

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Propuesta de un sistema de sedimentación para la recuperación de agua residual en el proceso de lavado de carbón mineral.

Autor: Alberto Matos Lahens

Tutor(es): Ms.C. Benigno Leyva de la Cruz
Dr.C. Pedro Enrique Beyris Mazar

Curso 2014-2015
“Año 57 de la Revolución”

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIRIA MECÁNICA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO: PROPUESTA DE UN SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN
PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUA RESIDUAL EN EL PROCESO
DE LAVADO DE CARBÓN MINERAL.

AUTOR: Alberto Matos Lahens

TUTOR(ES): Ms.C. Benigno Leyva de la Cruz
Dr.C. Pedro Enrique Beyris Mazar

CURSO 2014-2015
“AÑO 57 DE LA REVOLUCIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Alberto Matos Lahens

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.

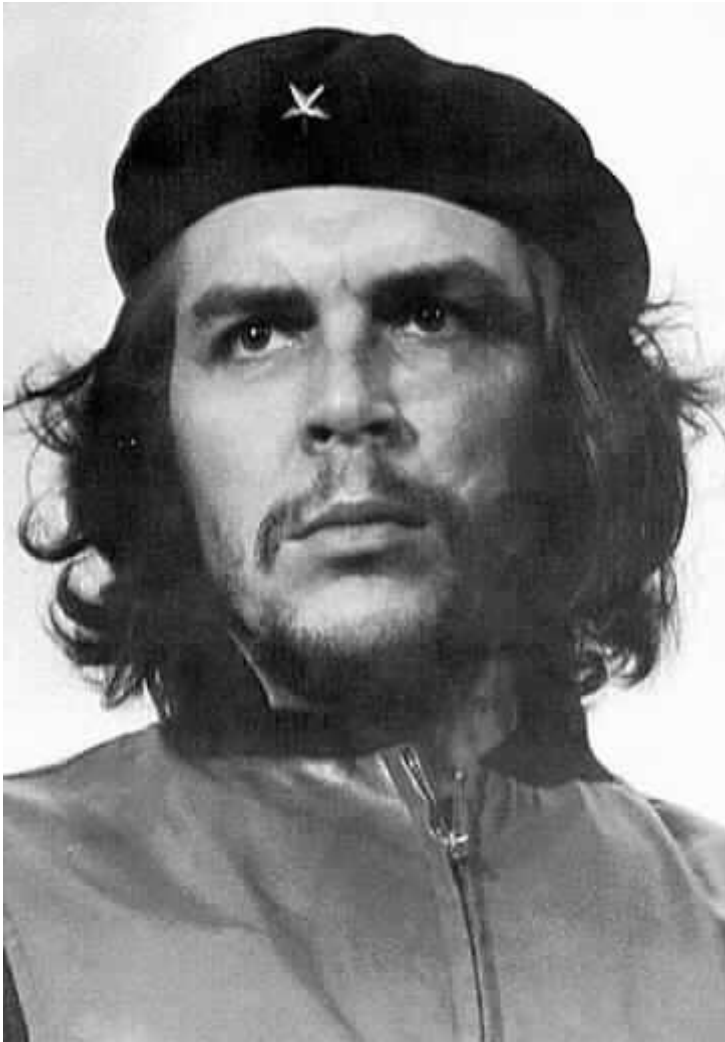
Alberto Matos Lahens

Dr.C. Pedro Beyris Masar

Ms.C. Benigno Leyva de la Cruz

PENSAMIENTOS

...El conocimiento nos hace responsables."



*"Nuestro sacrificio es
consciente; cuota para pagar
la libertad que construimos."*

La preparación del ingeniero debe asegurar la elevación de la productividad del trabajo, el mejoramiento de la calidad de la producción y la reducción del precio de costo en todas las fábricas del Ministerio de Industria.

DEDICATORIA

El autor de este trabajo de diploma le quiere dedicar, a todas aquellas personas que de una forma u otra fueron partícipe de la realización del mismo:

- ❖ A mi madre y mi familia que con sus principios revolucionarios y de desarrollo, me guiaron por el camino correcto por la formación de un profesional en nuestro país.*
- ❖ A mi mujer Annelis Echavarría Enríquez que con su espíritu progresista, me inculcó a una superación continua y satisfactoria.*
- ❖ A los tutores, por el buen desarrollo de mi tesis de grado y su ayuda incondicional.*
- ❖ Al colectivo de capacitación y el claustro de profesores de mi Universidad, que desarrollaron un método de estudio para mi formación profesional.*
- ❖ A nuestra Revolución, por las posibilidades que me ofrece.*
- ❖ A Dios el padre todo poderoso.*

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional y me enseñaron que para triunfar en la vida se requiere de mucho esmero, dedicación y apoyo de personas sinceras y respetuosas, es por eso que agradezco en primer lugar a:

- ❖ A la revolución, por permitirme forjarme como profesional en estos tiempos de lucha y sacrificios.*
- ❖ A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el aprendizaje como estudiante de la carrera que me ocupa.*
- ❖ A mis tutores por no escatimar tiempo ni esfuerzo en este trabajo de diploma ya que sin su supervisión y dedicación no se habría podido desarrollar dicho trabajo.*
- ❖ A mi madre Olga Margarita Lahens Espinosa y mi familia que han dado todo para obtener el triunfo y objetivo de mi vida.*
- ❖ A mi mujer por su dedicación y ayuda en mis estudios.*
- ❖ A mis compañeros de estudio que me brindaron su amistad.*

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo elaborar la propuesta de un sistema de sedimentación para la recuperación de agua residual, donde se desarrolló la determinación de las propiedades físicas y reológicas de la pulpa; los parámetros de selección de un sedimentador y de la bomba que satisface los requisitos de la instalación. Se efectuó una valoración técnico-económica y socio-ambiental del proceso propuesto. Los resultados obtenidos indicaron que existe la garantía de que no haya sedimentación de la pulpa en el tramo ubicado desde la criba hasta el sedimentador, puesto que la velocidad de transportación está en el orden de 0,4 m/s y la velocidad crítica estimada es de $2,09 \cdot 10^{-2}$ m/s; se determinó el diámetro, altura y torque requerido del sedimentador para asegurar el incremento del porcentaje de sólido de la pulpa de 3 a 26 %. Se estimó que el costo de la inversión requerida para el establecimiento de un sedimentador fabricado en la Empresa Mecánica del Níquel es de 50 360,5 CUC y de 79 676,4 CUC si se considera la variante de compra de uno Modelo LTS – Marca IPS, de la compañía Metso Corporation que se compraría en Brasil; además se fundamentó que la implementación del sistema de sedimentación propuesto permite aumentar la disponibilidad de agua para el proceso, disminuir las afectaciones ambientales y hacer un uso racional de este recurso natural.

SUMMARY

The present work had as objective to elaborate the proposal of a sedimentation system for the recovery of residual water, where it was developed the determination of the physical properties and reologic of the pulp; the parameters of selection of sedimentador and of the bomb that satisfies the requirements of the installation. A technician economic and partner environmental valuation of the proposed process was made. The obtained results indicated that it exists the guarantee that there is not sedimentation of the pulp in the tract located from the sieve until the sedimentador, since the transportation speed is in the order of 0,4 m/s and the dear critical speed is of $2,09 \cdot 10^{-2}$ m/s; it was determined the diameter, height and required torque of the sedimentador to assure the increment of the percent of solid of the pulp from 3 to 26%. He was considered that the cost of the investment required for the establishment of a sedimentador manufactured in the Mechanical Company of the Nickel is of 50 360,5 CUC and of 79 676,4 CUC if it is considered the purchase variant of one Model LTS - IPS Marks, of the company Metso Corporation that would be bought in Brazil; it was also based that the implementation of the proposed sedimentation system allows to increase the readiness of water for the process, to diminish the environmental affectations and to make a rational use of this natural resource.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1. Introducción	5
1.2. Trabajos precedentes sobre sedimentación	5
1.2.1. Trabajos precedentes realizados en la instalación	6
1.3. Teoría básica de la velocidad de sedimentación	7
1.4. Características y conceptos básicos de la sedimentación	8
1.4.1. Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido	8
1.4.2. La viscosidad del fluido	9
1.4.3. La temperatura de operación	9
1.4.4. La estabilidad de la suspensión	9
1.5. Procesos de sedimentación	10
1.5.1. Sedimentación de partículas floculentas	10
1.5.2. Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación	11
1.6. Efecto del pH en la velocidad de sedimentación	12
1.7. Consideraciones para el diseño de sedimentadores	13
1.7.1. Metodología para el diseño de sedimentadores	14
1.8. Modelos reológicos	15
1.9. Clasificación reológica general de los fluidos	17
1.9.1. Curvas de flujo	18
1.10. Factores que influyen en el comportamiento reológico	19
1.10.1. Efecto de la granulometría	19
1.10.2. Efecto de la temperatura	20
1.10.3. Efecto de la composición mineralógica	20
1.10.4. Efecto de la concentración de sólidos	20

1.10.5. Efecto del pH.....	21
1.11. Proceso tecnológico de la planta de beneficio de carbón	22
1.11.1. Características de la materia prima	22
1.11.2. Característica del producto utilizable por la planta de sínter	23
1.11.3. Características del material desechado	23
1.12. Conclusiones del capítulo 1	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1. Introducción	25
2.2. Origen de las muestras de pulpas	25
2.3. Determinación de la granulometría	26
2.3.1. Características de diseño del analizador de partículas	27
2.4. Determinación de la densidad aparente del carbón, de la pulpa y del % de sólido	27
2.5. Determinación de la velocidad de sedimentación de la pulpa	29
2.5.1. Preparación de la muestra	29
2.5.2. Determinación de la dosis de floculante por el método de Willcon.....	29
2.5.3. Análisis de la sedimentación	30
2.5.3.1. Determinación de la velocidad crítica	31
2.6. Determinación del comportamiento reológico de la pulpa	32
2.6.1. Pruebas de reología utilizando el viscosímetro brookfield DV-II + Pro.....	32
2.6.1.1. Descripción técnica del Viscosímetro Brookfield DV-II + Pro.....	32
2.6.1.2. Principio de funcionamiento.....	33
2.7. Determinación de la conductividad y el pH de la pulpa.....	33
2.8. Selección del sedimentador.....	34
2.10. Selección de la bomba.....	42

2.10.1. Verificación de la cavitación	42
2.11. Elaboración de los resultados	43
2.12. Análisis económico	45
2.12.1. Costo de la inversión	46
2.13. Conclusiones de capítulo 2	47
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.1. Introducción	48
3.2. Análisis de la determinación de la granulometría	48
3.3. Análisis de la determinación de la densidad del carbón, de la pulpa y del % de sólido	49
3.4. Determinación de la velocidad de sedimentación de la pulpa	50
3.5. Determinación del comportamiento reológico de la pulpa	53
3.6. Resultados del pH y conductividad de la pulpa	55
3.7. Selección del sedimentador	55
3.8. Determinación de las alturas necesarias y disponibles	58
3.9. Selección de la bomba	60
3.10. Valoración económica	62
3.10.1. Valoración económica de la inversión	63
3.10.2. Valoración económica de la fabricación	64
3.11. Impacto ambiental	65
3.12. Conclusiones de capítulo 3	68
CONCLUSIONES GENERALES	69
RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	78

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial constituye una de las principales fuentes de progreso en el siglo XXI, Cuba no ha quedado excepta de dicho desarrollo. Con más de cincuenta años de experiencia en operaciones portuarias, la Empresa Puerto Moa "Comandante Raúl Díaz Arguelles" se encuentra localizada en la costa norte oriental de la isla de Cuba, en la provincia de Holguín. Está ubicada en una dársena artificial al sur de la ensenada de Yaguasey, Bahía de Cayo Moa, en los 20° 39' 30" de latitud Norte y a 74° 55' 40" de longitud Oeste. El canal y la dársena tienen una profundidad de 11,3 m por diseño mínimo. Este puerto, consta con varias plantas dentro de sus instalaciones como son: base de petróleo que abastece a todas las empresas del territorio, base de almacenamiento de amoníaco para el proceso CARON de la Empresa "Ernesto Che Guevara", planta de procesamiento de coral, tanques de almacenamiento y planta de azufre para el suministro de los diferentes procesos de la empresa "Comandante Pedro Soto Alba", además de realizar el secado del producto final de esta empresa. Esta instalación, cuenta con un campo de boyas para la recepción de combustibles y posee áreas de almacenamientos de petróleo, amoníaco y carbón, así como medios para la transportación terrestre y marítima.

La función fundamental de la empresa es la exportación de níquel e importación de los suministros para el consumo de las industrias del territorio y el desarrollo industrial de la zona, con el objetivo de ayudar en la prestación de servicios en operaciones de carga, descarga, recepción y entrega de níquel a las empresas dedicadas a esta actividad. Además brindan servicios de dragado, almacenaje y distribución de materias primas (carbón, amoníaco, combustibles, azufre, etc.), almacenaje de mercancías, servicios de minería y transportación de coral, entre otros. Esta empresa ejecuta operaciones de descargas de materias primas, equipos, materiales y mercancías en general en dichas instalaciones. La referida empresa está enfrascada en estos momentos en un proceso de ampliación de sus capacidades de producción y modernización de sus tecnologías para incrementar sus aportes económicos al estado.

La "Empresa Puerto Moa" mantiene un sistema de gestión de la calidad certificado acorde a los requisitos de la norma internacional para los procesos de manipulación de mercancías en puertos y almacenes, consolidación y desconsolidación de cargas e

inspección de mercancías, así como las direcciones funcionales de apoyo a estos procesos. Para desarrollar sus servicios dispone de seis Unidades Empresariales de Base (UEB) y cinco Direcciones funcionales en la que se encuentran la de Explotación Portuaria Moa, de Mantenimiento, de Abastecimiento Técnico, de Transporte Portuario, de Coral Marítimo, de Recepción y de Suministro (Petróleo, Carbón y Amoníaco). En las direcciones funcionales se encuentran la Dirección General, Técnica, Económica y de Recursos Humanos.

Tiene aprobada la aplicación del perfeccionamiento empresarial y actualmente es una de las empresas que marchan a la vanguardia en la Provincia Holguín en la consolidación de los cuatro nuevos sistemas del perfeccionamiento empresarial tales como el Sistema de Gestión del Capital Humano, Sistema de Gestión de la Comunicación Empresarial, Sistema de Gestión de la Innovación y Sistema de Gestión Ambiental.

Actualmente la Empresa “Comandante Raúl Díaz Argüelles” suministra el carbón beneficiado a la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para el proceso de sinterización donde se encuentra ubicada la UEB de beneficio de carbón que brinda servicio a dicha empresa. Teniendo en cuenta los posibles incrementos productivos en los años venideros de la industria se requiere, de la remodelación y la modernización del equipamiento para aumentar la eficiencia de esta planta, además de la automatización del proceso para que se realice un uso más racional de los recursos.

A este trabajo le es de importancia la investigación de la no existencia de un sistema eficiente de tratamiento de las aguas de lavado del carbón para ser utilizadas nuevamente en el proceso, el cual permitiría la disminución de la contaminación ambiental y el uso racional del agua, un recurso natural importante para la vida humana. La planta de beneficio de carbón requiere de una innovación en su tecnología para poder aumentar su competitividad, puesto que en la misma se ha evidenciado la siguiente **situación problemática**:

- ❖ Elevados volúmenes de agua que se vierten al mar, sin una valoración de la posibilidad de su reincorporación al proceso.
- ❖ Roturas reiteradas en el sistema de criba lo que limita la obtención del tamaño requerido del carbón mineral.

- ❖ Insuficiente caracterización de los molinos utilizados en el proceso de molienda, lo que limita la obtención del tamaño requerido del carbón mineral según su tamaño estandarizado.
- ❖ Afectaciones ambientales por el proceso de lavado de carbón mineral, pues la piscina de descarga del agua utilizada en el proceso se desborda, lo que tiene como consecuencia una contaminación del medio ambiente y el agua residual desemboca al mar con partículas que deja el proceso.
- ❖ Insuficiente conocimiento de las propiedades físico - mecánicas y reológicas de la pulpa residual en relación con el porcentaje de sólido que posee la misma, que dificulta la evaluación y proyección racional del sistema de drenaje.

Dada investigación que permita aumentar la calidad del producto que oferta la Empresa Puerto Moa, lo la situación planteada, se sintetiza que, es necesario que se realice una cual pasa por considerar la no existencia de un sistema eficiente de tratamiento de las aguas de lavado del carbón para ser utilizadas nuevamente en el proceso y el aumento de la disponibilidad de agua para el proceso para un mayor aprovechamiento de la misma. Tal investigación debe basarse en un enfoque integral que permita una fundamentación racional de la propuesta de solución tecnológica a la luz de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

Teniendo en cuenta los criterios expuestos se define como **problema a investigar:** insuficiente conocimiento de las relaciones que se establecen entre las propiedades físicos y reológicas de la pulpa (densidad del polvo y de la pulpa, diámetro medio de las partículas en suspensión, velocidad de sedimentación, viscosidad, etc.), el gasto de la pulpa, la pérdida de presión que se produce durante el transporte de esta por tubería, y los parámetros de un sedimentador: lo que dificulta la elaboración de una propuesta de sistema de sedimentación que permita el incremento de la disponibilidad de agua en la instalación.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:** si se caracterizan las propiedades de la pulpa (diámetro de las partículas (d), viscosidad de la pulpa (μ), porcentaje de sólido (S), densidad de la pulpa (ρ_{pulpa}), densidad aparente del carbón (ρ_{polvo}), velocidad de sedimentación (v_s) y el pH, se podrá elaborar una propuesta de sistema de sedimentación con la incorporación de un sedimentador en el

proceso de lavado, para recuperar el agua residual.

Se establece como **objeto de la investigación**: sistema para sedimentación de la pulpa, y como **campo de acción**: recuperación de agua residual en proceso de lavado.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo general del trabajo**: elaborar una propuesta de sistema de sedimentación para la recuperación del agua residual del proceso de lavado en la UEB de beneficio de carbón ubicada en la EPM, para aumentar la calidad del producto que se oferta.

Objetivos específicos:

1. Realizar la revisión bibliográfica y sistematización de los fundamentos teóricos sobre la propuesta de sistema de sedimentación.
2. Efectuar experimentos de granulometría, densidad de la pulpa y del polvo, velocidad de sedimentación y reología, así como la elaboración de la propuesta de sistema de sedimentación.
3. Analizar los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados y la propuesta de sistema de sedimentación formulada sobre la base de criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales.

De acuerdo con los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el tema.
2. Determinación de la granulometría, la densidad del polvo y de la pulpa, la velocidad de sedimentación y la reología de la pulpa.
3. Determinación del diámetro, la altura y el torque requerido del sedimentador que se ajustan a la característica de la instalación.
4. Selección de la bomba que satisface la altura de carga necesaria en la instalación para lograr el flujo requerido.
5. Valoración técnico-económica y socio-ambiental del proceso propuesto para la recuperación del agua residual del proceso de lavado.

CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Desde hace más de dos décadas se viene trabajando en Cuba en la introducción de nuevas técnicas para la optimización de los recursos en explotación, con el objetivo de lograr el ahorro de recursos naturales garantizando un mejor aprovechamiento de los mismos; disminuir los consumos de energía eléctrica, sustituir importaciones e implementar mejoras en la calidad de los diferentes sistemas que componen a una instalación.

El objetivo de este capítulo es:

Realizar una revisión bibliográfica para la creación de un fundamento teórico y las peculiaridades de funcionamiento de un sistema de sedimentación que se adaptaría a un flujo tecnológico para el proceso de trituración y lavado de carbón antracita en la planta de beneficio ubicada en la EPM, del municipio de Moa.

1.2. Trabajos precedentes sobre sedimentación

El proceso de sedimentación en los distintos procesos de la industria es de vital importancia, ya que incurre en la eficiencia de estos brindando un mayor aprovechamiento de los recursos para cualquier alternativa de desarrollo y es un tema tratado anteriormente en varias investigaciones. Sobre el mismo algunos investigadores que se muestran a continuación han desarrollado trabajos acerca de la selección, optimización y uso de los diferentes sistemas de sedimentación en disímiles empresas en Cuba, así como la clasificación de los mismos.

Según Beyris (1997) la sedimentación está enmarcada dentro de los procesos gravitacionales sujeto a consideraciones teóricas con carácter de hipótesis, considerando un grupo nutrido de investigaciones teóricas encaminadas a describir el comportamiento de la velocidad de sedimentación determina dos direcciones científicas sobre la velocidad de desplazamiento de los granos o partículas; la determinista y la probabilística estadística.

Pese a lo fructíferos que puedan ser las investigaciones llevadas a cabo para la sedimentación de partículas asiladas, sin una correlación entre este hecho y la realidad, (que las partículas se encuentran en una pulpa) no se puede observar realmente lo satisfactorio o productivo que pueden ser los mismos, de allí que se hallan realizado

investigaciones que permiten adicionalmente conocer la relación que existe entre la sedimentación de una partícula y la sedimentación de una pulpa. Se considera que la sedimentación de pulpas de minerales ha tenido un tratamiento metodológico comparativamente muy modesto, lo que ha contribuido a alimentar la convicción de que se trata de una operación muy empírica (Sayago, 2001; Gutiérrez y Bueno 2004; y Jiménez, 2014).

El proceso de sedimentación gravitacional se estudia con el objetivo de aplicar un análisis y obtener una ecuación que permita predecir la velocidad de precipitación o sedimentación de las partículas sólidas en la suspensión, que responde a la necesidad de resolver un problema común en el diseño de cualquier operación separativa: la economía de espacio en el dimensionado de equipos (Browns 1965; Kasatkin 1987, Perry 1988). Como parámetro fundamental del proceso se tiene a la velocidad de sedimentación, la que depende principalmente de la distribución granulométrica, concentración de sólidos suspendidos, pH, composición químico-mineralógica, composición iónica y la temperatura (Valdés 1983; Ponce 1983; Miranda 2002; Mariño *et al.* 2007; Beyris y Fálcon 2007; Salinas 2012).

Mariño (2002) en su investigación acerca de las variables para el control de la concentración de sólidos alcanzable por sedimentación gravitatoria, plantea como objetivo confirmar si la concentración de sólidos obtenida por sedimentación gravitatoria relacionada estadísticamente con la concentración de sólidos alcanzada por otros métodos. Utilizando la separación mecánica de sistemas líquido-sólidos permitió determinar las principales tendencias en el comportamiento de esta relación, en función de las condiciones experimentales teniendo en cuenta como novedad científica la predicción teórica y la confirmación empírica entre la concentración de sólidos obtenida por sedimentación gravitatoria y la obtenida por filtración sin escurrido.

