



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Antonio Núñez Jiménez"
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico



Título: Evaluación de los parámetros de la instalación de bombeo con bomba Warman 6/4, en la planta de Lixiviación de la empresa Comandante "Comandante Ernesto Ché Guevara".

Diplomante: Javier Arévalo Suárez

Tutor: Dr. Raúl Izquierdo Pupo

Ing. Wilián Argüelles González

Ing. Mecánica: 5to año.

Curso: 2007-2008

Moa

"AÑO 50 DE LA REVOLUCIÓN"



Declaración de Autoridad

Yo, Javier Arévalo Suárez, autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero – Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Dr. Raúl Izquierdo Pupo

Ing. Wilián Argüelles González

Javier Arévalo Suárez



Pensamientos

El socialismo es inconcebible sin técnicas edificadas según las últimas palabras de las más nuevas ciencias. Sin una organización estatal planificada, que subordine a decenas de millones de personas a una rigurosa observancia de una norma única en lo concerniente a la producción y distribución de los productos.

“Vladimir Ilich Lenin”

La ciencia es buena porque nos ayuda a distinguir por medio de la acción lo posible de lo imposible y nos libera de la sabiduría y la ignorancia.

“Anatoli France”



Agradecimientos

A la Revolución, por darnos la oportunidad de estudiar la carrera que siempre nos interesó. A mis padres, a mi hermano, a mi familia por su constante apoyo, cariño y preocupación. A mi novia y familia. A mis profesores, por formarnos como buenos estudiantes y prepararnos para el trabajo y para la vida. A los trabajadores del Departamento de ingeniería y proyecto de la Empresa Ernesto Che Guevara, por su ayuda espiritual y material. A mis amigos y compañeros de clases, por compartir tan gratos momentos de la vida estudiantil. A mis tutores y en especial a Ricardo y a los que nos dedicaron incondicionalmente su tiempo desde los inicios hasta la completa confección del Trabajo de Diploma.

“A TODOS, MUCHAS GRACIAS”

Javier Arévalo Suárez



Dedicatoria

El Trabajo de Diploma está dedicado a los profesores de la carrera de Ingeniería Mecánica, a los trabajadores del departamento de ingeniería y proyecto de la E.C.E.C.G. y a la Revolución; eslabón fundamental para mi formación como profesional y principalmente a mis seres más queridos, porque ellos son la razón de ser de mí existir y fueron la fuente de inspiración para la realización de esta investigación.



Resumen

Para el desarrollo del presente trabajo se realizó una intensa búsqueda de información relacionada con: aplicación del transporte hidráulico, propiedades de los fluidos, modelos reológicos, balance de energía mecánica y las leyes de semejanza.

Al mismo tiempo se evaluó la instalación existente de transporte de pulpa de la tercera etapa de sedimentación y segunda de lixiviación con bomba Warman 6/4, en la planta de Lixiviación y lavado de la empresa Comandante “Comandante Ernesto Ché Guevara”; título del presente trabajo, en la cual se realizaron los cálculos de los parámetros fundamentales.

También se elabora la valoración económica para la modificación y el impacto medio ambiental elemento importante para la realización de cualquier proyecto.



ABTRACTS

For the development of this work it was carried out an intense researching search of information related to: application of the hydraulic transport, properties of the fluids, rheologic models, balance of mechanical energy and the laws of likeness.

At once it was evaluated the installation of silt transportation of the third period of sedimentation and second period of lixiviation with Warman 6/4 bomb. At lixiviation y laved plant of the Enterprise Comandant Ernesto Guevara which was made the necessary calculation of the fundamental paints.

The economic valuation was also elaborated for the modification and the environmental impact important element for the realization of any project.



Contenido	Índice	Págs.
Introducción		1
Capítulo I. Marco teórico.		3
1.1 Introducción.		3
1.2 Análisis y aplicación transporte hidráulico.		3
1.3 Descripción del proceso tecnológico de la planta de Lixiviación y Lavado.		5
1.4 Trabajos precedentes.		9
1.5 Propiedades de los fluidos.		11
1.6 Clasificación reológica de los fluidos.		14
1.7 Ecuación de balance de energía mecánica.		16
1.8 Expresiones para el cálculo de las pérdidas por fricción en tuberías circulares rectas.		17
1.9 Conexión en serie.		19
1.10 Conexión en paralelo.		19
1.11 Carga		19
1.12 Cavitación.		20
1.13 Conclusión del capítulo.		20
Capítulo II. Materiales y métodos.		21
2.1 Introducción.		21
2.2 Materiales empleados.		21
2.3 Propiedades del sólido, la pulpa y balance de gastos.		21
2.4 Modelo reológico.		22
2.5 Metodología de cálculo de la instalación.		23



2.6 Conclusión del capítulo.	29
Capítulo III. Análisis de los resultados, valoración económica e impacto medioambiental.	30
3.1 Introducción.	30
3.2 Resultados obtenidos.	30
3.3 Valoración económica.	32
3.4 Impacto medio ambiental.	34
3.5 Conclusión del capítulo.	38
Conclusiones generales	39
Recomendaciones	40
Bibliografía	41
Anexos	43

Introducción

El objetivo esencial de la industria del níquel cubano 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 por ciento de cobalto lo que elevará el valor del producto y servirá para mejorar la calidad del níquel de las plantas que trabajan con el proceso carbonato amoniacal.

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 las colas que garantice la producción continua con alta productividad.

En la empresa Comandante Ernesto Che Guevara existe una instalación industrial del transporte de las colas en la planta de lixiviación y lavado que es la caja de transferencia de la tercera etapa de se cimentación. Se ha comprobado que en la explotación de esta instalación se presentan problemas técnicos entre los que se pueden destacar, la cavitación de las bombas, vibraciones mecánicas, desconocimiento de varios de sus parámetros de trabajo para la correcta explotación de la misma.

Todos estos problemas indican la necesidad de hacer un estudio que permita determinar una metodología racional para determinar los parámetros de hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, las expresiones conocidas para el cálculo de los parámetros hidráulicos que se encuentran en la literatura han sido obtenidas para condiciones específicas y no se recomienda su aplicación en otras condiciones.

Problema:

Insuficiencia en el sistema de bombeo de cola, provocados por el desconocimiento de algunos parámetros de trabajo de la instalación.

Objeto de Estudio:

Instalación perteneciente a la de tercera etapa de sedimentación, con bombas Warman 6/4.

Hipótesis:

Con la aplicación de una metodología de calculo fundamentada en las propiedades física del mineral y la pulpa, se podrá determinar los parámetros de diseño de la instalación de bombeo y su explotación eficiente.

Objetivo General:

Realizar el cálculo de los parámetros fundamentales de la instalación de bombeo, que permita determinar los índices técnico económico de la misma.

Objetivos específicos:

1. Realizar un estudio de campo de aplicación del hidrotransporte.
2. Obtener la metodología de cálculo fundamentada en las propiedades físicas del mineral y la pulpa.
3. Determinar el algoritmo de cálculo de los parámetros de la instalación de bombeo en una hoja en Excel.

Tareas de la investigación:

1. Búsqueda Bibliográfica sobre el hidrotransporte de fluidos no newtonianos.
2. Análisis de las propiedades de la cola para el hidrotransporte.
3. Metodología para cálculo de los parámetros adecuados de trabajo del sistema.
4. Valoración económica e impacto medio ambiental.

CAPÍTULO I: Marco teórico

1.1 Introducción

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

1.2 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 bajo 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.

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

Este tipo de transporte es especialmente efectivo en el acarreo de arenas.

Tiene gran aplicación en la industria, en el laboreo de industria a cielo abierto, para la mecanización de los procesos de extracción y elaboración de materias primas, traslado y deposición 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 eléctricos y puertos marítimos.

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

Las grandes compañías mineras que tienen operaciones en altura son los principales usuarios de este sistema de transporte de pulpa a larga distancia por medio de tuberías. Los mineroductos representan una tecnología garantizada para la mayoría de los productos mineros (mineral, relaves, y concentrados), con bajos costos efectivos, alta productividad y bajo riesgo ambiental.

El concentrado más grande de Sudamérica se inauguró en 1982, en Brasil. Sin embargo, el primero que se construyó fue el de la división Salvador de la estatal Chilena Codelco, en 1959 en Perú, el primero fue el de Iscayez, en 1996 y en Argentina, el de baja Alumbrera, en 1997.

