263 m<sup>3</sup> de sólido hay 5 m<sup>3</sup> de líquido).

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

Sólido..... Mineral Reducido

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

Temperatura de descarga 190 °C en planta nueva y 280 en planta vieja.

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

Contenido de agua aproximadamente 55 % de amoníaco

Líquido..... Amoníaco (NH<sub>3</sub>)

## **2.2. Metodología de cálculo**

### **2.2.1. Curva característica de la bomba**

El cálculo de la nueva instalación se realiza con el fin de utilizar las bombas Wilfley instaladas en planta vieja que son de menor caudal y menor consumo de energía y se encuentran en existencia 28 de estas. Además se posee las condiciones para reparar cada uno de sus componentes y ensamblarlas en la empresa. Estas bombas

por diseño trabajan a ( $n=1800$  rpm) y trasegando pulpa, la curva característica de la bomba es la que se muestra a continuación.

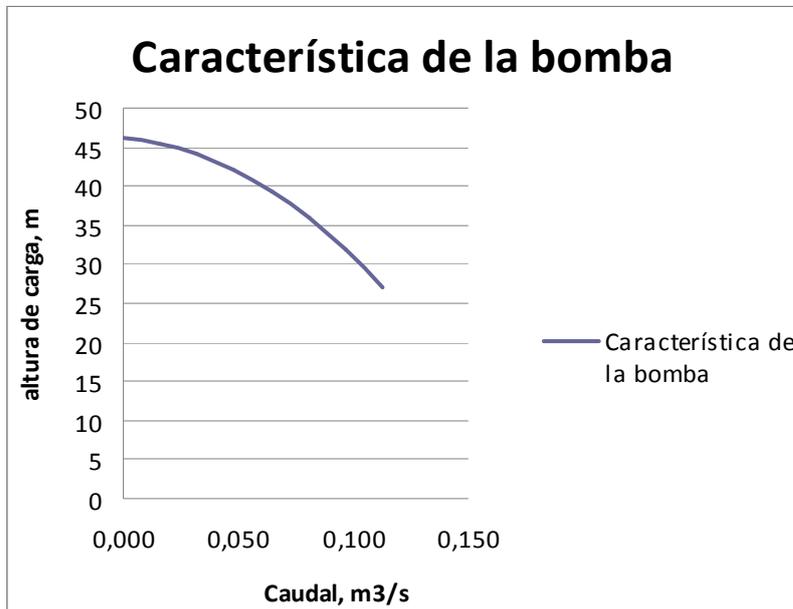


Figura 2.1 Curva característica de la bomba para  $n=1800$  rpm.

### 2.2.2. Cálculo de la nueva curva característica para la frecuencia de rotación $n = 1600$ rpm.

Como las bombas existentes en la instalación de bombeo de pulpa no trabajan en el número de revoluciones para la cual se construyó la curva característica de estas. En este caso la curva de la bomba sufre cambios en su comportamiento.

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

La cantidad de flujo entregado, varía directamente con la velocidad de rotación.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \tag{2.1}$$

Las cargas varían directamente de acuerdo con el cuadrado de la velocidad de rotación.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{(n_1)^2}{(n_2)^2} \quad 2.2$$

Como consecuencia de las dos leyes anteriores, la potencia necesaria variará tanto como el cubo de la velocidad de rotación.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{(n_1)^3}{(n_2)^3} \quad 2.3$$

### 2.2.3. Cálculo del diámetro de la tubería

Para realizar este cálculo es de vital importancia conocer que la velocidad crítica relaciona el punto de equilibrio entre la velocidad de sedimentación y la velocidad de transportación, esta tiene en cuenta las propiedades del fluido a transportar, las características geométricas de la tubería y la aceleración de la gravedad. Según Caballero (2008) la velocidad de transporte de la pulpa de la empresa Ernesto che Guevara debe estar entre 1,1 y 4,2 m/s para evitar la sedimentación de las partículas y no ser muy alta para evitar desgaste de las tuberías, por la similitud de las propiedades de la pulpa con la de nuestra investigación se toman estos valores para realizar el cálculo del diámetro de la tubería de nuestra instalación, en el cual se fija el valor de la velocidad en 1,5 y se hace variar el caudal para obtener varios valores de diámetros, calcular el promedio y estandarizarlo según los fabricantes y luego comprobar que el diámetro seleccionado cumpla con las especificaciones de la velocidad antes mencionada.

El diámetro de la tubería según (Kasatkin, A.N 1987), se determina:

$$Q = A \times V \quad (2.4)$$

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (2.5)$$

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} \times V \quad (2.6)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V}} \quad (2.7)$$

Con:

A: área de la tubería (m)

D: diámetro de la tubería (m)

Q: flujo (m<sup>3</sup>/s)

V: velocidad del fluido (m/s)

Para comprobar el valor del diámetro se realiza por la ecuación 2.4, al despejar la velocidad y sustituyendo el valor ya estandarizado del diámetro.

#### **2.2.4. Cálculos para determinar la curva característica de la red.**

Los cálculos para la curva característica de la red se realizan para las dos plantas en este caso se representa en este capítulo el calculo para planta nueva y de igual manera se procede para planta vieja ya que las condiciones son semejantes, diferenciándose solo en el caudal a bombear por tener en esta plata un horno mas, y la distancia hasta el distribuidor es de 175 m.

Una vez determinado el diámetro de la tubería que se va a instalar se procede a determinar la curva característica de la red según la ecuación.

$$H_s = h_{st} + (P_d - P_s) + h_p \quad 2.8$$

Donde:

H<sub>s</sub> carga de la red, m;

h<sub>st</sub>: altura estática, m;

P<sub>d</sub>: presión en la descarga, m;

P<sub>s</sub>: presión en la succión, m;

h<sub>p</sub>: altura de pérdida, m.

