



*Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento Metalurgia*

Impacto de la operación de bombeo de colas sobre la resistencia de las líneas instaladas y su vida útil

Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Lisandra Reynosa Caballero

Moa

2012



*Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero- Metalúrgico
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento Metalurgia*

Impacto de la operación de bombeo de colas sobre la resistencia de las líneas instaladas y su vida útil

Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Autora: Lisandra Reynosa Caballero -----

Tutores: Prof. Inst., Ing. Ariel Breff Azahárez -----

Prof. Asist., Ing. Evangelia García Peña, MSc -----

Moa

2012



Declaración y Autoridad

Yo, Lisandra Reynosa Caballero declaro por la presente, que este trabajo de diploma titulado **“Operaciones de bombeo de las colas sobre la resistencia de las líneas instaladas de polietileno de alta densidad”** entregada para optar al título de Ingeniero metalúrgico al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa certifico su propiedad intelectual a favor de dicho Instituto de Educación Superior para su posterior uso con fines docentes, educativos e investigativos.

Lisandra Reynosa Caballero

Fecha

Ing. Ariel Breffe Azahárez

MSc. Evangelia García Peña

Fecha

Fecha



DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de diploma a las personas que más quiero en el mundo, mis padres, Ramón Reynosa Caballero y Bersaida Caballero Terrero. Con todo cariño y amor aquí está la culminación de cinco años de sacrificios, alegrías y tristezas.

A mi novio Yosbel Guerra González por su amor incondicional, su comprensión y por todo el cariño y amor que siento por él.

A todos mis compañeros del aula y a mis amigos de siempre: Frank, Tania, Yenklis.
A todas aquellas personas que pusieron su granito de arena en esta investigación y sin los cuales hubiera sido imposible su realización.

Brindo este triunfo a esta Revolución que tanto esfuerzo dedica para elevar el nivel educacional y con ello a nuestro líder Fidel Castro Ruz que gracias a él hoy podemos hacer realidad nuestros sueños.



AGRADECIMIENTO

Es mi deseo dejar plasmada mi gratitud hacia la Revolución que de una forma u otra me permitió realizar mi sueño de ser un profesional competente.

A mis padres:

Por ser mis protectores y por su prudencia al encaminarme para continuar por la vía correcta.

A mis familiares:

Por formar parte de mi vida y apoyarme cada día en todo lo necesitado, así como guiarme por los buenos caminos.

A mi novio: Yosbel Guerra González, por confiar en mí y permitirme ayudarlo en sus proyectos futuros.

A mis amigos:

Esos que demostraron ser amigos en las buenas y en las malas. En especial a: Tania, Frank, Yenklis que siempre estuvieron allí cuando los necesite.

A: Evangelia García Peña y Ariel Breff Azahárez por apoyarme en todo momento para que esta tesis se terminara en tiempo y forma.

A los profesores:

Por apoyarme durante toda la carrera y brindarme sus conocimientos para formarme como un buen profesional.

A todos gracias, muchas gracias



PENSAMIENTO

"Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido: es hacer a cada hombre resumen del mundo viviente, hasta el día en que vive; es ponerlo al nivel de su tiempo para que flote sobre él, y no dejarlo debajo de su tiempo con lo que no podrá salir a flote; es preparar al hombre para la vida."

José Martí Pérez



RESUMEN

El propósito del trabajo fue determinar el impacto de las operaciones de bombeo de las colas con temperaturas superiores a 45 °C sobre la resistencia de las líneas de Polietileno de alta densidad; para llevar a efecto el objetivo se empleó el método de cálculo inverso, el método estadístico, se realizó un cálculo para el gasto de agua y se determinó la caída de presión, con los cuales se hizo el cálculo de la vida útil de la instalación existente y se fundamenta la variante para prolongar el período de utilización de la misma. Se obtuvo que la tubería instalada fue diseñada para alcanzar una vida útil de 25 años a una temperatura de 45 °C y una presión de $9,661 \cdot 10^5$ Pa; con las condiciones actuales no es posible cumplir los estándares de operación, porque alcanza valores entre 48 y 50 °C, con las cuales la tubería tendrá una vida útil de 2 años. Para alargar el período de utilización de dicha tubería se analizaron dos variantes, añadir agua en el tanque de almacenaje de colas o cambiar la tubería por una de mayor resistencia a la temperatura. Económicamente la variante seleccionada fue la adición de agua al tanque de almacenaje de colas ya que el sistema de bombeo tiene la capacidad suficiente para asimilar el incremento del flujo. Con la variante propuesta las tuberías de polietileno de alta densidad instaladas para el bombeo de las colas de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba tendrá un período de duración de 20 años.



ABSTRACT

The intention of the work was to determine the impact of the operations of pumping of the tails with temperatures high to 45 °C on the resistance of the lines of Polyethylene of HD; in order to take to effect the objective the method of inverse calculation, the statistical method was used, was made the a calculate for the expense of water and determined the pressure fall, of which the calculation took control of the life utility of the existing installation and the variant is based to prolong the period of use of the same one. It was obtained that the installed pipe was designed to reach a life utility of 25 years to a temperature of 45 °C and one pressure of $9,661 \cdot 10^5$ Pa; with the present conditions it is not possible to fulfill the operation standards, reach values between 48 and 50 °C, with which the pipe will have a life utility of 2 years. In order to extend the period of use of this pipe two variants were analyzed, to add water in the tank of storage of tails or to change the pipe by one of greater resistance to the temperature. Economically the selected variant went the addition of water to the tank of storage of tails since the pumping system has the capacity sufficient to assimilate the increase of the flow. With the propose variant the polyethylene pipes of HD installed for the pumping of the tails of the Commandant company Pedro Sotto Alba had a period of duration of 20 years.



ÍNDICE	Pág
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Fundamentos teóricos	4
1.2 Características de las tuberías polietileno de alta densidad.	4
1.2.1 Ventajas de las tuberías de polietileno.....	5
1.2.2 Principales aplicaciones.....	5
1.3 Aspectos generales sobre los fluidos.....	7
1.4 Propiedades de los fluidos.....	8
1.4.1 Densidad:.....	8
1.4.2 Peso específico.....	8
1.4.3 Viscosidad.....	9
1.4.4 Gasto	9
1.5 Antecedentes.....	11
Conclusión del capítulo 1	16
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS	17
Introducción	17
2.2 Materiales empleados.....	17
2.3 Métodos utilizados	17
2.3.1 Método de cálculo de la vida útil por vía inversa.....	17
2.3.2 Método estadístico	19
2.3.2.1 Procedimiento de limpieza de la base de datos	19
2.3.2.2 Procesamiento estadístico de la base de datos.....	20
2.4 Método de cálculo del balance de masa.....	20
2.4.1 Representación de las instalaciones de bombeo a la presa de cola.....	21
2.5 Fórmulas para cálculo hidráulico.	22



2.5.1 Caída de presión en la tubería.....	22
2.5.2 Cálculo del coeficiente de rozamiento.....	23
2.6 Método para realizar el análisis económico.....	23
2.6.1 Período de Recuperación.....	24
2.6.2 Valor Presente Neto.....	24
2.6.3 Razón de Costo Beneficio.....	25
2.6.4 Tasa Interna de Rendimiento.....	25
2.7 Base para el análisis económico.....	26
2.8 Selección de la variante más factible para alargar la vida útil de la tubería de HDPE en la planta de lavaderos.....	26
Conclusiones del capítulo 2.....	27
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	28
3.1 Cálculo de la vida útil por vía inversa.....	28
3.2 Resultado de los análisis estadísticos.....	28
3.3 Resultado del Balance de energía.....	33
3.4 Resultados del cálculo hidráulico.....	33
3.5 Variantes Propuestas:.....	34
3.6 Resultado del Estimado del Costo Capital.....	35
3.6.1 Bases del estimado.....	35
3.6.2 Fundamentos para el Análisis Económico.....	36
3.6.3 Métodos de Valoración y Selección de Inversiones.....	36
3.6.4 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR).....	37
3.6.5 Resultados del Tratamiento Económico.....	37
CONCLUSIONES.....	38
RECOMENDACIONES.....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40



INTRODUCCIÓN

La tubería de polietileno de alta densidad SCLAIRPIPE constituye el más reciente de los avances en cuanto a materiales y técnicas de fabricación. Desde el año 1968 y hasta nuestros días esta tubería ha logrado forjarse un nombre en lo que respecta al rendimiento eficaz en función de los costos en una amplia gama de aplicaciones industriales y municipales para tuberías. SCLAIRPIPE ha sido ampliamente utilizada en el mercado de suministro y distribución de agua potable a través de redes municipales, destinadas a alcantarillados de gravedad, colectores de alcantarillado y sistema hidráulico de presión.

Estas tuberías HDPE, Polietileno de Alta Densidad, ofrecen variadas alternativas de diseño, flexibilidad y garantizan una larga vida útil para todo tipo de proyectos en Acuicultura, Minería, Agricultura, Construcción, Pesca, Alcantarillado y todo tipo de Industria.