En un país como Chile este sistema es utilizado en la actualidad por los mineros Escondidos, Collahuasi, Los Pelambres, Disputada, Andina.

El mineroducto alumbrera, entre la provincia de Catamarca y Tucumán en el noreste de Argentina, es un sistema de transporte concentrado de cobre por tubería con una longitud total de 113 Km que opera desde 1997.

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

1.3 Descripción del proceso tecnológico de la planta de Lixiviación y Lavado

El objetivo de la planta de Lixiviación y Lavado es lixiviar o extraer la mayor cantidad de Ni del mineral reducido utilizando para ello el licor amoniacal, exigiéndose para ello la menor cantidad de pérdidas de Ni y amoníaco durante el proceso.

Este proceso se realiza utilizando como sustancia disolvente una solución de hidróxido y carbonato de amonio y como agente extrayente el oxígeno, el cual se le inyecta a la pulpa mediante aire de baja presión en los turboaeradores. El proceso ocurre en tres series de Lixiviación, de tres etapas cada una y en dos series de Lavado de cinco etapas.

Con el objetivo de recuperar la cantidad de amoníaco evaporado en el proceso de lixiviación y lavado existe un sistema que interconecta los turboaeradores y sedimentadores en líneas de succión que por medio de ventiladores los gases son obligados a pasar por torres de absorción, obteniéndose un licor débil amoniacal.

La separación de los licores y la pulpa se lleva a cabo mediante un proceso de decantación y a contracorriente, o sea, el sólido entra en forma de pulpa por los tanques de contacto y es bombeada a un distribuidor que la distribuye a la I etapa de lixiviación de cada serie, luego se lixivia en una II y III etapas todas formadas por turboaeradores y sedimentadores. En la descarga de los últimos turboaeradores de cada serie se encuentra un electroimán con el objetivo de magnetizar las partículas de Fe y formar flóculos para aumentar la velocidad de sedimentación, pasando luego a la separación de fases en los sedimentadores de cada etapa. Los sólidos se sedimentan formando una pulpa que es movida por los brazos del sedimentador hacia el centro del mismo donde es succionada por bombas y enviada a la siguiente etapa.

La pulpa en su recorrido es enviada mediante un distribuidor a las dos series de Lavado, esta pulpa es floculada para aumentar la velocidad sedimentación; efectuándose en cada sedimentador la separación del líquido y el sólido, el reboso obtenido de los sedimentadores de la I etapa de lavado es bombeado a los sedimentadores de la III etapa de Lixiviación y la pulpa del fondo de estos sedimentadores (I etapa de Lavado) es enviada al resto de las etapas sucesivamente

hasta llegar a la quinta y última que es la que envía la pulpa a los tanques de almacenaje de cola para luego ser bombeado a la planta de Recuperación de Amoniacó.

Los licores viajan en sentido contrario al del sólido, desde la última y penúltima etapas de lavado (inyección de licor débil amoniacal obtenido en las torres de absorción y de licor fresco amoniacal respectivamente) hasta la I etapa de lixiviación obteniéndose el licor producto final rico en Ni y Co y enviándose parte del mismo a la planta de Recuperación de Amoniacó y Cobalto y el resto conjuntamente con licores de II etapa se envía a los enfriadores para disminuir su temperatura y ser utilizado como licor de recirculación a las canales de contacto

Para una mejor comprensión del proceso la planta se divide en 5 partes fundamentales:

1. Tanques de contacto.
2. Lixiviación
3. Lavado
4. Enfriadores de licor
5. Torres de absorción

Tanques de contacto

En esta área se recibe el mineral reducido procedente de la planta de hornos de reducción, el cual es descargado por los enfriadores rotatorios de mineral hacia las canales de contacto con una temperatura hasta 200 °C donde se mezcla con licor con temperatura de 34-37 °C proveniente del área de enfriadores de licor manteniendo una relación de 6.6:1.

Esta pulpa se descarga a los tanques de contacto (2 unidades) que poseen un mecanismo de agitación formándose una pulpa con una densidad de 1130 g/l y una temperatura < 46 °C. La pulpa es bombeada hacia los turboaeradores de I etapa, luego es distribuida para cada línea de contacto para un DI de pulpa general donde se ramifica el flujo para 4 series de turboaeradores.

Lixiviación.

Esta área cuenta con 6 series de turboaeradores en I etapa, que lixivian el Ni y el Co

del mineral reducido, donde cada serie tiene una caja distribuidora que ramifica el flujo de pulpa suministrado del área de los contacto en 2 miniserie formadas por una cascada de 4 turboaereadores, y en algunos casos por 3 turboaereadores solamente.

En la descarga de los últimos turboaereadores de cada miniserie se encuentra un electroimán con el objetivo de magnetizar la partícula de Fe y formar flóculos para aumentar la velocidad de sedimentación, pasando luego a la separación de fase mediante 4 sedimentadores.

La Planta dispone de una Instalación Automática para la preparación y dosificación de floculante, esta solución se le aplica a las pulpas de entrada a los sedimentadores de la I y II Etapas de Lixiviación en la búsqueda de lograr licores libres de sólidos en suspensión para el sistema de enfriamiento de licores.

En los sedimentadores ocurre la separación parcial del licor y el sólido, parte de este licor es bombeado a los tanques colectores para ser enfriado y ser utilizado como licor de recirculación y el resto es enviado a la planta de recuperación de amoníaco como licor producto para filtrarlo. Los sólidos se sedimentan formando una pulpa que es movida por los brazos del SD hacia el centro de este, donde la misma es succionada por bombas centrifugas y es enviada a una II etapa de sedimentación de lixiviación.

El reboso de II etapa de sedimentación es enviado completamente al tanque colector para ser sometido a enfriamiento de licor y la pulpa de fondo es bombeada a una II etapa de aereación de 2 serie formada por 7 turboaereadores cada una.

La pulpa descargada por los turboaereadores es magnetizada y se envía a 2 sedimentadores ubicado en la II etapa de sedimentación para separar las fases respectivamente, el reboso de estos 2 sedimentadores es enviado a la II etapa de sedimentación y la pulpa es enviada a un distribuidor de lavado.

Lavado.

Esta área recibe la pulpa procedente de los últimos sedimentadores de Lixiviación y es distribuida en 2 flujos conforme a dos series de lavado, esta pulpa es floculada para aumentar la velocidad de sedimentación y se alimenta al primer sedimentador del área de lavado, esto ocurre en todas las etapa de lavado efectuándose en cada sedimentador la separación del liquido y el sólido, la de fondo de estos sedimentadores

es enviada a las diferentes etapas sucesivamente hasta llegar a la quinta y última etapa de lavado que es la que envía la pulpa a los tanques de almacenaje de cola para luego ser bombeada a la planta de recuperación de amoníaco.

Los rebosos de cada etapa de sedimentación es formado fundamentalmente por el licor débil introducido en la última etapa de lavado, desplazándose por el reboso de cada tanque sedimentador hasta la primera etapa de lavado. El licor fresco se inyecta en la penúltima etapa de lavado que conjuntamente con el licor débil forman la solución lavadora.

Enfriadores de licor.

Realiza la importante función de enfriar la solución utilizada en los tanques de contacto lo cual contribuye a disminuir la temperatura en el proceso de lixiviación, ya que remueve la inmensa cantidad de calor de la reacción química producida durante la oxidación de los elementos metálicos garantizando que la planta opere balanceada térmicamente; además favorece la solubilidad del aire en los licores, fundamentalmente para la extracción de Ni y Co, evita que se incremente la tensión de vapor de amoníaco por encima de los valores prescrito y aumente la solubilidad del Mg, factor este muy negativo en el proceso ya que este precipita en los equipos y líneas creando costras endurecidas que traen trastornos en el proceso.

Como medio refrigerante se utiliza agua de retorno que proviene de la torre de enfriamiento a una temperatura de 29 °C y una presión de 4 Kgf/cm².

Sistema de absorción

Con el objetivo de recuperar la cantidad de amoníaco evaporado en el proceso de lixiviación y lavado el sistema está interconectado (turboaeradores y sedimentadores) a la línea de succión que por medio de ventiladores los gases son obligados a pasar por las torres, el sistema de absorción está compuesto por 4 líneas una de repuesto 3 en operación .

Cada línea está compuesta por 3 torres. Todas las torres están dotadas de parrilla o relleno.