### 2.2.5. Cálculo de las pérdidas de carga por fricción

Las pérdidas de carga por fricción, se definen como las pérdidas de energía del fluido por el roce entre moléculas de agua y con las paredes de la tubería. Están relacionadas con las pérdidas por fricción, la velocidad media, aceleración de la gravedad, longitud y diámetro de la tubería.

Según Pavlov (1981), se determina por:

$$h_{p_{fr}} = \frac{\lambda \cdot L}{d_{eq}} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad (2.9)$$

Donde:

$h_{p_{fr}}$  pérdidas de carga por fricción, m;

$\lambda$ : coeficiente de fricción;

L- longitud de la tubería, m;

$d_{eq}$ - diámetro interior de la tubería, m;

w- velocidad media, m/s;

g- aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>;

El coeficiente de rozamiento  $\lambda$  se determina en la figura 1-5 según Pavlov (1981)

$$\lambda = f(\text{Re y } d_{eq} / e)$$

Donde:

Re: criterio de Reynolds;

$d_{eq}$ : diámetro equivalente, m;

e: coeficiente de rugosidad de la tubería, mm.

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot w \cdot d_{eq}}{\mu} \quad 2.10$$

Donde:

$\rho$  : densidad del líquido, kg/m<sup>3</sup>;

w: velocidad, m/s;

$\mu$  : viscosidad, Pa·s.

Cálculo de la velocidad

$$w = \frac{V}{F}$$

Donde

V: caudal, m<sup>3</sup>/s;

w: velocidad del fluido, m/s;

F: área de la sección circular; m<sup>2</sup>.

### 2.2.6. Cálculo de las pérdidas de carga por resistencias locales.

En el cálculo de las pérdidas por resistencias locales hay que tener en cuenta la cantidad de accesorios que se encuentran instalados en la red y a cada accesorio le corresponde un valor de resistencia local que se toman según Perry (1984), la relación de estos se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Relación de accesorios y coeficiente de resistencias locales

Accesorios	Coefficiente de resistencia local ( $\xi$ )	Cantidad	total
Codos de 90°	0,090	8,000	0,720
Codos de 45°	0,240	5,000	1,200
Codos de 30°	0,300	2,000	0,600
Coefficiente de salida	1,000	1,000	1,000
Coefficiente de entrada	1,000	1,000	1,000
Válvula de bola	0,050	1,000	0,050
Total	2,680	18,000	4,570

Para planta vieja la diferencia de accesorios es pequeña solo se aumenta un codo de 90° y se disminuye otro de 45°.

Según Pavlov (1981), el valor de pérdidas en cuestión se determina por la siguiente ecuación:

$$h_{p_{rl}} = \sum \zeta \cdot \frac{w^2}{2g} \quad 2.11$$

Donde:

$H_{p_{rl}}$ : pérdidas de carga por resistencias locales, m;

$\zeta$ : coeficiente de resistencia local;

w: velocidad media, m/s;

g: aceleración de la gravedad,  $m/s^2$ .

Luego de calcular la altura de perdida, para conformar la curva es necesario repetir el cálculo pero para diferentes caudales con el objetivo de obtener varios datos y poder realizar la curva.

Luego de tener las dos gráficas es decir la curva de la bomba y la de la red se hacen intersectar para conocer cuál es la altura y caudal de la bomba para esta red.

A partir del caudal determinado para esta red, se determina la cantidad de bombas que se necesita para trasegar el gasto de pulpa generada en los tanques de contacto.

### **2.2.7. Cálculo económico**

Para realizar el cálculo económico se tomaron las pérdidas de Níquel y Amoniaco en el área de contacto, tomadas de la estadística de operación de la planta, estas pérdidas se multiplicaron por los precios medios de estos productos en el año 2012. También se calculó el costo de la nueva instalación buscando en internet los precios de los accesorios y tuberías. Se analiza además el consumo de energía de los motores de las nuevas bombas en planta nueva con respecto a las instaladas actualmente.

### **Conclusión Parcial.**

En este capítulo se definieron los materiales y métodos a utilizar, para la creación de la curva característica de la bomba para la red dada.

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

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

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones desarrolladas que han permitido proyectar un sistema de bombeo de pulpa, desarrollando además una documentación técnica que avala las soluciones constructivas utilizando las normas internacionales y las experiencias acumuladas en la ejecución de otros proyectos similares en sistemas de transporte de fluidos en tuberías y evaluando criterios tecnológicos de la instalación que permitieron definir la mejor variante de diseño para el trazado, interconexión y montaje del equipamiento y redes de tuberías.

### **3.1. Cálculo de la curva característica de la bomba para $n = 1600$ rpm.**

Las bombas Wilfley para una frecuencia de rotación 1800 rpm y transportando pulpa poseen las características antes mencionada pero en la instalación van a trabajar con una frecuencia de rotación de 1600 rpm por lo que las características de esta varían, para determinar estas características se van a utilizar las ecuaciones 2.1 y 2.2 como se muestra a continuación.

Según el criterio de semejanza la cantidad de flujo entregado, varía directamente con la velocidad de rotación. Por lo que si se varía el caudal según los datos de la curva anterior podemos obtener una semejanza.