La gran versatilidad de los productos HDPE lo hacen ideal para todo tipo de proyectos en que sea necesario transportar, almacenar y distribuir. También la utilización del material HDPE favorece la economía, por la facilidad de transporte, instalación y sus casi nulos costos de mantenimiento y su larga vida útil (50 años a 20 °C y $1,035 \cdot 10^5$ Pa).

En el año 1998 en la planta de lixiviación y lavado de la empresa productora de sulfuros de níquel más cobalto "Comandante Pedro Sotto Alba" se instaló un circuito de estas tuberías para la evacuación de las colas procedentes de la última etapa de lavado, la tubería fue diseñada para alcanzar una vida útil de 25 años a una temperatura de 45 °C y una presión de $9,661 \cdot 10^5$ Pa.

En el año 2010 se instaló un circuito para el tratamiento del 100 % del agua procedente de los deshumidificadores con una temperatura de 83 °C, este incremento de temperatura ha ocasionado que las colas en la última etapa de lavado



incremente la temperatura por encima de 45 °C, alcanza valores entre 48 y 50 °C, además con el transcurso de los años se ha incrementado la altura de la presa de almacenaje de colas, lo cual requiere una mayor presión en la descarga de las bomba para poder distribuir las mismas de manera uniforme, hasta alcanzar valores de presión de $9,997 \cdot 10^5$ Pa.

De acuerdo con los datos de operación señalados anteriormente, puede llegar el momento en que la tubería pierda la resistencia para la cual fue diseñada y disminuya sustancialmente la vida útil para la que fue seleccionada. Si ocurre una perforación o rajadura de la tubería se violará los estándares de operación aprobados para la operación de Moa Nickel S.A, bajo la Resolución No. 139/2004. Y se incurrirá en una pérdida de producción de 50 t de sulfuros de níquel más cobalto por estar la tubería fuera de operación por un espacio de 8 horas como mínimo.

Se hace necesario evaluar la resistencia de las tuberías instaladas para la operación de bombeo de las colas de la empresa Pedro Sotto Alba, donde se propone una variante que permita prolongar el tiempo de vida útil, por lo que constituye esto la **Situación Problemática** del trabajo.

Como **Problema** se plantea el insuficiente conocimiento de las operaciones de bombeo de las colas en la resistencia de las líneas de Polietileno de alta densidad.

El **Objeto de estudio**, las operaciones de bombeo de las colas.

Como **Objetivo** se propone determinar el impacto de las operaciones de bombeo de las colas con temperaturas superiores a 45 °C sobre la resistencia de las líneas de Polietileno de alta densidad.

Hipótesis

Si se determina el impacto de las operaciones de bombeo de las colas con temperaturas superior a 45 °C, entonces se podrá conocer la resistencia de las líneas de Polietileno de alta densidad.

Campo de acción: La hidráulica

Objetivos específicos:

- 🚧 Caracterizar el sistema actual de evacuación de colas.
- 🚧 Calcular el sistema de redes hidráulicas para el bombeo de las colas con temperaturas inferiores a 45 °C.



- Determinar el impacto de las operaciones de bombeo de las colas con temperatura superior a 45 °C sobre la resistencia de las líneas de polietileno de alta densidad.

Métodos de investigación:

Método histórico – lógico en la investigación bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.

Método experimental para determinar el tiempo de vida útil de las tuberías de polietileno de alta densidad instaladas para el bombeo de colas en la empresa Pedro Sotto Alba.

Los aportes esperados en la investigación y los aportes ambientales, sociales y económicos que se prevén obtener con su aplicación son los siguientes:

En lo económico

- Disminución de las pérdidas de producción debido a los paros de la fábrica provocados por deterioro de las tuberías, lo que conlleva a un ahorro sustancial.

En lo social

- Mitigación de la contaminación ambiental y al hombre causado por el material estéril depositado en la escombrera.
- Disminución del impacto ambiental.



CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Fundamentos teóricos

La industria Minero –Metalúrgica se ha convertido en uno de los pilares en los que se sustenta el desarrollo económico – industrial del país y es una de la que enfrenta en la actualidad el reto del perfeccionamiento empresarial, vía para lograr un nivel competitivo mundial. Este perfeccionamiento empresarial como proceso integral no puede soslayar el perfeccionamiento tecnológico a partir de una aplicación consecuente de los avances de la ciencia y la técnica.

El **objetivo** del capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos necesarios sobre las experiencias ordenadas que existen a escala mundial en la fabricación y aplicación de tuberías de polietileno de alta densidad para las industrias metalúrgicas o químicas, así como las características y metodología de cálculos de la vida útil a diferentes regímenes de operación.

El polietileno de alta densidad es un termoplástico fabricado a partir del etileno (elaborado a partir del etano, uno de los componentes del gas natural). Es muy versátil y se puede transformar de diversas formas: inyección, soplado, extrusión, el mismo es un polímero obtenido del etileno en cadenas con moléculas bastantes juntas. Es un plástico incoloro, inodoro, no tóxico, fuerte y resistente a golpes y productos químicos. Se utiliza para fabricar envases de distintos tipos de fontanería, tuberías flexibles, prendas textiles, contenedores de basura, papeles, etc. Todos ellos son productos de gran resistencia y no atacables por los agentes químicos.

1.2 Características de las tuberías de polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad es un polímero que se caracteriza por:

- Excelente resistencia térmica y química.
- Muy buena resistencia al impacto.



- Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
- Muy buena procesabilidad, es decir, se puede procesar por los métodos de conformado, empleado para los termoplásticos, como inyección y extrusión.
- Es flexible, aún a bajas temperaturas.
- Es tenaz.
- Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
- Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre él.
- Es muy ligero.
- Su densidad es igual o menor a $0,952 \text{ g/cm}^3$.
- No es atacado por los ácidos, resistente al agua a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y a la mayoría de los disolventes ordinarios.

1.2.1 Ventajas de las tuberías de polietileno

- Livianas, de fácil manipulación y transporte.
- Flexibilidad y resistencia
- Resistencia química
- Resistencia a la radiación ultravioleta (contenido de negro humo)
- Baja presión.
- Resistencia a la abrasión.
- Paredes internas lisas con muy bajo coeficiente de roce que no permiten adherencias que posteriormente impidan el paso de los fluidos.
- Menores costos de instalación.
- Vida útil de más de 50 años con bajos costos de mantención y operación.
- Alta flexibilidad, que en caso de sismos o vibraciones del terreno, las tuberías se adaptan mejor a los movimientos, sin agrietarse ni desacoplarse.
- No hay pérdidas por evaporación.
- Mantiene el caudal uniforme en todo su recorrido.
- Costo del mantenimiento menor que el de otros materiales.

1.2.2 Principales aplicaciones

- Transporte de agua potable.
- Transporte de aire comprimido.
- Conductores subacuáticas absorbentes, emisores.



- Aplicaciones en minería.
- Agricultura.
- Transporte de aguas residuales corrosivas industriales.
- Transporte y distribución de gas natural.

En Cuba existen 3 importantes empresas que se dedican a la fabricación de tuberías plásticas de polietileno de alta densidad la primera se encuentra situada en Ciego de Ávila, la segunda en La Habana y la tercera en Holguín.

Ciego de Ávila

La primera que fue instalada en el país está ubicada en Ciego de Ávila.

Sus objetivos empresariales son:

Producir y comercializar de forma mayorista tuberías lisas de plástico al sistema del INRH (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos) y a otras entidades.

Brindar servicios de consultoría y asesoría en el montaje y la producción de tuberías plásticas y sus accesorios.

Comercializar de forma mayorista envases y embalajes recuperados de la materia prima adquirida para el proceso productivo.

La Habana

La planta se localiza en el poblado de Wajay, del municipio de Boyeros; la misma trabaja con tecnología de punta y tiene capacidad para fabricar 13,180 t al año de tuberías de polietileno de alta densidad.

Hidroplast cuenta con dos líneas de producción, la cual fabrica tuberías para el transporte de agua potable y planea agregar tuberías para alcantarillado a sus productos en el futuro. El costo de la planta fue equivalente a \$10,5 millones.

Holguín

Esta es la tercera empresa de su tipo existente en el país y cuenta con dos líneas de producción de tecnología de punta para la fabricación de tubos de polietileno de diferentes diámetros, que van desde 90 hasta 1 000 mm.