El funcionamiento de las torres está basado en el principio a contracorriente donde el agua y los gases fluyen en sentido opuesto, los gases entran por el fondo de la torre

vacía y salen después de atravesar las 3 torres impulsado por el ventilador a la chimenea que descarga a la atmósfera. El agua entra por la parte superior de la última torre y va enriqueciéndose en amoníaco a medida que va pasando de torre en torre hasta salir por el fondo de la primera. El licor débil es bombeado por bombas centrífugas en la descarga de cada torre donde opera una y una de reserva. El licor débil de la última torre se envía a la quinta etapa de lavado.

1.3.1 Descripción de la instalación objeto de estudio

La pulpa descargada por los TA 127 y 130 es magnetizada y son enviada a 2 SD (131 A y B ó C dos en operación y uno de reserva) ubicado en la III etapa de sedimentación de lixiviación, donde ocurre la separación de las fases líquidas y sólidas respectivamente, el rebozo de estos 2 SD es enviado completamente al DI-135 para diluir la pulpa de fondo de los SD de primera etapa de sedimentación de lixiviación (SD 109 A, B, C ó 120A).

La pulpa de fondo de estos SD 131 (A; B ó C) es enviada al área de lavado, al distribuidor 200 de lavado. En esta parte del proceso intervine la caja de transferencia objeto de estudio, instalación auxiliar para el trasiego de la cola hacia el DI-200, a través de tres bombas centrífugas modelo Warman 6/4; dos en operación y una de reserva. Esta caja de transferencia cumple un objetivo fundamental. Cuando se encuentran dos sedimentadores fuera de servicio y uno en operación la caja de transferencia es la encargada de recepcionar la cola de los sedimentadores fuera de servicios y trasegarla hacia el DI-200 de lavado y al sedimentador en operación.

Pero si se encuentran dos sedimentadores fuera de servicio y uno solo en operación, la pulpa es enviada hacia la caja de transferencia que a través de 3 bombas centrífugas modelo Warman 6/4 envían la pulpa al DI-200 y al SD en operación.

1.4 Trabajos precedentes

Un importante aporte fue dado por .Welty (1976); Bandala (2001), al efectuar una evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, donde plantean que la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la

viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades y además en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería, están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye y la aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la succión, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas.

Aportaron considerablemente los trabajos de Nekrasov (1986), que aborda la temática relacionada con la teoría general de la hidráulica, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con el transporte hidráulico y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de movimientos hidráulicos con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como, en otras empresas donde se aplica este método de transporte.

Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudoplástico o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por los dispositivos de transporte. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológicas según Darby (2002).

De tal manera para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados y diferentes factores han sido analizados. La caída de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama et al. (1980).

Adhikari et al.(2002); incorporaron el concepto de redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a un 5,4 % con respecto a los valores experimentales.

Resulta de gran importancia el estudio realizado por Estévez(2006), en la Planta de Recuperación de Amoniaco de la empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara“, el cual

hizo un cálculo verificativo y la propuesta de modificación de la instalación de bombeo de cola de dicha planta.

1.5 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. [Vennar, 1986]

La rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo en movimiento, constituye la mecánica de los fluidos y la hidráulica.

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

Densidad de un fluido:

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

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

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:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.2)$$

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

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

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

$$\gamma = \frac{P \cdot g}{R \cdot T} \quad (1.3)$$

Volumen específico:

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

$$V = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

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 1000kg/m³.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (1.5)$$

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.

$$\text{viscosidad cinematica } \nu = \frac{\text{viscosidad absoluta}}{\text{densidad } \rho}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\gamma/g} = \frac{\mu g}{\gamma} \quad (1.6)$$

Presión de vapor:

Cuando tiene lugar el fenómeno de la evaporación dentro de un espacio cerrado, la presión parcial a que da lugar las moléculas de vapor se llama presión de vapor. Depende de la temperatura, aumentando con ella.

Tensión superficial:

La tensión superficial (σ) de un líquido es el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en un número suficiente desde el interior del líquido hasta la superficie para crear una nueva unidad de superficie (J/m²). Este trabajo es numéricamente igual a la fuerza tangencial de contracción que actuase sobre una línea hipotética igual a la fuerza

tangencial de contracción que actuase sobre una línea hipotética de longitud unitaria en la superficie, y

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta L} (N/m) \quad (1.7)$$

las unidades son en m^2/s . En los líquidos la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, pero no se ve afectada apreciablemente por las variaciones de presión. En los gases la viscosidad absoluta aumenta al aumentar la temperatura, pero casi no varía con la presión. Como el peso específico de los gases varía con la presión (a temperatura constante), la viscosidad cinemática es inversamente proporcional a la presión.

Gasto:

Es la cantidad de líquido que pasa a través de la sección viva de flujo en la unidad de tiempo. Dicha cantidad se puede medir en una 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 [Nekrasov. 1986].

$$Q = A \cdot V \rightarrow \text{Gasto volumétrico} \left(\frac{m^3}{s}; \frac{l}{s} \right) \quad (1.8)$$

$$G = Q \cdot \gamma \rightarrow \text{Gasto en peso} \left(\frac{N}{s}; \frac{kg_f}{s} \right) \quad (1.9)$$

$$M = \rho \cdot Q \rightarrow \text{Gasto en masa} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (1.10)$$

La forma más usada de determinar el gasto es:

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}; \frac{l}{\text{min}}; \frac{m^3}{h} \quad (1.11)$$

Criterio de Reynolds:

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (1.12)$$

V – es la velocidad del fluido

D – diámetro de la tubería

ν - coeficiente cinemático $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

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.

En los fluidos que siguen el modelo de Ostwald de Waele, el Re_{cr} puede estimarse en función de n [Garcell.2003]:

$$Re_{cr} = 2100 + 875(1 - n) \quad (1.13)$$

Así, a medida que n disminuye, alejándose de la unidad, el régimen laminar se extiende a valores mayores de Re.

1.6 Clasificación reológica de los fluidos

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en dos grupos. [Garcell, 2003]

1. Newtonianos
2. No newtonianos

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

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

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

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo. [Garcell, 2003]

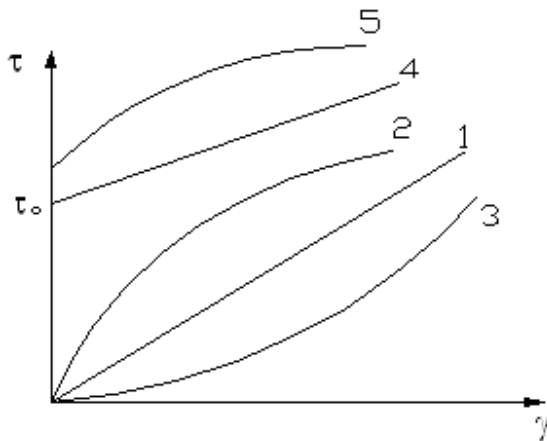


Figura 1.1: Curvas de flujo típicas: 1- Newtonianas; 2- Seudo plásticas; 3- Dilatantes; 4- Plástico ideal (Bingham); 5- Plástico real.

1.6.1 Modelos Reológicos.

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 [Garcell. 1990].

Modelo de Oswald 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. Para $n < 1$ el fluido es seudo plástico; para $n > 1$ el fluido es dilatante; y para $n = 1$ la ecuación se transforma en la ley de la viscosidad de Newton, siendo $K = \mu$.

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

En general n varía poco con los cambios de temperatura y concentración; en cambio, K es muy afectado por las variaciones de estas variables.

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.

El esfuerzo cortante inicial y la viscosidad plástica cambian apreciablemente con la variación de la temperatura y de la concentración.

Para $\tau_0 = 0$, la expresión anterior se transforma en la ley de Newton, siendo $\eta_p = \mu$

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 tiene los mismos significados descritos en los modelos anteriores

1.7 Ecuación de balance de energía mecánica

Es conocido que en el diseño de sistemas de tuberías se 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.[Garcell, 2003]

Las relaciones existentes entre las variables antes mencionadas dependen, fundamentalmente, de los requerimientos energéticos para el transporte del fluido a través del conducto y 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 newtonianos también se aplica el balance de energía mecánica en un sistema de flujo, al cual entra el fluido por un plano y sale por otro:

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

Donde:

Z_g – es la energía potencial para una altura vertical referida a un plano horizontal de referencia tomado arbitrariamente, m

$\frac{P}{\rho \cdot g}$ – es la energía de presión hidrostática, m

E_c – es la energía cinética media por unidad de masa, m

W_s – es el trabajo por unidad de masa (como trabajo hecho por una bomba sobre el fluido, m

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

$$\sum F = \frac{\Delta P_f}{\rho \cdot g} + \left(\frac{\Delta P_{Local}}{\rho \cdot g} \right) \quad (1.18)$$

El término $(\Delta P_f / \rho)$ se define para 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 $\sum F$ 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:

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

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 .