1.2.1. Trabajos precedentes realizados en la instalación

Noa (2011) realizó los cálculos para el diseño de un transportador de banda, para su posible utilización en la planta de trituración de carbón ubicada en la Empresa Puerto Moa, para después de obtener su productividad, seleccionar los elementos estandarizados del transportador y estandarizar las piezas de los otros transportadores. También determina las dimensiones necesarias de la tolva de alimentación para la

planta de carbón para un procesamiento anual de 11 000 t, ya que se quería aprovechar el transportador existente.

Noa (2012) realizó una investigación en la instalación objeto de estudio donde efectúa la determinación de los parámetros tecnológicos de la planta, el cual efectúa un análisis de la capacidad de producción de la planta que limitan la eficiencia y rendimiento de los diferentes equipos montados debido a que se producen pérdidas económicas y contaminación en el medio circundante de la Empresa Puerto de Moa.

Existe un trabajo realizado por la Empresa de proyecto CEPRONIQUEL en la cual se realiza la ingeniería de detalle de la planta de carbón, para su modernización en la Empresa Puerto de Moa, así como un listado de materiales necesarios para la realización de proyecto, también presenta datos técnicos y productivos de la planta, sin la presentación de los cálculos de los principales parámetros de la planta, es decir, sin tener en cuenta la productividad del molino, los transportadores y la criba existente, además no tienen en cuenta otros parámetros del proceso como es la granulometría del carbón, consumo de agua y demás. Tampoco tiene presente el equipamiento ya existente para la realización de un análisis que le permita mejorar el rendimiento de la planta (Noa, 2012).

Matos (2015) determinó la evaluación del sistema de bombeo de agua, en la planta de beneficio ubicada en la Empresa Puerto Moa (EPM) y brinda una propuesta de bomba para utilizar en el proceso, realizando una comparación técnico – económica entre la bomba que opera en la instalación y la bomba propuesta, donde el procedimiento empleado recoge los parámetros de costo de inversión y costo de bombeo entre ambas bombas.

De la revisión bibliográfica efectuada de los trabajos precedentes se determina que en ninguno de ellos se efectúa la propuesta de un sedimentador para la recuperación del agua que posee la pulpa que se desecha en el proceso de trituración y lavado de carbón en la planta de beneficio ubicada en la EPM.

1.3. Teoría básica de la velocidad de sedimentación

Cuando las partículas son muy finas el proceso de sedimentación se dificulta, se hace muy lento, lo que conlleva al uso de aparatos muy grandes donde la suspensión debe someterse al proceso de largo tiempo para obtener la capacidad de producción diaria

deseada (Rabinóvich 1987; Ferrer y Acosta 1991). Con el fin de incrementar la velocidad de sedimentación en estos casos, se emplean métodos de floculación, que consisten en provocar la formación de agregados de partículas, que tienen un mayor tamaño y peso que las partículas individuales. La floculación puede ser de naturaleza física, cuando el agrupamiento de las partículas se logra por agitación mecánica leve, por medios magnéticos, por calentamiento; o química, cuando se usan reactantes especiales que forman flóculos grandes que atrapan las partículas pequeñas o que proporcionan cargas eléctricas que hacen atraerse a las partículas (polímeros de alto peso molecular).

1.4. Características y conceptos básicos de la sedimentación

Un método muy difundido en la industria para la separación de suspensiones en sus componentes principales es la sedimentación, la cual se basa en la diferencia de densidades existentes entre las fases involucradas. Esta operación se lleva a cabo en equipos denominados sedimentadores, en los cuales las partículas sólidas tienden a descender, siguen la ley de caída libre de un cuerpo en el seno de un fluido, se obtienen de esta forma, en el fondo, un lodo bastante denso y con una concentración de sólidos superior a la de la suspensión alimentada, mientras que, en la parte superior se obtiene un fluido claro que debe estar libre de partículas sólidas, (Gresesqui 2010).

Existen diferentes factores que influyen de forma directa en la eficiencia de esta operación de acuerdo con Falcón (1983), Beyris y Falcón (1985), Rosabal y Valles (1988), tales como:

1. Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido.
2. La viscosidad del fluido.
3. La temperatura de operación.
4. La estabilidad de la suspensión.

1.4.1. Diferencia de densidades entre el fluido claro y el sólido

La diferencia de densidades influye de forma positiva en la velocidad de separación de las fases, cuando se opera con una mayor diferencia de densidades entre los componentes referidos, de manera que pudiera producirse la separación por decantación del licor claro. Por lo tanto, la velocidad de separación se favorece con un aumento de la diferencia de densidades de estos componentes.

1.4.2. La viscosidad del fluido

La viscosidad del fluido, al igual que la diferencia de densidades, influye de forma positiva en la velocidad de separación si se opera con valores relativamente bajos de esta, ya que para valores altos de viscosidad el líquido ofrece mayor resistencia al movimiento de descenso del sólido, y se dificulta la sedimentación.

1.4.3. La temperatura de operación

La temperatura de trabajo, que aparentemente no se considera en esta operación, ejerce gran influencia en los factores anteriores, puesto que, cualquier variación de esta, provoca efectos marcados en la densidad y viscosidad de los componentes.

1.4.4. La estabilidad de la suspensión

La estabilidad de la suspensión es un factor muy importante. La suspensión puede comportarse como inestable, en el caso de que las fuerzas de atracción de Van der Waals sean las responsables de promover la agregación entre partículas, que incrementa el tamaño de los flóculos lo que favorece el proceso de sedimentación, mientras que una suspensión estable prácticamente no sedimenta.

El predominio de la interacción repulsiva o de agregación obedece a la densidad de carga eléctrica superficial (σ_0) y a la fuerza iónica del medio dispersante, lo cual puede expresarse también mediante el potencial zeta (ξ). Tanto σ_0 como ξ son funciones del pH y de la fuerza iónica del medio dispersante.

En los pH correspondientes a puntos de máximos valores absolutos de potencial zeta, las fuerzas repulsivas son más importantes, lo que debe dar lugar a suspensiones más estables con un comportamiento reológico ligeramente pseudoplástico con tendencia a newtoniano. Por el contrario, al aproximarse el valor de potencial zeta a cero (i.e.p), es de esperar comportamientos plásticos o altamente pseudoplásticos, debido al predominio de las fuerzas atractivas las cuales inducen a la formación de agregados.

La magnitud de la densidad de carga eléctrica de las partículas está relacionada con la formación de complejos iónicos en su superficie (en dependencia de las fases mineralógicas o compuestos químicos que forman la fase sólida), la adsorción de iones, la adición de electrolitos, etc.

Un aumento de la fuerza iónica del medio trae consigo un incremento de la densidad de carga y una disminución del potencial zeta, a pH distintos del punto isoeléctrico, debido

a la compresión de la doble capa eléctrica, lo que facilita que las partículas se acerquen unas a otras al predominar las fuerzas de Van der Waals. La atracción entre partículas favorece la floculación y, por consiguiente, la sedimentación (Beyris y West 1992).

1.5. Procesos de sedimentación

La sedimentación se define como el proceso de separación de sistemas heterogéneos sólido-líquido, donde las partículas de sólidos suspendidos contenidos en líquido (solución acuosa) se separan en respuesta a la acción de la fuerza de gravedad, de las fuerzas de inercia (entre ellas las centrífugas), o de las fuerzas electrostáticas; generando una pulpa espesada en la parte inferior y un líquido clarificado sobrenadante en la parte superior (Kasatkin 1987; Perry 2000; Vega y Villacreses 2006; Corral 2009; Orozco 2009; Mariño et al. 2009; Cabrejos 2011; Ranjan 2011; Laguarda 2012). Los más importantes desarrollos tecnológicos modernos para la sedimentación se extienden en la industria minera, en especial en la industria metalúrgica, donde las aplicaciones más exigentes han sido requeridas; hoy en día se encuentran estos sistemas particularmente en la industria química y disímiles procesos industriales; en los que se encuentran la implementación de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales, entre otras (Mariño et al. 2010).

Durante la sedimentación tiene lugar un desplazamiento mecánico relativo de las fases, en la cual se haya implicado un mecanismo de transferencia de cantidad de movimiento por flujo viscoso (Zelikman et al. 1982; Gutiérrez y Bueno 2004). Como regla, ella no van acompañada de reacciones químicas; sus leyes se determinan por las leyes de la hidrodinámica, que depende en sumo grado de la construcción de los aparatos y de las condiciones de su explotación.

1.5.1. Sedimentación de partículas floculentas

La velocidad de las de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencias de velocidades de sedimentación de los flóculos, influencia de la turbulencia y variación de gradientes de velocidad; factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general (Mular y Bhappu 1982). Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorios o plantas pilotos con el propósito de predecir la eficiencias teóricas remocionales en función de

las cargas superficiales o velocidades de asentamiento preseleccionadas (Figura 1.1).

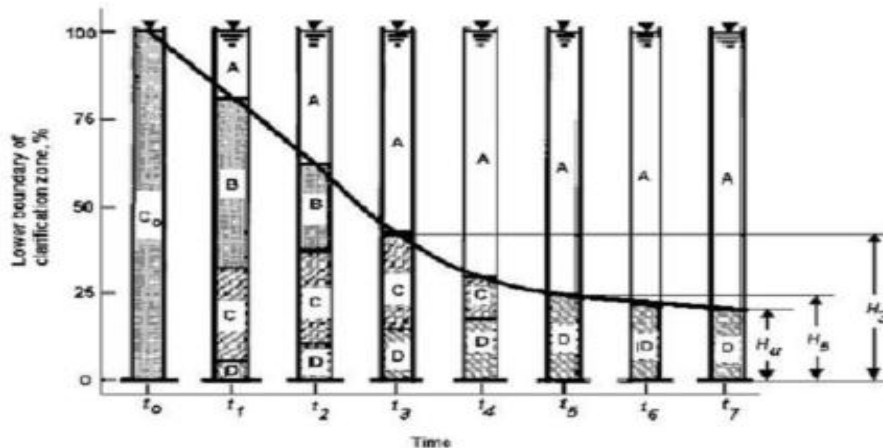


Figura 1.1. Cinética de la sedimentación

Fuente (Sincero, 2008).

Varios autores describieron la sedimentación de suspensiones mediante variaciones de la ecuación de Stokes o por modelos empíricos (Egolf y McCabe 1937), pero sin contribuciones realmente importantes en la modelación de la sedimentación. El desarrollo del conocimiento en sedimentación por Coe y Clevenger (1916) hasta la mitad del siglo 20 fue basado en balances macroscópicos del sólido y el fluido en sedimentación en probetas y sobre la observación de diferentes concentraciones establecidas en el sedimentador.

1.5.2. Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación

La intensificación del procesos de sedimentación puede ser alcanzada añadiendo a la suspensión sustancias que disminuyen la estabilidad de la suspensión y aglomeran las partículas formando otras más gruesas (coagulación o floculación) para aumentar su tamaño y como consecuencia, su velocidad de sedimentación que es función del cuadrado de dicho tamaño (Zelikman *et al.* 1982; Núñez, 2004).

Cuando se utilizan reactivos para aglomerar las partículas finas en los equipos de separación sólido-líquido, técnicamente se manifiesta una diferencia entre el efecto de coagulación y el de floculación aunque muchos productos empleados en la separación sólido-líquido poseen los dos efectos. Un agregado coagulado se volverá a formar después de que haya sido destruido y por el contrario un flóculo una vez destruido no volverá a formarse. Percibiendo mayor empleo los floculantes en los procesos de

sedimentación ya que la pulpas en la zona de compresión estará entre 5 - 60 minutos bajo una agitación suave. Además, el consumo del floculante es mucho menor que el del coagulante y son mucho más eficaces (mayor velocidad de sedimentación).

Por efecto del floculante se puede obtener, más rápidamente, no sólo un sedimentado de mayor concentración en sólidos (menos líquido) sino también en clarificado (rebose) más limpio (menor contenido en sólidos), pero un sistema coloidal la floculación no se puede aumentar indefinidamente (Svarosvsky 2000, Wills 1985, Truscott, 1978). Porque por encima de una concentración óptima la adición de un polímero es contraproducente.

1.6. Efecto del pH en la velocidad de sedimentación

El pH juega un papel importante en el proceso de sedimentación de las pulpas crudas. La experiencia indica que en el agua de rebose el pH disminuye su valor con el tiempo de contacto con el mineral laterítico.

Novoa (1976) propone controlar el pH de la pulpa para lograr valores óptimos de 5,5 – 5,7 con el objetivo de lograr una mejor sedimentación y expone que a valores mayores o menores de ese rango se observa un efecto negativo en la velocidad de sedimentación. Los valores de pH alcanzados en este trabajo difieren de los obtenidos por Valdés (1984), quien estudió los fenómenos químicos coloidales de la pulpa laterítica, determinando el rango óptimo de pH entre 6,6 – 7,6, cercano al punto isoeléctrico, lo que ha sido comprobado por otro trabajo, entre los que se pueden mencionar el de Ferro (1984); sin embargo Cerpa (1997) demuestra que el punto isoeléctrico se alcanza a pH= 4,8 – 8,4.

Esta diferencia puede estar dada por las condiciones de trabajo utilizadas en cada caso y las características del mineral. Novoa (1976) se limitó al estudio de las condiciones de sedimentación variando el pH en un rango muy estrecho. Por otra parte Valdés (1983) realizó un estudio más profundo a través de mediciones del potencial electrocinética de la partícula por los métodos de macro y micro electrofóresis en un intervalo de pH entre 0,3 y 12,4, estableciendo dos puntos isoeléctrico a pH entre 2 y 7 respectivamente; entre estos dos valores, la superficie de la partícula tiene carga positiva. Para un valor de pH inferior a 2 o superior a 7, las partículas se cargan negativamente. Cerca del punto isoeléctrico a pH de 6,6 – 7, no existen fuerzas electrostáticas capaces de

separar las partículas entre sí y estas tienden a regularse con la formación de agregados que sedimentan a mayor velocidad; es a estos valores de pH que se alcanzan las mejores condiciones de sedimentación de la pulpa cruda. Este trabajo establece el valor de pH en que las pulpas sedimentan mejor; pero no tiene en cuenta la procedencia o tipo del mineral de la pulpa, o sea su composición granulométrica, mineralógica y química.

1.7. Consideraciones para el diseño de sedimentadores

Los espesadores son equipos típicos que no han cambiado mucho su apariencia desde la invención del espesador (Dorr 1905). Estos equipos tienen un tiempo de vida superior a los 20 años. Los mecanismos convencionales de recogida de fango consisten en raquetas de fondo muy robustas. El puente normalmente es fijo. La tracción de las raquetas es central. La estructura sumergida en la que se apoyan las rasquetas que remueven lentamente el manto de fango y permiten que se abran canales que dejen salir el líquido y la compactación se vea favorecida.

Un diseño adecuado de un sedimentador por gravedad implica tener en cuenta las posibles sobrecargas (cero paradas o atascos) y el posible desarrollo de condiciones anormales. Por eso los parámetros de diseño de un sedimentador son según Wills (1985) y Gupta (2006):

- ❖ Velocidad ascensional, o carga superficial, que es el cociente de caudal de fluido y la superficie del depósito de sedimentación.
- ❖ Tiempo de retención, que es volumen del depósito de sedimentación dividido por el caudal; se puede sustituir éste parámetro por la altura del sedimentador.

Por tanto, para dimensionar un sedimentador destinado a realizar operaciones de sedimentación se requiere la determinación del área, la profundidad o altura, así como el coeficiente K, del par del accionamiento del sedimentador, en función del caudal y de las características de la alimentación, así como de la concentración de la suspensión que abandona el sedimentador por la parte inferior del mismo (Mular y Bhappu 1982; Núñez 2005).

El área de un espesador (parámetro fundamental de diseño) varía en razón inversa de la velocidad de sedimentación suponiendo todas las demás condiciones constantes. La velocidad de sedimentación es una característica fundamental de cada pulpa, la cual

debe ser determinada experimentalmente bajo ciertas condiciones de floculación. Es importante que el cálculo del área del espesador tenga la mínima área de trabajo según las necesidades del proyecto, y que considere un margen de seguridad para posibles variaciones de las características del alimento, tales como mineralogía, granulometría, gravedad específica, entre otras (King 2001).

Los factores fundamentales que determinan el funcionamiento del sedimentador gravimétrico se citan a continuación (Suárez, *et al.* 2007):

- ❖ Tipo de material.
- ❖ Naturaleza de la floculación.
- ❖ Carga de sólidos sobre el sedimentador.
- ❖ Tiempo de retención de sólidos en la zona de compresión.
- ❖ Tiempo de retención.
- ❖ Caudal de descarga.
- ❖ Sistema de alimentación.

1.7.1. Metodología para el diseño de sedimentadores

El criterio fundamental para el diseño de sedimentadores, es determinar la relación entre la velocidad de sedimentación (ver Figura 1.2) y las dimensiones del tanque a emplearse. La velocidad de sedimentación del mineral se mide mediante pruebas de laboratorio y con ellas se determina un parámetro de diseño denominado área unitaria (área de espesamiento dividido por flujo de sólido de alimentación, $m^2/t/día$). Tres procedimientos son los más usados para realizar este cálculo (Coe *et al.* 1916).

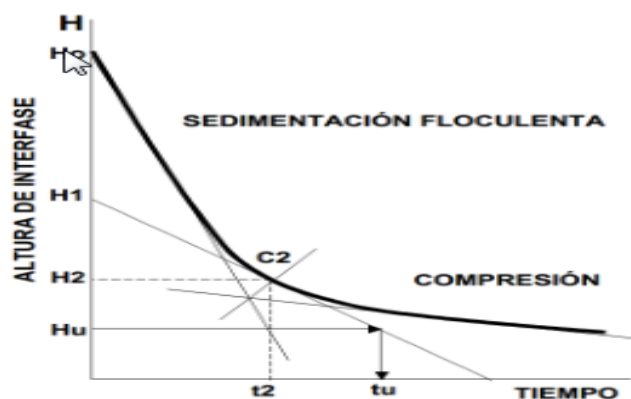


Figura 1.2. Determinación de las velocidades de sedimentación a partir de la curva de sedimentación discontinua.

Fuente: Jiménez (2014)

Como los minerales se extraen de varios frentes de explotación, el comportamiento de las suspensiones (pulpas metalúrgicas) varía mucho tanto en sus velocidades de sedimentación como en las alturas relativas de las distintas zonas durante la sedimentación. Para evaluar con exactitud las características de sedimentación de cada suspensión individual, es preciso realizar un estudio experimental (McCabe 1991).

Las principales variables de diseño para cualquier proceso de espesamiento son:

- ❖ La concentración de sólidos y gasto de la alimentación.
- ❖ Demanda de químicos y costo de éstos.
- ❖ Concentración de sólidos suspendidos y disueltos, así como el gasto del líquido clarificado.
- ❖ Concentración de sólidos y gasto de pulpa espesada.

El objetivo de los sedimentadores es conseguir un producto espesado a extraer por el fondo. La sedimentación en los sedimentadores se lleva a cabo en condiciones de sedimentación zonal. El problema fundamental de diseño consiste en la determinación del área de la sección transversal para que una pulpa con una concentración inicial de sólidos sea compactado hasta conseguir una concentración final (densidad) en la descarga inferior.

De modo que; la productividad del volumen de líquido claro producido en la unidad de tiempo por un sedimentador continuo depende fundamentalmente del área de la sección transversal disponible para la sedimentación, siendo en los sedimentadores industriales casi independiente de la profundidad del líquido (McCabe 1991; Mariño *et al.* 2009).

1.8. Modelos reológicos

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas (modelos reológicos) para expresar la relación que existe en estado estacionario entre τ y $\dot{\gamma}$. Todas estas ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos, cuyo valor numérico puede determinarse a partir de los datos de la curva de flujo a temperatura y presión constante. Los modelos más difundidos son: el modelo de Ostwald de Waele, modelo de Bingham y el modelo de Bulkley – Herschel.

El modelo reológico que se ajusta al petróleo pesado según Laurencio y Delgado, (2008) es la ley de potencia (ecuación 1.1). Su viscosidad

disminuye con el incremento del gradiente de velocidad y comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante.

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad (1.1)$$

Donde:

n - índice de flujo, adimensional.

K - índice de consistencia másica, Pa.s.

Según Turro (2002) la composición química de los elementos predominantes en la cola, son el hierro y la sílice con valores medio de 47,6 % y 12,45 % respectivamente. En los resultados obtenidos se observa que las partículas de tamaños menores de 44 μm , son mayoritarias y constituyen más del 60 % del volumen de la fase sólida, por lo que se puede decir que estamos en presencia de un comportamiento no newtoniano.

El comportamiento reológico depende fundamentalmente de la concentración de sólido y de las propiedades superficiales, dado el alto contenido de partículas finas. A concentraciones de 25 a 35 % en peso de sólidos el comportamiento es pseudoplástico, mientras que para concentraciones mayores fluyen como plásticos Bingham. Como la concentración de sólido de la cola excede al 35 % las curvas de fluido obtenidas se comportan similar a un plástico ideal Bingham (Garcell 2001).

El comportamiento del modelo de Bingham es el siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 el esfuerzo cortante límite o inicial (Pa) que es necesario vencer para que el fluido fluya, μ_p es la viscosidad plástica (Pa.s) y $\dot{\gamma}$ el gradiente de velocidad de deformación.

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:

$$\tau_{yx} = K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.3)$$

Esta expresión se conoce también como ley de potencia; se utiliza para describir el comportamiento de fluidos pseudoplásticos 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 pseudoplástico; 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:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta_p \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) \quad (1.4)$$

Dónde: 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:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.5)$$

Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales.

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

1.9. Clasificación reológica general de los fluidos

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

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.

A su vez los fluidos no newtonianos se clasifican en tres grupos:

1. De viscosidad invariable con el tiempo

- a) Seudoplásticos.
- b) Dilatantes.
- c) Plásticos reales.
- d) Plástico ideal.

De viscosidad dependiente del tiempo

- a) Tixotrópicos.
- b) Reopécticos.