En el año 1998 se instaló por primera vez en la planta de lixiviación y lavado de la empresa productora de sulfuros de níquel más cobalto "Comandante Pedro Soto Alba" localizada en la zona minera de Moa, un circuito de tuberías para la evacuación de las colas procedentes de la última etapa de lavado, la tubería fue diseñada para



una vida útil de 25 años a una temperatura de 45 °C y una presión de $9,661 \cdot 10^5$ Pa y material de polietileno de alta densidad (HDPE). Actualmente cambiaron las condiciones de diseño, se opera con una temperatura superior a los 45 °C y un presión de trabajo de $8,971 \cdot 10^5$ Pa en ocasiones ha llegado a alcanzar temperatura de 56 °C y presión de $1,035 \cdot 10^6$ Pa, la dirección de la empresa desconoce la vida útil que puede alcanzar la tubería si se trabaja por encima de las condiciones de diseño.

1.3 Aspectos generales sobre los fluidos

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

Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases.

Líquidos: son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y tienen superficies libres.

Gases: son compresibles, se expansionan hasta ocupar todas las partes del recipiente que los contenga.

Existen dos tipos de flujos permanentes que hay que considerar, el flujo laminar y el flujo turbulento. Que sean permanentes quiere decir que la velocidad del flujo es constante en el tiempo, pero no necesariamente en el espacio.

Por otro lado un flujo permanente podrá ser uniforme o no uniforme, la uniformidad implica constancia de la velocidad en el espacio.

Flujo laminar: El flujo laminar se da cuando las partículas fluidas se mueven siguiendo trayectorias paralelas y forman el conjunto de ellas, capas o láminas. Los módulos de las velocidades de capas adyacentes no tienen el mismo valor. El flujo laminar está gobernado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular, es decir, la tensión cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido por el gradiente de las velocidades o bien $\tau = \mu dv/dy$. La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia.

Flujo turbulento: En el flujo turbulento las partículas fluidas se mueven de forma desordenada en todas las direcciones.



$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy}$$

Donde μ representa los efectos debidos a la viscosidad y η tiene en cuenta los efectos debidos a la turbulencia.

1.4 Propiedades de los fluidos

Uno de los aspectos fundamentales en el cálculo de instalaciones hidráulicas lo constituyen las propiedades físicas de los fluidos. Desde el punto de vista del flujo de los fluidos los más importantes a tener en cuenta son la densidad, el peso específico y la viscosidad y en ciertos casos muy especiales, la tensión superficial. Todas estas propiedades varían, en mayor o menor grado, con la presión y la temperatura, por lo que resulta fundamental tener en cuenta las condiciones en las que se llevan a cabo los procesos.

1.4.1 Densidad

Es la masa del fluido contenida en una unidad de volumen que viene expresada por la relación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

donde:

m : masa de fluido, kg

v : volumen que ocupa dicha masa, m^3

ρ : densidad, kg/m^3

Para los líquidos la densidad prácticamente no varía con la presión y para intervalos pequeños de variación de temperatura puede considerarse constante.

1.4.2 Peso específico

El peso específico es el peso de la unidad de volumen y está vinculado a la densidad, por la relación:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2)$$

donde:

g : aceleración de la gravedad, m/s^2

ρ : densidad, kg/m^3



γ : peso específico, N/m³

1.4.3 Viscosidad

Durante el movimiento de un líquido real, en éste surgen fuerzas interiores de rozamiento, que ofrecen cierta resistencia al movimiento. Estas fuerzas actúan entre capas vecinas del líquido al desplazarse una respecto a la otra. La propiedad del líquido a oponerse a las fuerzas que provocan el movimiento relativo de sus partículas se denomina viscosidad.

La viscosidad puede ser considerada como un coeficiente indicador de la resistencia que experimenta un fluido al ser sometido a un esfuerzo cortante cualquiera y está definida por la ley de Newton:

$$\tau = \mu \cdot \gamma^{\circ} \quad (3)$$

donde:

τ : esfuerzo cortante, Pa

γ° : gradiente de velocidad, S⁻¹

μ - viscosidad, Pa.s

1.4.4 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 B,(1986).

$$Q = A \cdot V \rightarrow \text{Gasto volumétrico}, \frac{m^3}{s}; \frac{1}{s} \quad (4)$$

$$G = Q \cdot \gamma \rightarrow \text{Gasto en peso}, \frac{N}{s}; \frac{kg_f}{s} \quad (5)$$

$$M = \rho \cdot Q \rightarrow \text{Gasto en masa}, \frac{kg}{s} \quad (6)$$

La forma más usada de determinar el gasto es:

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}; \frac{l}{\text{min}}; \frac{m^3}{h} \quad (7)$$



Bombeo

Se denomina bombeo a la adición de energía a un fluido, con vista a transportarlo de un punto a otro. Desde el punto de vista físico es la transportación de la energía mecánica, del motor acoplado a la bomba, en energía del líquido. Se han desarrollado un gran número de tipos de bombas que difieren ampliamente en su fundamento y construcción mecánica para cubrir una gran variedad de condiciones de trabajo.

Definiciones básicas

Capacidad: Es el flujo volumétrico o gasto que es capaz de entregar una bomba en unas condiciones dadas.

Carga de bombeo: Es el trabajo que debe proporcionar la bomba al fluido para que pueda vencer las diferentes resistencias que se oponen al movimiento del fluido, y se expresa en altura de líquido.

$$H_B = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta z + \frac{\sum F}{g} \quad (8)$$

Carga estática: Es la distancia vertical entre el nivel libre de la fuente de abastecimiento y el punto de descarga.

$$H_z = Z \quad (9)$$

Carga de velocidad: Es la distancia vertical a la cual tendría que caer un cuerpo para adquirir la velocidad v :

$$H_c = v^2 / 2 \cdot g \quad (10)$$

Carga de presión: Es la longitud vertical de una columna de líquido que proporciona una presión hidrostática equivalente a la presión existente.

$$H_p = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (11)$$

Carga de fricción: Es la presión, expresada en la altura de columna de líquido, necesaria para vencer la resistencia de fricción provocada por el movimiento del fluido.

$$H_f = \sum F / g \quad (12)$$

De acuerdo con estas definiciones la ecuación puede ser escrita del siguiente modo.



$$H_B = \Delta H_p + \Delta H_c + \Delta H_z + H_f \quad (13)$$

1.5 Antecedentes

Kasatkin (1971) plantea que la velocidad de movimiento de los líquidos de pequeña viscosidad no debe superar – 3 m/s. Para los líquidos viscosos – 1 m/s siendo el movimiento de los líquidos por su propio peso sus velocidades ordinariamente son de 0,2 a 1 m/s, en las tuberías de presión (impulsión mediante bombas) las velocidades son de 1 a 3 m/s.

Al elegir la bomba, es necesario tener en cuenta la característica 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 combinación de las características del sistema y la bomba se denomina punto de trabajo. Este punto corresponde al caudal máximo de la bomba Q_1 durante su funcionamiento para la red dada. Si se necesita un caudal más grande es necesario aumentar el número de revoluciones del motor eléctrico o bien cambiar la bomba por otra de mayor caudal. El aumento del caudal puede también lograrse si se reduce la resistencia hidráulica h_p . En este caso el punto de trabajo se traslada por las características de la bomba a la derecha.

Crane (1995), plantea el teorema de Bernoulli, es una forma de expresión de la aplicación de la energía al flujo de fluidos en tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario, fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica (Energía Potencial), la altura debida a la presión (Energía de Presión) y la altura debida a la velocidad (Energía Cinética), es decir:

$$H = Z + \frac{P}{W} + \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (1,3)$$

donde:

H : Energía total en un punto

Z: Energía potencial

$\frac{P}{W}$: Energía de presión



W : Peso específico del agua = 1000 kg/m

$\frac{V^2}{2 \cdot g}$: Energía Cinética

g : Aceleración de la gravedad = 10 m/s

Osborne Reynolds dedujo que el régimen de flujo en tuberías depende de los cuatro factores siguientes:

ω : velocidad lineal del fluido, m/s

ρ : densidad del fluido, kg/m^3

de : diámetro equivalente de la tubería, m

μ : viscosidad dinámica del líquido, Pa · s

Los cuatro valores Reynolds se obtuvieron de la ecuación siguiente:

$$R_e = \frac{\omega \rho d_e}{\mu}$$

Para facilitar el análisis, se desglosa la unidad Pa en sus unidades básicas, para ello se sabe que:

$$P = \frac{F}{A}$$

donde:

F	—	fuerza ejercida, N;
A	—	área de la superficie sobre la cual actúa la fuerza, m^2

Entonces se puede escribir

$$Pa = [P] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{[m] \cdot [a]}{[A]} = \frac{kg \cdot m/s^2}{m^2} = \frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

El Teorema de Bernoulli plantea que la energía total contenida en el fluido es igual a la suma de las tres presiones o alturas que son la energía potencial, la cinética o de



velocidad y la piezométrica (Potencial más la cinética) y como la energía no puede ser creada ni destruida, la energía total es constante y se expresa como:

$$H = \left(\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \right)$$

La teoría del bombeo se debe a varios fenómenos que participan directamente en estas como son los diagramas de velocidades, las corrientes circulatorias y otros fenómenos que ayudan a imprimir al fluido una velocidad tal que al entrar en contacto con el difusor o la voluta la transforma en presión la cual permite elevar o transportar el fluido hasta el lugar que se desee.