#### **3.1.1. Cálculo del caudal de la bomba.**

Cuando el caudal de la bomba era  $0,016 \text{ m}^3/\text{s}$  para la frecuencia de rotación de 1800 rpm, en la nueva frecuencia es:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$Q_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot Q_1$$

$$Q_2 = \frac{1600}{1800} \cdot 0,016 \quad \frac{rpm}{rpm} \cdot m^3 / s$$

$$Q_2 = 0,014 \text{ m}^3 / s$$

De igual forma se determina para los caudales 0,048; 0,081 y 0,113 m<sup>3</sup>/s y se obtuvieron los valores 0,043; 0,072 y 0,100 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

### 3.1.2. Cálculo de la altura de carga.

Es necesario determinar también la carga de la bomba para poder realizar la curva, y ella se determina de igual manera que el caudal pero con la ecuación 2.2, para los valores de 45, 42, 36 y 27 se obtuvieron los valores de 35,951; 33,185; 28,444 y 21,333 respectivamente.

Una vez determinado los valores de caudal y altura de carga se procede a realizar el gráfico, que según los datos obtenidos tendría esta forma.

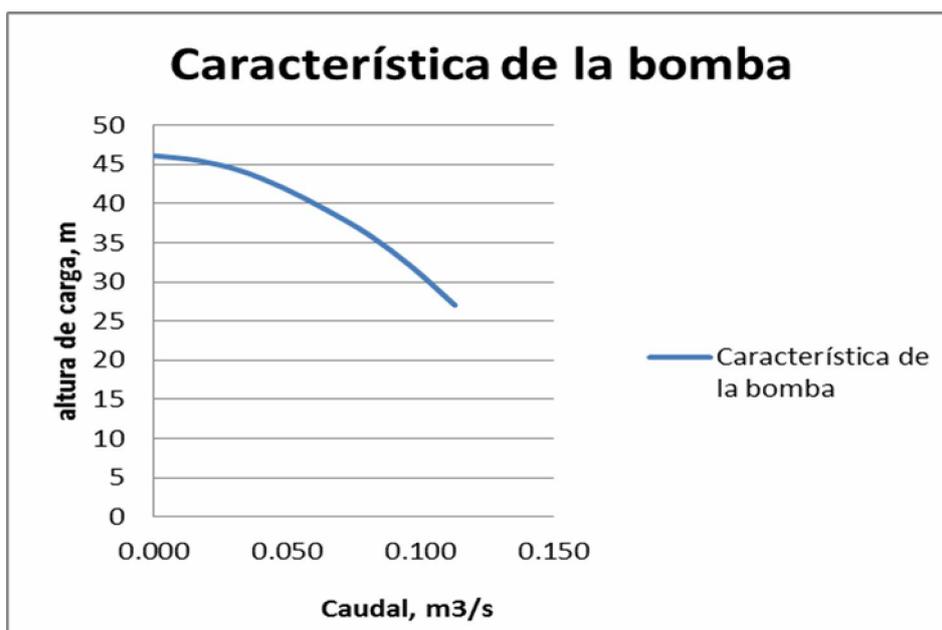


Figura 3.1 curva característica de la bomba para  $n = 1600$  rpm.

### 3.2. Cálculo del diámetro de la tubería

El cálculo del diámetro de la tubería se realiza por la ecuación 2.7.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.043}{3.14 \cdot 1.5}} \quad \sqrt{\frac{m^3 / s}{m / s}}$$

$$d = 0,191m$$

Para una velocidad del fluido de 1,5 m/s, se variaron los datos del caudal a bombear a través de la instalación en los valores de 206; 257 y 309 m<sup>3</sup>/h obteniéndose como resultado los siguientes valores de diámetros 0,221; 0,247 y 0,270 m respectivamente, con un diámetro promedio para la tubería de 232 mm, al estandarizar el valor se determinó escoger, 200 mm. Con este diámetro y al utilizar la ecuación 2.4 se determinan los valores reales de velocidad que posee el flujo en la tubería y estos son 1,362; 1,825; 2,283 y 2,738 m/s, para los caudales antes mencionados y que se encuentran dentro de los valores recomendados por Caballero (2008).

### 3.3. Cálculos para determinar la curva característica de la red.

La curva característica de la red se realiza mediante la ecuación 2.8, donde la altura estática de la instalación es 22 m, según mediciones realizadas, no existe diferencia de presiones apreciables, puesto que se trabajan con presiones atmosféricas y para determinar la altura de pérdida se procede de la forma siguiente.

#### 3.3.1. Cálculo de las pérdidas de carga por fricción

Debido a que los demás valores de la ecuación 2.8 no varían con el caudal, el cálculo de las pérdidas por fricción se realiza para varios valores de caudal con el objetivo de encontrar el comportamiento de la red al variar esta variable.

Las pérdidas por fricción se calculan por la ecuación 2.9 y esta su vez depende del coeficiente de rozamiento ( $\lambda$ ) que se encuentra en la figura 1-5 según Pavlov (1981) y se encuentra en el anexo 2, y para entrar al gráfico es necesario conocer el valor

del criterio de Reynolds y la razón diámetro equivalente ( $deq$ ) y la rugosidad de la tubería ( $e$ ).