1.8 Expresiones para el calculo de las perdidas por fricción, $\sum F$, en tuberías circulares rectas

El término de pérdidas por fricción, $\sum F$, puede estimarse mediante la definición siguiente:

$$\sum F = \frac{1}{2} \langle V \rangle^2 e_v \quad (1.20)$$

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,

$$e_v = 4f \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1.21)$$

donde f es coeficiente de fricción o de Fanning.

Combinando las expresiones (1.20) y (1.21)

$$\sum F = 2f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle V \rangle^2}{g_c} \quad (1.22)$$

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

$$e_v = f' \left(\frac{L}{D} \right) \quad (1.23)$$

En ese caso, la ecuación (1.22) toma la forma de la ecuación de Darcy - Weibach:

$$\sum F = f' \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle V \rangle^2}{2g_c} \quad (1.24)$$

Para los tuberías circulares, con independencia de la naturaleza reológica del fluido, el coeficiente Fanning se define como sigue (Garcell, 2001)

$$f' = \frac{\tau_w g_c}{\frac{1}{2} \rho \langle V \rangle^2} = \frac{\Delta P_f D g_c}{2L \rho \langle V \rangle^2} \quad (1.25)$$

También se puede calcular la fórmula de $\sum F$ para tuberías rectas, según (Días, 1989).

$$\sum F = \frac{f \cdot L \cdot V^2}{2 \cdot D} \quad (1.26)$$

o

$$\sum F = K \frac{V^2}{2} \quad (1.27)$$

1.9 Conexión en serie

Cuando dos tuberías de diferentes tamaños o rugosidades de manera que el fluido pase por una y a continuación por la siguiente se dice que están conectadas en serie.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$\sum F_T = \sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3$$

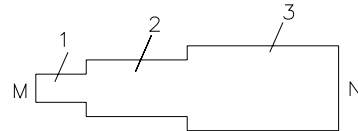


Fig. 1.1: Conexión de la tubería en serie.

1.10 Conexión en paralelo

Una combinación de dos o más tuberías conectadas, de tal manera que la corriente fluida se divida en dos o más tuberías y después se junten de nuevo, es un sistema de tubería en paralelo.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_T$$

$$\sum F_1 = \sum F_2 = \sum F_3$$

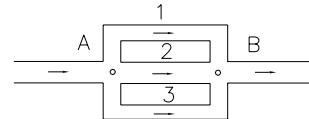


Fig. 1.2: Conexión de la tubería en paralelo.

1.11 Carga

El término de carga es una forma de expresar la cantidad de energía en un sistema dado. Cualquier tipo de energía mecánica se puede expresar por este termino, que representa la energía contenida equivalente a la que posee una columna líquida de determinada altura.

1. Carga de bombeo: Es el trabajo que debe realizar la bomba con el fluido para que pueda vencer las diferentes resistencias que se oponen al movimiento del fluido, y se expresa en altura de líquido.
2. Carga estática: Es la distancia vertical entre el nivel libre de la fuente de abastecimiento y el punto de descarga.

3. Carga de velocidad: Es la altura vertical desde la cual tendría que caer un cuerpo para adquirir la velocidad.
4. Carga de presión: Es la longitud vertical de una columna de líquido que proporciona una presión hidrostática equivalente a la presión existente.
5. Carga de fricción: Es la presión, expresada en la altura de columna de líquido, necesaria para vencer la resistencia por fricción provocada por el movimiento del fluido.

1.12 Cavitación

Si la presión en un punto interior cualquiera de una bomba cae por debajo de la tensión del vapor correspondiente a la temperatura del líquido se vaporizara y se formarían cavidades de vapor. Las burbujas de vapor son transportadas por la corriente hasta alcanzar una región de mayor presión, donde, al destruirse dichas burbujas, se produce un choque violentísimo sobre las paredes adyacentes. A este fenómeno se le llama cavitación.

1.13 Conclusión del capítulo I

1. Existe suficiente información acerca de la utilización de la mecánica de los fluidos en la industria, lo cual se ha demostrado a través de los años.
2. Los fluidos no newtonianos son de gran utilización en la industria, es muy complejo el cálculo con estos tipos de fluidos.
3. No existe nivel de automatización en la instalación objeto de estudio.

CAPITULO II: Materiales y Métodos.

2.1 Introducción.

El cálculo de la instalación se realiza empleando Microsoft Excel y el modelo reológico de la pulpa obtenido en el Centro de investigación del níquel y la laterita (CEINIL), con el objetivo de verificar los parámetros de trabajo de la instalación para un fluido no newtoniano.

Para el cálculo de la instalación de bombeo con bomba Warman 6/4, se utiliza una metodología que permite realizar un análisis detallado de los principales parámetros.

2.2 Materiales empleados.

1. Cinta métrica de 10 metros
2. Cinta láser marca HILTI modelo PD28 alcance máx. 100 m
3. Flujometro digital

2.2.1 Funcionamiento y utilización de cada material

Cinta métrica: Esta tiene gran utilización en la industria en específico en el departamento de diseño, la cual se utiliza para la medición de tramos rectos y muy largos; en mi trabajo se utilizo para los tramos largos de tubería con fácil acceso.

Cinta láser: Esta cinta es una de las preferidas de la industria ya que es de alta tecnología, tiene gran exactitud la cual mide grandes distancias sin necesidad de llegar a estas, esta tuvo gran importancia en mi trabajo ya que fue utilizada en los lugares de difícil acceso para la medición de los tramos de tubería.

Flujometro digital: Como su nombre lo indica es para medir flujo; la señal se controla un panel de control digital. Mediante el flujómetro se conoció el flujo de entrada a la caja de transferencia.

2.3 Propiedades del sólido, la pulpa y balance de gastos.

A continuación se muestra la densidad del sólido, liquido y la pulpa con el por ciento en peso; también se recogen los gastos másicos y volumétricos. (Ver anexo 1)

	Dens Ton/m ³	% peso
Sólido	4.17	54.91%
Liquido	1.025	45.09%

Pulpa	1.750	1.00
Flujo másic	1126.63	ton/h
Flujo másic	1,126,631.81	kg/h
Flujo volum	644	m ³ /h
Flujo volum	0.1789	m ³ /s

2.4 Modelo reológico

El modelo reológico de la pulpa corresponde con un plástico Bingham su ecuación característica, es la 1.15 del capítulo 1.

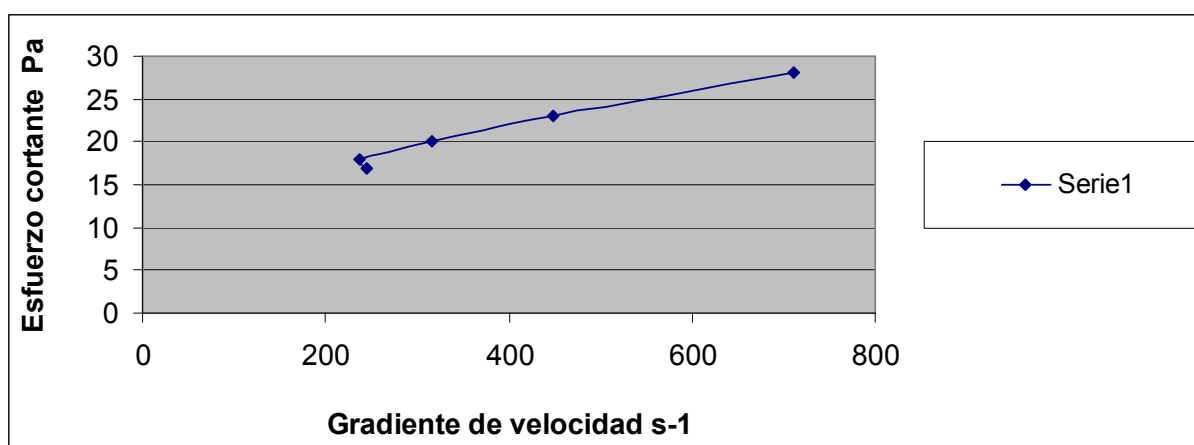
En la tabla 2.1 se presenta los parámetros reológicos de la pulpa a 55% de sólido y a una temperatura de 35 °C, la información tiene como fuente:

γ - gradiente de velocidad.