Columbié (2006), realiza un estudio del transporte de fuel oil obtenido a partir del Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa Ernesto Che Guevara, donde realiza varias mediciones de temperatura y presión, al utilizar un termómetro y un manómetro, también tiene en cuenta la longitud de los tramos analizados de la instalación empleada y las características del flujo del fluido que se transporta, para así, hacer el cálculo de la instalación de transporte, obtiene como resultado que los cálculos realizados para este nuevo transporte es factible desde el punto de vista medio ambiental, pero no se tuvo en cuenta para el cálculo la vida útil de la instalación.

Izquierdo (1989), en el 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 Sotto 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, el que depende 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, sin embargo no consideró en la evaluación otros parámetros tales como el tiempo de vida útil y la eficiencia de la instalación.

A partir de los trabajos descritos por Caldiño y Salgado (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas



agua - arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas tales como pH y diámetro medio de las partículas de arena. El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos, (Steffe y Morgan,1986); (Ibarz y Vélez, 2001); (Vélez, 2003); (Sablani, 2003). En el trabajo el fluido a transportar es mezcla de agua, arena y arcilla.

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

Moreno (2011), analizó las variantes para la alimentación del sólido de colas a la presa de forma estable, caracterizó el sólido alimentado donde fundamenta el criterio de diseño para el montaje de la bomba reforzadora y para el flujo de pulpa, sólido y residual para las condiciones actuales. Además realiza cálculos hidráulicos, los cuales fundamentan la propuesta de montaje de una bomba reforzadora para el bombeo de forma estable de pulpa a la presa, debió analizar el tiempo de duración de la tubería para ver si era rentable o no su análisis.

Estévez (2006), realizó un estudio en la planta de Recuperación de Amoníaco 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, en este caso el material a transportar es cola de la tecnología amoniaca que tiene menor corrosivo.

Roque (1989), desarrolló investigaciones experimentales en relación con el bombeo de soluciones azucaradas de naturaleza no newtonianas, en equipos centrífugos y propuso coeficientes de corrección que permiten pronosticar la curva característica de estos equipos de bombeo en función de las propiedades reológicas de los fluidos ensayados. Estos coeficientes de corrección se determinan en función del número generalizado de Reynolds, y el método de re-cálculo según plantea su autor es válido para el rango comprendido entre números de Reynolds de $1,3 \cdot 10^{-4}$ a $1,6 \cdot 10^4$

$$Re = \frac{U_2^{(2-n)} \cdot D_2 \cdot \rho}{\frac{K}{8} \left[\frac{6 \cdot n + 2}{n} \right]^n}$$

Donde:

n - Índice de la ley de potencia (adimensional).

K - Índice de consistencia másica, Pa.s

En el trabajo el fluido a transportar son soluciones azucaradas y el equipo empleado son de tipo centrífugos.

Montero (2009), realizó un análisis del sistema de bombeo a la presa de cola de la planta de lavaderos en la empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Donde hizo un cálculo hidráulico a la bomba, como resultado propone instalar a la bomba 356-PU-1A un nuevo motor de 300 HP y un variador de velocidad (VFD) de 350 HP para lograr mayor carga y capacidad.

Instalar un transmisor indicador de flujo en el fondo del tanque 153-TK-7 de mayor rango. Actualmente es de 0-3,000 gpm y no es suficiente porque se operan con flujos superiores a 3,000 gpm. En este caso aunque se transporta fluido a la presa de cola, el objetivo mejorar las características de la bomba instalada en la planta de lavadero.



Conclusión del capítulo 1

1. Se realizó una amplia revisión del estado del arte relacionado con la temática desarrollada, lo que permitió trazar la estrategia de trabajo para dar respuesta al problema planteado.
2. Se profundizó en los conocimientos para el transporte hidráulico de pulpa por tuberías de diferentes materiales.
3. La bibliografía consultada, aporta información sobre las propiedades básicas de los fluidos, características de las tuberías de polietileno de alta densidad, ventajas, así como sus principales aplicaciones y cálculos.



CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción

Este capítulo presenta de manera resumida la metodología de determinar las condiciones de operación, el tiempo de vida útil y una variante para alargar la vida útil de la tubería utilizada en el bombeo de colas en la empresa productora de sulfuros de níquel más cobalto Pedro Sotto Alba.

En el capítulo se plantea como objetivo:

Fundamentar las diferentes variantes para la alargar la vida útil de la tubería de polietileno de alta densidad.

2.2 Materiales empleados

Software para realizar el análisis estadístico

Computadora

2.3 Métodos utilizados

2.3.1 Método de cálculo de la vida útil por vía inversa

Para determinar la vida útil de la tubería por este método se parte de la ecuación de cálculo de la presión interna.

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot DF}{SDR - 1} \quad (1)$$

$$DF = F \cdot FE \cdot FT \cdot FL \quad (2)$$

Donde:

- P: presión interna 1034214 Pa-
- S: espesor en m
- D: diámetro exterior 0,4572 m-



- t: grosor de pared 0,0508 m-
- SDR: relación de dimensión estándar entre el diámetro y el espesor
- DF: factor de diseño completo
- F: coeficiente de seguridad de diseño- 0,5
- FE: factor ambiental- 1
- FT: factor de corrección por temperatura- 0,66
- FL: factor de corrección de vida

$$SDR = \frac{D}{t} \tag{3}$$

$$DF = \frac{P \cdot (SDR - 1)}{2 \cdot S} \tag{4}$$

$$FL = \frac{DF}{(F \cdot FE \cdot FT)} \tag{5}$$

Tabla1 Datos del fabricante

S: Fortaleza hidrostática a largo plazo	
PE 3048	1,10E+13 Pa
PE 2406	8618447 Pa
F: Coeficiente de seguridad de diseño 0,5	
FE: Factor ambiental	
Petróleo crudo 0,5	
Gas natural mojado 0,5	
Agua 1	
FT: Factor de corrección por temperatura	
75°C	1
100°C	0,81
120°C	0,66
140°C	0,5
Factor de corrección de vida	



1 año	1,16
2 años	1,13E-06
5 años	1,09
10 años	1,07
20 años	1,04

2.3.2 MÉTODO ESTADÍSTICO

El método estadístico permite tratar tabulaciones numéricas obtenidas de observaciones, en forma de medidas o muestras, tomadas de una fuente o población, para obtener conclusiones de un sistema o población estudiados. La estadística se puede dividir en dos partes: la estadística descriptiva, que se encarga de la colección y resumen de datos, y la inferencia estadística, cuya función fundamental es la obtención de conclusiones de una población o sistema.

La inferencia estadística tiene a su vez dos aspectos: la estimación, que consiste en deducir o estimar una propiedad de la población y la comprobación de hipótesis, que estriba en determinar con qué grado de precisión se cumple una suposición de la población.

La estadística permite, mediante sus distintas ramas, proveer a la investigación científica de los métodos necesarios para el mejor logro de sus fines.

El método científico consta de tres pasos generales: la ejecución de experimentos, que debe ser apoyada por el diseño de experimentos; la obtención de conclusiones objetivas mediante la inferencia estadística y, la obtención de leyes, que corresponden a la rama del saber o de las ciencias que se estudie.

El método empleado consiste en un análisis estadístico del registro diario de temperatura y presión desde enero del 2011 hasta diciembre del 2011, tomados del Citec en la empresa Comandante Pedro Sotto Alba, se analizaron en el programa Statgraphics, el cual ofrece una tabla de frecuencia y un gráfico de dispersión donde se determina en que grado la tubería trabaja fuera de su rango de diseño.

2.3.2.1 Procedimiento de limpieza de la base de datos

En el trabajo fue necesario efectuar la limpieza de la base de datos a través de dos pasos de filtrado. El primer paso consistió en la limpieza de la base de datos a través



del software Excel, el cual permitió eliminar los períodos que no cumplían con los valores habituales de medición, relacionados con afectaciones y trabajos de mantenimiento del equipamiento.

La comprobación de la calidad de la limpieza efectuada y la obtención de la base de datos (limpia final), se realiza a través del análisis estadístico cuyo procedimiento se expone a continuación.

2.3.2.2 Procesamiento estadístico de la base de datos

Por cada una de las filas de la base de datos se toman los valores dudosos de acuerdo a las afectaciones e inconveniencias que motivaron a realizar la limpieza de la base de datos en concordancia con lo que se explicó anteriormente.

El Software STATGRAPHICS CENTURION XV para Windows tiene una estructura modular constituida por 3 módulos diferentes, en los que podrá encontrar más de 150 procedimientos de distribución.

El módulo básico aporta todos los programas de estadísticas básicas. A partir de éste se pueden seleccionar las funciones estadísticas adicionales necesarias en los otros módulos.