2. Materiales viscoelásticos (líquidos de Maxwell)

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

1.9.1. Curvas de flujo

A continuación en la Figura 1.3 y 1.4 se muestran las curvas de flujo que se representan gráficamente, al relacionar valores experimentales de τ contra $(-dv/dy)$. Así, se obtendrán curvas de flujo de diferentes formas en dependencia de la naturaleza reológica de los fluidos, según Turiño (1984) y Tejeda (1985).

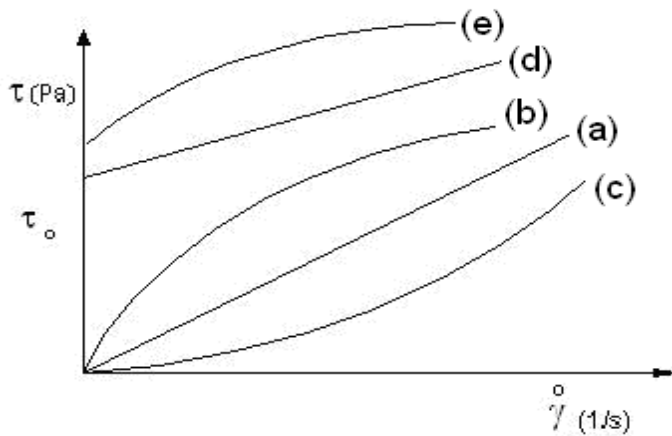


Figura 1.3. Curvas de flujo típicas: (a)- Newtonianas; (b)- Seudoplásticas; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.

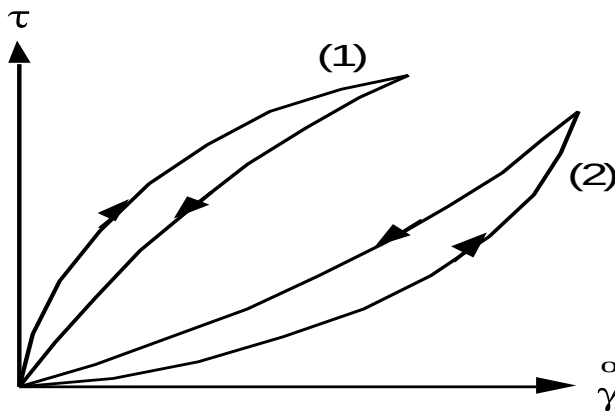


Figura 1.4. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo: 1- Tixotrópico; 2- Reopéctico.

Fuente: Garcell, 2001.

1.10. Factores que influyen en el comportamiento reológico

La velocidad de sedimentación de los cuerpos depende considerablemente de la forma de los granos y de la temperatura del medio.

1.10.1. Efecto de la granulometría

En general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas partículas que poseen propiedades magnéticas con las que ocurre lo contrario, como es el caso de las pulpas de maghemita, según lo expresado por Garcell (1984).

En un trabajo realizado por Garcell (1992), se confirmó que las pulpas acuosas de

laterita (limonita) preparadas con partículas mayores de 90 μm no logran formar una estructura y muestran un comportamiento newtoniano; en cambio, las preparadas con mezclas de partículas inferiores a 50 μm forman estructuras que comunican a la suspensión propiedades plásticas, pudiendo ajustarse su curva al modelo de los plásticos Bingham.

Las pulpas de lateritas industriales muestran una distribución granulométrica en la que predominan las partículas con tamaños inferiores a 43 μm , de ahí el comportamiento típico de los plásticos Bingham de estas.

1.10.2. Efecto de la temperatura

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos, según Garcell (1993), a) disminución de la viscosidad del medio dispersante; b) debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

1.10.3. Efecto de la composición mineralógica

Se ha comprobado que las pulpas de mineral laterítico pueden presentar un amplio rango de los valores del punto iso eléctrico (i.e.p.) o de su punto de carga cero (p.z.c) en la dependencia de su composición mineralógica, según lo expresado por Garcell (1993).

Este hecho hace que la viscosidad y estructuración de las pulpas de laterita sean, a su vez, una función del pH. Los cambios de la composición mineralógica, también influyen sobre las características de sedimentación de las suspensiones de laterita y sobre la estabilidad de las pulpas.

1.10.4. Efecto de la concentración de sólidos

Por lo general, en las suspensiones diluidas (con valores de concentración volumétrica ϕ inferior a 10 %) el comportamiento de las suspensiones es newtoniano. A medida que aumenta la concentración de sólidos, se incrementan las interacciones de las partículas, con la tendencia a formar flóculos, agregados y estructuras. Como consecuencia de esto, a concentraciones moderadas, la suspensión puede alcanzar el comportamiento seudoplástico. A concentraciones más altas, los efectos

hidrodinámicos son menos importantes, y, dado que las partículas se hayan más cerca una de otras, se forman estructuras tridimensionales que le comunican a la dispersión propiedades plásticas (Garcell 1993; Cerpa y Garcell 1998).

En trabajos realizados por Garcell (1993) y Cerpa y Garcell (1998) con pulpas de lateritas pudo determinarse que, para concentraciones menores de 18 % en peso de sólidos, estas pulpas exhiben un comportamiento pseudoplástico que es prácticamente independiente de su composición mineralógica y para contenidos de sólidos en el orden de 22 % en peso se manifiestan propiedades plásticas, y a medida que se incrementa la concentración hasta 45 %, las viscosidades aumentan, dependiendo cada vez más de la mineralogía del sólido. En estas condiciones, las curvas de flujo, pueden ser ajustadas, en algunos casos, al modelo de Bingham, o al de Buckley – Herschel, en otros.

1.10.5. Efecto del pH

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoeléctrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas. Es por ello que las partículas se dispersan más fácilmente, y la suspensión adquiere más estabilidad y exhibe menores valores de viscosidad.

Otro aspecto importante está relacionado con la adsorción de iones en la superficie del sólido, lo cual provoca variación de la carga superficial de las partículas y desplazamiento del i.e.p. y de p.z.c, según Garcell (1994). En general, cuando no hay adsorción específica de iones, los valores del i.e.p y de p.z.c coinciden, sin embargo, cuando se adsorben cationes y aniones los valores del i.e.p y p.z.c experimentan desplazamiento hacia pH más ácidos o más básicos, trayendo consigo cambios en el

comportamiento de la suspensión.

1.11. Proceso tecnológico de la planta de beneficio de carbón

El carbón llega al puerto de Moa a través de barcos provenientes de Viet Nam y otros países sudamericanos, estos barcos son descargados y la materia prima almacenada en las instalaciones del puerto de Moa. El flujo tecnológico de la planta (ver Anexo 1) comienza después de la descarga del carbón en la plazoleta de recepción donde es trasegado por un cargador frontal hasta la tolva de alimentación. Desde esta tolva el carbón cae por gravedad en el transportador número 001, que es el encargado de alimentar la criba vibratoria SN-001, a este equipo se le inyecta agua a presión por medio de rociadores para eliminar todas las partículas menores a 1,19 mm evitando que las partículas más pequeñas ingresen a la atmósfera producto del aire de la costa, esta criba posee dos secciones de malla con aberturas cuadradas. Una sección con malla de dimensión menor a 1,19 mm y una segunda sección con malla de dimensión 2,5 a 4,75 mm y las fracciones mayores a 5 mm pasan al triturador de rodillo ML-001, aquí se reduce su tamaño hasta los 4,0 mm, donde son recirculadas nuevamente al proceso productivo por medio del transportador de banda 002 y de ahí a la criba vibratoria.

El carbón con granulometría inferior a 1,19 mm es arrastrado y descargado por una tubería hasta una caja colectora que lo suministra a una piscina donde se separa del agua, este proceso ocurre por decantación, el agua con este carbón fino en cierta cantidad cae por reboso a las demás secciones de la piscina, donde se termina de descartar el carbón fino.

El producto clasificado (+2,5 ÷ 4,75 mm) es evacuado por medio del transportador de banda TR- 003 y este a su vez es el encargado de alimentar el producto final a la tolva de recepción o silos de almacenaje, la cual cuando se llena es abierta por la parte inferior, cayendo el material en los camiones que transportan el material hasta la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

1.11.1. Características de la materia prima

Según Noa (2012) la materia prima de esta planta, es el carbón de piedra, fundamentalmente antracita, que es importado desde Viet Nam y países latinoamericanos, es de alta calidad debido a su utilización en el flujo productivo (sínter) de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Esta materia prima tiene procedencia de la Corporación “COALIMEX” Viet Nam y sus características se muestran a continuación en la tabla 1.1:

Tabla 1.1.Característica de la materia prima.

Descripción del Material	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje %
Carbón Antracita No.4 ASTM Std	Dimensiones	15 ÷ 35	mm.	-
	Cenizas	-	-	4,68
	Material Volátil	-	-	6,87
	Contenido de azufre	-	-	0,50
	Valor Calórico	8 090	kCal/kg	
	Carbón fino			8,45
	Temperatura de fusión de la ceniza	1 400	°C	-
	Gravedad específica	-	-	0,950

1.11.2. Característica del producto utilizable por la planta de sinter

A continuación en la tabla 1.2 se muestra el producto utilizable por la planta de sinter de la empresa productora de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” el cual debe poseer las siguientes características:

Tabla 1.2. Características del material utilizable.

Descripción del Material	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje %
Carbón Antracita No.4 ASTM Std	Granulometría	>2,5	mm	74
	Grueso	4,75	mm	5,0
	Fino	<1,19	mm	7,0
	Fino	>1,19	mm	14
	Humedad	-	-	2,0
	Gravedad específica	-	-	1,10

1.11.3. Características del material desechado

La planta de beneficio en el proceso de obtención de trituración y lavado del carbón desecha una granulometría del carbón que no se puede utilizar en el proceso de sinter de la industria ya que es rechazado por ser partículas muy finas que rápidamente se queman, se disuelven y se convierten en cenizas. A continuación la tabla 1.3 muestra las características de este material:

Tabla 1.3. Características del material desechado.

Descripción del Material	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje
Carbón Antracita No.4 ASTM Std	Granulometría	1,19	mm	8,45
	Grueso	>1,19	mm	1,45
	Fino	<1,19	mm	7,0
	Humedad	-	-	4,0
	Gravedad específica	-	-	1,10

1.12. Conclusiones del capítulo 1

- ❖ Se efectuó una revisión de trabajos precedentes realizados en la Unidad Empresarial de Base (UEB) ubicada en la “Empresa Puerto Moa”, determinándose que en ninguno de ellos se efectúa la propuesta de un sistema de sedimentación para la recuperación del agua que posee la pulpa.
- ❖ Se mostraron los fundamentos teóricos referidos al proceso de sedimentación y al fenómeno de transporte de fluidos que sirven de base al análisis, explicación y proyección de un sistema de sedimentación para la instalación objeto de estudio.
- ❖ Se desarrolló una descripción del flujo tecnológico de la UEB objeto de estudio, lo que permite adquirir una visión de conjunto o panorámica de la instalación y facilita la contextualización del conocimiento.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La fundamentación teórica acerca de los conocimientos del comportamiento y propiedades de transporte de pulpa, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la solución de problemas asociados a la evaluación y diseño de los sistemas de transporte por tuberías de fluidos en la industria cubana. En los sedimentadores la densidad de la pulpa influye decisivamente en el proceso de sedimentación, ya que durante el proceso la pulpa se hace estable y la sedimentación lenta. Para el desarrollo de toda investigación se necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados, lo que validan los resultados que se obtienen, es por eso que resulta indispensable una correcta toma de muestra, así como la aplicación de los métodos adecuados en aras del cumplimiento del objetivo propuesto.

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

Establecer los métodos y procedimientos experimentales para la obtención de las principales propiedades y modelos matemáticos que permitan el transporte eficiente por tubería de la pulpa residual objeto de estudio, y la propuesta del sistema de sedimentación adecuado.

2.2. Origen de las muestras de pulpas

En el análisis experimental se utilizaron muestras de pulpa producto al rechazo en el proceso de lavado de carbón y polvo tomados en dos puntos del proceso tecnológico de la planta de beneficio de carbón ubicada en la “Empresa Puerto Moa”, en la tubería de descarga y en el área de sedimentación de la pulpa respectivamente. A continuación en la tabla 2.1 se relacionan los puntos de toma de muestras utilizados para el análisis.

Tabla 2.1. Puntos de toma de muestras.

Muestras	Punto de toma de muestra
M - 1	Tubería de descarga de la pulpa
M - 2	Área de sedimentación de la pulpa

❖ Toma y preparación de las muestras

Para la toma de la muestra 1 se hizo un compósito de la pulpa evacuada por la tubería de descarga, este compósito se obtuvo con tomas realizadas cada 2 horas por un

período de 2 días, esta pulpa se homogenizó y almacenó en una cantidad de 5 litros para la realización de los experimentos.

Para realizar el estudio se tomaron muestras de polvo representativas en el lugar señalado en la tabla 2.1. Del polvo que llega al área de sedimentación contenida en el rechazo del proceso, se tomó la muestra 2 y para ello se aplicó el método de puntos propuesto por Mitrofanov (1984). El número de puntos de obtención de muestra dependió de la regularidad del área de origen de la muestra y la dimensión de la superficie sujeta al muestreo. Esta última tiene un área de aproximadamente 150 m². La masa que se tomó en cada punto es de aproximadamente 60 kg, hasta obtener una cantidad lo suficientemente grande, la cual posteriormente se sometió a un proceso de homogenización y cuarteo como se muestra el esquema de la Figura 2.1.

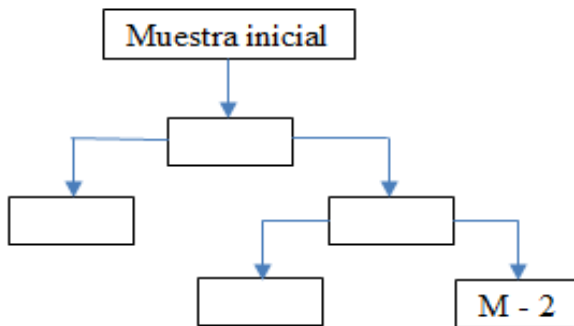


Figura 2.1. Esquema de preparación de la muestra 2

Al finalizar el proceso se seleccionó una muestra de aproximadamente 4 kg, la cual se almacenó en jaba de nailon teniendo en cuenta la reserva necesaria para el desarrollo de los experimentos.

2.3. Determinación de la granulometría

El análisis de la composición granulométrica se realizó en unos de los laboratorios pertenecientes a la empresa Ernesto Che Guevara (ECG); mediante un analizador de partículas compacto 22 (ver Figura 2.2), con alto grado de precisión en el análisis del diámetro de las partículas de pequeños diámetros. Dicho analizador posee un rango de medición de 0,3 a 300 μm el cual se describe detalladamente a continuación.



Figura 2.2. Equipo láser para el análisis de partículas pequeñas.

2.3.1. Características de diseño del analizador de partículas

El equipo cuenta con un banco óptico con una alta tecnología acoplada a un diodo láser. El cual mediante una ondulación de 635 nm, permite definir la longitud que está dentro del rango visible. El montaje rápido para medir las células permite el funcionamiento de importancia para el ajuste automático en la operación del instrumento sin dificultad. El equipo presenta un sensor de silicio monolítico en un material de apoyo cerámico que consta de elementos semicirculares para la buena aceptación del formulario de las partículas y también optimiza las garantías de la estabilidad mecánica y térmica. Presenta un despliegue de LCD que constantemente informa a los sistemas el estado del equipo, permitiendo operar en el sitio conectándose a la computadora, donde brinda la información necesaria de los resultados del proceso. La integración de inteligencia reconoce automáticamente las partículas dispersando la unidad conectada en cada caso y controlando sus funciones permitiendo limpiar aproximadamente 300 ml de volumen de suspensión, automáticamente y totalmente sin dejar cualquier residuo.

2.4. Determinación de la densidad aparente del carbón, de la pulpa y del % de sólido

Densidad del polvo

Para la determinación de la densidad aparente del sólido se utilizó el método del picnómetro, siguiendo el procedimiento propuesto por Heny *et al.* (1959). Dicha prueba se realizó en el laboratorio de química de la Facultad de Metalurgia Electromecánica,

utilizando un juego de picnómetros de 25 ml, una pipeta de 25 ml, una balanza digital con precisión $\pm 0,0001$ g y una estufa de temperatura hasta 100 °C. El procedimiento consistió en el desarrollo de los siguientes pasos: Se tomó un picnómetro vacío y se pesó (peso A); se le añadió agua destilada y se volvió a pesar (peso B); se vació y secó el picnómetro minuciosamente y se le introdujo el mineral para ser pesado (peso C); el mineral con agua se puso en una estufa a calentar para que escaparan las burbujas de aire, se enfrió y cuando el agua estuvo encima del material se tapó y se pesó (peso D). Luego se determina la densidad del sólido como el producto del peso específico relativo del sólido por la densidad del agua.

El peso específico se determinó por la expresión siguiente:

$$\delta_e = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (2.1)$$

Entonces la densidad aparente del sólido fue calculada utilizando la fórmula que se muestra a continuación:

$$\rho_s = \delta_e \cdot \rho_{H_2O} \quad (2.2)$$

Densidad de la pulpa

Para determinar la densidad de la pulpa se utilizó el método volumétrico, a través del procedimiento siguiente: Se tomó una probeta de capacidad 250 ml y se pesó; se tomó la muestra de la pulpa y se homogenizó mediante agitación; se vertió la pulpa en la probeta hasta el volumen de 25 ml y se pesó la probeta con la pulpa, obteniéndose los resultados en g.

La densidad de la pulpa en g/cm³ se obtiene por la siguiente expresión.

$$\rho_l = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

Donde:

m – Es la masa total de la pulpa, g.

V – Es el volumen total la pulpa, cm³.

ρ_l – Es la densidad la pulpa, g/cm³.

Porcentaje de sólido

Con los datos obtenidos de la densidad del polvo y de la pulpa se calculó el porcentaje de sólido por la fórmula expuesta en Martínez (2009), la cual se muestra a continuación.

$$S = \frac{\rho_l - \rho_{H_2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \quad (2.4)$$

El cálculo del porcentaje de sólido permitió definir la concentración volumétrica de la pulpa. Las expresiones que se utilizaron en el cálculo de ambas concentraciones son las que se refieren a continuación, de acuerdo con Turro (2002), García *et al.* (2014), Mariño *et al.* (2009).

$$C_v = S \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (2.5)$$

Donde:

C_v – Es la concentración volumétrica de la suspensión.

2.5. Determinación de la velocidad de sedimentación de la pulpa

Para la determinación de velocidad de sedimentación de la pulpa analizada se tuvo en cuenta la utilización de un floculante, debido a la dificultad de definir la misma naturalmente. A continuación se muestra una breve descripción de la preparación de la muestra para realizar el experimento.

2.5.1. Preparación de la muestra

En el desarrollo de esta investigación se utilizó el floculante **SUKERFLOC N-194** de la firma Quimizuk, s. a. el cual se aplica a procesos de separación de líquidos-sólidos en el tratamiento de agua mejorando su calidad reduciendo los sólidos en suspensión y la turbidez. Por estas razones este floculante es seleccionado para la evaluación de la sedimentación en la presente investigación.

A partir de las recomendaciones del fabricante, la mejor aplicación y dosificación de floculantes depende de la aplicación y se recomienda la previa evaluación a escala de banco y la determinación de las dosis óptimas. Ver ficha técnica en Anexo 7.

En esta investigación se seleccionó un sedimentador y se determinó el área de sedimentación necesaria para el residual de estudio realizando una evaluación en el proceso de sedimentación utilizando una dosis de 0,6 ml por cada 1 000 ml de pulpa.

2.5.2. Determinación de la dosis de floculante por el método de Willcon

Este método se basa en la utilización de la mesa de floculación, donde son preparadas varias muestras con determinadas dosis de floculantes. Consiste en observar cómo se

desarrolla en cada una de las rajas el flóculo de mayor tamaño y velocidad de sedimentación aparente, para escoger aquella dosis de floculante más adecuada. Para la realización de los ensayos de floculación se utilizó el floculante **SUKERFLOC N-194**, donde fue estudiada la aplicación de una dosis de 0,6 ml para añadir a una concentración de 1 g/L para un volumen de 1 000 ml de la muestra. Las corridas de sedimentación se realizaron a una temperatura entre 26 y 28 °C, muy similar a la media aritmética anual del territorio que es de 26 °C.

Primeramente se debe agitar simultáneamente la muestra a una determinada velocidad contenida en una serie de probetas de 1 000 ml, luego se deja decantar y se observa el resultado del ensayo, es decir, el período de tiempo en que la muestra analizada contenga el agua clara.

La dosis de coagulante para operar en la instalación objeto de estudio debe ajustarse al volumen del sedimentador propuesto, por medio de la siguiente relación.

$$Cf = Q * 0,000 6 \quad (2.6)$$

Donde:

Cf- Concentración de floculante, ml

Q- Gasto de pulpa introducido en el sedimentador, m³/s

2.5.3. Análisis de la sedimentación

El análisis de sedimentación se realiza con el objetivo de valorar el comportamiento de la pulpa durante el proceso de sedimentación. La curva de sedimentación se realiza de forma experimental, para ello se toma una probeta de 1 000 ml (Ver Anexo 6), y una muestra del material escogido de la tubería de descarga de la planta de beneficio de carbón objeto de estudio.

El comportamiento de la sedimentación de la pulpa objeto de estudio se caracteriza por medio de la velocidad de sedimentación, la cual puede ser definida desde el punto de vista matemático como la rapidez con que varía la altura de la interface en la unidad de tiempo (ecuación 2.7). El análisis matemático de la velocidad de sedimentación incluyó el ajuste de modelos matemáticos a la curva de altura de la interface (Z) contra tiempo (t).

$$v_{sed} = \frac{dZ}{dt} \quad (2.7)$$

La curva de sedimentación se realizó de forma experimental, según norma EN-14702-1-2007.

2.5.3.1. Determinación de la velocidad crítica

Se puede considerar la velocidad crítica como la velocidad media del flujo para la cual es inminente la sedimentación de las partículas sólidas del mineral que se transporta en el líquido.

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

$$v_m = (1,1 - 1,2) \cdot v_{\text{Crít.}} \quad (2.8)$$

La determinación de la velocidad crítica por las indicaciones metodológicas para el cálculo técnico económico de los sistemas de transporte por tuberías se efectúa por medio de la siguiente expresión (Martínez 2009; García *et al* 2014).

$$V_{\text{Crít}} = 6 \cdot K_d \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot D \cdot w} \cdot \sqrt{\rho_{\text{polvo}} - 1} \cdot \sqrt[6]{S} \quad (2.9)$$

Donde:

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

D – diámetro de la tubería, m.