### 3.3.1.1. Cálculo del criterio de Reynolds

El cálculo del criterio de Reynolds se realiza mediante la ecuación 2.10 y se desarrolla como sigue:

Este cálculo de pérdidas primeramente se realiza con un caudal de 257.778 m<sup>3</sup>/h o 0.072 m<sup>3</sup>/s, que es uno de los caudales que más se traba en la planta. Para este caudal anteriormente en el cálculo del diámetro se determinó la velocidad del fluido, que es 0.280 m/s.

$$Re = \frac{1140.000 \cdot 0.280 \cdot 0.2}{0.009} \quad \frac{\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{m} / \text{s} \cdot \text{m}}{\text{Pa} \cdot \text{s}}$$

$$Re = 57770,439$$

El valor de la rugosidad de la tubería se toma de la tabla XII según Pavlov (1981) se encuentra en el anexo 1, para tubos sin costura con corrosión insignificante  $e = 0.2$  mm.

$$deq / e = 200 / 0.2$$

$$deq / e = 1000.000$$

Una vez obtenido los estos valores se determina en la figura 1-5 del Pavlov (1981) el valor del coeficiente de resistencia local que para estos valores es 0,022; y al sustituir este resultado en la ecuación 2.9 se obtienen los siguientes resultados.

$$hp_{fr} = \frac{0,022 \cdot 196,000}{0,200} \cdot \frac{2,280^2}{2 \cdot 9.81} \quad \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}^2 / \text{s}^2}{\text{m} / \text{s}^2}$$

$$hp_{fr} = 5,714 \text{ m}$$

### 3.3.1.2. Cálculo de las pérdidas de carga por resistencias locales

Según la ecuación 2.11 y los datos tomados de la tabla 2.1 se realiza el cálculo de las pérdidas por resistencias locales.

$$h_{p_{rl}} = 4,570 \cdot \frac{2,280^2}{2 \cdot 9.81} \quad \frac{m^2 / s^2}{m / s^2}$$

$$h_{p_{rl}} = 1,211 \text{ m}$$

Ya calculada las pérdidas por fricción y resistencias locales se calculan las pérdidas totales que no es más que la suma de dichos valores y para la situación nuestra el resultado es 6,926 m y se sustituyen la ecuación 2.8 con el fin de obtener la carga de la red a ese caudal.

De igual forma se procede para caudales de 0; 100; 200; 360 y 420 m<sup>3</sup>/h y se obtuvieron los siguientes resultados 22,000; 23,199; 26,325; 35.254 y 39,765 m respectivamente.

Al graficar estos resultados se obtiene la curva característica de la red, que muestra el comportamiento de la altura de carga en dependencia del caudal que se transporta por ella, dicha figura se muestra a continuación.

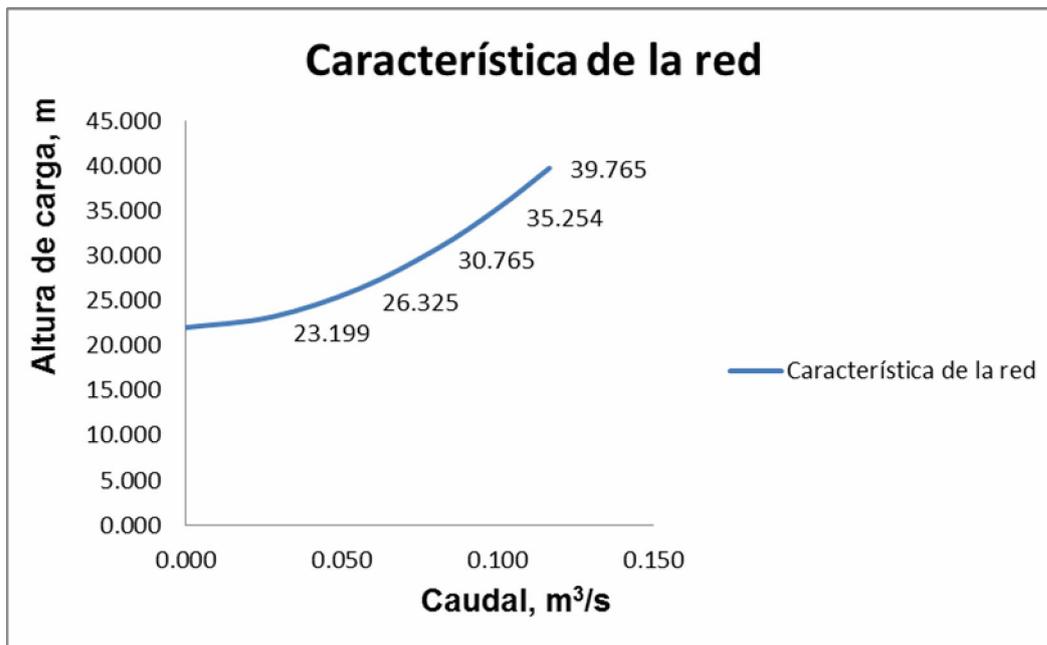


Figura 3.2 Curva característica de la red.

### 3.4. Determinación del punto de trabajo de la bomba trabajando para la red dada.

Para obtener el punto de trabajo de la bomba conectada a la red es necesario hacer coincidir las curvas de la bomba con la de la red, como se muestra más adelante en

la figura 3.3, donde se puede observar que el caudal máximo de la bomba trabajando para esta red es  $0.070 \text{ m}^3/\text{s}$  o  $256 \text{ m}^3/\text{h}$  y altura de carga de  $28.500 \text{ m}$ , también se garantiza que las bombas alcancen la altura deseada para la instalación que es de  $22 \text{ m}$ .