Los módulos son los siguientes: módulo básico, control de calidad y diseño de experimentos, análisis de series temporales, análisis multivariante y regresión avanzada.

El programa presenta un importante conjunto de novedades, que aumentan sus reconocidas capacidades en cuanto a potencia de cálculo y gráfica, flexibilidad, racionalidad y facilidad de uso.

2.4 Método de cálculo del gasto de agua

Una de las alternativas para alargar la vida útil de la tubería que se utiliza para el bombeo de colas, es añadir agua de retorno de la piscina sur al tanque de almacenaje de colas, con el objetivo de disminuir la temperatura hasta las condiciones de diseños, para la cual fue seleccionada la tubería. Para saber la cantidad de agua que se le debe añadir al tanque de almacenamiento de colas se debe calcular el gasto de agua.

La expresión para realizar el cálculo de gasto de agua se muestra en la expresión que se expone a continuación:



$$G_3 = \frac{G_1 \cdot Cp_1 \cdot (t_{1i} - t_{1f}) + G_2 \cdot Cp_2 \cdot (t_{2i} - t_{2f})}{Cp_3 \cdot (t_{3f} - t_{3i})} \quad (6)$$

donde:

G_1, G_2 y G_3 : gastos volumétricos de las colas, del agua residual y del agua de la presa respectivamente, m^3/s ;

t_{1i}, t_{2i} y t_{3i} : temperaturas iniciales de las colas, del agua residual, del agua de la presa de cola respectivamente, $^{\circ}C$;

Cp_1, Cp_2 y Cp_3 : capacidades caloríficas de las colas, del agua residual y del agua de la presa respectivamente, $kJ/(kg \cdot K)$;

También se utilizó el Microsoft Excel, para realizar el cálculo hidráulico donde se emplea una metodología que permite hacer un análisis detallado de los resultados.

2.4.1 Representación de las instalaciones de bombeo a la presa de cola

La planta de lavadero vierte las colas al tanque de almacenamiento pero además en este tanque se vierten los residuales líquidos del proceso de los deshumidificadores, lo que ocasiona que aumente la temperatura de los residuos en el tanque de almacenamiento y cuando se vierta a la presa de cola, la tubería trabaja en condiciones superiores a las de diseño por lo que se propone utilizar el agua de reboso recirculándola al tanque de almacenamiento y de esta forma disminuir la temperatura.

En la figura 2.1 se muestra la instalación de bombeo, donde se representan los tramos en que se divide para facilitar el cálculo hidráulico. El tramo uno está comprendido desde el tanque de almacenamiento (TK) y las bombas, el dos desde las bombas hasta la entrada de la presa de cola y el tres en el interior de la presa.

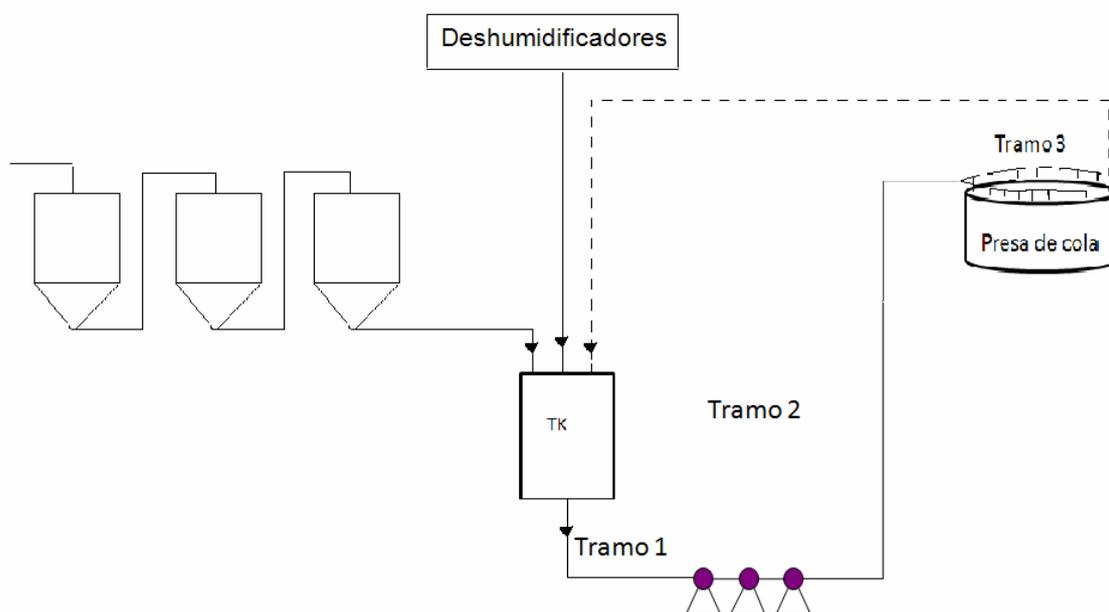


Figura 2.1 Instalación de bombeo al depósito de colas

2.5 Fórmulas para cálculo hidráulico

Una vez determinado el flujo de agua que se debe añadir en el tanque de almacenaje de colas, es necesario determinar si la instalación es capaz de garantizar el transporte del flujo hasta la presa de colas. Para lograr esto es necesario calcular la caída de presión que ofrece la red y compararlo con la presión que ejerce la bomba.

2.5.1 Caída de presión en la tubería

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left(1 + \frac{\lambda \cdot L}{d} + \sum \zeta \right) + \rho \cdot g \cdot h_{el} \quad (7)$$

donde:

Δp : caída de presión de la red, Pa;

ρ : densidad del líquido, kg/m³;

w : velocidad lineal del fluido a través de la sección transversal de la red, m/s;

λ : coeficiente de rozamiento;

L : longitud de la red, m;

d : diámetro de la red, m;

ζ : coeficiente de resistencia local;

g : aceleración de la caída libre, m/s²;



h_{el} : altura de elevación del fluido, m.

2.5.2 Cálculo del coeficiente de rozamiento

El coeficiente de rozamiento se determina con el criterio de Reynolds (Re) y la relación que existe entre el diámetro y la rugosidad (d/e) de la tubería en la figura 1-5 de libro de texto Problemas y Ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química Pavlov.

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (8)$$

donde:

μ : coeficiente dinámico de viscosidad, Pa·s

2.6 Método para realizar el análisis económico

Para realizar el análisis económico se empleó la técnica de presupuesto capital para la selección de alternativas.

Para la mayoría de los autores el problema fundamental que se presenta en toda inversión está relacionado con la determinación de la rentabilidad del proyecto. A su parecer al disponer de una medida de la rentabilidad del proyecto, se puede decidir si éste conviene o no llevarlo a cabo, y además cuando se dispone de una lista de alternativas de inversión, estas se pueden ordenar de mayor a menor rentabilidad, con el objetivo de realizar en primer término aquellas más rentables. Esta jerarquización de las oportunidades de inversión tiene especial interés cuando la empresa dispone de unos recursos financieros inferiores a los que hubieran sido necesarios para realizar todas las inversiones que superan la rentabilidad mínima aceptable.

Existen múltiples criterios para fundamentar las decisiones de inversión. Desde 1948 existían varias docenas de reglas o criterios para fundamentar las decisiones de inversión en activos de capital, muchos de los cuales estaban faltos de toda teoría y otros se hallaban al límite de la superstición. A partir de 1948 aparecieron nuevos criterios que pretendían fundamentar la racionalidad de las inversiones.

Gitman (2006) clasificó cinco técnicas en dos grupos, denominándolas técnicas sofisticadas y no sofisticadas. En el primer grupo se encuentran la tasa promedio de



rentabilidad (TPR) y período de recuperación de la inversión (PRI) y en el segundo el valor presente neto (VPN), razón costo beneficio y tasa interna de rendimiento (TIR). Con motivo de brindar una mayor coherencia y objetividad al estudio de las técnicas expuestas, se detallan las mismas.

2.6.1 Período de Recuperación

Es la primera técnica planteada por el autor, lo define como el plazo de tiempo que se requiere para que los ingresos netos de una inversión recuperen el costo de la misma. Esta se determina si se suman los flujos futuros de efectivo de cada año hasta que el costo inicial del proyecto de capital quede por lo menos cubierto, por lo que la cantidad total del tiempo que se requiere para recuperar el monto original invertido, que incluye la fracción de un año en caso de que sea apropiada, es igual al período de recuperación. Para su cálculo, Gitman (2006) propuso la ecuación siguiente:

$$PR = \frac{\text{Año anterior a recuperación} + \text{Costo no recuperado al principio de año}}{\text{Flujo de efectivo durante el año}} \tag{9}$$

2.6.2 Valor Presente Neto

A medida que se reconocieron los defectos en el método del período de recuperación y en estos otros métodos iniciales, las personas empezaron a buscar otras formas de mejorar la efectividad de las evaluaciones de proyectos. Uno de estos métodos que marcó pauta dentro de las técnicas de presupuesto de capital es el **Valor Presente Neto**, conocido por sus siglas en inglés como NPV (Net Present Value), el cual se basa en las técnicas de flujo de efectivo descontado y se define como un método para evaluar las propuestas de inversión de capital mediante la obtención del valor presente de los flujos netos de efectivo en el futuro, descontado al costo de capital de la empresa o a la tasa de rendimiento requerida.