Tabla 2.1: Resultados experimentales de los parámetros del modelo reológico plástico Bingham.

τ (Pa)	γ (s ⁻¹)	Visc Plást Pas	Visc efect (Pas)	8*v/D
17	245	0.069	0.0943	180.21
18	247	0.073	0.0991	181.68
20	317	0.063	0.0858	233.17
23	449	0.051	0.0696	330.26
28	712	0.039	0.0535	523.71

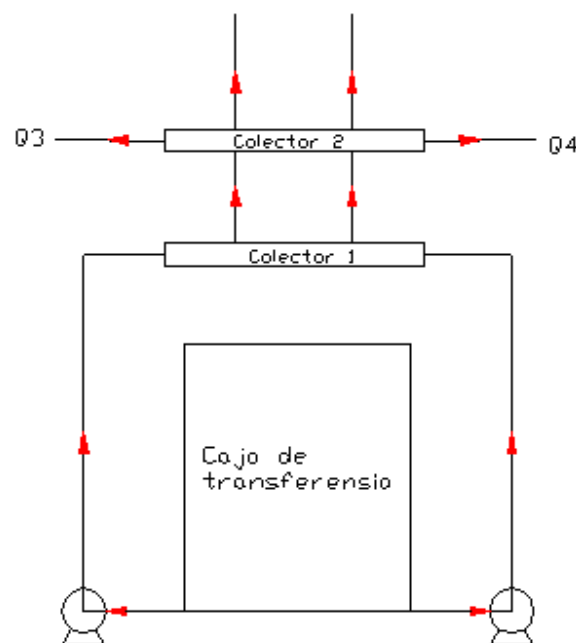
Figura 1: Grafico del modelo; esfuerzo cortante contra gradiente de velocidad.



2.5 Metodología de cálculo de la instalación.

El calculo de la instalación se fundamenta en el modelo reológico realizado en el CEINIL con la pulpa lixiviada de la planta la cual es la sustancia de trabajo que trasiega la instalación; el liquido es de tipo plástico Bingham. Para el calculo se tuvo en cuenta las perdidas hidráulicas que proporcionan los accesorios de dicha instalación (Ver anexos 2, 3 y 4).

Esquema de la instalación:



2.5.1 Área de la sección de la tubería.

$$A = \pi \frac{d_{tub}^2}{4}, m^2 \quad (2.1)$$

d – diámetro del tubo en, m

2.5.2 El número de Reynolds, Re:

$$Re = \frac{V \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2.2)$$

d - diámetro del tubo / m

ρ - densidad del fluido / kg/m³

μ - viscosidad / Pa.s

V – velocidad del fluido / m/s

2.5.3 Factor de fricción o fanning:

Esta fórmula sirve para cualquier tubería según (Días, 1989)

$$f = \left[-2 \cdot \log \left(\frac{0.00001236}{D} \right) + \left(\frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} \right]^{-2} \quad (2.3)$$

D – Diámetro de la tubería / m

2.5.4 Velocidad del fluido

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}, m/s \quad (2.4)$$

D – Diámetro de la tubería, m

2.5.5 Determinación del flujo en una conexión de 4 tuberías en paralelo.

El flujo estimado para las 2 bombas en paralelo es de 644 m³/h. Para el cálculo de flujo utilizamos un sistema de ecuaciones por error y tanteo ya que la instalación cuenta con cuatro ramales (Ver anexo 5) los cuales tienen flujos distintos según (Días, 1989).

Para determinar los flujos reales de cada ramal, se planteó el sistema de ecuaciones siguiente:

Como se planteó en el capítulo I en las conexiones en paralelo se emplean 2 ecuaciones, en una los gastos se suman y en la otra las pérdidas de cargas son iguales entre los tramos paralelos.

$$(1) Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0.178867 m^3 / h \quad (2.5)$$

Iguualamos las cargas en función de Q_1 y Q_2

$$\frac{8 \cdot f_1 L t \cdot Q_1^2}{\pi^2 \cdot D_1^5} = \frac{8 \cdot f_2 L t \cdot Q_2^2}{\pi^2 \cdot D_2^5}$$

Despejamos en función del factor de fricción y el gasto

$$(2) \frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \frac{D_1^5}{D_2^5} \cdot \frac{L t_2}{L t_1}$$

$$(3) \frac{f_1}{f_3} \cdot \frac{Q_1^2}{Q_3^2} = \frac{D_1^5}{D_3^5} \cdot \frac{L t_3}{L t_1}$$

$$(4) \frac{f_1}{f_4} \cdot \frac{Q_1^2}{Q_4^2} = \frac{D_1^5}{D_4^5} \cdot \frac{L t_4}{L t_1}$$

Ponemos el factor de fricción en función del número de Reynolds por la formula 2.3, según Días, 1989

$$(5) \frac{f_1}{f_2} = \frac{Re_2}{Re_1}$$

$$(6) \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1 \cdot Q_2}{D_2 \cdot Q_1}$$

$$(7) \frac{f_1}{f_3} = \frac{D_1 \cdot Q_3}{D_3 \cdot Q_1}$$

$$(8) \frac{f_1}{f_4} = \frac{D_1 \cdot Q_4}{D_4 \cdot Q_1}$$

Sustituimos la ecuación 6 en 2

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 1.15 m^3 / s$$

$$(9) Q_2 = 0.8715 \cdot Q_1$$

Sustituimos la ecuación 7 en 3

$$\frac{Q_1}{Q_3} = 2.641 m^3 / s$$

$$(10) Q_3 = 0.3787 \cdot Q_1$$

Sustituimos la ecuación 8 en 4

$$\frac{Q_1}{Q_4} = 2.6596 m^3 / s$$

$$(11) Q_4 = 0.3760 \cdot Q_1$$

Luego para determinar el resultado de flujo de cada ramal sustituimos las ecuaciones (9, 10 y 11) en 1

2.5.6 Viscosidad efectiva

La viscosidad efectiva se determina despejando el valor de la relación $8 \cdot v/D$ según el modelo. (Ec. 2.12)

$$\mu_e = \frac{\tau \cdot D}{8 \cdot V} \quad (2.6)$$

τ – esfuerzo cortante

2.5.7 Balance de Cargas

$$H_{red} = H_p + H_c + H_z + H_f ; H_{red} = H_B \text{ Carga en la instalación (m)} \quad (2.7)$$

$$H_p = \frac{P_{final}}{\rho \cdot g}, \text{ Carga de presión final (m)} \quad (2.8)$$

P_{final} - presión final en (Pa)

$$H_c = \frac{V^2}{2 \cdot g} \text{ Carga cinética (m)} \quad (2.9)$$

$$H_z = \Delta Z \text{ Carga estática (m)} \quad (2.10)$$

$$H_f = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \text{ Carga de fricción (m)} \quad (2.11)$$

2.5.8 Carga de Presión por pérdidas hidráulicas

Por el modelo reológico (Bingham) hallamos la caída de presión.

Ecuación reológica para un 55% de sólido:

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} = \tau_0 + \eta_p \cdot \frac{8 \cdot V}{D} \quad (2.12)$$

$$\Delta P = \frac{\left(\tau_0 + \frac{\eta_p \cdot 8 \cdot V}{D} \right) \cdot (4 \cdot L_t)}{D} ; \text{Pa} \quad (2.13)$$

2.5.9 Cavitación

El calculo de cavitación se realiza para comprobar si las bombas trabajan a régimen cavitacional (según Días, 1989).

2.5.9.1 Condición de ausencia de cavitación

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

$$CNPSd \geq CNPSr$$

2.5.9.2 Altura neta positiva en la succión

Se denomina NPSH (altura neta positiva en la succión) a la diferencia entre la presión del líquido a bombear referida al eje del impulsor y la tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (es la presión del líquido que a esa temperatura, se halla en equilibrio con su presión de vapor en un depósito cerrado). Debemos por tanto conocer

y comparar en cada caso el NPSH disponible (NPSH_d) de la instalación y el NPSH requerido (NPSH_r) por la bomba.