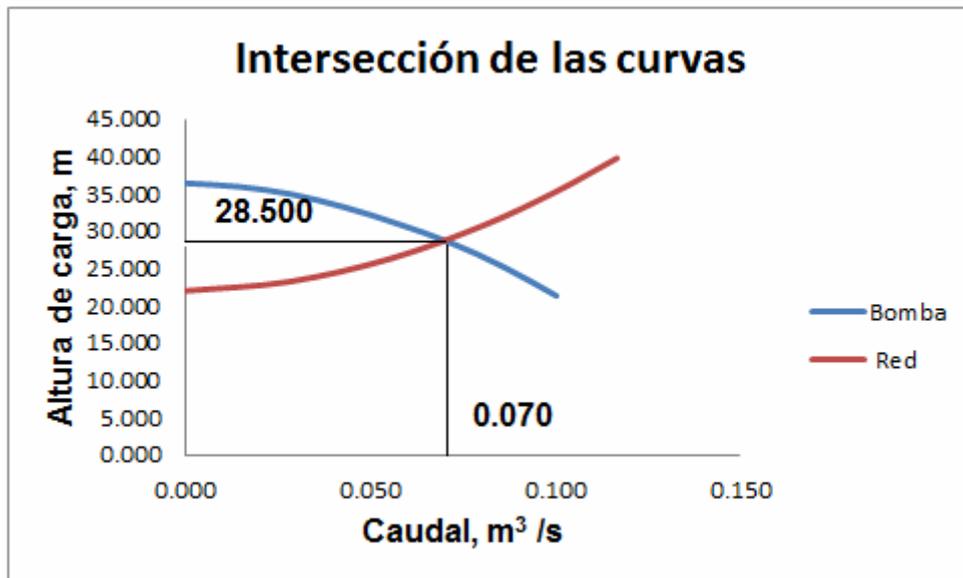


Figura 3.3. Combinación de la característica de la red y de la bomba.

A partir de estos resultados, y como cada bomba trabaja para una red independiente, en dependencia del tonelaje procesado en la planta de hornos podemos transportar el flujo generado en los contactos de planta nueva con tres bombas en operación para cuando el caudal sea mayor a  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ , cuando el caudal sea menor a  $499 \text{ m}^3/\text{h}$  y superior a  $256 \text{ m}^3/\text{h}$  se utilizaría dos bombas con la salida estrangulada para evitar que se presente la cavitación en las bombas, cuando el flujo sea menor a  $256 \text{ m}^3/\text{h}$  solo se utilizara una bomba en operación.

En planta vieja se cuenta con un horno mas es decir se genera un flujo mayor de pulpa con características similares, al analizar las condiciones de bombeo de ambas plantas las diferencias de longitudes no influyen apreciablemente en los resultados y el aumento del caudal está dentro de los rangos con los que se construyó la curva de la red, el máximo caudal manejado en esta planta fue de  $631 \text{ m}^3/\text{h}$ , pero normalmente se trabajan valores de  $426$  a  $521 \text{ m}^3/\text{h}$ . pues las operaciones realizadas son similares a la instalación de planta nueva.

### 3.5. Propuesta de la nueva instalación

La planta de hornos de reducción cuenta con dos plantas, planta vieja y planta nueva, estas plantas tienen en operación en condiciones no especiales entre dos a seis unidades, en planta vieja y entre dos a cinco en planta nueva generando un flujo de mineral a las canales del área de contacto entre 40 a 120 t/h, en planta vieja y entre 40 a 100 t/h en planta nueva, para garantizar la relación líquido sólido en los contactos se bombea entre 120 a 600 m<sup>3</sup> de licor a las canales de ambas plantas, descargando estas a dos Tanques de Contactos o (Mezcladores) en cada planta.

Debido a los cálculos realizados se propone independizar las dos plantas, es decir que las cuatro bombas Wilfley instaladas en planta vieja en vez de transportar el flujo para planta nueva, lo envíen directo a la caja distribuidora, cada una con una red de 200 mm y estas bombas trabajando para esta red garantiza cada una un caudal de 256 m<sup>3</sup>/h. En planta nueva se deben instalar cuatro bombas Wilfley cada una también instalada a una red de 200 mm. Con un caudal de 256 m<sup>3</sup>/h. Con esta propuesta se eliminarían las bombas Morris reduciendo las pérdidas de (Ni) níquel y (NH<sub>3</sub>) amoníaco considerablemente.

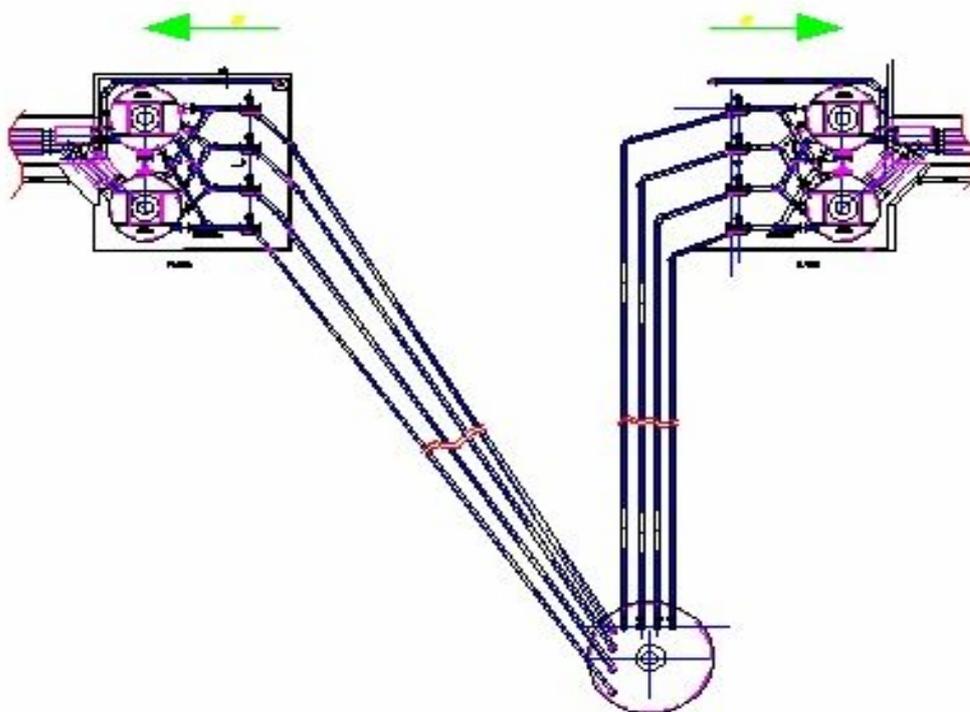
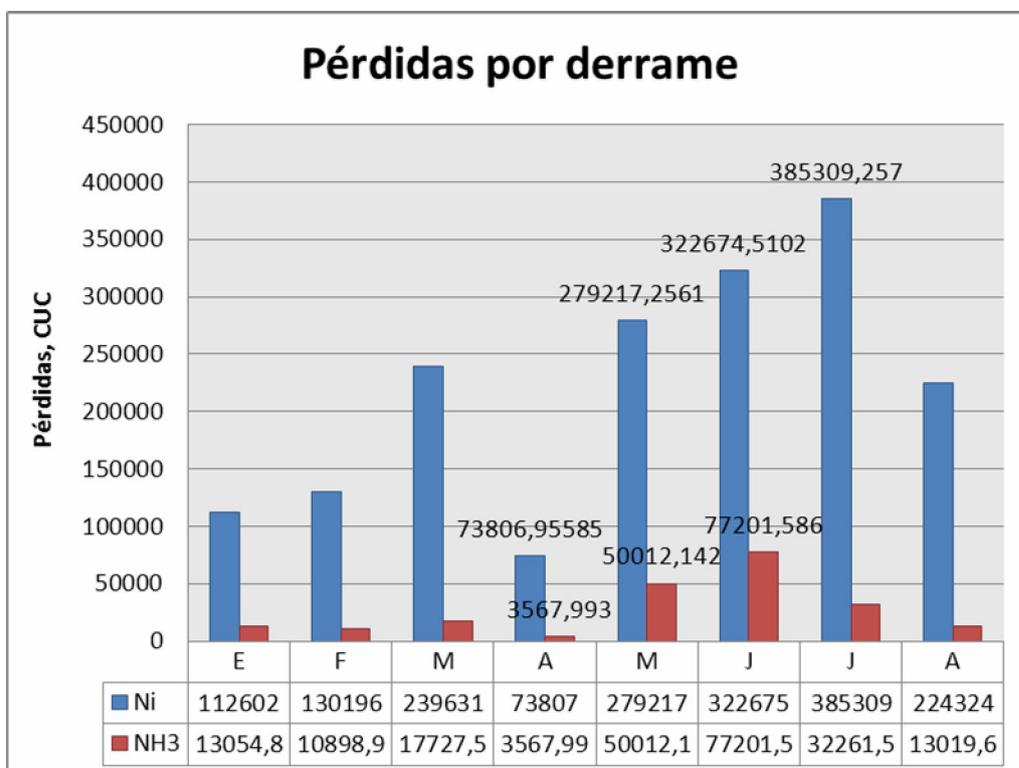


Figura 3.4 Propuesta de instalación.

### 3.6. Valoración económica.

En la grafica 3.1 podemos apreciar las perdidas que en divisas causadas por conecto de derrame de níquel y amoniaco en los contactos de la empresa, por las averías continuas de las Morris, en los meses de Enero a Agosto del año 2012. Calculándose con las pérdidas en toneladas de estos productos y multiplicada por los precios promedios de estos durante todo el año para el níquel 17594,03 cuc y para el amoniaco 676.91 cuc. Con los valores mas significativos por concepto de derrame de níquel en los meses de Mayo, Junio y Julio con 279217; 322674 y 385309 cuc respectivamente. Por concepto de amoníaco podemos de igual manera ver los valores más alarmantes en los meses de Mayo y Junio con 50012 y 77201 cuc respectivamente. Las perdidas totales del periodo fueron de 1985504 cuc.

Estas pérdidas no se recuperarían el 100 % pero se alcanzarían altos valores de recuperación ya que se eliminarían las bombas Morris y la cavitación que estas presentan. Al instalar las bombas Wilfley estas operan con mayor eficiencia y averías mínimas.



Grafica 3.1 Pérdidas cuc por concepto de derrame.

### **3.6.1. Ahorro por concepto energético.**

Al instalar la nueva propuesta, por concepto de energía se ahorra 190 KW, ya que se eliminarían dos bombas Morris de operación con un consumo de 150 KW cada una y se eliminaría también el doble bombeo al bombear directamente de planta vieja al distribuidor y no para planta nueva como se realizaba anteriormente. Solamente quedarían operando dos bombas con motores de 55 KW en cada planta y se pondría una tercera solo cuando estén trabajando las plantas a máxima capacidad.

### **3.7. Impacto medioambiental**

La Empresa “Cdte. René Ramos Latour” de Nicaro está enfrascada en un proceso de modernización de todas sus áreas, con vistas de lograr un incremento de la eficiencia metalúrgica del níquel y el cobalto y una disminución de los costos de operación para hacerse más competitiva con respecto a otras plantas similares en el mundo.

En los últimos años el impacto del medio ambiente a nivel mundial ha despertado una mayor conciencia ecológica y el sentir de la necesidad imperiosa de preservar la naturaleza. La instalación estudiada no esta ajena a los programas actuales de cuidado del medio ambiente es por ello que se tiene como objetivo principal en este capitulo, la valoración económica para un correcto funcionamiento y el impacto medio ambiental de la nueva instalación.

La planta de níquel “Comandante René Ramos Latour”, durante más de 68 años de explotación ha producido un gran impacto negativo sobre el medio ambiente Esta es una de las razones por las que para llevar a cabo este trabajo, se ha tenido en cuenta el cumplimiento de leyes y regulaciones medioambientales como es el caso de la Ley 0033-981.

La ley 81 del medio ambiente, establece los principios que rigen la política ambiental y las normas básicas para regular la gestión ambiental del estado y las acciones de

los ciudadanos y la sociedad en general, a fin de proteger el ambiente y contribuir a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible del país.

Debido a problemas tecnológicos de diseño del proyecto original de la planta, y a un manejo ambiental inadecuado durante todo el periodo de explotación, se han originado afectaciones medioambientales severas relacionadas con el vertido de efluentes líquidos crudos, la gran disposición de los residuos sólidos; así como la emisión a la atmósfera de grandes volúmenes de polvo.

El análisis del estado actual del medio ambiente a partir de las transformaciones sufridas durante la evolución socioeconómica del territorio con la caracterización de los componentes de los medios físicos y bióticos, posibilitan determinar de forma preliminar la relación que se produce entre las acciones que provocan impactos y los factores ambientales.

El principal impacto que produce la ejecución de una nueva instalación de pulpa (cola), es la erosión de polvo de cola, gases amoniacales, otros componentes nocivos para la salud del hombre.

### **3.7.1. Efectos ambientales en la instalación de bombeo de pulpa**

Derrame en las tuberías por salidero de pulpa a raíz de roturas, provocando emisión de gases tóxicos al personal de operación y mantenimiento.

Sedimentación de pulpa en lugares donde se ha averiado el sistema, afectando la salud de las personas que se encuentran trabajando en el área.

Constantes averías de las bombas en el sistema de bombeo de pulpa hacia el distribuidor general de pulpa, provocando inmediateces y desprendimientos de gases y sedimentos del producto en la instalación.

Los operadores que participan en el sistema de bombeo de pulpa están expuestos a los gases tóxicos por los constantes escapes de pulpa desde el mezclador de la pulpa hasta el distribuidor general.

Medidas constructivas para eliminar estos problemas

Dar mantenimiento y conservación de todo el sistema de tuberías principalmente en las uniones y sellos.

Mantener la cultura industrial, eliminando toda la sedimentación de polvo de pulpa y cola derramado en la planta.

Corregir todos los salideros de pulpa de cola en toda la instalación (principalmente en la salida de las bombas).

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

El amoníaco, tanto el líquido como el vapor es fuertemente irritante para la piel, los ojos y las vías respiratorias.

El amoníaco es muy tóxico y la exposición a altas concentraciones puede producir quemaduras, cegueras y hasta la muerte.

Las concentraciones bajas de amoníaco pueden cortar la respiración, pero sin provocar efectos nocivos.

Las concentraciones medias de amoníaco pueden causar decaimiento, irritación, congestión, hinchazón o entumecimiento de las membranas mucosas de los ojos, nariz y garganta.

El líquido produce quemaduras graves, parecidas a las quemaduras cáusticas y estas varían de acuerdo con la concentración del amoníaco y del tiempo que se permanezca expuesta al mismo.

Cuando el amoníaco líquido se pone en contacto con la piel, produce congelación rápida e intensa en la zona afectada.

La ingestión del amoníaco líquido origina una acción corrosiva severa en la boca, la garganta y el estómago.

El amoníaco gaseoso tiene una gran acción irritante en cualquier tejido húmedo, la taquipnea y la taquicardia (agitación de la respiración y los latidos del corazón respectivamente), son algunos de los efectos originados por la irritación de las vías respiratorias, pudiendo llegar hasta detener la respiración.

El amoníaco inhalado solo produce efecto en los tejidos superficiales ya que no es absorbido por el organismo.

Debido a la alta solubilidad del amoníaco en el agua, éste tiene gran facilidad para disolverse en el sudor del cuerpo humano.

### **3.7.3. Afectaciones sufridas por el ruido en las instalaciones de bombeo en un régimen cavitacional**

En las bombas en su interacción con el medioambiente es bueno destacar que existe un nivel de ruido medio respecto a las Normas Internacionales establecidas por el Banco Mundial sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad. Si no se utilizan los medios de protección adecuados, se pueden producir daños profundos a la salud humana. De los tipos de ruido que podemos encontrar con mayor frecuencia y casi de forma permanente es el ruido transportado por el aire: Cuando se encuentra ruido excesivo dentro de un espacio, se necesita identificar la fuente. Esto puede obtenerse con un análisis espectral detallado. En la mayoría de los casos se utilizan técnicas de análisis de las bandas de octavo, divide las partes audibles de los espectro del ruido en las bandas adyacentes que tiene una frecuencia superior de corte iguales a dos veces la frecuencia inferior de corte.

#### **Conclusiones parciales**

Técnicamente resulta factible la utilización de la bomba Wilfley en sustitución de la bomba Morris por las siguientes razones:

La carga de altura que da la bomba para la red dada es mayor que la necesaria.

El flujo de pulpa que da la bomba en estas condiciones es mayor que el necesario, sin llegar a cavilar.

## **CONCLUSIONES**

Se realizó la modificación al sistema de bombeo de pulpas en el área de tanques de contacto de la empresa René Ramos Latour donde las cuatro bombas Wilfley instaladas en planta vieja se le conectaron una red de 200 mm a cada una que descarga a la caja distribuidora y en planta nueva se sustituyeron las bombas Morris por Wilfley y se le instalan una red de 200 mm de diámetro, cada una que descargan en la caja distribuidora.

Los cálculos que justifican la nueva modificación de bombeo arrojaron que es necesario instalar cuatro bombas Wilfley de 256 m<sup>3</sup>/h, en cada planta, dos en operación y dos de reserva, para transportar el caudal generado en los tanques de contacto.

Con la nueva instalación se logra disminuir apreciablemente las pérdidas por concepto de derrame y el consumo de energía consumido por los motores de las bombas instaladas, se eliminó el doble bombeo en planta nueva.

## **RECOMENDACIONES**

Diseñar un sistema de muestreo para llevar a cabo la contabilidad metalúrgica con la nueva propuesta, ya que se independiza el bombeo de ambas plantas.

Continuar el estudio de factibilidad económica teniendo en cuenta el costo de la inversión para fabricar la nueva propuesta de bombeo.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, A. Pérez, R. y Martínez, D., Mecánica de Fluidos, Editorial Universo Sur, Cuba 1996

BLASCO J.A. Propiedad reológica de los fluidos no newtonianos. Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza, 20/1/2004.

Brown, C.G.: Operaciones básicas de la ingeniería química. Edición Revolucionaria, 1965. pp. 87.

Caballero (2008) Caracterización de las pulpas generadas en los tanques de contacto de la empresa Ernesto Che Guevara para su hidrotransporte.

Camilo R (2010) ``Evaluación del sistema de calentamiento y bombeo sobre el residuo almacenado en la base de petróleo de la Empresa Puerto Moa``.

CHERKASSKI, V.M. "Bombas, Ventiladores y Compresores. Editorial Mir, Moscú, 1986.

Columbie O (2006) Estudio del transporte de fuel oil desde los tanques (Mazut) de resección hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa "Ernesto Che Guevara.

Crane, División de Ingenieros, Flujo de fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. Editorial:

Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada, Ediciones ISPJAM, Santiago de Cuba, 1990.

Dinámica de los fluidos, 16/2/2004. Disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/Din%E1mica\\_de\\_fluidos](http://es.wikipedia.org/wiki/Din%E1mica_de_fluidos)

[es.wikipedia.org/wiki/Cavitación](http://es.wikipedia.org/wiki/Cavitación)

GARCELL, L.R. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Facultad de ingeniería química. Universidad de Oriente. 1 – 40, 2001.

Gardea, H., “Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos”. Ingeniería, Investigación y Tecnología. 9(2) 17-26, 2008.

Guzmán, D., Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniaco. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2001. 124p

IZQUIERDO, P.R. Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Emp. Cmdte Pedro Soto Alba. Revista Minería y Geología. ISMM, Moa, 1989.

Izquierdo, R., Turro, A. y Nikolaev, A., “Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural”. Minería y Geología. 18(2) 53-59, 2001.

Karassik Igor: Bombas centrífugas. Edición Revolucionaria, 1968. pp. 39.

Kasatkin, A.N.: “ Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química ” Editorial Pueblo y Educación, 1987. pp. 138 – 210.

LAFITA MARTINEZ, L.A. Proyección de un sistema de hidrotransporte de pulpa abrasiva (cola) desde la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” hasta el nuevo depósito de cola. Trabajo de diploma. ISMM 2001.

Mecánica de los fluidos. Disponible en <http://homepages.mty.itesm.mx/jllopez/fra.htm>

Pakrovskaya, I., El transporte hidráulico en la industria minera. Nedra, Moscú, 1985.

PAKROVSKAYA. Transporte hidráulico de sólidos, 1985

Pavlov, K. (1981). Problemas y ejemplo para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. e. Mir. Moscú.

PÉREZ BARRETO, R.; S. MALIUK. Sobre la elección de criterios de semejanza hidrodinámica aplicadas al transporte hidráulico. Revista Minería y Geología (3), 1984.

PEREZ. Ensayos de cavitación de una bomba centrífuga (2000).

PERRY, J.H. Chemical engineers handbook. 6 ed. New York: McGraw Hill Book, 1984.

Reynosa L (2012). Impacto de la operación de bombeo de colas sobre la resistencia de las líneas instaladas y su vida útil

Rodriguez (2009) Propuesta de un nuevo sistema de hidrotransporte desde la Planta de Recuperación de Amoniaco hasta el nuevo depósito de colas.

SUAREZ. Artículo sobre movimiento de suspensiones en régimen turbulento. 1998.

TURRO, Artículo de flujo de las colas del mineral laterítico del proceso CARON, (2004).

TURRO, B.D.; Y.C. ZARZABAL. Metodología de investigación del transporte hidráulico aplicable a las condiciones de la industria del níquel. Trabajo de diploma, Facultad de Metalurgia Electromecánica, ISMM, 1997.

## ANEXOS

### Anexo 1

Valores medios de rugosidad de los tubos	
Tuberías	e, mm
Tubos de acero sin costura y tubos soldados con corrosión insignificante . . . . .	0,2
Tubos de acero viejos y herrumbrosos . . . . .	0,67 y más
Tubos de acero para techar tratados con aceite cocido . . . . .	0,125
Tubos de fundición de hierro ya usados para conducción de agua . . . . .	1,4
Tubos de aluminio técnicamente lisos . . . . .	0,015—0,06
Tubos de latón, cobre y plomo sin costura, limpios; tubos de vidrio . . . . .	0,0015—0,01
Tubos de hormigón enlucidos . . . . .	0,3—0,8
Tubos de hormigón sin enlucir . . . . .	3—9
Oleoductos en condiciones medias de explotación y conductos de vapor saturado . . . . .	0,2
Conductos de vapor de funcionamiento periódico . . . . .	0,5
Conductos de aire comprimido a la salida de un compresor . . . . .	0,8
Conductos de condensado de funcionamiento periódico . . . . .	1,0

# Anexo 2