La fórmula de cálculo del NPV es la siguiente:

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \frac{CF_n}{(1+k)^n}$$

(10)

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_n}{(1+k)^t}$$

Donde:



NPV: Valor presente neto

CF_n : Flujo de caja en los diferentes años del proyecto

K: Tasa de descuento %

T : Cantidad de años

El criterio para la toma de decisiones de aceptación o rechazo cuando se utiliza esta técnica es el siguiente: Si el VPN ≥ 0 , se acepta el proyecto, de lo contrario es rechazado. Si el VPN es mayor o igual a cero, la empresa obtiene un rendimiento igual o mayor que el rendimiento requerido o el costo de capital.

2.6.3 Razón de Costo Beneficio

Se le llama **Razón de Costo Beneficio (B/C)** algunas veces al índice de rentabilidad. Este método para presupuesto de capital no difiere mucho del método del VPN. La única diferencia es que la razón B/C calcula el valor presente del rendimiento relativo por la suma que se invierte, en tanto que el sistema de valor presente da la diferencia entre el valor presente de las entradas de efectivos y la inversión neta.

La razón se define de la siguiente forma:

$$\text{Razón B/C} = \frac{\text{Valor Presente de entradas de efectivo}}{\text{Inversión neta}} \quad (11)$$

El criterio para toma de decisiones de aceptación o rechazo cuando se utiliza esta técnica es el siguiente: Si la razón B/C ≥ 1 , se acepta el proyecto, de lo contrario es rechazado. Cuando la razón es B/C ≥ 1 , el VPN es mayor o igual a cero. En consecuencia los métodos de VPN y razón B/C dan la misma solución a decisiones de aceptación-rechazo.

2.6.4 Tasa Interna de Rendimiento

La **Tasa Interna de Rendimiento (TIR)** se define como aquella tasa de descuento que es igual al valor presente de un proyecto con el valor presente de los costos esperados, esta tasa se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$CF_0 + \frac{CF_1}{(1+TIR)^1} + \frac{CF_2}{(1+TIR)^2} + \frac{CF_n}{(1+TIR)^n} = 0$$

o

$$\sum_{t=0}^n \frac{CF_n}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (12)$$



Donde:

CFn: Flujo de caja en los diferentes años

TIR: Tasa interna de rendimiento

n: Cantidad de años que dura la inversión

El criterio para la toma de decisiones de aceptación o rechazo cuando se utiliza esta técnica es el siguiente: Si la $TIR \geq$ costo de capital, se acepta el proyecto, de lo contrario es rechazado. Para que un proyecto sea aceptable, la TIR debe ser mayor o por lo menos igual al costo de capital o tasa de oportunidad de la empresa. Esto garantiza que la empresa gane más que el rendimiento requerido.

2.7 Base para el análisis económico

Para realizar el análisis económico se tuvieron en cuenta las siguientes bases:

Pérdidas de producción por evitar rotura en la tubería (315 t de sulfuros de níquel más cobalto).

Precio del Ni: 9,00 \$/lb

Precio del Co: 15,00 \$/lb

Vida útil de la tubería: 20 años

2.8 Selección de la variante más factible para alargar la vida útil de la tubería de HDPE en la planta de lavaderos

La inversión se justifica sobre la base de alargar la vida útil de la tubería utilizada en el trasiego de colas desde la planta de lavaderos hasta la presa de almacenaje de colas, también evitar pérdidas de producción por ruptura de la tubería, lo cual provocaría que se detenga el proceso productivo por espacio de tres días como mínimo.

1 - Determinación del estimado de costo capital para el cambio de la tubería actual por una más resistente, mediante el uso del software canadiense denominado Cleopatra.

Para realizar el costo capital, se analizaron las diferentes ofertas recibidas por el departamento de proceso de la subdirección de ingeniería de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba, con la oferta de tuberías más resistentes a las condiciones de operación, se procedió a utilizar el software (Cleopatra). A través del



mismo se pueden realizar estimados estándar para construcción de planta de proceso.

Los estimados de costo capital normalmente incluyen:

- ✚ Equipamiento de proceso
- ✚ Utilidades
- ✚ Equipamiento auxiliares
- ✚ Mano de obra
- ✚ Costos indirectos tales como fletes, ingeniería, seguro, etc.
- ✚ Asignación para Contingencia.

Para realizar el estimado se debe tener claridad con la información con que se cuenta y el tipo de inversión, para estudios preliminares el estimado presenta un orden de magnitud de ($\pm 50\%$), para aprobación de gastos y con ofertas firmes ($\pm 30\%$) y para solicitar el financiamiento para ejecutar la inversión ($\pm 15\%$).

Determinación de otras ventajas y desventajas de las diferentes variantes, tales como: contaminación ambiental, temperatura de los gases, concentración de vapores, realización del muestreo, corrosión, afectación a los operadores, gastos de mantenimiento y gastos de operaciones.

Cálculo del resto de los indicadores económicos (VAN, TIR, TR) se utiliza una hoja de Excel, establecida por el departamento económico de la empresa Pedro Sotto Alba.

Conclusiones del capítulo 2

1. En el capítulo se relacionan los principales materiales y métodos empleados para realizar los cálculos hidráulicos de la instalación de bombeo de colas para la operación actual y futura.
2. Se proponen las fórmulas con las cuales se realiza el cálculo de la vida útil de la instalación existente y se fundamenta la variante para prolongar el período de utilización de la misma.



CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el capítulo se analizan de forma económica las variantes propuestas con el objetivo de alargar la vida útil de la tubería que se utiliza para el trasiego de colas desde la última etapa de lavado hasta la presa de almacenaje.

Una vez implementada la variante más económica se minimiza el riesgo de rajadura o ponche en la tubería de polietileno de alta densidad, por la cual se trasiega las colas, además se evitaría un paro total de la planta por no contar con los aseguramientos necesarios para restablecer las condiciones originales de la tubería y evitaría penalizaciones para la empresa por el vertimiento de colas ácidas al medio ambiente.

3.1 Cálculo de la vida útil por vía inversa

Para realizar el cálculo inverso se utilizaron las fórmulas 3, 4 y 5 planteadas en el capítulo 2, donde los resultados son los siguientes:

$$SDR = \frac{0,4572 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}}$$

$$SDR = 9$$

$$DF = \frac{1034214 \cdot (9-1) \text{ Pa}}{2 \cdot 1,10\text{E}+13 \text{ Pa}}$$

$$DF = 3,75\text{E}-07$$

$$FL = \frac{3,75\text{E}-07}{(0,5 \cdot 1 \cdot 0,66)}$$

$$FL = 1,13636\text{E}-06$$

Según el cálculo realizado se busca el valor en la tabla 1 del capítulo 2 y se puede decir que la tubería duraría 2 años si se trabaja bajo las condiciones actuales.



Resultado de los análisis estadísticos

En la tabla 3.1 se muestra un resumen estadístico de los valores de presión bajo los cuales se realiza el bombeo de la pulpa.

Tabla 3.1 Resumen estadístico para la presión

Recuento	335
Promedio	685090 Pa
Desviación Estándar	16,3346
Coeficiente de Variación	16,4392 %
Mínimo	170921 Pa
Máximo	926448,5 Pa
Rango	755527,5 Pa

La tabla 3.1 muestra un resumen estadístico para la presión, incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. Los valores de estos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. El promedio de presión para el bombeo de colas es de 685090 Pa, con un mínimo de 170921 Pa y máximo de 926448,5 Pa.

En la tabla 3.2 se muestra la frecuencia de presión durante el bombeo de las colas.



Tabla 3.2 Frecuencias para Presión,

	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>			<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia</i>
<i>Clase</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Punto Medio</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Relativa</i>	<i>Acumulada</i>	<i>Rel. Acum.</i>
	menor o igual	0,0		0	0,0000	0	0,0000
1	0,0	15,0	7,5	0	0,0000	0	0,0000
2	15,0	30,0	22,5	1	0,0030	1	0,0030
3	30,0	45,0	37,5	3	0,0090	4	0,0119
4	45,0	60,0	52,5	0	0,0000	4	0,0119
5	60,0	75,0	67,5	18	0,0537	22	0,0657
6	75,0	90,0	82,5	68	0,2030	90	0,2687
7	90,0	105,0	97,5	122	0,3642	212	0,6328
8	105,0	120,0	112,5	91	0,2716	303	0,9045
9	120,0	135,0	127,5	32	0,0955	335	1,0000
10	135,0	150,0	142,5	0	0,0000	335	1,0000
	mayor de	150,0		0	0,0000	335	1,0000

Media = 99,3639 Desviación Estándar = 16,3346

Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias donde se divide el rango de presión en intervalos del mismo ancho, y se cuenta el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo. Puede verse gráficamente los resultados de la tabulación donde se selecciona el Histograma de la lista de Opciones Gráficas.