La velocidad específica n_s , según Pérez (2000), establecida en correspondencia con el régimen de trabajo en la succión de una máquina, referido en el epígrafe 1.6; se obtiene:

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{\left(\frac{\Delta h_m}{10}\right)^{3/4}}; \text{ rev/min} \quad (2.14)$$

Donde:

n - es el N° de revoluciones (rev/min)

Para la evaluación de la calidad del diseño, de la fabricación o de la confiabilidad de los datos técnicos referentes a la aspiración, es importante la determinación de Δh_s , o sea; el NPSH_r, que será:

$$\text{NPSH}_r = \Delta h_s = 10 \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3}; \text{ m} \quad (2.15)$$

En el diseño de nuevas máquinas el valor de C se determina mediante el cálculo. Para esta bomba el coeficiente C se obtuvo en función de la velocidad específica, ($C = f(n_s)$). Su valor corresponde a las Bombas con el rodete en voladizo: $C = 880 \log n_s^{3/4}$.

La carga neta positiva disponible es en función de la instalación e independiente del tipo de bomba, la cual se calcula por la siguiente ecuación:

$$\text{NPSH}_d = H_s - H_v \quad (\text{m}) \quad (2.16)$$

$$H_s = H_{at} - H_v - H_f - H_c - h_a \quad (\text{m}) \quad (2.17)$$

$$h_a = 0.000125 \cdot (Q \cdot n^2)^{0.67} \quad (2.18)$$

h_a – carga de aspiración en (m)

n – número de revoluciones por minuto del motor en (rev/min)

H_v – Carga de presión de vapor

$$H_v = \frac{P_v}{\rho \cdot g} \quad (2.19)$$

NPSHd = 4.66 m y NPSHr = 3.40 m

2.5.10 Balance energético de una bomba centrífuga

El balance energético de una bomba centrífuga se sustenta en el cálculo del rendimiento total de la bomba y en la potencia real que consume el motor, porque estos aspectos caracterizan energéticamente la instalación. La metodología a utilizar se establece a continuación según (Días, 1989).

2.5.11 Potencia hidráulica útil de la bomba

$$N_b = \frac{H \cdot Q \cdot \rho \cdot g}{1000} ; \text{ kW} \quad (2.20)$$

2.5.12 Potencia útil de la instalación

$$N_{\text{instalación}} = \frac{N_b}{E_f \cdot 0.85} ; \text{ kW} \quad (2.21)$$

Donde:

Ef- eficiencia de bombeo (%)

2.6 Conclusión del capítulo II

1. Se revela el modelo reológico de la pulpa lixiviada a 55% de sólido y a 35° C.
2. Se expuso la metodología de cálculo para el modelo reológico de la pulpa lixiviada, la cual satisface el cálculo de los parámetros ingenieriles fundamentales para la explotación eficiente del sistema de bombeo.

Capítulo III: Análisis de los resultados, valoración económica e impacto medioambiental.

3.1 Introducción

Para visualizar y analizar los resultados obtenidos con mayor facilidad insertamos las tablas con los resultados obtenidos con ayuda del Microsoft Excel, se grafica la curva de la bomba para ver el punto de trabajo de la misma.

Toda planta o instalación lleva consigo una valoración económica ya que en esta se destinan una gran cantidad de recursos. Aparejado a esto están los estudios medio ambientales los cuáles son necesarios que cumplan con las normas establecidas para garantizar así una operación final con éxito.

En tal sentido el objetivo de este capítulo es realizar el análisis de los resultados, la valoración económica y el impacto medioambiental que tiene el proceso de lixiviación de cola.

3.2 Resultados fundamentales obtenidos (en los cuatro ramales de la instalación)

Ver anexos 6, 7 y 8.

Tabla 3.1. Número de Reynolds del flujo en cada ramal el cual es turbulento

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
Re (1)	27062.57	adimensional	2.2
Re (2)	31053.81	adimensional	2.2
Re (3)	71458.75	adimensional	2.2
Re (4)	27062.57	adimensional	2.2

Tabla 3.2. Factor de fricción en cada ramal

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
f (1)	0.0134	adimensional	2.3
f (2)	0.0134	adimensional	2.3
f (3)	0.0134	adimensional	2.3
f (4)	0.0134	adimensional	2.3

Tabla 3.3. Velocidad en cada ramal

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
V (1)	1.3388	m/s	2.4
V (2)	1.1667	m/s	2.4
V (3)	0.5070	m/s	2.4
V (4)	0.5034	m/s	2.4

Tabla 3.4. Flujo volumétrico de cada ramal

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
Q (1)	0.0681	m ³ /s	2.5
Q (2)	0.0594	m ³ /s	2.5
Q (3)	0.0258	m ³ /s	2.5
Q (4)	0.0256	m ³ /s	2.5

Tabla 3.5. Viscosidad efectiva de la pulpa en cada ramal

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
μ_e (1)	0,022	Pa.s	2.6
μ_e (2)	0,019	Pa.s	2.6
μ_e (3)	0,008	Pa.s	2.6
μ_e (4)	0,008	Pa.s	2.6

Tabla 3.7. Carga de fricción en cada ramal por el modelo

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
Hf (1)	1.93	m	2.11
Hf (2)	2.20	m	2.11
Hf (3)	4.92	m	2.11
Hf (4)	4.95	m	2.11

Tabla 3.6. Caída de presión en cada ramal

Parámetros	Valor calculado	Unidad de medida	Ecuación
ΔP (1)	33095.30	Pa	2.13
ΔP (2)	37706.29	Pa	2.13
ΔP (3)	84385.178	Pa	2.13
ΔP (4)	84982.59	Pa	2.13

3.3 Valoración económica

La valoración económica esta encaminada al costo del montaje de una de las líneas de descarga de dicha instalación, la reparación de una de las bombas y fundamentalmente el gasto eléctrico en un año de la instalación.

Tabla 3.8: Costo de reparación de una bomba Warman 6/4

Bomba Warman 6/4	Valores(CUC)
Plato de la succión	\$ 38.00
Tapa trasera de la voluta	\$ 265.95
Camisa del eje 120x100	\$ 99.03
Loctite 431 de 20GR	\$ 11.28
Sello de revestimiento de voluta 450x12	\$ 29.97
Retenedores de grasa E - 046	\$ 67.18
Total	\$ 511.41

Tabla 3.9: Costo del montaje de la tubería de descarga desde la instalación al distribuidor

Filas	Conceptos de gastos	Valores
1	Materiales	\$ 60,809.82
2	Mano de obra	\$ 6,291.08
3	Uso de equipos	\$ 4,236.48
4	Otros gastos directos de obra	\$ 6,777.06
5	Gastos generales de la obra	\$ 6,063.67
6	Total gastos directos de producción	\$ 84,178.11

El valor total del montaje de esta línea es 17205.77 CUC.

Tabla 3.10: Calculo del precio del servicio de construcción

Recursos (Mano de obra)	UM	Cantidad	Precio Unita.	Importe
Instalador de tuberías del grupo salarial VII	hh	126.4	\$ 2.93	\$ 370.35
Instalador de tuberías del grupo salarial VI	hh	183.31	\$ 2.72	\$ 498.60
Instalador de tuberías del grupo salarial IV	hh	37.5	\$ 2.29	\$ 85.87
Soldador del grupo salarial VII	hh	822	\$ 2.93	\$ 2,408.46
Soldador del grupo salarial VI	hh	6.94	\$ 2.72	\$ 18.89
Total		1176.15		\$ 3,382.17

3.3.1 Costo por consumo de energía

- La planta recibe energía eléctrica producto de la generada en la termoeléctrica (C.T.E.) de la empresa y de la consumida por la red nacional.

Consumo de energía de la red nacional

Mes	Energía consumida (MW)
Mayo	465

1MW-----9.96 CUC

- Se consumió en este periodo 465MW de la red nacional lo que equivale a 4631.4 CUC.

Consumo de energía de la C.T.E.

Mes	Energía consumida (MW)
Mayo	372

- Para generar un MW de energía la C.T.E. consume 25 toneladas de vapor y para generar 1 tonelada de vapor se consume 0.73 kg de petróleo conociendo que una tonelada de petróleo vale 498.13 CUC y que en este período se consumió 372MW equivalente se determino que el gasto por consumo de energía es de 3706.09 CUC.