W – grosor hidráulico o velocidad transitoria, m/s.

ρ_{polvo} – densidad del polvo, kg/m^3 .

S – concentración de peso en sólido, adimensional.

K_d – coeficiente empírico corregido, que depende de la granulometría.

$V_{\text{Crít.}}$ – Velocidad crítica de transportación, m/s.

El coeficiente empírico que tiene en cuenta la influencia de la granulometría del material se determina utilizando la tabla 2.2, que se muestra a continuación.

Tabla 2.2. Coeficiente empírico, que depende de la granulometría del material (d_{cp}).

$d_{\text{cp}}(\text{mm})$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
K_d	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,83	0,77	0,73	0,74

La velocidad media del flujo se determinó a través de la siguiente expresión, la cual se dedujo a partir del análisis de continuidad de un fluido en una vena líquida.

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (2.10)$$

Donde:

Q- es el gasto que fluye a través de la tubería, m^3/s .

A- es el área de la sección transversal del conducto, m^2 .

v_m - es la velocidad media de transportación, m/s .

2.6. Determinación del comportamiento reológico de la pulpa

La finalidad de esta práctica fue trazar la curva reológica o reograma de la pulpa analizada, mediante una serie de parámetros que se determinaron experimentalmente en el laboratorio. La determinación del comportamiento de los fluidos respecto al gradiente aplicado en estado estacionario, se realizó bajo condiciones de flujo laminar, para que estos datos tengan validez.

2.6.1. Pruebas de reología utilizando el viscosímetro brookfield DV-II + Pro

La prueba reológica del fluido objeto de estudio se realizó en un laboratorio perteneciente a la empresa de estudio del níquel Capitán Alberto Montes de Oca (CEDINIC) con asistencia de sus técnicos, utilizando el viscosímetro brookfield DV-II + Pro que describe a continuación.

2.6.1.1. Descripción técnica del Viscosímetro Brookfield DV-II + Pro

El viscosímetro Brookfield DV-II + Pro (Figura 2.3) mide la viscosidad de los fluidos a velocidades de corte determinadas. La viscosidad es una medida de la resistencia al flujo de los fluidos. El equipo ofrece una versatilidad excepcional de modos de control que permite el funcionamiento autónomo tradicional, el funcionamiento automático mediante programas descargados desde un ordenador o con control total a través del ordenador utilizando el software Brookfield Rheocalc 32.



Figura 2.3. Viscosímetro programable Brookfield DV-II + Pro.

1. El DV-II+Pro puede utilizarse como un viscosímetro Brookfield tradicional para la recogida de datos de viscosidad a una sola velocidad a través de su sencillo teclado; tan sólo es necesario seleccionar el husillo y la velocidad y leer el valor en la pantalla.
2. El software Brookfield DVLoader se puede utilizar para programar el equipo para que controle todos los aspectos de las pruebas y de la recogida de datos sin que el operario tenga que supervisar el instrumento; tan sólo necesita iniciar el programa y regresar a los datos de prueba impresos (la impresora es opcional).
3. El software Brookfield Rheocalc 32 realizará todas las funciones de control y toma de datos del equipo desde el ordenador, a la vez que sirve de plataforma para la recogida y el análisis de datos avanzados para el control externo. En algunos de estos modos de control, el mismo proporcionará los mejores resultados de medición y control de la viscosidad.

2.6.1.2. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del DV-II + Pro consiste en dirigir un husillo (que está sumergido en el fluido de prueba) a través de un muelle calibrado. La resistencia viscosa del fluido al avance del husillo se mide mediante la deflexión del muelle. La flexión del muelle se mide con un transductor rotativo. El intervalo de medición del DV-II + Pro (en centipoise o milipascal/segundo) está determinado por la velocidad de rotación del husillo, el tamaño y la forma de éste, el depósito en el que gira y el par de torsión a escala completa del muelle calibrado.

❖ Presentación y tratamiento de los resultados

Se presentaron los datos experimentales tal como fueron obtenidos en el laboratorio. Además se realizó una tabla de resultados (Ver tabla 10 del Anexo 12).

Al mismo tiempo, se elaboró la gráfica pertinente, y en el de ajuste de la recta de regresión se presentaron los valores obtenidos y el coeficiente de correlación.

2.7. Determinación de la conductividad y el pH de la pulpa

El análisis de la pulpa se efectuó en el laboratorio central de la UEB FUEL – OIL de Moa perteneciente a la Central Termoeléctrica Lirio Ramón Pérez con la participación de sus técnicos de laboratorio donde, para determinar la caracterización de la pulpa se utilizó el pH-metro/Conductímetro modelo: HND-C de conductibilidad digital marca

KOBOLD (Figura 2.4), con los electrodos combinados de pH/Conductividad de la Redox-Messgerat marca JUMO. En el cual su principio de funcionamiento se basa en el método electroquímico para medir el pH de las pulpas y el método analítico basado en la conducción eléctrica de los iones en solución.



Figura 2.4. pH-metro y conductímetro.

2.8. Selección del sedimentador

La selección del sedimentador de acción continua se determinó a partir de los requisitos operacionales, el valor de la sección transversal, la altura y el torque requerido en el accionamiento. Las expresiones que se utilizaron en el cálculo de los parámetros referidos anteriormente se muestran a continuación, las cuales fueron tomadas de Falcón (2002).

❖ Cálculo de la sección transversal de sedimentador continuo

En la Figura 2.5 se muestran las variables fundamentales que caracterizan al fluido que entra y sale del sedimentador. Para el caso específico de un sedimentador de separación del agua que contiene la pulpa residual que se genera en el proceso lavado de carbón en la planta de beneficio de carbón ubicada en EPM, las variables del proceso son: el gasto de pulpa que entra (Q_o), la concentración de sólido inicial de pulpa (C_o), la densidad inicial del sólido (ρ_s), gasto de pulpa que sale espesado (Q_f), la concentración de sólido final de pulpa (C_f), la densidad del sólido a la salida (ρ_{sf}), gasto del agua de reboso (Q_r), la concentración de sólido del agua de reboso (C_r) y la densidad del agua de reboso (ρ).

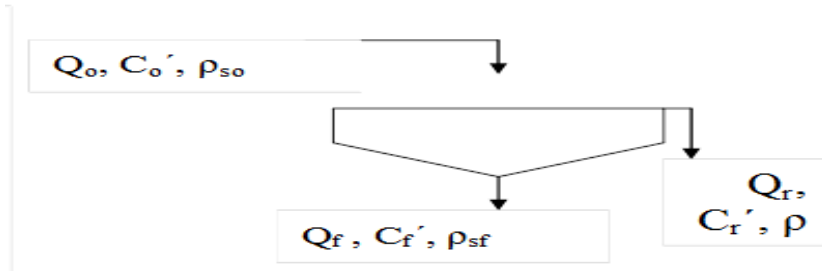


Figura 2.5. Esquema de los flujos relativos al sedimentador.

A partir de un balance de sólido y de líquido en el sedimentador se obtuvo las siguientes ecuaciones que muestran la relación entre varios parámetros, las cuales sirven para determinar el gasto de pulpa espesado y el gasto del líquido (agua) de reboso.

$$Q_f = \frac{Q_o \cdot C_o'}{C_f'} \quad (2.11)$$

$$Q_r = Q_o - Q_f \quad (2.12)$$

La concentración de sólido que contiene la pulpa se determinó a partir de la siguiente expresión, la cual se dedujo a partir de la ecuación 2.4.

$$C = \frac{\rho_s \cdot (\rho_l - \rho_{H_2O})}{(\rho_s - \rho_{H_2O})} \quad (2.13)$$

La densidad de la pulpa para distintos porcentaje de sólido se calculó por medio de la ecuación siguiente:

$$\rho_l = \frac{-\rho_{H_2O}}{\left[\frac{\%S}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \right) - 1} \right]} \quad (2.14)$$

A continuación se presenta la metodología de cálculo para determinar los parámetros del sedimentador según la metodología expuesta por Falcón (2002) para pulpas con no definición de interface A-B. Teniendo en cuenta los planteamientos antes mencionados, las ecuaciones básicas para determinar la fracción de sólidos en la superficie inicial y final para pulpas se expresan como:

Superficie inicial:

$$X_0 = \frac{C_0}{\rho_{s0}} \quad (2.15)$$

Superficie final:

$$X_f = \frac{C_f}{\rho_{sf}} \quad (2.16)$$

Donde: X_0 - Fracción de sólidos en la superficie inicial, adimensional; C_0 -Concentración de sólido inicial, adimensional; ρ_{s0} -Densidad del sólido inicial, adimensional; X_f - Fracción de sólidos en la superficie final, adimensional; C_f -Concentración de sólido final, adimensional; ρ_{sf} -Densidad del sólido final, adimensional.

Para determinar la relación sólido líquido inicial y final de la pulpa la ecuación queda explícita como:

Relación sólido líquido inicial:

$$R_0 = \frac{1-X_0}{X_0} \quad (2.17)$$

Relación sólido líquido final:

$$R_f = \frac{1-X_f}{X_f} \quad (2.18)$$

Donde:

R_0 - Relación sólido líquido inicial, adimensional; R_f : Relación sólido líquido final, adimensional.

Para determinar el cálculo de la velocidad de sedimentación para que no se rebosen partículas menores de $4\mu\text{m}$, se tuvo en cuenta el diámetro equivalente correspondiente a partículas menores de $4\mu\text{m}$ y un coeficiente de fricción que se muestran a continuación en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Factores de reboso.

Parámetro	Valor	Unidad de Medida
D_o	$4 \cdot 10^{-6}$	m
μ	$1 \cdot 10^{-3}$	Pa*s

Teniendo en cuenta los valores planteados anteriormente en la tabla 2.3 se determinó la velocidad de sedimentación utilizando fundamentalmente la expresión:

$$v_s = \frac{18 \cdot D_0^2 \cdot (\rho_{polvo} - \rho_{H_2O}) \cdot X_f}{g \cdot \mu} \quad (2.19)$$

Siendo: v_s -velocidad de sedimentación, m/s; D_0 -diámetro de las partículas (menores de 4 μ m), (m); ρ_{polvo} -densidad del polvo, kg/m³; ρ_{H_2O} -densidad del agua, kg/m³; g -aceleración de la gravedad, m/s²; μ - Coeficiente de fricción, Pa/s.

Para determinar el área del sedimentador se utiliza la expresión que se describe a continuación:

$$f = \frac{R_0 - R_f}{V_s \cdot k \cdot 24} \quad (2.20)$$

Donde: f - Área del sedimentador, m²; k - coeficiente que considera el área útil del sedimentador 0,7-0,8, adimensional.

En el desarrollo de este método para el cálculo del flujo de sólido seco, para llegar a determinar el área de flujo de la pulpa y el área del sólido seco se emplearon las siguientes ecuaciones:

Flujo de sólido seco:

$$m = C_0 \cdot Q_0 \quad (2.21)$$

Área de flujo de la pulpa:

$$A = m \cdot f \quad (2.22)$$

Área del sólido seco:

$$S = A \cdot 1,3 \quad (2.23)$$

Donde: Q_0 - Caudal de pulpa que entra en el sedimentador, m³/s; C_0 - Concentración de sólido inicial en la pulpa, kg/m³; m -flujo de sólido seco, t/h; A - Área de flujo de la pulpa, m²; S - Área del sólido seco, m².

El empleo de este método permitió determinar el diámetro óptimo del sedimentador el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (2.24)$$

Donde: d - diámetro del sedimentador, m

La relación sólido-líquido X puede obtenerse por:

$$X = x / (1 - x); \quad x = C' / \rho_s \quad Y \quad \rho_s = \rho \cdot \left[1 + C' \cdot \left(\frac{1}{\rho_{H_2O}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right]$$

Por lo que,

$$X = \frac{C'}{\rho_s = \rho \cdot \left[1 + C' \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right]} \quad (2.25)$$

$$(2.26)$$

$$V_d = \frac{Q_o \cdot Co}{\rho_{polvo}} \cdot (tf - tc) + \frac{Q_o \cdot Co}{\rho_{H2O} \cdot X}$$

La altura mínima de la zona de compresión se determinó según

$$H_D = \frac{V_D}{A} \quad (2.27)$$

Donde:

A- es la sección transversal determinada para el sedimentador y la altura total se determina como:

$$H = H_{Alim.} + H_{Cono} + H_{Almacen} + H_D \quad (2.28)$$

Donde:

$H_{Alimentación}$ – inmersión del tubo de alimentación (30 – 60 cm).

H_{Cono} – altura del cono de fondo (30 – 60 cm).

$H_{Almacén}$ – altura de la capacidad de almacenaje para hacer frente a interrupciones, irregularidades o utilizar el sedimentador como almacén de suspensión (30 – 60 cm).

❖ Elección de los mecanismos

Los requisitos de carga usualmente relacionan la demanda de torque con el par del motor que acciona el mecanismo de rastrillo.

La demanda de torque se determinó por la expresión:

$$M_T = K \cdot D^2 ; N \cdot m \quad (2.29)$$

Donde: K – coeficiente que se expresa en N/m.

D – diámetro del rastrillo, m.

Los valores de K se obtienen del libro "Plant Design of Mineral Dressing" AIME, 1983.

2.9. Determinación de las alturas necesarias y disponibles

En el cálculo del área de la tubería se tuvo en cuenta el diámetro nominal de la misma y se expresa por la expresión siguiente:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.30)$$

Una vez determinada el área se calculó la velocidad del fluido correspondiente al caudal suministrado. A continuación se muestra la expresión correspondiente para el cálculo de la velocidad, como resultado del despeje de la ecuación de continuidad.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.31)$$

Conociendo la velocidad de la corriente del fluido, el diámetro del tubo, la densidad del líquido y el coeficiente μ , se determinó el régimen de la corriente del líquido (Ecuación 2.40), lo que es muy importante para los cálculos hidráulicos.

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2.32)$$

❖ Cálculo hidráulico de las tuberías

Para la presentación de la fórmula que se utilizó en el cálculo se supone que una tubería simple de sección constante, situada a voluntad en el espacio (Figura 2.6), tiene una longitud total L y el diámetro d , y posee varias resistencias locales. En la sección inicial (1 – 1) se tiene la altura de nivel Z_1 y la presión excesiva P_1 y en la final (2 – 2), Z_2 y P_2 respectivamente. La velocidad en estas secciones es constante gracias a que el diámetro del tubo es invariable, e igual a v . Aplicando la ecuación de Bernoulli a las secciones 1 – 1 y 2 – 2; considerando que $\alpha_1 = \alpha_2$ y eliminado las alturas dinámicas, se tiene:

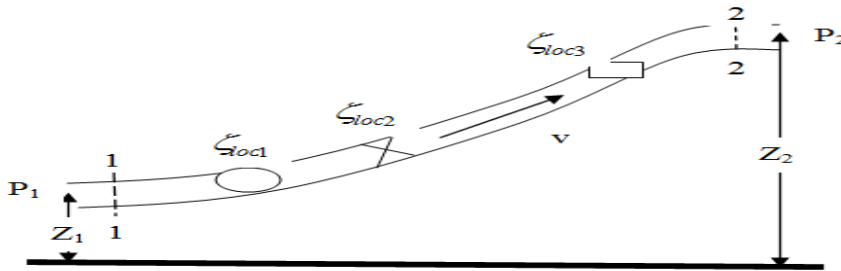


Figura 2.6. Esquema de una tubería simple.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\delta} = Z_2 + \frac{P_2}{\delta} + \sum h \quad (2.33)$$

O bien,

$$\frac{P_1}{\delta} = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2}{\delta} + \sum h = \Delta Z + \frac{P_2}{\delta} + \sum h. \quad (2.34)$$

La altura piezométrica que se encuentra en el miembro izquierdo de la ecuación se

denomina altura necesaria (H_{nec}). Si esta magnitud sea dada, se denomina altura disponible (H_{dip}). Como se ve en la ecuación, esta altura se forma de la altura geométrica ΔZ a la cual asciende el líquido en el proceso de su flujo por la tubería, de la altura piezométrica al final de la tubería, y de la suma de todas las pérdidas hidráulicas en la misma.

La suma de los dos primeros sumando $\Delta Z + \frac{P_2}{\rho}$ es la altura estática y se la puede representar como cierta altura geométrica equivalente a la elevación del líquido $\Delta Z'$, y el último sumando $\sum h$, como función de potencia del gasto, entonces:

$$H_{nec.} = \frac{P_1}{\rho} = \Delta Z' + \sum h = \Delta Z' + k \cdot Q^m . \quad (2.35)$$

Donde el coeficiente k y el índice m tienen diferentes valores en dependencia del régimen de la corriente.

Para el régimen laminar, al sustituir las resistencias locales por las longitudes equivalentes, se obtiene:

$$\sum h = \frac{128 \cdot (l + l_{eq.}) \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot d^4} \quad (2.36)$$

Por consiguiente

$$k = \frac{128 \cdot (l + l_{eq.})}{\pi \cdot g \cdot d^4} \text{ y } m = 1. \quad (2.37)$$

Para el régimen turbulento, se tiene:

$$\sum h = \left(\sum \zeta + \lambda_t \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (2.38)$$

Por consiguiente,

$$k = \left(\sum \zeta + \lambda_t \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \text{ y } m = 2. \quad (2.39)$$

Las fórmulas anteriores son la base para el cálculo de las tuberías simples. Al mismo tiempo esta fórmula permite trazar la curva de las alturas necesarias.

Cuando se examina el caso en el cual las velocidades son distintas en el comienzo y en el final de la tubería, la expresión de la altura necesaria para toda la tubería, a diferencia de la fórmula 2.35 debe contener la diferencia de las alturas dinámicas en el comienzo y el final de la tubería, o sea:

$$H_{nec.} = \frac{P_1}{\rho} = \Delta Z' + \sum h = \Delta Z' + C \cdot Q^2 + k \cdot Q^m \quad (2.40)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{\alpha_2}{S_2^2} - \frac{\alpha_1}{S_1^2} \right) \quad (2.41)$$

$$\Delta Z' = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2}{\rho} \quad (2.42)$$

En las expresiones anteriores S_1 y S_2 son las áreas de la sección transversal de la tubería al comienzo y al final respectivamente, α_1 y α_2 son los coeficientes que tienen en cuenta las irregularidades en la distribución de los perfiles de velocidad que se presentan en la misma al inicio y al final, respectivamente. El coeficiente de irregularidad de las velocidades adquiere el valor de 2 para régimen laminar y en el rango de 1,13 a 1,025 (ver figura 60 de Nekrasov, 1986) para régimen turbulento; para este último se puede adoptar $\alpha = 1$.

❖ Determinación del coeficiente de rozamiento

Existen varias fórmulas empíricas y semiempíricas que expresan la relación entre el coeficiente de rozamiento y el número de Reynolds para la corriente turbulenta en tubos lisos. En este trabajo se empleó la fórmula del científico ruso P. Konakov. Dicha ecuación tiene la forma siguiente:

$$\lambda_t = \frac{1}{(1,81 \cdot \log(Re) - 1,5)^2} \quad (2.43)$$

Y se usa desde $Re = Re_{crít.}$ hasta Re igual a varios millones.

❖ Determinación de los coeficiente de pérdidas locales

La cuestión consistió en determinar los coeficientes $\zeta_{loc.}$ para diferentes resistencias locales.

Las resistencias locales más sencillas se pueden dividir en los siguientes grupos y subgrupos:

1. Ensanchamiento del cauce: brusco y gradual.
2. Estrechamiento del cauce: brusco y gradual.
3. Cambio de dirección del cauce: brusco y gradual.

En el capítulo 8 del libro Nekrasov se determinaron los valores recomendados para los coeficientes de pérdidas locales.

2.10. Selección de la bomba

La potencia necesaria para transportar la pulpa estuvo dada por la deducción de la ecuación Darcy - Weisbach asumiendo el transporte de un fluido Newtoniano. Para cualquier fluido, la potencia necesaria en W, para su transporte por una tubería será.

$$N_e = H_{nec.} \cdot Q \cdot \rho_l \cdot g \quad (2.44)$$

Corrección de la curva característica de la bomba

Para calcular la característica de la bomba, puesto que el fluido de pulpa es distinto al utilizado para elaborar la curva característica, se puede emplear la expresión que se plantea a continuación:

$$H_{bc.}(Q) = H_b(Q) \cdot \left(1 - k \cdot \frac{\rho_l - \rho_{agua}}{\rho_l} \right)^{0.86} \quad (2.45)$$

Donde:

K – es el coeficiente que depende del tipo de bomba, se escoge entre 0,4 y 0,6.

2.10.1. Verificación de la cavitación

Cuando la columna del líquido está por encima del eje de la bomba solo se analiza este fenómeno en el caso que la altura del líquido sea igual o inferior a 0,5 m sobre el nivel del eje de la bomba, ya que otro nivel del tanque es favorable para las bombas (Hernández, 2009).

Para que la bomba no cavite se hizo observancia de la siguiente condición: $NSPH_{dis} > NSPH_{req.}$ Aquí, $NSPH_{dis.}$ es la altura de carga disponible en la succión de la bomba y $NSPH_{req}$ es la altura requerida en la entrada de la bomba; la altura disponible se determina por cálculo en función del régimen de operación de la bomba, la altura en la succión, la presión en el recipiente de donde se produce la succión, la tensión del vapor del líquido a la temperatura dada y la pérdida de carga por rozamiento y locales. Por otra parte la altura requerida se definió por la característica de la bomba, la cual se obtuvo en uno de los catálogos del fabricante de las mismas.

Para calcular la altura disponible en la succión de la bomba se empleó la siguiente expresión:

$$NPSH_{dis}(Q_r) = P_{atm} + H_{succ} - H_{eq.} - h_t - \Sigma h_{succ}(Q_r) \quad (2.46)$$

Donde:

P_{atm} – es la presión atmosférica en el tanque de donde se produce la succión.

$H_{succ.}$ – es la altura geométrica en la succión de la bomba, la cual se toma con signo negativo si el depósito está por debajo del eje de la bomba.

h_t – es la tensión del vapor saturado del líquido a la temperatura dada.

$\sum h$ – es la pérdida de altura en la succión, la cual se determina en función del régimen de flujo.

$H_{eq.}$ – es la pérdida de altura producto a la influencia de la rapidez de la bomba, se caracteriza por la velocidad específica de la bomba y se determina de la forma que se indica a continuación.

$$H_{eq.} = \left[10 \cdot \left(\frac{n \cdot \sqrt{Q}}{c} \right) \right]^{\frac{4}{3}} \quad (2.47)$$

Donde:

n – es el número de revoluciones por minuto del rotor, rev/min.

Q – es el gasto que ofrece la bomba, m³/s.

c – es un valor tabulado y se da en función del coeficiente de rapidez.

n_s – es el coeficiente de rapidez, el cual se determina como sigue.

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \left[\frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \right] \quad (2.48)$$

El valor de c se determinó en la siguiente tabla 2.4, en función del resultado que se obtuvo en el cálculo del coeficiente de rapidez.

Tabla 2.4. Valor de c y en función del coeficiente de rapidez.

n_s	Menor que 70	70 - 80	80 – 150	Mayor que 150
c	600	700	800	1200

2.11. Elaboración de los resultados

Para aumentar la representatividad de los resultados en la determinación de los parámetros de la pulpa se deben efectuar repeticiones de las mediciones. Los resultados que se obtienen se inspeccionan para asegurar su condición de normalidad, basado en criterio estadístico. Las expresiones matemáticas que se utilizan en el análisis son las que se refieren a continuación:

❖ Elaboración de los resultados

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectúa aplicando las expresiones matemáticas que se referencian a continuación, (Miller *et al.*, 2005).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.49)$$

$$LX, \text{máx} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.50)$$

$$LX, \text{mín} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.51)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.52)$$

Donde:

$\bar{X}$ – es la media aritmética de las mediciones realizadas del correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$LX, \text{máx}$ – es el límite superior de tolerancia para el correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

$LX, \text{mín}$ – es el límite inferior de tolerancia para el correspondiente parámetro, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

t - es el estadístico de la distribución probabilística de student.

S - es la desviación típica, se expresa en la misma unidad de medida del parámetro.

n - es el total de observaciones.

Las expresiones anteriores son válidas si la muestra es pequeña, esto es menor que 30. En caso contrario se debe cambiar el estadístico t por el estadístico Z de la distribución de Gauss.

En caso que existan valores anormales, los mismos se pueden eliminar procediendo como se indica a continuación, de acuerdo con Hernández (1986):

1. Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan $\bar{X}$ y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).
2. Se establece el intervalo dado por la ecuación $LT = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$ y se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido.

3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar como es lógico, los valores anormales.

❖ **Ajuste de curva por regresión**

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, el cual se basa en el ajuste de una curva al conjunto de puntos ordenados, tal que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller *et al.* 2005).

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el del coeficiente de determinación, de Student, y el de Fisher. Se consideró que el ajuste es significativo: según el criterio de Student, cuando se cumplió que p-Valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher crítico o tabulado y según el criterio del coeficiente de determinación, cuando el valor de este estuvo próximo a 1 ó -1.

En el Software Excel se utilizó la herramienta para análisis de datos que contiene programado la opción regresión. La instrucción regresión permitió realizar el ajuste de curva con el método de mínimo cuadrado y chequear los tres criterios de bondad del ajuste.

2.12. Análisis económico

Todo proyecto de inversión genera efectos o impactos de naturaleza diversa, directos, indirectos, externos e intangibles. Estos últimos rebasan con mucho las posibilidades de su medición monetaria y sin embargo no considerarlos resulta pernicioso por lo que representan en los estados de ánimo y definitiva satisfacción de la población beneficiaria o perjudicada.

En la valoración económica pueden existir elementos perceptibles por una comunidad como perjuicio o beneficio, pero que al momento de su ponderación en unidades monetarias, sea imposible o altamente difícil materializarlo. En la economía contemporánea se hacen intentos, por llegar a aproximarse a métodos de medición que aborden los elementos cualitativos, pero siempre supeditados a una apreciación subjetiva de la realidad.

No contemplar lo subjetivo o intangible presente en determinados impactos de una inversión puede alejar de la práctica la mejor recomendación para decidir, por lo que es conveniente intentar alguna metódica que inserte lo cualitativo en lo cuantitativo.

2.12.1. Costo de la inversión

El objetivo de este análisis consistió en determinar el desembolso de efectivo (costo de la inversión) que se debe hacer para lograr el establecimiento del sistema de sedimentación propuesto. Esto constituye un punto de partida importante para evaluar la factibilidad económica de la inversión.

Costo de la inversión

$$I = I_{inv} + I_{const} + I_{Tran} + I_{Mont} \quad (2.53)$$

Donde:

I_{inv} – es el valor de la investigación.

I_{const} – es el gasto de la adquisición.

I_{Tran} – es el gasto de transportación.

I_{Mont} – es el gasto por concepto de montaje.

Luego de tener dicho resultado, se debe realizar una estimación de los flujos de efectivos generados a partir de la explotación del sistema para poder aplicar las técnicas de evaluación financiera de inversiones, tales como: período de recuperación (PR), período de recuperación descontado (PRD), valor actual neto (VAN), tasa interna de rentabilidad (TIR) y tasa interna de rentabilidad modificada (TIRM).

2.13. Conclusiones de capítulo 2

- ❖ Se expresaron las expresiones matemáticas y procedimientos que permitieron la caracterización de las propiedades físicas y reológicas de la pulpa objeto de estudio y se plantearon las características de los medios e instrumentos utilizados; es decir, se indicó con qué y cómo efectuar la determinación de la granulometría, la densidad del sólido y de la pulpa, el % de sólido, la velocidad de sedimentación y la reología del fluido.
- ❖ Se plantearon las expresiones matemáticas que permitieron la determinación de la altura necesaria para el transporte por tubería de un fluido Newtoniano, la selección de una bomba y un sedimentador continuo, así como los elementos referidos a la estimación del costo de la inversión necesario para lograr la materialización de lo proyectado.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

El estudio de las propiedades físicas y reológicas del residual generado en la planta de beneficio de carbón ubicada en la EPM es de importancia en la caracterización del material objeto de estudio para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tubería y para la evaluación de la posibilidad de reutilizar el agua que posee, lo que incluye la realización de muestreo con vista al aseguramiento de la representatividad y objetividad en los resultados, el análisis de la granulometría, de la densidad del polvo y de la pulpa, el cálculo del porcentaje de sólido, la obtención de la velocidad de sedimentación y del comportamiento reológico.

Los estudios experimentales de las propiedades de transporte de pulpas, posibilitan una mejor selección de modelos para la adecuación de los métodos de cálculo. El método de correlación, aplicado en parte de los resultados del trabajo, tiene una aplicabilidad universal para conjuntos de datos de toda clase en procesos físicos. Sin embargo, su precisión es adecuada si se utilizan dentro del intervalo de aplicación en el cual fueron desarrolladas.

Relacionado con este planteamiento, se propone como **objetivo del capítulo**:

Realizar un análisis de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los procedimientos y expresiones que se plantearon en el capítulo anterior, con vista a sustentar el conocimiento adquirido sobre las propiedades físicas y reológicas de la pulpa objeto de estudio y la propuesta para un sistema de sedimentación.

3.2. Análisis de la determinación de la granulometría

Se realizan tres repeticiones del experimento para determinar la tendencia en el comportamiento de la variable del diámetro de las partículas en la muestra analizada. Los resultados promedios obtenidos se muestran en la tabla 2 del Anexo 8. Luego se verificó la normalidad de las observaciones, lo que implicó el utilizar las ecuaciones 2.49 a la 2.52. Se indica que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, para un nivel de confianza del 95 %.

La Figura 3.1 muestra la curva de característica sumarias de la pulpa analizada con el analizador de partículas.

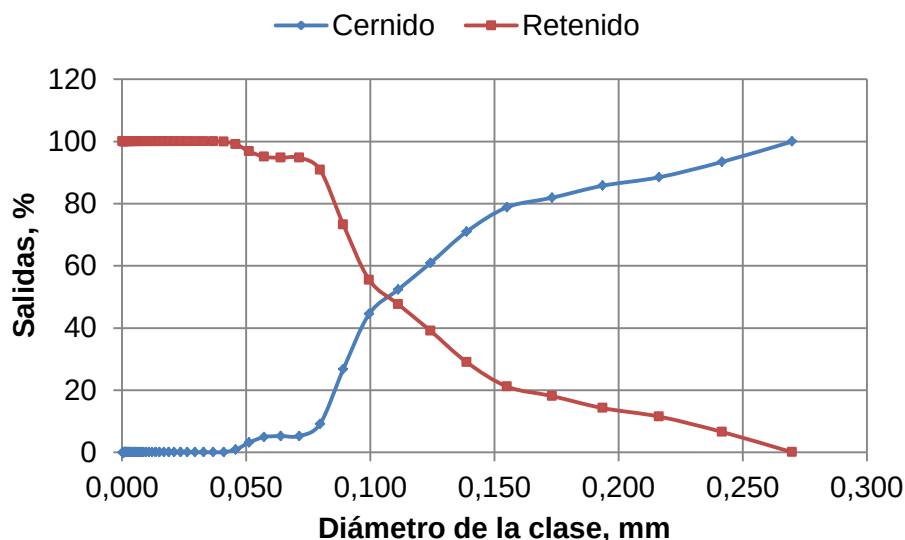


Figura 3.1. Curva de característica sumarias de la pulpa analizada, con el analizador de partículas.

Basado en el criterio del tamaño de partículas la pulpa da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas de hidromezclas dispersas gruesa (Turro 2002). La determinación de la composición granulométrica para la pulpa objeto de estudio presenta una granulometría de 0,15 mm de diámetro de la clase en el 80 % cernido.

3.3. Análisis de la determinación de la densidad del carbón, de la pulpa y del % de sólido

Densidad del polvo

La densidad del sólido se determinó aplicando el procedimiento del picnómetro descrito anteriormente, lo que implicó el utilizar las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. Los resultados obtenidos indican que el proceso de medición se realiza bajo control estadístico, puesto que al replicar el experimento no se mostró diferencias significativas entre los valores para un nivel de confianza del 95 %. Se indica que existe una probabilidad de que si se realizan las mediciones de la densidad del polvo bajo condiciones similares a las que existieron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,004 a 1,065 g/cm³, con valor para la media aritmética normal de 1,026 g/cm³.

Densidad de la pulpa

Los valores de la densidad se obtuvieron al aplicar el procedimiento correspondiente y utilizando la ecuación 2.5. El resultado obtenido indica que el proceso de medición

también se realizó bajo control estadístico. Lo que permitió plantear que la densidad de la pulpa es de $0,983\ 97\ \text{g/cm}^3$, con una probabilidad de ocurrencia del 95 %.

Determinación del % de sólido

La tabla 3.1 muestra el valor obtenido del porcentaje de sólido que contiene la pulpa residual correspondiente a la muestra 1. El cálculo se realizó aplicando la ecuación 2.1 hasta la 2.5. (En el Anexo 9 y 10 se muestran las tablas complementarias).

Tabla 3.1. Resultados del porcentaje de sólido.

Parámetros	Valor	Unidad de Medida
Densidad del polvo	1026,0	kg/m^3
Densidad del agua	982,58	kg/m^3
Densidad de la pulpa	983,97	kg/m^3
S	3	%

3.4. Determinación de la velocidad de sedimentación de la pulpa

El residual objeto de estudio después del análisis realizado anteriormente resultó ser una pulpa de baja concentración de sólido de color negro. Es importante señalar que se apreciaba que el sólido sedimentaba con cierta lentitud, aunque parte del material de mayor granulometría lo hacía en el instante, manteniéndose un sobrenadante turbio en la muestra, donde en algunas muestras se pudo apreciar una mancha oleosa en la superficie superior.

En la tabla 7 del Anexo 11 se muestra los resultados obtenidos de las pruebas para determinar la velocidad de sedimentación de la pulpa objeto de estudio, considerando lo que se planteó en el capítulo anterior. Se efectúan tres mediciones de la altura de la interface en cada tiempo considerado; se decide en el intervalo de 0 a 14 minutos efectuar las observaciones cada 1 minuto respectivamente. Se determina el valor promedio de las alturas y se calcula el rango de normalidad para cada experimento desarrollado, para lo cual se utilizan desde la ecuación 2.49 a la 2.52, todo lo cual estuvo bajo control estadístico, al no mostrarse diferencias significativas entre los resultados obtenidos. Esto reseña que existe una probabilidad del 95 % que si se llevan a cabo las mediciones de la altura de la interface del proceso de sedimentación en situación similar a la que estuvo presente en este ensayo el resultado se obtenga en los rangos de normalidad establecidos.

La curva de sedimentación de la pulpa se muestra a continuación en la Figura 3.2, la

cual se elaboró a partir de los datos contenidos en tabla 8 del Anexo 11, utilizando el software Excel. La ilustración permite visualizar el comportamiento de la altura de la interface generada en el proceso de sedimentación de la pulpa.

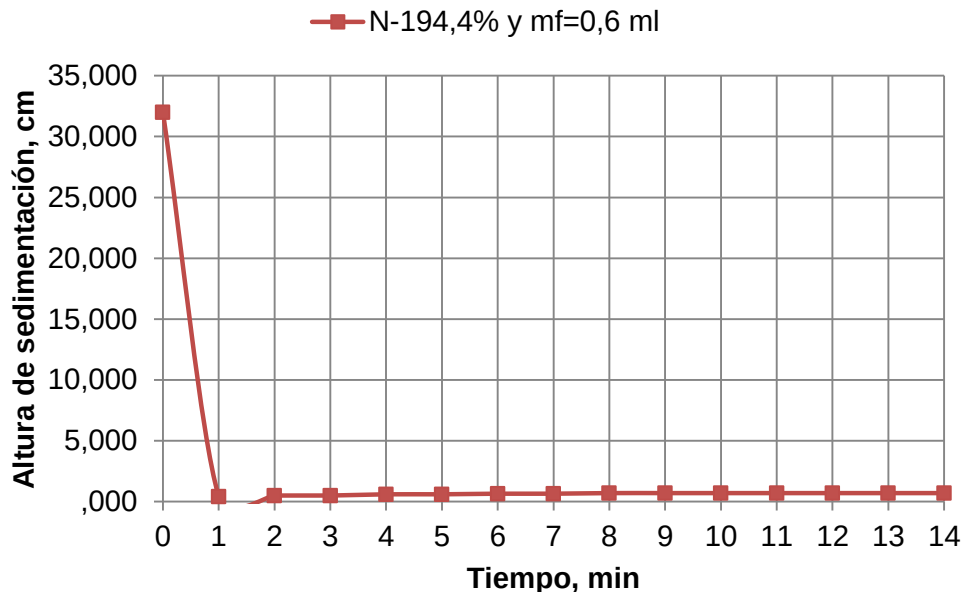


Figura 3.2. Curva de sedimentación de la pulpa.

El comportamiento de la altura de la interface refleja las tres fases por las que transita el proceso de sedimentación, la fase de sedimentación libre que se manifiesta durante el primer minuto (0,60 s) de iniciado el proceso, la fase de sedimentación contrariada que se extiende desde 2 minutos hasta 8 minutos de iniciado el proceso y la fase compresiva que se estudia en el tiempo que media desde 9 hasta 14 minutos de efectuado el proceso.

La velocidad de sedimentación de la pulpa objeto de estudio puede ser determinada a partir del ajuste de la curva de altura de la interface contra el tiempo con un modelo lineal (una recta). La primera derivada del modelo lineal obtenido será la velocidad de sedimentación.

Los resultados del cálculo realizado para el ajuste indican que la representación de la curva de la Figura 3.2 por un modelo lineal es significativa si se considera el criterio de Student y el de Fisher, pero la correlación puede ser mejorada ya que difiere considerablemente de la unidad. El criterio de Student refiere una probabilidad inferior a 0,05 para la intersección ($4,98E-02$) y para la variable ($1,15E-01$), el de Fisher un valor

de cálculo (2,85) mayor que el Ficher crítico (1,15E-01) y el coeficiente de correlación de 0,42. Sobre la base de los cálculos realizados se obtiene el siguiente modelo.

$$Z = 8,09 + (-0,77 * t) \quad (3.1)$$

Donde:

t – Es el tiempo que se considera después de iniciado el proceso, h.

Z – Es la altura de la interface, cm.

Aplicando el criterio de la primera derivada a la ecuación 3.1 se obtiene la velocidad de sedimentación que caracteriza la pulpa objeto de estudio. La velocidad de sedimentación según lo planteado anteriormente es de -0,77 cm/h.

❖ **Determinación de la velocidad de sedimentación de caída libre**

El cálculo realizado para el ajuste, indica que la sección de la curva de la Figura 3.2 correspondiente a la etapa de sedimentación libre puede ser representada por un modelo lineal significativamente, considerando el criterio de Student, el de Ficher y el del coeficiente. El criterio de Student indica una probabilidad menor a 0,05 para la intersección (1,43E-14) y en cuanto a la variable (6,02E-14), el de Ficher un valor de cálculo (9,99E+06) superior a el Ficher crítico (6,02E-14) y el coeficiente de correlación de 0,99. Los cálculos efectuados permiten el alcance del siguiente modelo perteneciente a la fase de caída libre.

$$Z = 32 + (-31,60 * t) \quad (3.2)$$

Donde:

t – Es el tiempo que se considera después de iniciado el proceso, h.

Z – Es la altura de la interface, cm.

El criterio de la primera derivada aplicado a la ecuación 3.2 permite obtener la velocidad de sedimentación que caracteriza a la pulpa objeto de estudio en la fase libre. La velocidad de sedimentación según lo planteado anteriormente es de -31,60 cm/h.

❖ **Determinación de la velocidad de sedimentación contrariada**

El criterio de Student, el de Ficher y el del coeficiente de correlación indican que el ajuste a la sección de la curva de la Figura 3.2 que corresponde a la etapa de sedimentación contrariada puede ser representado significativamente por un modelo

lineal. El criterio de Student refiere en reiterada ocasión una probabilidad inferior a 0,05 para la interacción ($2,31\text{E}-06$) y en relación a la variable ($1,30\text{E}-04$), el de Fisher un valor de cálculo ($7,51\text{E}+01$) mayor que el Fisher crítico ($1,30\text{E}-04$) y el coeficiente de correlación de 0,96, obteniéndose el siguiente modelo matemático.

$$Z = 0,039 \cdot t + 0,398 \quad (3.3)$$

Donde:

t – Es la altura de la interface, h.

Z – Es la altura de la interface, cm.

Aplicando el criterio de la primera derivada a la ecuación 3.5 se obtiene la velocidad de sedimentación que caracteriza a la pulpa objeto de estudio en la fase contrariada. La velocidad de sedimentación según lo referido anteriormente es de 0,039 cm/h.

- **Verificación de la sedimentación durante el transporte**

En la tabla 9 del Anexo 11 se muestran los resultados de la determinación de la velocidad de transporte de la pulpa, la velocidad de sedimentación en fase de caída libre y en la de caída contrariada. Los valores indicados se determinaron en correspondencia con las expresiones 2.9 y 2.10.

La velocidad crítica calculada según la ecuación 2.9, adecuada para el funcionamiento normal es de $2,09\text{E}-02$ m/s muy inferior a la que se transportará la pulpa por lo que existe garantía de que no haya sedimentación en la tubería inferior durante el transporte de la pulpa objeto de estudio, desde la criba hasta la piscina de descarga ya que la velocidad media del flujo es de 0,40 m/s. Se considera válido indicar que para el cálculo de la velocidad crítica de transportación se escogió un valor de K_d igual a 0,15, extrapolando a partir de los valores contenidos en la tabla 2.2, ya que el alcance de lo referido en la tabla está limitado.

3.5. Determinación del comportamiento reológico de la pulpa

Para las suspensiones de bajo contenido de sólidos con una fracción volumen Φ_s de sólidos menor del 10 %, casi siempre es posible llevar a cabo los cálculos considerando un comportamiento newtoniano y es determinada por ecuaciones empíricas (Aguar 1975).

La tabla 10 del Anexo 12 presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para determinar el comportamiento reológico de la pulpa objeto de estudio

considerando el método descrito en el capítulo anterior. En donde se tuvo en cuenta el viscosímetro programable brookfield DV-II + Pro, para el cálculo de la media representativa se tuvo en cuenta el resultado brindado por el equipo para determinar la viscosidad de la pulpa para un nivel de significancia de un 95%, empleando las ecuaciones de verificación de normalidad 2.49 a 2.52, descritas en el capítulo anterior teniendo en cuenta un grado de libertad de 23.

La curva de flujo de la pulpa pronosticada se muestra a continuación en la Figura 3.3, la cual se elabora a partir del ploteo de los datos contenidos en la tabla 11 del Anexo 12, utilizando el software Excel. La gráfica permite visualizar el comportamiento del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

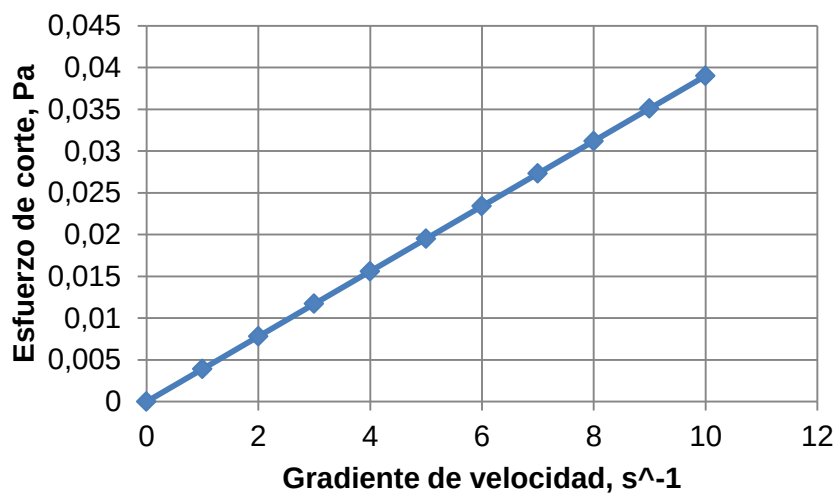


Figura 3.3. Curva de flujo de la pulpa.

En la Figura 3.3 se aprecia el esfuerzo de corte de la pulpa objeto de estudio en correspondencia de diferentes valores de gradientes de velocidad donde puede ser determinada a partir del ajuste a la curva con un modelo lineal (una recta). Mediante los resultados del cálculo realizado para la muestra, indican que la representación de la curva de flujo tiene un comportamiento Newtoniano.

Tabla 3.2. Modelo reológico de la pulpa.

Ec. 3.4	Modelo general para fluido newtoniano	$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$
Ec. 3.5	Modelo particular para la pulpa	$\tau_{x,y} = 0,00387 \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$

Donde: $\tau_{x,y}$ – es el esfuerzo de corte, en Pa y $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ – es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Por lo tanto se indica que la pulpa objeto de estudio muestra un comportamiento reológico Newtoniano, ya que puede ser representada la curva de flujo de esta por un modelo lineal, significativamente. El coeficiente de viscosidad dinámico según lo planteado anteriormente es entonces de 0,003 87 Pa*s.

3.6. Resultados del pH y conductividad de la pulpa

La tabla 3.3 refiere la caracterización realizada a la muestra de pulpa sobre la base de la determinación del pH y la conductividad.

Tabla 3.3. Caracterización de la muestra.

Parámetro	Valor	Unidad de Medida
pH	7,70	-
Conductividad	215	$\mu S/cm$

La tabla anterior muestra la caracterización de la pulpa objeto de estudio en esta investigación la cual presenta un pH de 7, 70, y una conductividad de 215 $\mu S/cm$. A todo lo largo del monitoreo presentando pH cercanos al neutro, donde se puede inferir que no existe corrientes contaminantes ácidas o básicas en el residual objeto de estudio. De igual manera, se aprecian valores de conductividad relativamente bajos, asociada principalmente a la composición acuosa de sales disueltas de Magnesio y Silicio.

3.7. Selección del sedimentador

La tabla 3.4 muestra las especificaciones técnicas que se determinaron para la selección del sedimentador de acción continua, atendiendo a los requisitos operacionales del flujo tecnológico de la planta de beneficio de carbón ubicada en EPM. Los parámetros mostrados en la tabla siguiente se determinaron utilizando las expresiones 2.11 a 2.14

Tabla 3.4. Datos iniciales.

	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Porcentaje de Sólido
Concentración de pulpa	(C ₀)	39,00	g/l(kg/m ³)	3 %
Gasto de agua de reboso	(Q)	55	m ³ /h	
Gasto de agua inicial	(Q ₀)	70	m ³ /h	
Densidad del polvo	ρ _{polvo}	1026	kg/m ³	
Densidad del agua	ρ _{agua}	1000	kg/m ³	
Altura inicial	Z ₀	32	cm	
Concentración final de pulpa	(C _f)	258	g/l(kg/m ³)	26 %
Gasto de lodo espesado	(Q _f)	9,81	m ³ /h	

La determinación de los parámetros del sedimentador se efectúa aplicando de las ecuaciones 2.15 hasta la 2.29 descritas en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12 del Anexo 12.

En la definición de la altura total del sedimentador se precisa para la altura de inmersión del tubo de alimentación; la altura del cono de fondo y la altura de la capacidad de almacenaje para hacer frente a interrupciones, a irregularidades o utilizar el sedimentador como almacén de suspensión 60 cm en cada una y al coeficiente *K* se le asigna el valor de 75 N/m puesto que se considera un régimen de carga estándar; el cual se obtiene del libro "Plant Design of Mineral Dressing" AIME (1983).

A partir de las especificaciones técnicas planteadas, se proponen los sedimentadores referenciados en la tabla 3.5 que se ajustan a las características técnicas de explotación teniendo en cuenta el flujo tecnológico en la instalación objeto de estudio.

Tabla 3.5. Especificaciones técnicas del sedimentador propuesto.

Parámetros	Sedimentador 1	Sedimentador 2
Diámetro de la sección transversal	4,437m	5,740
Altura total	8,2m	6,100 m
Torque	972 N*m	1000 N*m

El sedimentador 1 se fabricaría en el Empresa Mecánica del Níquel, mientras que el 2 es un sedimentador de placas inclinadas Modelo LTS– Marca IPS, de la compañía **Metso Corporation**, que se compraría en Brasil mediante la Sucursal

Metso Brasil Indústria e Comércio Ltda ubicada en Sorocaba-SP-Brasil. La ilustración de un ejemplar del sedimentador propuesto se muestra en el Anexo 13. El modelo LTS combina un depósito de sedimentos circular y un mecanismo de cuñas con la capacidad de clarificación del sistema de placas laminares LT en una sola unidad compacta. Las cuñas, junto con el tamaño ampliado del depósito de sedimentos, ofrecen:

- Mayor capacidad de espesamiento de los sedimentos.
- Evacuación positiva de los sedimentos.
- Mayor capacidad de almacenamiento y desborde de los sedimentos.

Ventajas

1. Estructura de alta resistencia del depósito, la tolva de sedimentos y los conjuntos de placas laminares, así como del sistema de cuñas. Mecanismo opcional de elevación de cuñas.
2. Posición de las ranuras de alimentación especialmente diseñada para la relación óptima entre las superficies de clarificación y espesamiento.
3. Amplios espacios entre las placas laminares para el tratamiento de pulpa de alta densidad y partículas sólidas gruesas.
4. Sin cortocircuitos ni turbulencias en la superficie. Floculador integrado con agitador de velocidad variable.

Para considerar un menor coste de instalación la compañía entrega la pieza en secciones prefabricadas en base más pequeña, la cual ocupa menos espacio en el suelo y presenta un perfil cuadrado para mayor facilidad de planificación y construcción. La flexibilidad para cambios o ampliaciones en las plantas de operación, se puede instalar en cualquier sistema, es fácil de trasladar para su adaptación a los cambios en los procesos para la instalación simplificada dentro de la planta, menor recorrido de las tuberías e instalación a nivel elevado para la alimentación por gravedad de los procesos inferiores para garantizar una supervisión más sencilla. Posee menor superficie y volumen interno, donde presenta fácil aislamiento contra la pérdida de calor y la emisión de vapores tóxicos que permite la reducción de las pérdidas por evaporación. Su estructura sencilla con acero laminado y perfiles estándar que permite incorporar materiales y revestimientos especiales para su mantenimiento.

3.8. Determinación de las alturas necesarias y disponibles

Tramo 1: Criba- Sedimentador

La Figura 8 del Anexo 14 muestra el esquema de instalación que trasiega la pulpa generada en la planta de beneficio de estudio, desde la criba hasta el sedimentador propuesto. Como se puede observar en la figura se indica con un número cada uno de los componentes que constituyen a la instalación y las cotas de dimensiones fundamentales.

La tabla 13 del Anexo 14 refiere los datos de la instalación que sirven de base al cálculo de los parámetros de transporte. La cantidad de cada uno de los elementos se puede apreciar al realizar una inspección visual del esquema de la instalación mostrada en la figura 8 Anexo 14. Las dimensiones de los parámetros fueron definidas sobre la base de consideraciones objetivas del contexto ambiental de la planta. Los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los accesorios se escogieron a partir de la información referenciada en Nekrasov (1986), Martínez y Laurencio (2004).

En la tabla 3.6 se muestra los resultados del cálculo realizado para efectuar el análisis del tramo 1, los cuales se obtienen a partir de la aplicación del procedimiento descrito en el capítulo anterior. En la misma se muestra las referencias de las ecuaciones utilizadas, los parámetros involucrados, los valores numéricos determinados y las unidades de medidas en que se expresa cada parámetro.

Tabla 3.6. Resultados del cálculo para la selección de la bomba.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de medida
2.30	A	$7,854 \cdot 10^{-3}$	m^2
2.31	v	2,229	m/s
2.32	Re	$5,94 \cdot 10^4$	-
2.43	λ	0,02	-
-	$\Sigma \zeta$	5,8	-
2.39	k	$9,555 \cdot 10^3$	s^2/m^5
2.38	Σh	3,12	m

Los resultados mostrados en la tabla anterior muestran el cálculo realizado para la tubería que posee un área de $7,854 \cdot 10^{-3} m^2$, una velocidad de 2,229 m/s, un Reynolds de $5,94 \cdot 10^4$, por lo que el régimen de flujo es turbulento. El factor de fricción es de 0,02,

la suma de los coeficientes de pérdidas locales en la tubería tienen un valor de 5,8, el coeficiente k toma un valor de $9,555 \cdot 10^3 \text{ s}^2/\text{m}^5$, lo que permitió definir la altura de 3,12 m. Por lo que se puede inferir que no es necesario utilizar una bomba en este tramo puesto que el fluido caería por gravedad debido a que el valor de las pérdidas es menor que la altura de la instalación objeto de estudio.

Tramo 2: Sedimentador – criba

El esquema de instalación que trasiega el agua de reboso generada en el sedimentador propuesto se muestra en la Figura 9 del Anexo 15. En la misma se observa la indicación de cada uno de los componentes que forma al tramo y las cotas de dimensiones fundamentales.

En la tabla 14 del Anexo 15 se muestran los datos vinculados al tramo objeto de análisis, que sirven de base al cálculo de los parámetros de transporte. La cuantía de cada uno de los elementos se puede apreciar al realizar una observación del esquema de la instalación presentada en la Figura 9 del Anexo 15. Las dimensiones de los parámetros y los valores de los coeficientes de pérdidas locales fueron definidas de forma en tabla 14 del Anexo 15 para proceder al cálculo del tramo dado.

En la tabla 3.7 se muestra los resultados del cálculo realizado para efectuar el análisis de la selección de la bomba en el tramo dado, los cuales se obtienen a partir de la aplicación del procedimiento descrito en el capítulo anterior. En la misma se muestra las referencias de las ecuaciones utilizadas, los parámetros involucrados, los valores numéricos determinados y las unidades de medidas en que se expresa cada parámetro.

Tabla 3.7. Resultados del cálculo para la selección de la bomba.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de Medida
2.30	A	$7,854 \cdot 10^{-3}$	m^2
2.31	v	1,945	m/s
2.32	Re	$1,945 \cdot 10^5$	-
2.43	λ	0,016	-
-	$\Sigma \zeta$	5,8	-
2.39	k	$8,518 \cdot 10^3$	s^2/m^5
2.35	H_{nec}	7,988	m
2.44	N_{nec}	$1,197 \cdot 10^3$	W

Los resultados mostrados en la tabla anterior demuestran el cálculo de selección de la bomba para la tubería que posee un área de $7,854 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, una velocidad de 1,945 m/s, un Reynolds de $1,945 \cdot 10^5$ en donde la bomba trabajará en un régimen turbulento. El factor de fricción es de 0,016, la suma de las pérdidas locales en la tubería tienen un valor de 5,8, el coeficiente k toma un valor de $8,518 \cdot 10^3 \text{ s}^2/\text{m}^5$, lo que permitió definir la altura y la potencia necesaria, que toman el valor de 7,988 m y $1,197 \cdot 10^3 \text{ W}$ respectivamente.

3.9. Selección de la bomba

El cálculo de la potencia necesaria para efectuar el flujo de agua desde el sedimentador hasta la criba se efectúa considerando la ecuación 2.44. Para el gasto de $55 \text{ m}^3/\text{h}$, la altura necesaria de 7,988 m y un peso específico de $10\,000 \text{ N/m}^3$, se obtiene que la potencia necesaria sea de $1,197 \cdot 10^3 \text{ W}$.

Sobre la base de la potencia, el gasto y la altura de carga definida para la instalación, se procede a la selección de una bomba que sea capaz de suplir la demanda del flujo en el proceso. Los parámetros que debe cumplir por condiciones de diseño la bomba propuesta para la explotación en la instalación objeto de estudio. La cual debe tener una potencia de $2\,000 \text{ W}$, una eficiencia de un 68 % y un debe utilizar un motor con potencia de $2\,173 \text{ W}$ y una eficiencia de un 85 %.

Se determina que el punto de operación de la instalación se encuentra en la coordenada correspondiente a un gasto de $55 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,0152 \text{ m}^3/\text{s}$) y una altura de 7,988 m. En el análisis de la curva característica de la bomba en función de la curva de la red para la evaluación del tramo de la instalación, se realizó el cálculo en el tramo de la bomba hasta la criba y, de esta forma se pudo realizar un análisis de la curva de la bomba en función de la curva de la red, en mediación de los distintos caudales para tomar distintos valores de altura. Una vez que se obtienen estos resultados, se puede representar la curva de la bomba en función de la curva de la red, la cual queda ilustrada en la Figura 3.4. que se muestran a continuación. En la tabla 15 del anexo 18 se muestra los resultados obtenidos en el tramo desde la bomba hasta la criba en mediación de los distintos caudales para tomar distintos valores de altura.

❖ Variación de la característica de la bomba

En la Figura 3.4 se muestra que en la planta de beneficio de la EPM, existe un gasto volumétrico de $0,0152 \text{ m}^3/\text{s}$ con una altura de presión de $7,988 \text{ m}$, teniendo en cuenta la explotación de una sola bomba, donde se pudo escoger una bomba de modelo 8020. En la tabla 16 del Anexo 18 se muestran los parámetros técnicos de la bomba propuesta.

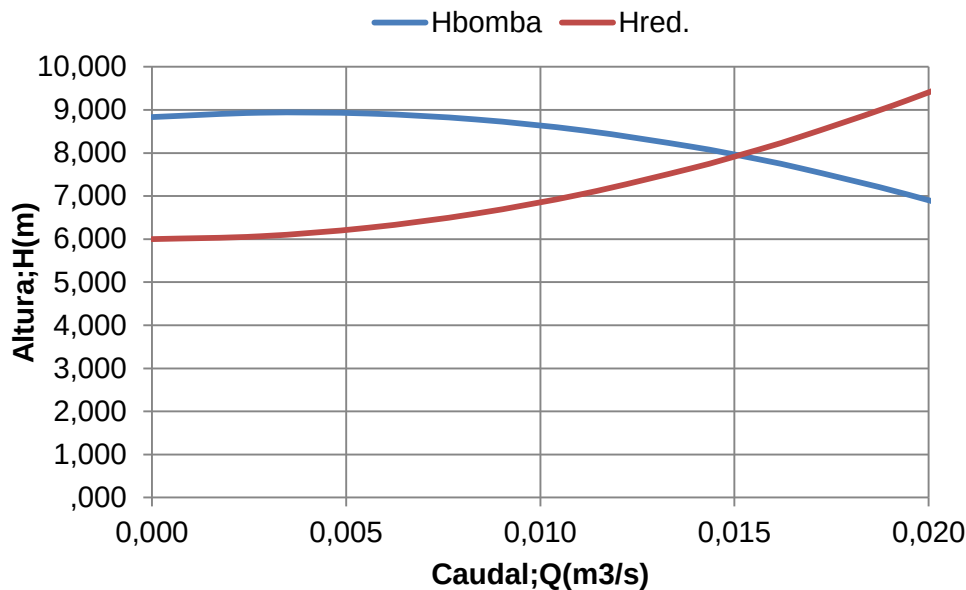


Figura 3.4. Curva característica de la bomba en función de la curva de la red.

❖ Verificación de la cavitación

La tabla 17 del Anexo 18 muestra los resultados del cálculo realizado para verificar la condición referida al fenómeno de la cavitación. El cálculo se efectúa considerando las ecuaciones 2.46 a la 2.48.

Se puede inferir a partir del resultado que en la instalación no se debe presentar el fenómeno de la cavitación, puesto que el valor de la altura requerida es mucho menor que el de la altura admisible.

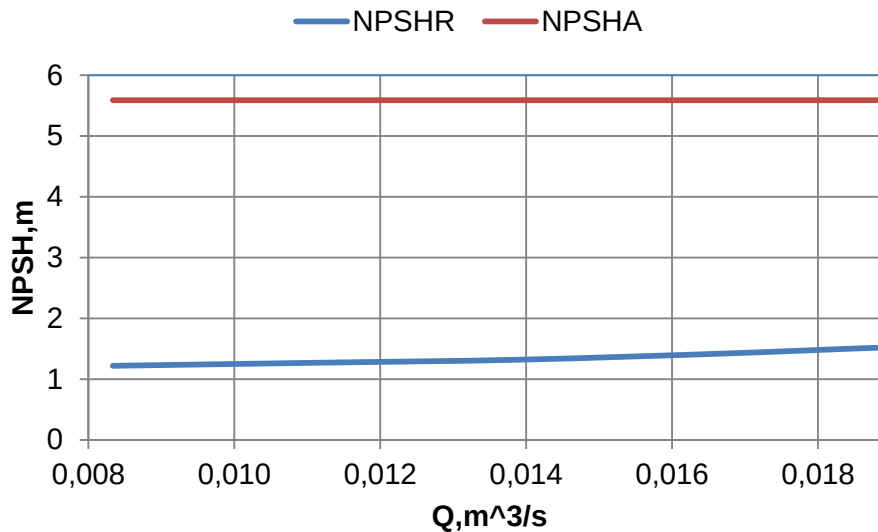


Figura 3.5. Comportamiento de la altura requerida y admisible con respecto al caudal.

La figura anterior muestra el resultado del cálculo referido al fenómeno de cavitación, en donde se pudo llegar a la conclusión que la bomba no cavita, porque en el punto de operación ($Q=0,015 \text{ m}^3/\text{s}$), la altura requerida en la succión es menor que la altura admisible. La misma toma un valor de 5,59 m.

3.10. Valoración económica

El contenido profesional del ingeniero lo constituye la solución de problemas ingenieriles. La esencia de la tarea o del problema ingenieril es el cambio o transformación de una situación o estado, o de la forma y el contenido a otro. En cualquier caso, para que haya problema ingenieril es imprescindible que existan múltiples variantes, las cuales no son igualmente ventajosas o evidentes, es decir, es necesario que exista más de una solución posible y que estas no sean evidentes. Al mismo tiempo, debe ser no sólo técnicamente correcta, sino económicamente racional y segura desde el punto de vista de la protección del individuo contra daños que limiten la integridad física, la salud, o provoquen accidentes fatales y por extensión del medio que le rodea. Queda claro que además de los conocimientos técnicos, el ingeniero no puede prescindir de los conocimientos económicos que hacen de sus soluciones, la solución de un problema.

3.10.1. Valoración económica de la inversión

En este trabajo se expone una metodología para elaborar la propuesta de un sistema de sedimentación para la Unidad Empresarial de Base ubicada en la EPM. Se plantea una valoración de los resultados obtenidos, poniendo de manifiesto la importancia de estos tanto en el plano conceptual como práctico y se propondrá la utilización de la metodología en la elaboración de propuestas para otras instalaciones similares.

Sobre la base de la ecuación 2.53 se efectúa el análisis económico del costo en el que se incurre por concepto de la instalación propuesta. En la tabla 3.8 se muestra el resultado de la evaluación del modelo para estimación del costo de la inversión.

Tabla 3.8. Costo de la inversión para el sedimentador importado desde el extranjero.

Parámetros	Valor, CUC	Proveedor
Valor de la investigación (I_{inv})		
Pruebas realizadas:		
Ensayos granulométricos	22,5	ECG
Ensayos de densidad del polvo	582,49	ISMM
Ensayos de densidad de la pulpa	552,44	ISMM
Ensayos de velocidad de sedimentación	554,05	ISMM
Ensayo reológico	112,65	CEDINIC
Costo de floculante	1056,46	QUMIZUK S.A
1.Gasto de la adquisición (I_{Const})	65 000	Metso Corporation
2.Gasto de transportación (I_{Trans})	2 000	FLETE MARÍTIMO
3.Gasto de transportación (I_{Transp})	1 257	SERVICAR
4.Gasto por concepto de montaje (I_{Mont})	8 538,91	SOMED
Costo total de la inversión (I)	79 676,4	

En la tabla anterior se muestra el valor de la investigación; que está dado por el costo generado para realizar los ensayos para la determinación de las propiedades de la pulpa y el costo de adquisición del floculante que requiere la instalación por mes para trabajar continuamente 8 horas diarias; el cual se determinó sobre la base de la ecuación 2.6. El gasto de adquisición se refiere al costo por la compra de equipamiento y accesorio para la instalación propuesta. El gasto de transportación está referido al desembolso de efectivo que se debe hacer para lograr el traslado de todos los equipos, accesorios y materiales necesarios para el establecimiento de la instalación y por último el gasto por concepto de montaje incluye lo referente al monto de la inversión para

crear las condiciones y establecer el proceso.

El establecimiento de las cifras referidas a los ensayos realizados para determinar las propiedades de la pulpa se efectuó sobre la base de los precios otorgados por el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINIQ) que realizan dichos trabajos. La estimación de los costos adquisición del tanque de sedimentación parte de la metodología del cálculo de costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que se utiliza como Norma empresarial, para calcular las fichas de costo, amparado por la resolución conjunta No. 1/2005. El gasto en flete marítimo, transportación y el de montaje está dado por el precio acordado con SERVICAR y SOMED, respectivamente.

Se debe señalar que lo expuesto anteriormente se hace a manera de mostrar una referencia sobre la implicación económica ocasionada por el establecimiento del sistema de sedimentación propuesto. La valoración económica comprende todos los gastos en lo que se incurre, algunos de los cuales son difíciles de cuantificar, así como el análisis de la factibilidad económico financiera, lo que no solo se limita al estimado del costo de la inversión inicial sino también a considerar los criterios de recuperación de la inversión y las ganancias que se obtienen; lo cual no es objetivo del presente trabajo.

3.10.2. Valoración económica de la fabricación

La tabla 3.9 muestra la valoración económica del costo de fabricación del sedimentador que se fabricaría en la Empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed Beche (EMNI). El costo de la inversión fue estimado con tecnólogos pertenecientes al taller 06 de la entidad tomando como referencias proyectos de este tipo realizados en la empresa.

Tabla 3.9. Costo de la inversión para el sedimentador fabricado en la EMNI.

Material	Partes Componentes	Precio(CUC)	Precio(CUP)
Acero al carbono A 515	Costo de la investigación (I_{inv})	2 326,54	-
	Costo de montaje (I_{Mont})	8 538,91	-
	Costo de transportación (I_{Trans})	1 257	-
	Brazo largo	39 96,05	14 524,88
	Brazo corto	25 08,06	93 34,07
	Piso del Sedimentador	11 000,957	16 787,55
	Tanque del Sedimentador	20 733,95	35 532,10
	Costo total de la Inversión (I)	50 360,517	-

El análisis económico referido anteriormente se basa en la variante de adquisición de un sedimentador fabricado en la Empresa mecánica de Níquel. Como puede observarse el monto de la inversión se encuentra alrededor de los 50 360,517 CUC. Si se considera la solución referida a la compra de un sedimentador Modelo LTS– Marca IPS, de la compañía Metso Corporation, sobre el cual se refiere el monto de la inversión presenta un costo de 79 676,4 CUC, el monto de la inversión aumentaría considerablemente, de lo que se infiere que es más factible económicamente fabricar el sedimentador en la EMNI que comprarlo en el extranjero.

3.11. Impacto ambiental

Se entiende por impacto ambiental al efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad, a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base, debido a la acción antrópica o a eventos naturales, Kramer (2012).

A esta investigación le es de vital importancia la zona costera adyacente a la instalación objeto de estudio la cual ha recibido durante varios años, el vertimiento de estos contaminantes sin tratar, eliminando la posibilidad de explotación por otros sectores como la pesca y la recreación, por solo citar dos ejemplos. El tratamiento de residuales es de vital importancia para el medio ambiente, de ahí nos brinda la eliminación de efectos contaminantes en el mismo con la implementación del presente trabajo; donde se elimina la carga contaminante que impacta al litoral costero adyacente. Por otra parte, nos brinda la posibilidad de la reutilización del agua tratada en instalación dentro

de la empresa donde no se requiera índice de calidad de agua superiores.

Del punto de vista social, el concepto de optimización de consumo de agua se transcribe a la formación de capacidades de agua potable que puede estar disponible a la población o a nuevos proyectos en desarrollo en el territorio garantizando una mayor disponibilidad de la misma en el municipio alegando al uso racional de la misma.

El uso de floculante para los parámetros de explotación por diseño del sedimentador en el proceso de sedimentación de la pulpa estudiada, no tiene incidencias en el medio ambiente el cual es un producto soluble sin la presencia de ningún químico contaminante. Las soluciones no son más corrosivas que el agua el cual es benéfico en cualquier proceso de separación sólido-liquido.

El análisis de las implicaciones ambientales de las acciones del hombre conjunto al desarrollo industrial y la sociedad, permite trabajar al mismo en énfasis de disminuir la contaminación circunstancial. Donde mantiene estrictamente relacionado el factor económico ya que se ve comprometido en desarrollar nuevas técnicas que permitan la disminución de efectos contaminantes con la capa de ozono.

❖ **UEB de beneficio de la EPM**

La UEB de beneficio de carbón ubicada en (EPM) actualmente tiene incidencia perjudicial en relación al medio ambiente, debido a las afectaciones que se producen, algunas de las cuales se refieren a continuación:

- ❖ Afectaciones ambientales por el proceso de lavado de carbón mineral, pues la piscina de descarga del agua utilizada en el proceso se desborda, lo que tiene como consecuencia una contaminación del medio ambiente y el agua residual desemboca al mar con partículas que deja el proceso.

Se estima la posibilidad de disminuir las afectaciones que se producen en la UEB, debido a que se prevé:

- ❖ Disminuir los volúmenes de pulpa a evacuar desde la instalación, ya que con el sistema de sedimentación propuesto gran parte del agua contenida en la pulpa se reincorpora al proceso.
- ❖ Aumentar la disponibilidad de agua para la instalación y la comunidad, ya que gran parte del agua que posee el lodo es reincorporada al proceso.

- ❖ La instalación proyectada debe garantizar que no exista la sedimentación del lodo en la tubería.

De todo lo planteado anteriormente se infiere que la propuesta de un sistema de sedimentación para la UEB es una solución tecnológica que se proyecta como posible desde el punto de vista técnico y razonable desde el punto de vista económico, social y ambiental.

❖ **Efectos ambientales del procesos de fabricación**

Según García (2014) en el proceso de fabricación de los componentes del sistema de sedimentación se pueden ejecutar los procesos de fundición, maquinado, conformación, corte y soldadura. Estos procesos afectan al medio ambiente, por lo que se requiere del conocimiento y control de las principales variables que lo caracterizan.

Las implicaciones económicas y sociales que todo esto representa son universalmente conocidas, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen, por lo que todo trabajo que se haga debe considerar el tratamiento de este tema puesto que el mismo reviste gran importancia.

Debido a su proximidad con el lugar de origen y emisión, el personal es el que más está expuesto a los riesgos de la producción. En la UEB de Construcciones Metálicas de la Empresa Mecánica del Níquel, esto se traduce en amplias normativas para la protección de los que allí laboran. Tomando como ejemplo los procedimientos de fabricación más importantes y de mayor relevancia ambiental. Esta empresa dispone de hojas de datos que informan sobre la peligrosidad de los riesgos a que están expuestos los trabajadores, así como de instrucciones redactadas. Es importante que el personal de la empresa sea consciente del peligro que esto representa a largo plazo.

3.12. Conclusiones de capítulo 3

- ❖ Se determinó que en el tramo de la instalación que abarca desde la criba hasta el sedimentador no debe existir sedimentación porque la velocidad crítica determinada es inferior a la velocidad de transportación ($2,09E-02$ es menor que $0,40$).
- ❖ Se efectuó la determinación del diámetro, altura del sedimentador y torque requerido para asegurar el aumento del porcentaje de sólido en la pulpa de un 3 % a un 26 %, para un gasto de la pulpa alimentado de $65 \text{ m}^3/\text{h}$ lo que derivó la propuesta de un sedimentador Modelo LTS– Marca IPS para operar en la planta objeto de estudio.
- ❖ Se efectuó el cálculo de la altura necesaria y disponible en los dos tramos considerados en la instalación, lo que derivó una propuesta de bomba centrífuga de serie 8020 para lograr el flujo de pulpa desde el tanque de sedimentación hasta la criba.
- ❖ Se plantearon las implicaciones económicas y ambientales de la propuesta del sistema de sedimentación. El costo estimado de la inversión inicial para el sedimentador fabricado en la Empresa Mecánica del Níquel es de 50 360 CUC y de 79 676 CUC si se considera la compra en el extranjero lo que prevé la disminución de las afectaciones ambientales del proceso de lavado de carbón mineral.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se elaboró la propuesta del sistema de sedimentación para la recuperación del agua que contiene el residual de la UEB objeto de estudio, a partir de la determinación de diámetro, altura y torque requerido en el sedimentador para asegurar el incremento del porcentaje de sólido de la pulpa de un 3 % a un 26 %, con un gasto de la pulpa alimentado de $65 \text{ m}^3/\text{h}$.
2. Se analizó la sedimentación que caracteriza la pulpa objeto de estudio. Para un 3 % de sólido la velocidad de sedimentación en la fase de caída libre es de $31,60 \text{ cm/h}$ ($8,78\text{E-}05$), en fase contrariada de $0,039 \text{ cm/h}$ ($1,08\text{E-}07$), la velocidad crítica estimada es de $2,09\text{E-}02 \text{ m/s}$; lo que indica que existe garantía de que no exista sedimentación de la pulpa en el tramo que mediaría entre la criba y el sedimentador, puesto que la velocidad de transportación calculada está en el orden de $0,40 \text{ m/s}$.
3. Se efectuó la determinación de la altura necesaria y disponible en los tramos que mediarían entre el sedimentador y la criba. El cálculo realizado permitió proponer una bomba centrífuga serie 8020 de potencia 2 kW y rendimiento máximo de 68 % para el segundo tramo, mientras que para el primer tramo se indica que el flujo de agua residual se realizaría a gravedad; todo esto partiendo de considerar una elevación de la criba respecto al sedimentador de 6 m, situado a una distancia de 29 m de la criba y un diámetro para la tubería de entrada y salida del sedimentador de 0,1 m.
4. Se realizó una valoración de los resultados obtenidos. Se estimó el costo de la inversión requerida para el establecimiento de un sedimentador de placas inclinadas Modelo LTS– Marca IPS, que se compraría en Brasil, en el mercado internacional es de 79 676 CUC mientras que uno fabricado en la EMNI es de 50 360 CUC. Se planteó que con la implementación del sistema de sedimentación propuesto es posible: aumentar la disponibilidad de agua para el proceso y disminuir las afectaciones ambientales que se producen hoy en día en la UEB objeto de estudio.

RECOMENDACIONES

1. Determinar el coeficiente de ajuste para la expresión que posibilita el cálculo de la velocidad crítica de transportación de la pulpa, ya que en el presente trabajo se realizó una extrapolación, lo cual genera imprecisiones en la determinación.
2. Determinar las velocidades de sedimentación y la reología de la pulpa que se genera en el proceso de sedimentación, para un 26 % de sólido, con el propósito de evaluar el fenómeno de transporte en el tramo 3, tramo que media entre el sedimentador y el depósito para la descarga de la pulpa.
3. Considerar la variante propuesta de sistema de sedimentación para la UEB de beneficio de la EPM, ya que se prevé que esta es técnicamente posible y además económica, social y ambiental, razonable para aumentar la disponibilidad de agua y establecer un uso racional de la misma.
4. Tener en cuenta el uso de filtradores e hidrociclones en investigaciones posteriores que permitan realizar una valoración económica acerca de la factibilidad de los mismos con respecto a los sedimentadores.
5. Realizar la evaluación de la influencia que provoca el uso de floculante en los parámetros de transportación de la pulpa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar, S. P. *Comportamiento reológico de las colas de Nicaro*. Trabajo de Diploma. Facultad de Tecnología. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba 1975.
2. Beyris Mazar, P. y J. Falcón Hernández. 1985: “*Estudio de la preparación de mineral y su influencia en la velocidad de sedimentación*”. Revista Minería y Geología, Vol. 1.
3. Beyrís, M. P. 1997. *Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la empresa Comandante “Pedro Soto Alba”*. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM (Moa). Facultad de Metalurgia.
4. Beyris, Mazar, P. y D. C. West Domínguez. 1992: “*Estudio de la homogeneización del mineral limonítico en la sedimentación a escala semi-industrial*”. Revista Minería y Geología, N°1.
5. Browns, G. G. 1965. *Operaciones básicas de la ingeniería química*. Instituto Cubano del libro, La Habana, 269 pp.
6. Cabrejos Guillén, Crispin. “*Evaluación del efecto de la floculación química a pulpas de carbonato de níquel en la Empresa Comandante René Ramos Latour*”. Etapas 01 y 02. Trabajo de diploma. Dpto. Ing. Mecánica, Facultad Metalurgia y Electromecánica, ISMM. 2011.
7. Cerpa A. y L. R. Garcell. 1998: “*Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas*”, Informe al evento Metalurgia, 98, Ciudad de la Habana.
8. Cerpa, N. A. 1997. *Propiedades del flujo de suspensiones lateríticas concentradas. Influencia de la mineralogía y de las características coloidales*. Madrid, CSIC.
9. Coe, H. S.; Clevenger, G. H. 1916: *Methods for determining the capacities of slime-settling tanks*. Trans. Am. Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum. Engrs., 55, 356.
10. Corral, Martínez, C. C. 2009: *Velocidad de sedimentación de óxido de zirconio dispersado en alginato de sodio adicionado con goma gelan*. Dr.C. Carlos Francisco Cruz Fierro (Tutor). Tesis de Residencia Profesional. Instituto Tecnológico de Durango. 52 p.

11. Díaz, A., *Manual de hidráulica aplicada*. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1989.
12. Dorr .W.P 1905.1905: “*Colloidal Systems and Interfaces*”. John Wiley and Sons, New York.
13. Egolf, C.B.; McCabe, W.L. *Rate of Sedimentation of Flocculated Particles*.Trans. Alche. Vol 33. 1937. P 620.
14. Falcón Hernández, J., y et al. 2002: “*Sedimentación de la pulpa cruda en la empresa Moa Nickel S.A.*”. Revista Minería y Geología, Vol. XIV, N°1.
15. Falcón, H. J. 1983. *Consideraciones sobre la sedimentación de la pulpa limonítica en la planta “Pedro Soto Alba”*. Revista Minería Geología, 2: 173-188.
16. Ferrer Carbonell E. A. y G. Rosario Acosta. 1991: *Estudio de la sedimentación del mineral laterítico en los espesadores de la fábrica “Comandante Pedro Sotto Alba”*. Revista Minería y Geología, N°3.
17. Ferro. D .E. 1984) E.A.: 1988 “*Química Coloidal*”. Editorial MIR, Moscú, traducción al español ampliada y modificada, editorial MIR.
18. Garcell, L., *Características reológicas y mineralógicas de las pulpas limoníticas de Moa en períodos de sedimentación crítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería Química., 1984.
19. Garcell, L., *Caracterización reológica de la pulpa de limonita de Moa*. Revista Tecnología química, 1992, (1): 5-9.
20. Garcell, L., *Comportamiento reológico de la pulpa laterítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.
21. Garcell, L., *Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y critica*. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
22. Garcell, L., *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
23. Garcell, P.L. *Estudio reológico de las suspensiones de limonita de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba*. Facultad de tecnología química. Santiago de Cuba. ,1994.

24. 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.
25. García, E., *“Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo”*. Tesis presentada en opción al título de ingeniero mecánico. Moa 2014.
26. García, E., Leyva, B., y Laurencio, H. 2014. *“Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo”*. (Ciencia y Futuro / v.4 n.4 / Febrero-Septiembre / p. 22-41 ISSN 2306-823x.
27. Gresesqui .W.M 2010. *Estudio para el incremento de la productividad del sedimentador de Alto Rate de la Empresa Moa Nickel S.A.* Trabajo de diploma, ISMM, 2010.
28. Gupta .T.H.2006: *Parametric of Design of Sedimentador*. Editorial Plenum Press, New York.
29. Gutiérrez. O, Bueno. A. 2004: *“Estudio de la Sedimentación de las pulpas lateríticas y de los factores que la afectan”*. Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
30. Heny, K.; Fred, H. y Stephen, L. 1959: *Mineralogía*. Edición revolucionaria. La Habana.
31. Hernández, S. *Metrología dimensional*. Editorial ISPJAE.1986.
32. Jiménez, Guilarte, Miguel. *Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología carbonato amoniacal y su influencia en el consumo de energía de los sedimentadores*.Tesis presentada en opción al título de ingeniero mecánico.Moa 2014.
33. Kasatkin, A. *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial pueblo y Educación. 1987. /pág 262-366.
34. King, R. P. *Principles of flotation*. Johannesburg: Instituto Surafricano de Minas y Metalurgia, 2001. p. XXX
35. Kramer García F, (2012) *Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible*.
36. Laguarda, Martínez, E. 2012: *Investigation of sedimentation behaviour of Microcrystalline cellulose: Relating particle-to-particle interaction to sedimentation*

- behavior*. Dr.C. Tuve Mattsson (Tutor). Tesis de Maestría. Chalmers University of Technology. 44 p.
37. Laurencio, H. & Martínez, R. 2004: *Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad (cola) en el proceso carbonato amoniacal*. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
38. Laurencio, H. y Delgado, Y., “*Comportamiento reológicos de la emulsión de petróleo pesado*”. Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. 16(2) 244-250, 2008. <http://redalyc.uaemex.mx>. [Consultada: 15 Diciembre 2008].
39. Mariño, A. Mora, L. Chang, A. 2009. *Equipos de la metalurgia no ferrosa*. Editorial Felix Varela. La Habana. Cuba. 238 p.
40. Mariño, P. A., Falcón, H. J., Valadao, G. E. S. 2009. *Predicción de los valores máximos de concentración de sólidos en el producto espesado*, Revista Información tecnológica. 12(3): 181-188.
41. Mariño. P A (2002). *Variables para el control de la concentración de sólidos alcanzable por sedimentación gravitatoria*, Tesis Doctoral, ISMM, 2002.
42. Mariño-Pérez, A.; Falcón-Hernández J.; Sales, Valadao, G., E.,(2010): *Correlación teórica entre las concentraciones de sólidos en el lodo sedimentado por gravedad y en la torta sin escurrir*. Minería y Geología 26 (4): 79-103.
43. Martínez Rojas, R: “*Caracterización de las propiedades físico mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tuberías.*” Tesis en opción al título de Master en Electromecánica. ISMM. Moa, 2009.
44. Matos Lahens, Alberto. “*Evaluación del sistema de bombeo de agua en la planta de beneficio de la Empresa Puerto Moa “Raúl Díaz Argüelles”*”, Proyecto de Ingeniería Mecánica III. Moa, 2015.
45. McCabe, Warren; Smith, Julian C. *Operaciones básicas de ingeniería química*. Volumen II, 1991.
46. Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005. pp 25 – 30.
47. Mitrofanov, L. 1984. *Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales*, Editorial MIR, Moscú.

48. Mular y Bhappu 1982; Mular J. R., Bhappu P. M., 1981. A one-dimensional model of sedimentation using darcys law. *Separation science and Technology*, 14(4): 291-304.
49. Nekrasov B. "Hidráulica". Editorial Pueblo y Educación, 1986.
50. Noa, Osorio, Alcides. "Diseño de un transportador para la planta de carbón de la Empresa Puerto Moa "Raúl Díaz Argüelles", Proyecto de Ingeniería Mecánica III. Moa, 2011.
51. Noa.O.A. *Determinación de los parámetros tecnológicos de la planta de preparación mecánica de Carbón de la Empresa Puerto Moa.*, Trabajo de diploma, ISMM, 2012.
52. Novoa Ortega, R. Influencia del pH y otros factores de la sedimentación de la pulpa mineral. *Revista Cenic*, 7, Feb 1976.
53. Núñez, M.R. *Empleo de coagulantes y floculantes durante la sedimentación*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMMM, 2004. 75 h.
54. Núñez, Sánchez, María. *Evaluación del floculante Piciz 7010 en la clarificación de los licores y sedimentadores de las pulpas*. 2005
55. Orozco Suárez, Leonel. *Determinación de los Parámetros de Sedimentación en la planta de Lixiviación de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara* .Trabajo de diploma. Dpto. Ing. Mecánica, Facultad Metalurgia y Electromecánica, ISMM. 2009.
56. Perry J.H., *Chemical engineers handbook*. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1988.
57. Perry, Ch. K. 2000 *Perry`s Chemical engineer`s handbook*. Ed. Revolucionaria, La Habana, 2t.
58. Proyecto "Remodelación de la planta de Carbón de la empresa Puerto Moa "Raúl Díaz Argüelles", Elaborado por CEPRONIQUEL, Moa, Cuba, 2011.
59. Rabinóvich, E. Z. 1987: "Hidráulica". Editorial MIR, Moscú.
60. Ranjan, Rout, J. 2011: *Study of the settling characteristics of fly ash-water slurry and designing of a settling pond*. Dr.C. P. Rath (tutor). Tesis de Grado. National Institute of Technology. 54 p.
61. Rosabal Vega, J. M y Valles Matos, M. 1988: "Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas" (Tomo II), Editorial Pueblo y Educación, Ciudad Habana.

62. Sayago-Peñaloza J. 2001: *Estudio del efecto de la forma y el tamaño de las partículas sobre la velocidad de sedimentación gravitacional de suspensiones*. Bibliografía. Miguel Jiménez Guilarte Trabajo de Diploma 68 Dr.C. Mary Luz Alonso (Tutor). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 119 p.
63. Skelland, A. *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
64. Suárez, Castellanos, J. Y Acevedo del Monte, E. 2007. *Las tecnologías y su impacto en la producción actual de Moa Nickel y su expansión*. Centro de Investigaciones para la industria Minero Metalúrgica. La Habana, Cuba, Enero. (Presentación).
65. Svarovsky, L.: *Separation Solid-Liquid Chem. Eng.*, vol. 86, 2000; (a) núm. 14, p. 62; (b) núm. 15, p. 93; (c) núm. 16, p. 69.
66. Tejeda H.D. *Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales*. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
67. Truscot, F, M. 1978. What the filter man should Know About Theory, Filtration and Separation, July/August.
68. Turiño, I. M. *Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga*. Centro azúcar, No.1, 1994.
69. Turro B. A., *Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaco*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154
70. Valdés, F. 1983; Ponce 1983; Miranda 2002; Mariño et al. 2007; Beyris y Falcón 2007; Salinas 2012.: “*Fundamentos químico coloidales de la sedimentación de las pulpas acuosas del mineral laterítico*”. Revista Tecnológica, Vol. 14, N°3.
71. Valdés, F. 1984: “*Fundamentos químico coloidales de la sedimentación de las pulpas acuosas del mineral laterítico*”. Revista Tecnológica, Vol. 14, N°3.
72. Vega, Guzmán, C; J, Villacreses-Zambrano, A, J. 2006: *Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio*. Dr.C. David Matamoros (Tutor). Trabajo de Diploma. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 182 p.

73. Wills .B.A, 1985, Gupta. A. M, 2006. *Mineral Processing Technology*. Pergamon Press, Oxford, Third Edition, 1985.
74. Zelikman .N. A.; M. G. Voldman; V. L. Beliauskaya. *Teoría de los mecanismos hidrometalúrgicos*. Moscú. 1982.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO 1

Figura 1. Planta de beneficio de carbón de la EPM.

ANEXO 2

Figura 2. Picnómetro.

Fuente: García (2014)

ANEXO 3



Figura 3. Balanza digital.

Fuente: García (2014)

ANEXO 4



Figura 4. Estufa.

Fuente: García (2014)

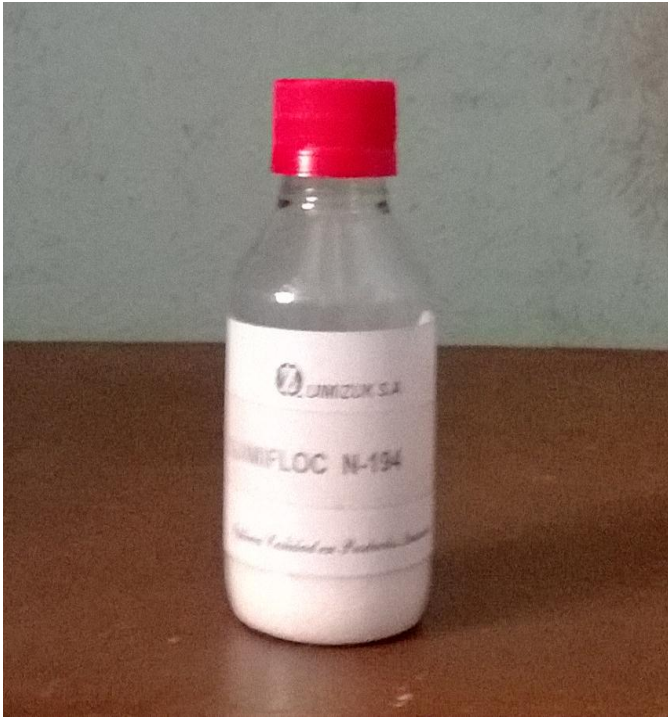
ANEXO 5

Figura 5. Floculante.

ANEXO 6

Figura 6. Probeta.

ANEXO 7

Ficha Técnica (SUKERFLOC N-194)



El SUKERFLOC N-194 es un floculante catiónico altamente efectivo, de alto peso molecular. El mismo acondiciona con alta eficacia los sólidos para las operaciones de deshidratación y ayuda en los procesos de clarificación, en especial la industria minera y los tratamientos de agua, dentro de una amplia variedad de industrias. Este floculante muestra un excepcional desempeño en las separaciones sólido-líquido en un amplio rango de condiciones.

Beneficios

1. El producto seco minimiza las necesidades de espacio de almacenamiento.
2. Uso económico: eficaz a bajas dosis.
3. Remoción de sólidos altamente eficaz.
4. Eficaces en la remoción de sólidos.
5. Efectivo en un amplio rango de pH, no modifica el pH del sistema.
6. Mejora la producción de sólidos en la torta.

Aplicaciones

Este producto pueden ser benéfico en cualquier proceso de separación sólido-líquido, recomendados para:

1. Deshidratación en filtros banda, centrífugas y filtros prensa.
2. Flotación por medio de aire disuelto.
3. Filtración.
4. Espesado.
5. Clarificación del agua.
6. Tiene aplicaciones en las industrias de papel, la industria azucarera y la minera y los tratamientos de agua en general.

Propiedades físicas

Tabla.1. Propiedades físicas.

Propiedades Físicas	N-194
Estado de agregación	Sólido
Aspecto	Polvo
Color	Blanco
Grado de Carga, 3 %	5
Peso molecular relativo	Alto
Densidad a granel, 1,0 kg/m ³	7 750 ± 50
pH de solución al 0,5%, 25 °C	3,0 – 5,0
Viscosidad, cps:	
0,10	80%
0,25	200%
0,50	400%

Dosificación del producto

Las soluciones madre se pueden preparar con una concentración de hasta un 0,5% a través de una unidad de preparación automatizada o por lotes. Las soluciones se deben dejar añejar unos 30 a 60 minutos para lograr la máxima eficacia. Se debe utilizar agua de alta calidad. El agua de la dilución secundaria debe añadirse a la solución madre justo antes de preparar, en una proporción al menos 10:1.

Condiciones de almacenamiento

Las soluciones no son más corrosivas que el agua y los materiales recomendados para la construcción de recipientes incluyen el acero inoxidable, la fibra de vidrio, el plástico, con recubrimientos epóxicos o de vidrio. No se debe utilizar hierro, cobre ni aluminio. Los derrames de polímeros pueden provocar caídas y se deben recoger antes de lavar con agua. La vida útil de estos productos es de 24 meses cuando se almacenan en empaques sin abrir en atmósfera seca y a temperatura no superior a los 40°C. El tiempo de almacenamiento sólido es acerca de hasta 1 año y es resistente a la humedad.

ANEXO 8

Tabla 2. Resultados del análisis granulométrico.

Cernido, %	Retenido, %	Diámetro, mm	Cernido, %	Retenido, %	Diámetro, mm
0	100	0,00031	0,02	99,98	0,01512
0	100	0,00035	0,02	99,98	0,01689
0,01	99,99	0,00039	0,02	99,98	0,01887
0,01	99,99	0,00044	0,02	99,98	0,02108
0,01	99,99	0,00049	0,02	99,98	0,02355
0,01	99,99	0,00054	0,02	99,98	0,02631
0,01	99,99	0,00061	0,02	99,98	0,02940
0,01	99,99	0,00068	0,02	99,98	0,03285
0,01	99,99	0,00076	0,02	99,98	0,03670
0,02	99,98	0,00085	0,1	99,9	0,04100
0,02	99,98	0,00095	0,9	99,1	0,04581
0,02	99,98	0,00106	3,16	96,84	0,05118
0,02	99,98	0,00118	4,93	95,07	0,05718
0,02	99,98	0,00132	5,24	94,76	0,06388
0,02	99,98	0,00147	5,25	94,75	0,07137
0,02	99,98	0,00165	9,14	90,86	0,07974
0,02	99,98	0,00184	26,72	73,28	0,08909
0,02	99,98	0,00205	44,51	55,49	0,09954
0,02	99,98	0,00230	52,36	47,64	0,11121
0,02	99,98	0,00256	60,91	39,09	0,12425
0,02	99,98	0,00287	70,99	29,01	0,13882
0,02	99,98	0,00320	78,83	21,17	0,15510
0,02	99,98	0,00358	81,91	18,09	0,17329
0,02	99,98	0,00400	85,76	14,24	0,19361
0,02	99,98	0,00446	88,49	11,51	0,21631
0,02	99,98	0,00499	93,42	6,58	0,24167
0,02	99,98	0,00557	99,98	0,02	0,27001
0,02	99,98	0,00623	0,02	99,98	0,02108
0,02	99,98	0,00696	0,02	99,98	0,02355
0,02	99,98	0,00777	0,02	99,98	0,02631
0,02	99,98	0,00868	0,02	99,98	0,02940
0,02	99,98	0,00970	0,02	99,98	0,03285
0,02	99,98	0,01084	0,02	99,98	0,03670
0,02	99,98	0,01211	0,1	99,9	0,04100
0,02	99,98	0,01353	0,9	99,1	0,04581

ANEXO 9

Tabla 3. Valores de densidad del polvo.

		Muestras		
		M1	M2	M3
A	Picnómetro vacío	19,8146	18,8397	19,0720
C	Picnómetro con polvo	27,9382	27,6180	28,8218
D	Picnómetro con polvo + agua	44,9918	43,6689	43,8177
B	Picnómetro con agua destilada	44,3512	43,4696	43,5859
pagua	Densidad del agua	0,981	0,985	0,981
ppolvo	Densidad del polvo, g/cm ³	1,0655	1,0081	1,0044

Tabla 4. Elaboración de los valores de la densidad del polvo.

ρ_{polvo}	Ec. 2.2	1,0260	
S	Ec. 2.2	0,033	
t		4,303	95%
Ltmax	Ec. 2.2	1,1666	
Ltmin	Ec. 2.2	0,8854	

ANEXO 10

Tabla 5. Valores de densidad de la pulpa.

	Picnómetro vacío,g	Picnómetro lleno, g	Masa de la pulpa, g	Volume n,ml	Densidad de la pulpa, g/cm ³	Densidad de la pulpa, kg/m ³
Picnómetro 1	19,8146	44,3310	24,52	25	0,9807	980,66
Picnómetro 2	18,8397	43,5493	24,71	25	0,9884	988,38
Picnómetro 3	19,0720	43,6440	24,57	25	0,9829	982,88

Tabla 6. Elaboración de los valores de densidad de la pulpa.

ρ_{pulpa}	Ec. 2.2	983,97	
S	Ec. 2.2	27,50	
t		4,303	95%
Ltmax	Ec. 2.2	1102,31	
Ltmin	Ec. 2.2	865,64	

ANEXO 11

Tabla 7. Resultados de las pruebas de velocidad de sedimentación.

N-194		
	Z,cm	t,min
32,00	0	0
0,40	31,6	1
0,50	31,5	2
0,50	31,5	3
0,60	31,4	4
0,60	31,4	5
0,65	31,35	6
0,65	31,35	7
0,70	31,3	8
0,70	31,3	9
0,70	31,3	10
0,70	31,3	11
0,70	31,3	12
0,70	31,3	13
0,70	31,3	14

Tabla 8. Resultados de las repeticiones de las pruebas de velocidad de sedimentación.

Rep1	Rep2	Rep3
32,00	32,00	32,00
0,39	0,42	0,39
0,51	0,50	0,49
0,51	0,49	0,49
0,60	0,60	0,61
0,59	0,60	0,60
0,65	0,65	0,65
0,65	0,65	0,65
0,70	0,70	0,70
0,70	0,70	0,70
0,70	0,70	0,70
0,70	0,70	0,70
0,70	0,70	0,71
0,70	0,70	0,70
0,70	0,70	0,70

Tabla 9. Resultados de verificación de la sedimentación durante el transporte.

Parámetro	Valor	Unidad de Medida
Vcrit	2,09E-02	(m/s)
Vm 1	2,30E-02	(m/s)
Vm 2	3,96E-01	(m/s)

ANEXO 12

Tabla 10. Presentación de los resultados.

Repetición 1				Repetición 2		Repetición 3	
	n(rev/min)	μ (mPa*s)	par%	μ (mPa*s)	par%	μ (mPa*s)	par%
1	200	4,62	15,5	4,86	16	4,43	15,2
2	180	4,43	13,3	4,43	13,6	4,53	13,6
3	160	4,01	10,7	4,2	11,2	4,24	11,3
4	150	3,88	9,7	3,84	9,9	4,08	10,2
5	140	3,77	8,9	4,07	9,4	3,94	9,2
6	135	3,64	8,2	3,64	8,3	4	8,9
7	105	3,03	5,3	3,09	5,4	3,26	5,7
8	100	2,88	4,8	3,12	5,2	3	5

Tabla 11. Presentación de los resultados del análisis reológico de la pulpa.

$dv/dy, (s^{-1})$	$\tau, (Pa)$
0	0
1	0,0039
2	0,0078
3	0,0117
4	0,0156
5	0,0195
6	0,0234
7	0,0273
8	0,0312
9	0,0351
10	0,0390

ANEXO 12

Tabla 12. Resultados de los parámetros técnicos del sedimentador.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de Medida
(2.15)	X_o	0,039	-
	X_f	0,251	-
(2.16)	R_o	24,641	-
(2.18)	R_f	2,977	-
(2.19)	v_s	$7,636 \cdot 10^{-7}$	m/s
(2.20)	f	469	m^2
(2.21)	m	0,025	t/h
(2.22)	A	11,892	m^2
(2.23)	S	15,46	m^2
(2.24)	d	4,437	m
(2.25)	X	0,036	-
(2.26)	Vd	70,982	-
(2.27)	H_d	5,969	m^2
(2.28)	H	8,228	m
(2.29)	M_t	972	N/m

ANEXO 13



Figura 7. Sedimentador propuesto.

ANEXO 14

Tramo 1: Criba- Sedimentador

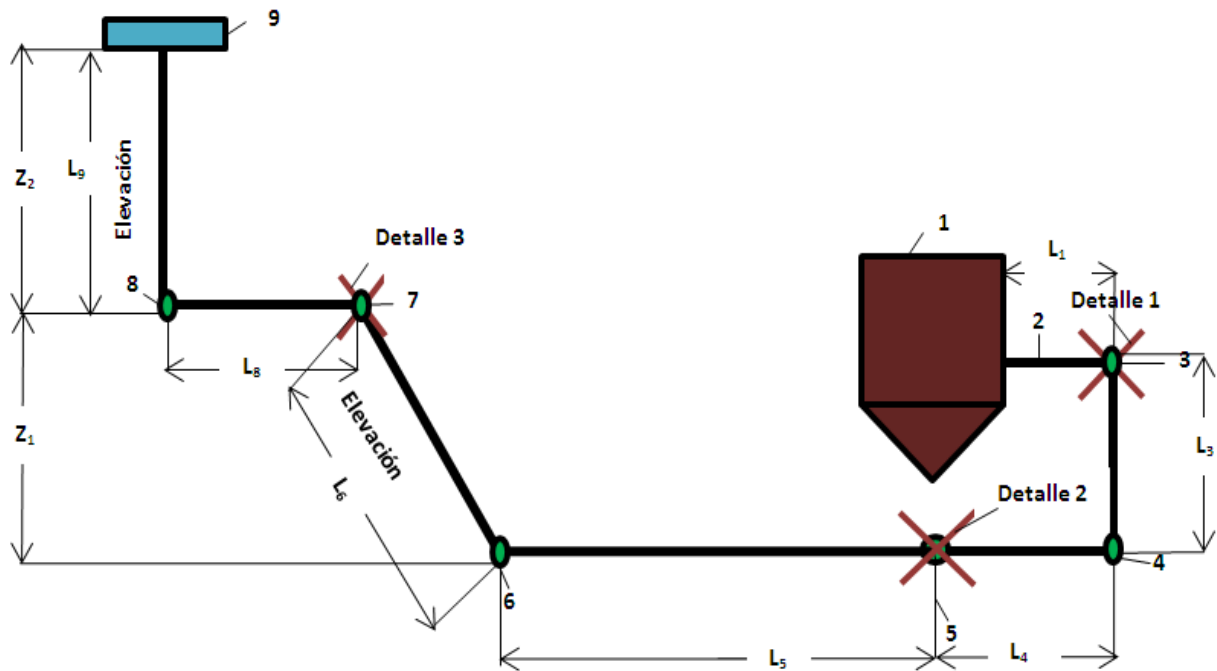


Figura 8. Esquema de la instalación.

Donde:

1-Sedimentador (1).

2-Tuberías (2).

3-Codos (3, 4, 6, 7,8).

4- Bomba centrífuga (5).

5- Criba (9).

Z₁- Altura de la tubería con relación al eje de la bomba.

Z₂- Altura de la tubería de entrada del agua en la criba con relación al eje de la bomba.

L₁ -Distancia entre el orificio de salida del agua del tanque al eje del codo 3.

L₂- Distancia entre el eje del codo 2 y el codo 3.

L₃- Distancia entre el eje del codo 3 y el codo 4.

L₄- Distancia entre el eje del codo 4 y el codo 5.

L₅- Distancia entre el eje de la bomba y el codo 6.

L₆- Distancia entre el eje del codo 6 y el codo 7.

L₇- Distancia entre el eje del codo 7 y el codo 8.

L_8 - Distancia entre el eje del codo 8 y el codo 9.

L_9 - Distancia entre el eje del codo 9 y la criba.

Detalle1: Tubería de 3 m en profundidad con una (T flujo desviado 90°) en el extremo y una válvula.

Detalle2: Tubería de 2 m en profundidad con un codo de 90 ° en el extremo y una válvula.

Detalle 3: Tubería de 6 m en profundidad con un codo de 90 ° en el extremo.

Tabla 13. Accesorios necesarios para el tramo 1.

Tramo 1			
Succión 356PU 1A/B/C	Cantidad	Parámetro	Valor
Codos 90 °	3	(ξ)	1,0
Codos 45 °	2	(ξ)	0,4
Válvula mariposa 18"	1	(ξ)	2,0
Diámetro de la tubería	-	d	100 mm
Largo de la tubería	-	L	29 m
Altura	-	ΔZ	6 m

ANEXO 15

Tramo 2: Sedimentador-Criba.

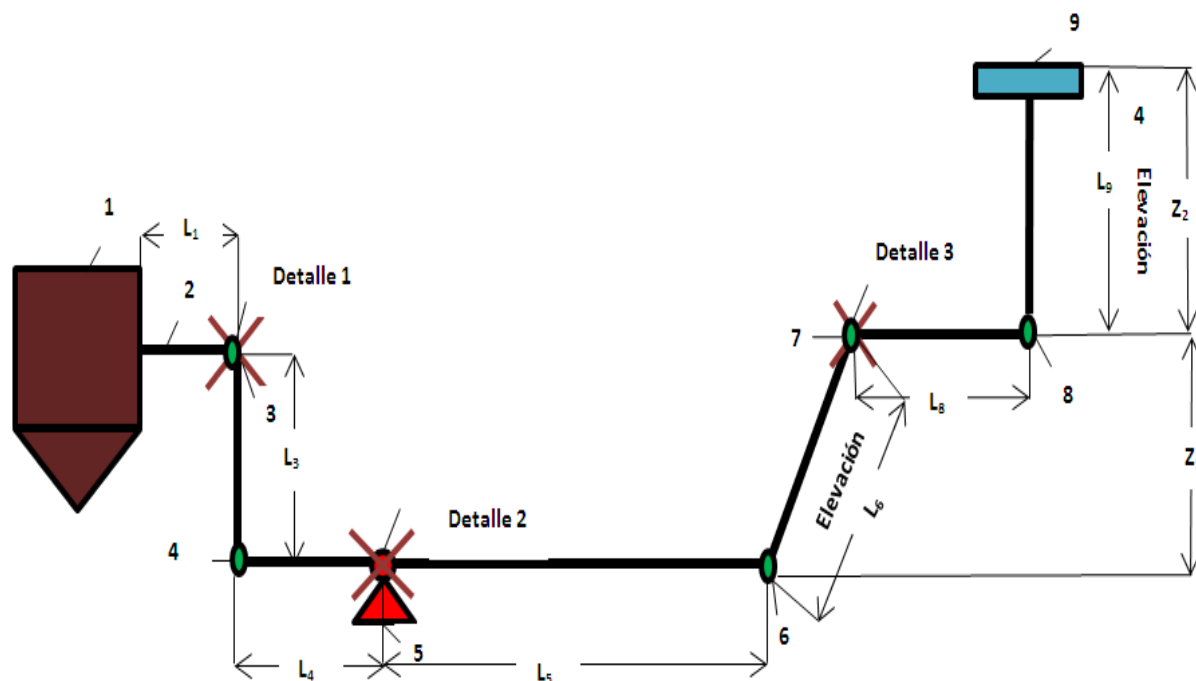


Figura 9. Esquema de la instalación.

Donde:

1-Sedimentador **(1)**.

2-Tuberías **(2)**.

3-Codos **(3, 4, 6, 7,8)**.

4- Bomba centrífuga **(5)**.

5- Criba **(9)**.

Z₁- Altura de la tubería con relación al eje de la bomba.

Z₂- Altura de la tubería de entrada del agua en la criba con relación al eje de la bomba.

L₁ -Distancia entre el orificio de salida del agua del tanque al eje del codo 3.

L₂- Distancia entre el eje del codo 2 y el codo 3.

L₃- Distancia entre el eje del codo 3 y el codo 4.

L₄- Distancia entre el eje del codo y el eje de la bomba.

L₅- Distancia entre el eje de la bomba y el codo 6.

L₆- Distancia entre el eje del codo 6 y el codo 7.

L₇- Distancia entre el eje del codo 7 y el codo 8.

L₈- Distancia entre el eje del codo 8 y el codo 9.

L₉- Distancia entre el eje del codo 9 y la criba.

Detalle1: Tubería de 3 m en profundidad con una (T flujo desviado 90°) en el extremo y una válvula.

Detalle2: Tubería de 2 m en profundidad con un codo de 90 ° en el extremo y una válvula.

Tabla 14. Accesorios necesarios para el tramo 2.

Tramo 2			
Succión 356PU 1A/B/C	Cantidad	Parámetro	Valor
Codos 90 °	3	(ξ)	1,0
Codos 45 °	2	(ξ)	0,4
Válvula mariposa 18"	1	(ξ)	2,0
Diámetro de la tubería	-	d	100 mm
Largo de la tubería	-	L	29 m
Altura	-	ΔZ	6 m

ANEXO 16

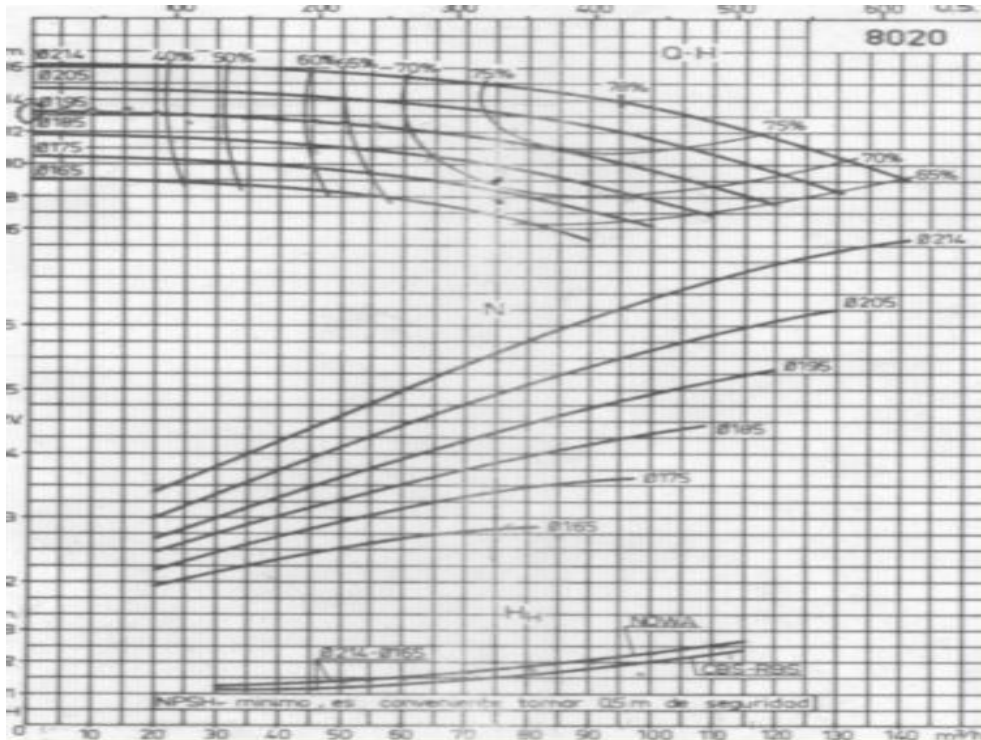


Figura 10. Curva característica de la bomba.

ANEXO 17



Figura 11. Bomba centrífuga propuesta para la instalación.

ANEXO 18

Tabla 15. Resultados obtenidos en el tramo desde la bomba hasta la criba.

Q (m ³ /h)	Q (m ³ /s)	H red (m)	H bomba (m)
0	0,000	6,000	10,140
10	0,003	6,064	10,226
20	0,006	6,258	10,224
30	0,008	6,580	10,135
40	0,011	7,031	9,958
50	0,014	7,611	9,694
60	0,017	8,319	9,342
70	0,019	9,157	8,903
80	0,022	10,123	8,376
90	0,025	11,219	7,761

Tabla 16. Parámetros técnicos de la bomba propuesta para la instalación.

Parámetro	Valor	Unidad de Medida
te	0,09	CUC/kW*h
tt	8760	h/año
Nbomba	2000	W
η_{motor}	0,85	–
η_{bomba}	0,68	–
Nmotor	2173,91304	W

Tabla 17. Resultados relativos al cálculo referido a la cavitación.

Ecuación	Parámetro	Valor	Unidad de Medida
2.30	A	$7,854 \cdot 10^{-3}$	m ²
2.31	v	1,945	m/s
2.32	Re	$1,941 \cdot 10^5$	-
2.43	λ	0,016	-
-	$\Sigma \zeta$	4,44	-
2.39	k	$4.568 \cdot 10^3$	s ² /m ⁵
2.48	ns	21,566	-
2.47	Heq	0,378	m
2.46	NPSH _{disp}	5,59	m