En la figura 3.1 se observa la dependencia de la frecuencia con respecto a la presión, en esta se muestra que los valores más alto se obtienen a una presión de 620528,2 a 723949,5 Pa, y los menores valores se obtienen a una presión de 103421,4 a 310264,1 Pa, y el valor máximo de presión es de 923897,5 Pa.

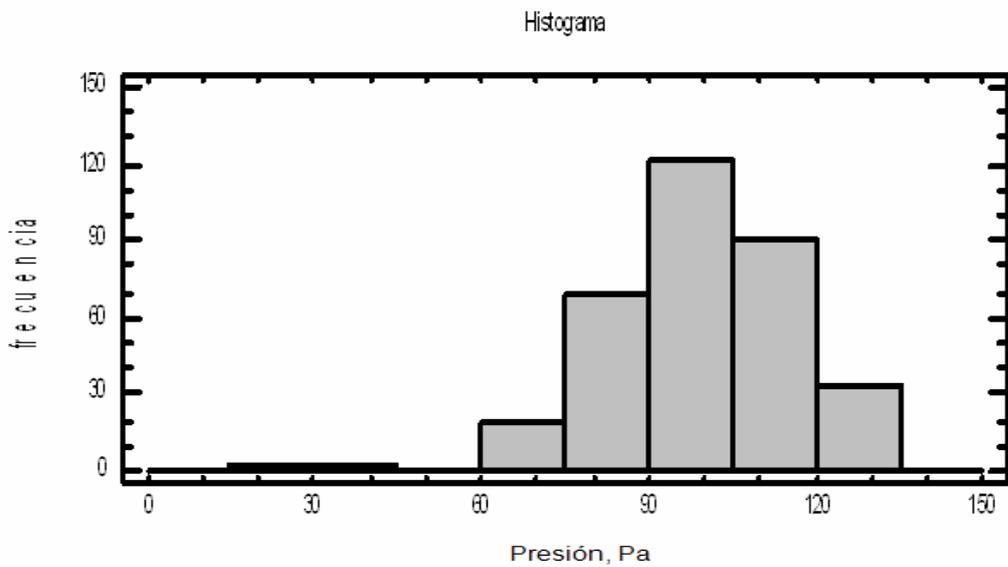


Figura 3.1 Dependencia de la frecuencia con respecto a la presión

En la tabla 3.3 se muestra un resumen estadístico para los valores de temperatura de bombeo de la cola.

Tabla 3.3 Resumen Estadístico para la temperatura

Recuento	391
Promedio	46,0707, °C
Desviación Estándar	4,4574
Coefficiente de Variación	9,67514 %
Mínimo	26,208, °C
Máximo	64,913, °C
Rango	38,705 °C

La tabla muestra el resumen para la temperatura. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. Los valores promedios de temperatura son de 46, 0707 °C, con un mínimo de 26,208 °C y máximo de 64,913 °C, con una desviación estándar de 4,4574.

En la tabla 3.4 se exponen los valores de frecuencia para la temperatura.



Tabla 3.4 Frecuencias para la temperatura

	Límite	Límite			Frecuencia	Frecuencia	Frecuencia
Clase	Inferior	Superior	Punto Medio	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. Acum.
	menor o igual	24,0		0	0,0000	0	0,0000
1	24,0	29,0	26,5	2	0,0051	2	0,0051
2	29,0	34,0	31,5	6	0,0153	8	0,0205
3	34,0	39,0	36,5	14	0,0358	22	0,0563
4	39,0	44,0	41,5	89	0,2276	111	0,2839
5	44,0	49,0	46,5	189	0,4834	300	0,7673
6	49,0	54,0	51,5	83	0,2123	383	0,9795
7	54,0	59,0	56,5	7	0,0179	390	0,9974
8	59,0	64,0	61,5	0	0,0000	390	0,9974
9	64,0	69,0	66,5	1	0,0026	391	1,0000
10	69,0	74,0	71,5	0	0,0000	391	1,0000
	mayor de	74,0		0	0,0000	391	1,0000

Media = 46,0707 Desviación Estándar = 4,4574

Esta opción ejecuta una tabulación de frecuencias donde se divide el rango de temperatura en intervalos del mismo ancho, y se cuenta el número de datos en cada intervalo. Las frecuencias muestran el número de datos en cada intervalo, mientras que las frecuencias relativas muestran las proporciones en cada intervalo. Pueden verse gráficamente los resultados de la tabulación si se selecciona el Histograma de la lista de opciones gráficas.

En la figura 3.2 se observa la dependencia de la frecuencia con respecto a la temperatura, en esta se muestra que los valores más alto de frecuencia se obtienen a una temperatura de 44 a 55 °C, y los menores valores de frecuencia se obtienen a una temperatura de 24 a 28 °C y el valor máximo de temperatura es de 64,9 °C.

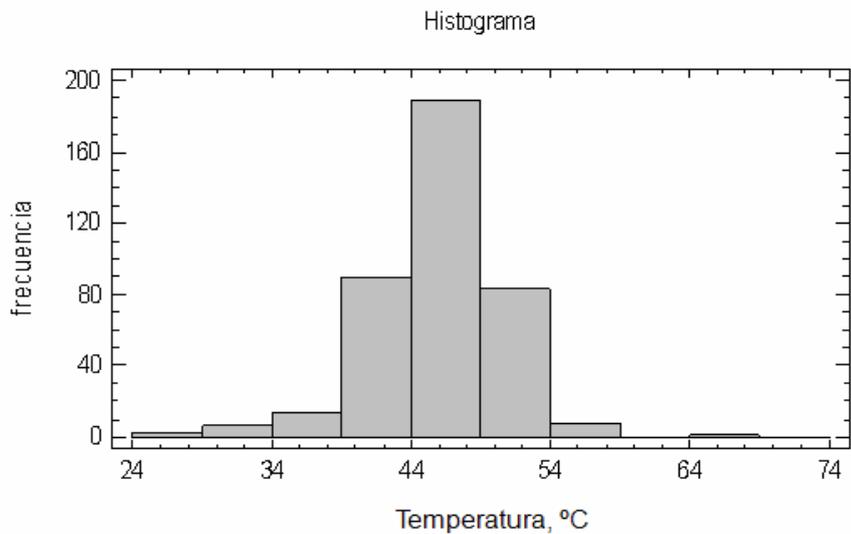


Figura 3.2 Dependencia de la frecuencia con respecto a la temperatura.

3.3 Resultados del cálculo del gasto de agua

Para el cálculo del gasto de agua se utilizó la fórmula 6 planteada en el capítulo 2, con la cual se determina el flujo necesario para disminuir la temperatura hasta 46 °C.

Los resultados se muestran a continuación:

$$G_3 = \frac{196,970 \cdot 4,290 \cdot (48 - 41,073) + 63,131 \cdot 4,190 \cdot (40 - 41,073)}{4,190 \cdot (41,073 - 25)}$$

$$\frac{\text{kg}}{\text{s}} = \frac{\frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (\text{°C} - \text{°C}) + \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (\text{°C} - \text{°C})}{\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (\text{°C} - \text{°C})}$$

$$G_3 = 82,708 \text{ kg/s}$$

El flujo de agua necesario que se le debe añadir al tanque de almacenaje de colas es de 82,708 kg/s a una temperatura de 25 °C.

Para determinar el gasto total que debe transportar la bomba se suman el gasto de agua, cola y residual.

$$G_t = 196,970 + 63,131 + 82,708$$

$$G_t = 342,809 \text{ kg/s}$$

3.4 Resultados del cálculo hidráulico



3.4.1 Cálculo de la caída de presión

Para este cálculo se utilizó la fórmula 7 planteada en el capítulo 2

Tabla 3.4 Caída de presión en los diferentes tramos de la tubería.

Tramos	1	2	3	Total
Caída de presión Pa	18,986	399,126	523,420	941,532

En la tabla 3.4 se muestra que la mayor caída de presión se encuentra en el tramo tres, que aunque posee menor longitud que los demás, en las pérdidas por resistencias locales influyen considerablemente las resistencias que ofrecen los Spigots y en el tramo dos que presenta mayor longitud las resistencias locales no son grandes.

3.5 Variantes Propuestas

Las alternativas analizadas para seleccionar la factible desde el punto de vista económico fueron las siguientes:

Variante 1: Añadir agua de retorno de la piscina sur en el tanque de almacenaje de colas con una temperatura de 25 °C.

Actualmente se alimenta agua de la piscina sur a la última etapa de lavado, con el objetivo de recuperar parte del níquel y cobalto que se alimenta a la presa de cola y disminuir los gastos de operación por consumo de agua de lavado.