- En la instalación con dos bombas trabajando 24h diarias y con un consumo de 110KW/h resulta que al año son 950400KW lo que equivale a 950.4MW, por lo que el costo de este consumo es 9465.984 CUC.
- Mediante los cálculos se muestra, que con un motor de menos potencia la instalación realiza la misma función. El motor actual es de 55 KW y con uno de 37KW se satisface el consumo el problema y se contribuye al ahorro del país, en especial al ahorro del petróleo. Con este motor en las dos bombas producen un ahorro de 3136.684 CUC.

3.4 Impacto medio ambiental

La fabrica de níquel de Punta Gorda “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante varios años de explotación ha producido un gran impacto negativo sobre el medio ambiente. Debido a problemas tecnológicos y al manejo ambiental inadecuado durante todo el periodo de explotación, se han originado afectaciones medioambientales severas; como son:

- La emisión de gases conteniendo amoniaco y carbonato de níquel en los alambiques de cola y licor.
- Generación de dióxido de azufre (SO_2) y otras sustancias nocivas durante el proceso de separación de cobalto, filtración y secado al aire libre en un almacén abierto sin sistema de extracción de gases por tiro forzado, los cuales producen corrosión en las instalaciones.
- Generación de gases y compuestos químicos nocivos para la salud de los trabajadores en el área de preparación de sulfhidrato de sodio.
- Alta generación de calor en áreas aledañas a los alambiques de cola y de licor, produciendo estrés al trabajador.
- Ruidos, que aunque estén en la norma, afectan por acumulación y constancia el tímpano del oído y ocurre la pérdida de la audición.
- Altos niveles de amoniaco y erosión del polvo de cola en los residuos, afectando a la fauna natural.

3.4.1 Efecto ambiental de la cola

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

Medidas constructivas para eliminar estos problemas

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

3.4.2 Afectaciones a la salud por el amoniaco

- 1- El amoniaco, tanto el líquido como el vapor es fuertemente irritante para la piel, los ojos y las vías respiratorias.
- 2- El amoníaco es muy tóxico y la exposición a altas concentraciones puede producir quemaduras, cegueras y hasta la muerte.
- 3- Las concentraciones bajas de amoniaco pueden cortar la respiración, pero sin provocar efectos nocivos.
- 4- Las concentraciones medias de amoníaco pueden causar decaimiento, irritación, congestión, hinchazón o entumecimiento de las membranas mucosas de los ojos, nariz y garganta.
- 5- El líquido produce quemaduras graves, parecidas a las quemaduras cáusticas y estas varían de acuerdo con la concentración del amoniaco y del tiempo que se permanezca expuesta al mismo.
- 6- Cuando el amoniaco líquido se pone en contacto con la piel, produce congelación rápida e intensa en la zona afectada.

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

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

Medidas de seguridad

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

2- Hay que situar duchas y lavaderos de ojos y cuerpo convenientemente para que cualquier obrero afectado se aplique grandes cantidades de agua rápidamente.

3- También es necesario utilizar los equipos de protección cuando se requieren.

4- Instruir adecuadamente a los trabajadores respecto a los métodos de manipulación del amoníaco con el objetivo de prevenir el contacto directo del líquido a una exposición imprevista del gas.

Medios de seguridad

1- Si las concentraciones están por encima de los 100 PPM (partes por millón) de amoníaco en los gases del ambiente, deben usarse respiraderos o máscaras y espejuelos de seguridad.

2- Si se está manejando amoníaco deben utilizarse guantes de goma industriales y delantal engomado para evitar las salpicaduras en el cuerpo.

3- Si las concentraciones están por encima de 3000 PPM deben utilizarse trajes engomados bien puestos para evitar afectaciones a la piel, es decir, el cuello debe mantenerse abrochado, los guantes se mantendrán por fuera de la camisa y los pantalones quedarán por fuera de las botas, también puede pasarse grasa por la piel antes de ponerse el traje para evitar que los vapores del amoníaco sean absorbidos; las cremas no son suficientes para la protección.

En el poblado de Moa que es donde se encuentra ubicada dicha empresa, se observa notablemente el amplio espectro de deterioro ambiental existente, lo que influye en gran medida en la salud de dicha población. Del 75 al 80% de las personas que han vivido en Moa más de 10 años presentan Reforzamiento Pulmonar.

En la tabla 3.1 se exponen los efectos que produce en el ser humano el amoniaco a distintas concentraciones.

Tabla 3.11: Efectos del amoniaco a distintas concentraciones

PPM de amoniaco en el aire	Efectos
53	Mínimo olor permisible
100	Concentración máxima tolerable en inhalaciones por largo tiempo
300 – 500	Concentración máxima tolerable en inhalaciones por corto tiempo (1/2 – 1 hora)
400	Concentraciones mínimas que causan irritaciones inmediatas en la garganta
700	Concentraciones mínimas que producen irritaciones inmediatas en los ojos
1720	Concentraciones mínimas que hacen toser
2500 – 4500	Concentraciones peligrosas, incluso en tiempo breve
5000 – 10 000	Muerte rápida, obstruye la inhalación en corto tiempo

Estas concentraciones varían según los escapes de amoniaco que ocurran en la instalación y pueden exceder los límites permisibles, debido a salideros imprevisto e irregularidades de operación, tomando como medida que los operarios lleven consigo el equipamiento que los protege de los gases.

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

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

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

3.5 Conclusión del capítulo III

- 1 Se manifiesta el impacto medio ambiental de la planta con respecto al amoníaco y a la cola, el cual según datos se encuentra en niveles permisibles.
- 2 Con el cálculo demostramos que con un motor de 50 HP la instalación trabaja con la misma eficiencia que con el actual que es de 75 HP y la eficiencia calculada es de 65%
- 3 Con el cambio de motor la instalación ahorra 3136.684CUC en petróleo al país, lo cual representa un ahorro en el consumo de electricidad.

Conclusiones generales

1. La revisión bibliografía ha permitido determinar los parámetros reológico de la pulpa a 55% de sólido y una temperatura de 35°C.
2. Se determinaron los gastos aplicando un sistema de ecuaciones para cuatro tuberías en paralelo desconocidos hasta el presente; estos son: $Q_1=0.0681$, $Q_2=0.0594$, $Q_3=0.0258$ y $Q_4=0.0256$ (m³/h) respectivamente, para un flujo total de 0.1789 m³/h.
3. Se comprobó que las bombas no trabajan a régimen cavitacional ya que la altura de succión neta positiva requerida es menor que la altura de succión neta disponible; obteniendo que el (NPSH)_{disp} tiene un valor de 4.66 m y el (NPSH)_{req} es de 3.40 m.
4. Con la propuesta de modificación del cambio del motor de 55 KW por el de 37 KW se ahorran 3136.684CUC en petróleo el cual se utiliza en la producción de energía eléctrica.
5. Para el desarrollo del trabajo se presento el problema de no contar con los parámetros físicos existentes.



Recomendaciones

1. Realizar un estudio mas afondo de las propiedades de la pulpa lixiviada, así como el modelo reológico de los flujos de la planta.
2. Situar en la instalación instrumentos de medición capaces de leer algunos de los parámetros del sistema de bombeo para comprobar las diferencias con respecto a los parámetros calculados en el presente trabajo.
3. Disminuir las perdidas locales como son algunas Te que pueden ser sustituidas por Ye que van en dirección al flujo, para aumentar la eficiencia de la instalación.

Bibliografía

1. Crane: "Flujo de fluidos; en válvulas, accesorios y tuberías". Mexico. Edición McGRAW – HILL/interamericana de Mexico, S.A de C.V. 1995.
2. Cherkasski V. M.: "Bombas, ventiladores y compresores". URSS. Editorial Mir Moscu. 1986.
3. Cisneros H B, Cavitación "Un ataque al corazón de las Bombas Centrifugas" [En línea], disponible en (<http://www.mch.cl/documentos/pdf/cavita.pdf>). [Accesado el día 28 de marzo de 2007].
4. Córdova, T. A. "Estudio de los parámetros de la instalación de transporte hidráulico de las colas en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara". Trabajo de diploma. ISMM. Moa. 1999.
5. Días A.: "Manual de hidráulica aplicada". Cuba. Editorial Pueblo y educación, 1989.
6. Garcell. L. R: "Flujos de tuberías de suspensiones minerales no Newtonianas". ISPJAM. Facultad de tecnología Química. Departamento de Procesos Químicos. Santiago de Cuba, 2003
7. Garcell. L. R. Y Col.: "Estudio Reológico de las Suspensiones de Limonita de la Empresa CMDTE Pedro Sotto Alba de Moa". Facultad de Tecnología Química. Departamento de Procesos Químicos. Santiago de Cuba. 1990.
8. Jiménez Y. "Trabajo de Diploma". Moa. 2005
9. Manual de operaciones de la planta de Lixiviación y lavado de la Emp. Comandante Ernesto Che Guevara.
10. Méndez Bustabad, Ofelia; López Echevarria, Nadia: "Flujo de fluidos y separaciones mecánicas". Dpto. de Ediciones del ISPJAE. Ciudad de La Habana, 1984.
11. Nekrasov B.: "Hidráulica". Editorial Pueblo y Educación, 1986.
12. Pérez Barreto, R.; Strouhal number and specific speed. Caracterização de ensaios de máquinas de fluxo no laboratório de vazão do IPT. Proyecto. CAPES-MES. IPT. San Pablo, 2000,
13. Pérez, R. Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas. 2000.



14. Pérez, R. Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas. 2004.
15. Pérez, F. Equipos de Bombeo. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1983.
16. Vennard K.: "Elementos de mecánica de los fluidos". México. Edición revolucionaria, 1986.
17. Warman, Bomba de lodo: "Las bombas de lodo tipo warman". Hungría. 1984

BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA

Será necesario conocer los flujos por cada Ramal

Por lo que se requiere de un Balance de Energía Mecánica entre los puntos Colector (2) y las terminaciones de cada Ramal (1,2,3,4)

1- Balance entre colector 2 y el sedimentador 1

$$HP0 = P0/(gp) = Hf1 + \Delta He1$$

$$HP0 = (8*f1*L1*Q1^2)/(\pi^2 * g * D1^5) + (Z1-Z0)$$

$$HP0 = 9560,59 * f1 * Q1^2 + 9,0$$

$$Z1-Z0 (m) = 9,0$$

$$Z1(m) = 13,0$$

$$Z0(m) = 4,0$$

2- Balance entre colector 2 y el sedimentador 2

$$HP0 = P0/(gp) = Hf2 + \Delta He2$$

$$HP0 = (8*f2*L2*Q2^2)/(\pi^2 * g * D2^5) + (Z2-Z0)$$

$$HP0 = 107621,65 * f2 * Q2^2 + 9,0$$

$$Z2-Z0 (m) = 9,0$$

$$Z2(m) = 13,0$$

$$Z0(m) = 4,0$$

3- Balance entre colector 2 y el distrib

$$HP0 = P0/(gp) = Hf3 + \Delta He3$$

$$HP0 = (8*f3*L3*Q3^2)/(\pi^2 * g * D3^5)$$

$$HP0 = 25244,75 * f3 * Q3^2 +$$

$$Z3-Z0 (m) = 18,0$$

$$Z3(m) = 22,0$$

$$Z0(m) = 4,0$$

4- Balance entre colector 2 y el distril

$$HP0 = P0/(gp) = Hf4 + \Delta He4$$

$$HP0 = (8*f4*L4*Q4^2)/(\pi^2 * g * D4^5)$$

$$HP0 = 25427,44 * f4 * Q4^2 +$$

$$Z4-Z0 (m) = 18,0$$

$$Z4(m) = 22,0$$

$$Z0(m) = 4,0$$

Es necesario determinar los flujos reales de cada ramal.

$$(1) Q1+Q2+Q3+Q4 = 0,178867$$

$$8*f1*L1*Q1^2/\pi^2*D1^5 = 8*f2*L2*Q2^2/\pi^2*D2^5$$

$$(2) (f1/f2)*(Q1^2/Q2^2) = (D1^5/D2^5)*(L2/L1)$$

$$(3) (f1/f3)*(Q1^2/Q3^2) = (D1^5/D3^5)*(L3/L1)$$

$$(4) (f1/f4)*(Q1^2/Q4^2) = (D1^5/D4^5)*(L4/L1)$$

Suponemos régimen Laminar

$$(5) f = 64/Re \quad Re = D*v*p/\mu$$

$$(6) f1/f2 = Re2/Re1 \quad v = 4*Q/\pi*D^2$$

$$(7) f1/f2 = D1*Q2/D2*Q1$$

$$(8) f1/f3 = D1*Q3/D3*Q1$$

$$(9) f1/f4 = D1*Q4/D4*Q1$$

Sustituimos (7) en (2)

$$Q1/Q2 = 1,15$$

$$(10) Q2(m^3/s) = 0,8715 \quad *Q1$$

Sustituimos (8) en (3)

$$Q1/Q3 = 2,641$$

$$(11) Q3(m^3/s) = 0,3787 \quad *Q1$$

Sustituimos (9) en (4)

$$Q1/Q4 = 2,6596$$

$$(12) Q4(m^3/s) = 0,3760 \quad *Q1$$

Sustituimos (10,11,12) en (1)

$$Q1(m^3/s) = 0,0681 \quad Q1(L/s) = 68,1$$

$$Q2(m^3/s) = 0,0594 \quad Q2(L/s) = 59,4$$

$$Q3(m^3/s) = 0,0258 \quad Q3(L/s) = 25,8$$

$Q_4(\text{m}^3/\text{s}) = 0,0256$ $Q_4(\text{L/s}) = 25,6$
 Se comprueba si el Flujo es laminar en las tuberías

	RAMAL 1	RAMAL 2	RAMAL 3	RAMAL 4
$v(\text{m/s}) =$	1,3388	1,1667	0,5070	0,5034
$8 \cdot v/D =$	42,083	36,674	15,937	15,823
$\mu_e(\text{Pas}) =$	0,022	0,019	0,008	0,008
$Re =$	27062,57	31053,81	71458,75	27062,57
$f =$	0,0134	0,0134	0,0134	0,0134
$H_f(\text{m}) =$	0,60	0,52	0,23	0,22
$D \cdot \Delta P/4L =$	17,04	16,92	16,46	16,45
$\Delta P(\text{Pa}) =$	33095,30	37706,292	84385,178	84982,59118
$H_f(\text{m})_{\text{Modelo}} =$	1,93	2,20	4,92	4,95

Cálculo de algunos parámetros de la línea de succión y descarga de 2 bombas

Bomba 141A	Bomba 141C	
Succión	Succión	
$Q_s(\text{m}^3/\text{s}) =$	0,0894	$Re_1 =$
$v(\text{m/s}) =$	1,7580	$f_1 =$
$8 \cdot v/D =$	55,2582	$H_f =$
$\mu_e(\text{Pas}) =$	0,029	
$Re =$	27062,573	
$f =$	0,0134	
$H_f(\text{m}) =$	0,6518	
$D \cdot \Delta P/4L =$	17,3378	
$\Delta P(\text{Pa}) =$	18776,5095	
$H_f(\text{m})_{\text{Modelo}} =$	1,0940	1,1098

Bomba 141A	Bomba 141C	
Descarga	Descarga	
$Q_d(\text{m}^3/\text{s}) =$	0,0894	
$v(\text{m/s}) =$	1,7580	
$8 \cdot v/D =$	55,2582	
$\mu_e(\text{Pas}) =$	0,029	
$Re =$	27062,5726	
$f =$	0,0134	
$H_f(\text{m}) =$	0,4774	0,4089
$D \cdot \Delta P/4L =$	17,3378	
$\Delta P(\text{Pa}) =$	15646,3791	13400,35
$H_f(\text{m})_{\text{Modelo}} =$	0,9116	0,7807

Cálculo del colector 1 al colector 2

Colector 1	Colector 2
$Q_c(\text{m}^3/\text{s}) =$	0,0894
$v(\text{m/s}) =$	1,7580
$8 \cdot v/D =$	55,2582
$\mu_e(\text{Pas}) =$	0,029

Re=	27062,5726	27062,57
f=	0,0134	0,0134
Hf(m)=	0,3558	0,3558
D*ΔP/4L=	17,3378	17,3378
ΔP(Pa)=	11660,9305	11660,93
Hf(m)Modelo=	0,6794	0,6794



uidor 200 en el ramal 3

$$3^5 + (Z3 - Z0) \\ 18,0$$

buidor 200 en el ramal 4

$$4^5 + (Z4 - Z0) \\ 18,0$$

487702903,6
0,006483862

0,287561301
0,49

0
#DIV/0!