Existe una conexión en la entrada del tanque de almacenaje de cola, la misma no se utiliza por existir limitaciones en el bombeo de la pulpa hacia la presa de almacenaje.

En este momento se está instalando una tubería de mayor diámetro del mismo material (HDPE), desde la descarga de las bombas hasta 250 m a la entrada de la presa, con el objetivo de evitar el desbordamiento del tanque de almacenaje de cola, se realizó un balance de masa para cuantificar el flujo de agua que se necesita añadir al tanque de almacenaje, para disminuir la temperatura por debajo de 45 °C, y evaluar el comportamiento del sistema de bombeo.

Los gastos de operación por incremento en el flujo de agua a la entrada del tanque de almacenaje de cola ascienden a 171,435 USD por incremento en el consumo de energía (tabla 3.5).



Variante 2: Cambio de la tubería actual por un material resistente, que soporte la temperatura del fluido y la presión de descarga de la bomba.

En el mundo se fabrica tuberías de polímeros, con muy buenos resultados y de fácil instalación, además resistente a temperatura y presión elevada.

3.6 Resultado del estimado del costo capital

Se realizó un estimado del costo capital para la alternativa 1 y 2 con el objetivo de analizar la factibilidad económica de las variantes propuestas.

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

En la tabla 3.5 se muestran los resultados del costo capital.

Tabla 3.5 Costo capital para las variantes 1 y 2

DENOMINACION	Variante 1, (USD)	Variante 2, (USD)
Equipos		
Eléctrica		\$171,433
Civil y trabajo en el sitio	35,000	
Estructura y Construcción	10,000	
Insulación y pintura	3,000	
Total de costo directo	745,000	171,433
Ingeniería	31,000	
Otros gastos	69,000	
Total de otros gastos	100,000	
Contingencia	100,000	
Total de gastos capitales	945,000	171,433

La tabla muestra un costo capital de 945,00 USD para la variante 1 y de 171,433USD para la variante 2.

3.6.1 Bases del estimado

Para la elaboración del estimado se tuvo en cuenta ofertas de suministradores, catálogos de precios y estimaciones basadas en equipamientos similares.



Por el nivel de información existente, se consideró un estimado tipo 3, detallado ± 15 %, considerándose, además:

- Información de precios del equipamiento por ofertas recibidas de los diferentes suministradores registrados en la empresa Comandante Pedro Sotro Alba Catálogos de precios de la Construcción, PRECONS II.
- Estimator's Equipment Installation Man-Hour Manual.
- Datos de archivo.
- Otros.
- Costo de Operación

3.6.2 Fundamentos para el Análisis Económico

La inversión se justifica sobre la base de alargar la vida útil de la tubería utilizada en el trasiego de colas desde la planta de lavaderos hasta la presa de almacenaje de colas, también evitar pérdidas de producción por ruptura de la tubería, lo cual provocaría que se detenga el proceso productivo por espacio de tres días como mínimo y evitar penalizaciones a la empresa por el vertimiento de colas ácidas al medio ambiente.

- Minimizar el impacto ambiental al evitar derrames de colas al medio ambiente.
- Evitar gasto de operación por el mantenimiento y cambio de estructura cada 3 años. (484,000 USD)
- Vida útil de la tubería: 20 años
- Precio del Níquel: 9\$/lb. (19,8\$/Kg)
- Precio del Cobalto: 1 5,00 \$/lb. (33 \$/Kg)

3.6.3 Métodos de Valoración y Selección de Inversiones

Tiempo de recuperación de la inversión. Para el período de recuperación se utiliza la fórmula 9 planteada en el capítulo 2.

Se obtiene que la variante 1 a implementar se recupera en 0,5 años y la variante 2 se recupera en 0,1 años

Cálculo del valor actual neto (VAN)

Para el cálculo del valor actual neto se utilizó la fórmula 10 planteada en el capítulo 2.



Se obtuvo para la variante 1 un valor de 837,000 USD, para la variante 2 el valor obtenido fue de 1, 501,000 USD a una tasa promedio de 15 %. En la tabla 3.6 se muestran los resultados para cada variante a un 15 y 25 %.

3.6.4 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

Además de los indicadores anteriores también se calculó la tasa interna de retorno del proyecto equivalente a 101,4 % para la variante 1 y de 988 % para la variante 2

Desde el punto de vista económico la variante 2 es la opción más factible por las siguientes razones:

De las variantes evaluadas esta es la que tiene mayor valor actualizado neto a un 15 % (1 501 000 MP USD).

No posee gasto de mantenimiento.

Posee menor tiempo de construcción y puesta en marcha

3.6.5 Resultados del Tratamiento Económico

Para seleccionar económicamente la variante a implementar se utilizó la hoja de cálculo programada en Excel, donde se determinó el costo capital de cada variante y los ahorros por pérdidas de sulfuro de níquel más cobalto al ocasionar una avería no planificada en la tubería.

En la tabla 3.6 se exponen los indicadores de rentabilidad para la selección de la variante a implementar.

Tabla 3.6 Indicadores de rentabilidad

Variantes	Tasa Interna de Retorno	Tiempo de Recuperación de la Inversión	Valor Actualizado Neto	
	%	Años	15%	25%
Variante 1	101	0,5	\$837 000	\$ 634 000
Variante 2	988	0,1	\$ 1 501 000	\$1 338 000

Aplicando los indicadores de rentabilidad a cada una de las variantes analizadas, se muestra que la variante 2 presenta una tasa interna de retorno de 988 superior a 1, y un tiempo de recuperación de la inversión de 0,1 años y un valor actualizado neto de 1 501 000 USD, mayor que 0. La variante 1 presenta indicadores de rentabilidad inferiores a la variante 2.



CONCLUSIONES

Se determinó el impacto de las operaciones de bombeo de las colas con temperaturas superiores a 45 °C sobre la resistencia de las líneas de Polietileno de alta densidad, donde se demuestra que con la adición de agua de retorno de la piscina sur al tanque de almacenaje de colas con una temperatura de 25 °C, la tubería tendrá un tiempo de vida útil de 20 años.

- La tubería trabaja el 72 % del tiempo durante un año con temperatura de la cola superior a los 45 °C.
- La presión de operación de bombeo de la tubería se encuentra por debajo de la presión de operación establecida por el fabricante.
- Con la adición de 82,708 kg/s de agua al tanque de almacenaje de colas, se disminuye la temperatura por debajo de 45 °C.
- De acuerdo a los cálculos hidráulicos realizados el sistema de bombeo asimiló el flujo de colas más el incremento del flujo de agua.
- La valoración económica realizada demostró que la variante 1 es más económica que la variante 2.



RECOMENDACIÓN

- Una vez iniciadas las operaciones con la tubería de 24 pulgadas (610 mm) para el trasiego de colas, se recomienda iniciar la adición de 82,708 kg/s de agua al tanque de almacenaje de colas para alargar la vida útil de la tubería.



BIBLIOGRAFÍA

- Armando D. y David G: Manual de hidráulica aplicada. Ediciones ISPJAM, 1989. Pág. 7 – 16; 125 – 136. (Santiago de Cuba 1989).
- Caldiño, V. and M. Salgado (2004) “Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris”. 7mo Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec
- Crane (1995). Flujo de fluidos; en válvulas, accesorios y tuberías. S. A. d. C. V. Edición McGRAW – HILL/interamericana de México.
- Columbie, M., Estudio del transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de ingeniería mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2006.
- Estévez (2006). Caracterización de la planta de recuperación de amoníaco en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- Gitman L (2006). Fundamentos de Administración Financiera. La Habana: Editorial Félix Varela.
- Ibarz, J. and G. Vélez y Barbosa (2001). Transporte de Alimentos Fluidos a Través de Tuberías. Inéditos, Puebla, México, Universidad de las Américas.
- Izquierdo, R. (1889). “Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba”. Minería y Geología. . Moa, ISMM.
- Kasatkin, A.G. (1971). Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química.
- Montero (2009). Análisis de la instalación de bombeo de colas en la empresa Pedro Sotto Alba



Moreno(2011). Análisis sobre limitación de capacidad en el bombeo de colas en la planta de lavado en las capacidades actuales del proceso.

Nekrasov B.: "Hidráulica". Editorial Pueblo y Educación, 1986.

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

Roque, D., Método de recálculo de la característica de funcionamiento de las bombas centrífugas que manipulan soluciones azucaradas, Memorias del VI encuentro Nacional de Jefes de Maquinarias. MINAZ. Santa Clara, 1989.

Sablani, S. "Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids". Journal of non Newtonian fluid. 57(2) 327-335, 2003.

Steffe, M. and G. Morgan (1986). Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods. Food Technology. 11(7) 78-85.

Vélez, J., Apuntes de Ingeniería de Alimentos I, Universidad de las Américas, Puebla, México, Inéditos, 2003

Welty, J., R (1976). Wicks Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer.