

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

COEFICIENTE DE CORRECCIÓN DE CARGA PARA TRANSPORTE DE
HIDROMEZCLA LATERÍTICA

Moa, 2018



FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
MAESTRÍA DE ELECTROMECAÁNICA

COEFICIENTE DE CORRECCIÓN DE CARGA PARA TRANSPORTE
DE HIDROMEZCLA LATERÍTICA

Autor: Ing. Yordan Rosa De Armas

Tutor: Dr.C Gabriel Hernández Ramírez

Moa, 2018

Agradecimientos.

A Dios por haberme bendecido todo este tiempo.

A la Revolución Cubana por la oportunidad de formarme como profesional.

A mi hijo y mi esposa, por el apoyo que me han dado.

A mi madre por ser tan sacrificada y darme la educación para mi formación en la vida.

A mi tutor Gabriel Hernández por haberme soportado todo este tiempo.

A mis amigos Eduardo Pelegrin y Jorge Pupo por el apoyo técnico en la instalación para la experimentación de mi investigación.

Al Departamento de Tecnología, Taller Central, Taller Eléctrico, tecnólogos y Jefes de Turnos de La Planta de Espesadores por su apoyo para la realización de la experimentación de la investigación.

A todos los que me apoyaron para la realización de los resultados de la investigación.

“Cuando la sabiduría entrare en tu corazón y la ciencia fuere grata a tu alma;

La discreción te guardará, te preservará la inteligencia”.

Proverbios 2:10-11

RESUMEN

No considerar el coeficiente de corrección de carga-capacidad de las hidromezclas lateríticas en el sistema de bombeo trae consigo la operación ineficaz y energéticamente no eficiente del proceso de lixiviación ácida; esta investigación evalúa un modelo matemático que relaciona los parámetros reológicos de las hidromezclas lateríticas con los energéticos del sistema de bombeo, que garantice la operación eficaz y energéticamente eficiente, en este tipo de proceso. A partir de estudios experimentales y mediante procedimientos estadísticos se modela el comportamiento de carga, potencia y rendimiento de la bomba cuando se maneja hidromezcla laterítica. Aplicando el procedimiento propuesto en el sistema de bombeo de pulpa cruda garantiza un caudal de $1600 \text{ m}^3/\text{h}$ y la concentración de sólidos demandados en el proceso tecnológico, y la eficiencia energética del sistema se incrementó de forma general en 5%. Se concluye que la utilización de un modelo matemático del coeficiente de corrección que relaciona los parámetros reológicos de la pulpa laterítica y los energéticos del sistema de bombeo, garantizan un proceso de lixiviación ácida, energéticamente eficiente.

SUMMARY

Not to consider the correction coefficient of head-flow of laterite slurries in the pumping system carries with it the ineffective operation and non-efficient energy of the acid leaching process; this investigation evaluates a model mathematical that relates the rheological parameters of laterite slurries with energy of the pumping system, that guarantees the effective and energy efficient operation, in this type of process. From experimental studies and by means of statistical procedures is modeled the performance of head, power and efficiency of the pump when is handled laterite slurries. Applying the procedure proposed in the system of crude slurry pumping guarantees a flow of 1600 m³/h and the solid concentration demanded in the technological process, and the energy efficiency of the system was increased in 5 % of general form. It is concludes that the utilization of a mathematical model of the correction rate that relates the rheological parameters of the laterite slurry and the energies of the pumping system, guarantee an acid leaching process, power efficiency.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO PARA LA MODELACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO DE HIDROMEZCLAS LATERÍTICAS	6
1.1. Introducción	6
1.2. Sistemas de bombeo de hidromezclas	6
1.3. Proceso de lixiviación ácida a presión para menas lateríticas	8
1.3.1. Breve caracterización de los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos	8
1.3.2. Caracterización del proceso de lixiviación ácida a presión (PLAP)	10
1.3.3. Sistemas de bombeo en el proceso de lixiviación ácida a presión	12
1.4. Eficacia y eficiencia de los sistemas de bombeo.	13
1.5. Variables que influyen en la operación de bombeo de las pulpas lateríticas.	18
1.6. Propiedades reológicas de las hidromezclas lateríticas	19
1.7. Factores que influyen sobre las características de las hidromezclas	24
1.7.1. Composición mineralógica	25
1.7.2. Forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas	25
1.7.3. Efecto del contenido de sólidos	26
1.8. Modelos reológicos de las hidromezclas lateríticas.	26
1.8.1. Influencia de las propiedades reológicas de las hidromezclas lateríticas en el diseño de sus sistemas de bombeo	29
Conclusiones	32
CAPÍTULO 2. MODELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL SISTEMA DE BOMBEO DE HIDROMEZCLAS DE LAS PULPAS LATERÍTICAS CRUDA.	33
2.1. Introducción.	33
2.2. Caracterización operacional del objeto de estudio	33

2.3.	Propiedades reológicas de las hidromezclas de las pulpas cruda a partir de sus propiedades físicas -----	34
2.3.1.	Factores reológico obtenidos según las normas empresariales -----	35
2.3.1.1.	La distribución de tamaños de las partículas-----	35
2.3.1.2.	Concentración total de sólidos -----	36
2.3.1.3.	Número de mineral -----	36
2.3.1.4.	El pH -----	37
2.4.	El efecto de la pulpa en el funcionamiento de la bomba. -----	38
2.5.	Diseño de experimento para la hidromezcla laterítica-----	39
2.5.1	Definición de variables para el diseño-----	40
2.5.2	Planeamiento experimental.-----	42
2.6.	Obtención experimental de los parámetros operacionales de la bomba centrífuga. -----	44
2.6.1.	Procedimiento experimental para la obtención de los parámetros de hidrotransporte. -----	46
2.6.2.	Principales variable medidas en la experimentación -----	47
2.6.3.	Principales fórmulas matemáticas usadas en el experimento. -----	47
2.6.3.1.	Carga de la bomba. -----	47
2.6.3.2.	Potencia de la bomba-----	48
2.6.3.3.	Eficiencia de la bomba-----	48
2.6.3.4.	Costo de bombeo -----	48
2.6.3.5.	Obtención de los coeficientes del modelo matemático de la operación del equipo de bombeo. -----	49
2.7.	Diseño del experimento para determinar las características de funcionamiento de la bomba-----	51
2.7.1.	Formulación de la hipótesis estadística-----	52
2.7.2.	Matriz del experimento-----	53

Conclusiones.-----	54
CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO: IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DE PULPAS LATERÍTICA -----	
3.1. Introducción.-----	55
3.2. Resultados del experimento y análisis de varianza.-----	55
3.3. Distribución de tamaño de las partículas que conforman la fase sólida de las muestras utilizadas. -----	56
3.4. Resultados reológicos de las muestras-----	57
3.5. Procedimiento para la selección de parámetros energéticamente óptimos de operación eficaz de las bombas centrífugas.-----	58
3.6. Resultados de las curvas características de la bomba.-----	59
3.7. Comportamiento de la curva carga – capacidad-----	64
3.8. Calculo del coeficiente de corrección experimental (CHexp) para la pulpa a 41,93 % de sólidos. -----	65
3.9. Calculo del coeficiente de corrección experimental según modelo matemático de Hernández (2017). -----	66
3.10. Análisis Económico y Medio Ambiental-----	66
Conclusiones.-----	68
CONCLUSIONES -----	69
RECOMENDACIONES -----	70
BIBLIOGRAFÍA -----	71
ANEXOS-----	86
ANEXOS #1: Esquema tecnológico principal de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. -----	87
ANEXO #2 Diagrama de flujo de la planta de espesadores de pulpa -----	88
ANEXO #3 Diagrama para el cálculo de los factores de corrección para líquidos viscosos, de las distintas características de las bombas centrífugas.-----	89

ANEXO #4 Estación experimental de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.-----	90
ANEXO #5 Descripción de la instalación de hidrotransporte del ISMMM. -----	91
ANEXO #6 Resultados de la prueba con agua a 1 600 r/min.-----	93
ANEXO #7 Resultados de la prueba con agua a 1 400 r/min.-----	94
ANEXO #8 Resultados de la prueba con agua a 1 200 r/min.-----	95
ANEXO #9 Resultados de la prueba con agua a 1 000 r/min.-----	96
ANEXO #10 Resultados de la prueba con pulpa a 41,96 % de sólidos a 1 400 r/min.-----	97
ANEXO #11 Resultados de la prueba con pulpa a 42,36 % de sólidos a 1 400 r/min.-----	98

INTRODUCCIÓN

A raíz de la crisis energética de los años 70 del siglo XX y con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y del progresivo cambio climático, la eficiencia energética se convirtió en una meta que motiva a las sociedades a trazar políticas y regulaciones que propicien el mejoramiento de la calidad y la eficiencia del suministro energético.

En las industrias de producción de Níquel + Cobalto no están exentas de mejoramientos de la calidad y eficiencia en los sistemas de alto consumo energético. Lo que se estima un alto consumo en los sistemas de accionamiento por motores de inducción como en bombas, ventiladores, compresores y aplicaciones de tracción mecánica.

En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) el consumo de electricidad facturado en el año 2016 fue de 20 458,6 GWh, de ellos corresponde al sector estatal 8 532,3 GWh para un 41,7% del consumo y a la industria 4 743,5 GWh. Los motores de inducción constituyen los consumidores principales de la energía total (Oficina Nacional de Estadística, 2016). En la industria con tecnologías hidrometalúrgicas los motores de baja tensión pueden alcanzar hasta el 45,9 % de la potencia instalada (Romero, 2014).

En particular, la industria cubana del níquel inmersa en un creciente y constante ascenso en sus producciones, demanda cada vez más un apreciable consumo de energía y es la eficiencia uno de los principales factores que decide la rentabilidad de sus empresas. Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de la Unión del Níquel y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), requiere que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica y energética de los mismos, debido a las fluctuaciones de los precios de los combustibles y a la exigencia de ahorro de energía como vía hacia el desarrollo sustentable, el valor de la eficiencia energética juega un papel fundamental y es principio tecnológico esencial para lograr el desarrollo socioeconómico tal como se refleja en los Lineamientos de la política económica y social del VII Congreso del Partido Comunista de Cuba.

En las industrias que procesan el mineral laterítico cubano, sus sistemas de transporte de fluidos son consumidores de una parte importante de la energía utilizada con fines productivos. Según (Leonhard, 1996), más del 60 % de la energía total que se consume en la transportación de fluidos es mediante los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de este consumo, más del 55% se utiliza en los accionamientos de bombas. Se estima, además, que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los subsistemas mecánicos. Es evidente, entonces, la especial importancia que tiene proponer medidas que contribuyan a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas.

En la Planta de Espesadores de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” (ECPSA) existen sistemas de hidrotransportes de pulpa lateríticas que bombean el material para la Planta de Lixiviación, los cuales son altos consumidores de energía, por lo que se requiere un estudio para mejorar los parámetros que afectan la carga, capacidad, potencia y rendimiento de las bombas centrífugas.

En el costo de la extracción del níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico incide significativamente el elevado consumo energético durante el tratamiento de las pulpas (también denominadas hidromezclas) que constituyen fluidos con características particulares, además, incide negativamente una baja eficiencia operacional cuya causa se requiere precisar para disminuir los costos e incrementar su fiabilidad (Pérez, et al., 2010). De esta situación se deduce la necesidad de investigar los factores que inciden en la variación de las propiedades de las hidromezclas en los parámetros operacionales.

En los últimos años los estudios se han centrado en las hidromezclas de cieno carbonatado, materia prima para la neutralización en el proceso de lixiviación ácida (Martínez, 2009; Breff, *et al.*, 2014; Martínez *et al.*, 2015; Hernández, *et al.*, 2016;), las mismas han estado relacionadas con el beneficio y los modelos reológicos para su transporte.

La presente investigación se interesa por el proceso que se desarrolla en la ECPSA, caracterizado por una alta eficiencia de extracción de sulfuros de níquel y cobalto utilizando el ácido sulfúrico como reactivo químico. En el proceso tecnológico de esta fábrica (ver Anexo #1) intervienen plantas que producen ciertas materias primas. Cada una de las plantas posee funciones específicas, interrelacionadas en un estricto orden tecnológico, que tributan a la obtención del sulfuro mixto de Ni y Co. Las plantas de producción son: Preparación de Pulpa Mineral, Espesadores, Lixiviación, Lavaderos, Neutralización y Precipitación de Sulfuros. Después que la pulpa ha recibido tratamiento físico en las plantas de Preparación de Pulpa y Espesadores, el material resultante será sometido al proceso de lixiviación en la planta homónima.

En los estudios revisados sobre el comportamiento del funcionamiento de las bombas centrífugas cuando manejan hidromezclas de pulpas lateríticas, no se ha determinado el factor de corrección para la relación de la carga, capacidad y rendimiento de forma experimental para las nuevas condiciones. El Instituto Hidráulico emitió carta gráfica para determinar el factor de corrección para fluidos viscosos pero no para hidromezclas con sólidos en suspensión por lo que limita el estudio para estos sistemas, también advierte la no utilización de esta carta gráfica interpolando y determinar el coeficiente de corrección de forma experimental.

El conocimiento del comportamiento reológico de los fluidos constituye uno de los eslabones necesarios a tener en cuenta cuando las suspensiones de distintos materiales son utilizadas en procesos tecnológicos. Sin embargo, estas relaciones de influencia aún poseen un carácter general, lo que obliga a realizar nuevas caracterizaciones experimentales, para determinar las relaciones específicas entre las propiedades de las hidromezclas lateríticas cruda, y la eficiencia de los sistemas de bombeo. Por consiguiente, el presente trabajo tiene como:

Situación Problemática:

El sistema de bombeo de hidromezclas lateríticas debe garantizar el flujo de operación cuando la concentración de la pulpa está entre 47,5 y 48 %, sin embargo se conoce que a estas concentraciones la eficiencia del bombeo es baja debido a que: no se han caracterizado adecuadamente las suspensiones lateríticas concentradas que se procesan

en el área de espesadores y, además, la operación del sistema de bombeo es inadecuada para el fluido que se bombea.

En la actualidad la concentración de pulpa tiene un promedio de 43 % y el bombeo se comporta como un proceso eficaz pero con eficiencia desconocida. El hecho de que no se logre transportar de 1-2 % de sólidos, reduce la producción de Ni+Co/año, además de que los índices de: vapor/mineral; fuel/Ni+Co; electricidad consumida del SEN MW/Ni+Co y el vapor aumentan, por lo que provoca mayor emanaciones de contaminantes al medio ambiente afectando la salud humana.

Este aumento del índice de vapor incrementa la dilución de los licores, disminuye la eficiencia de lixiviación y la de lavado por el acrecentamiento de los flujos en el proceso por la disminución del % de sólidos transportado, aumentando los costos de producción de Ni + Co.

Problema científico:

Insuficiente conocimiento acerca de los coeficientes de corrección de carga y capacidad de las bombas centrífugas de pulpas lateríticas crudas, con el consumo energético del sistema de bombeo.

Objeto de la investigación:

Sistemas de bombeos de hidromezclas lateríticas cruda.

Campo de acción:

Coefficiente de corrección de carga – capacidad.

Objetivo general de la investigación:

Determinar el coeficiente de corrección de carga – capacidad para los sistemas de bombeos de hidromezclas lateríticas cruda.

Hipótesis de la investigación:

Si se determina el coeficiente de corrección de carga – capacidad de las bombas centrífugas para la pulpa laterítica cruda, entonces, es posible corregir la característica operacional de estos equipos de bombeo en condiciones variables de producción existente.

Para dar cumplimiento al objetivo general se declaran los siguientes:

Objetivos Específicos:

- I. Obtener el coeficiente de corrección del sistema de bombeo de hidromezclas que garantice la eficacia y eficiencia energética en correspondencia con las condiciones operativas variables.
- II. Elaborar un procedimiento de cálculo a partir de los modelos anteriores para la selección de parámetros energéticamente óptimos de operación eficaz de las bombas centrífugas instaladas.
- III. Evaluar el impacto económico de las propuestas de esta investigación.

Se desarrollan las siguientes tareas:

- I.a Compilación bibliográfica sobre: el comportamiento de los fluidos, los yacimientos lateríticos, los procesos de sedimentación y de lixiviación ácida.
- I.b Sistematización de los resultados de la tarea I.a y realizar un análisis crítico que permita establecer las deficiencias e insuficiencias del conocimiento disponible sobre esos aspectos.
- I.c Análisis químico, mineralógico y reológico de pulpas cruda con el propósito de caracterizar las hidromezclas o pulpas estudiadas.
- II.a Descripción de las limitaciones teórico-prácticas de los métodos de obtención del punto de funcionamiento de las bombas centrífugas en función de las características reológicas de las hidromezclas espesadas.
- II.b Determinación de parámetros para la operación eficiente de los sistemas de bombeo de hidromezclas.
- III Valoración de los beneficios económicos y los impactos ambientales asociados a la operación de los sistemas de bombeos en las condiciones de explotación de empresas con tecnología de lixiviación ácida.

Los resultados de la presente investigación se presentan en una memoria estructurada en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO PARA LA MODELACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO DE HIDROMEZCLAS LATERÍTICAS

1.1. Introducción

El objetivo del presente capítulo es establecer el estado del arte de la investigación a partir del desarrollo actualizado del Marco Contextual y del Marco Teórico.

Para ello se realizarán análisis críticos de los trabajos precedentes y en particular de las bases teóricas y metodológicas consideradas para su ejecución así como una sistematización de los logros, insuficiencias y deficiencias que se tienen en las investigaciones realizadas sobre las propiedades del fluido y el transporte de hidromezclas lateríticas donde constituye un elemento de la mayor importancia conocer la influencia de dichas propiedades en el diseño de las características de los sistemas de bombeo, redes de tuberías, accesorios y equipos que deben utilizarse según las necesidades tecnológicas, así como los requerimientos medio ambientales que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de estas pulpas.

1.2. Sistemas de bombeo de hidromezclas

Un sistema de bombeo consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos (Blanco, et al., 1994). En un sistema típico, además de las tuberías que enlazan los puntos de origen y destino, son necesarios otros elementos. Algunos de ellos proporcionan la energía necesaria para el transporte: bombas, lugares de almacenamiento y depósitos. Otros son elementos de regulación y control: válvulas y equipos de medida. La especificación básica que debe satisfacer un sistema de bombeo es el transporte de un caudal de un determinado fluido de un lugar a otro. Además, suele ser necesario que el fluido llegue al lugar de destino con una presión determinada, y que el sistema permita un rango de variación tanto del caudal como de la presión. El diseño de un sistema de bombeo consiste en el cálculo y/o selección de las tuberías, bombas, que permitan cumplir las especificaciones de la forma más económica posible. En cuanto a la operación de un sistema de bombeo, hay que tener en cuenta los sistemas de

regulación y control que permitan obtener el caudal y la presión deseados, así como los problemas de cavitación, inestabilidades y transitorios que se puedan producir.

La resolución de la mayor parte de los problemas de la dinámica de fluidos pasa a través de las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía. Durante la operación de un sistema de bombeo deben cumplirse simultáneamente las ecuaciones que se derivan de los principios de conservación de la masa (continuidad) y de la energía para régimen permanente (Streeter, et al., 2000). Para efectuar el análisis de la operación se deben componer estas ecuaciones en la dirección del flujo entre las secciones características del sistema, estas son: depósitos de succión y descarga, nodos donde se ramifica el flujo y otras, donde se disponga de la mayor información energética posible. Del planteamiento de estas ecuaciones surge la posibilidad de efectuar el estudio de forma analítica y gráfica según se refiere en (Nekrasov, 1968), esta última basada en dichas relaciones matemáticas.

(Stepanoff, 1969) explicó que cuando se bombea sólidos en suspensión, el impelente de la bomba transmite energía al líquido transportador. Para una mezcla homogénea, él explicó que el impelente podrá transmitir tanta carga a la mezcla como habría podido transmitir carga al agua. El funcionamiento del impelente no se deteriora pero la potencia consumida se incrementa linealmente con la gravedad específica de la mezcla. En realidad, a mejor punto de eficiencia, la presencia de sólidos tiende a reducir la carga hidráulica por la pérdida de energía para moverse a través de la abertura del impelente. De la misma manera, la eficiencia de la bomba cuando maneja la mezcla se reduciría por la presencia de sólidos.

(Stepanoff, 1969) reportó el trabajo por investigadores japoneses quienes indicaron que las pruebas en pulpa de carburo mostraron que la relación carga-capacidad puede incrementar o decrecer dependiendo en si la concentración de sólidos en suspensión tienden a causar en la pulpa un comportamiento Newtoniana o No-Newtoniana.

Estudios por (Hunt y Faddick, 1971) reportaron que varias pruebas en diferentes laboratorios y campos de aplicaciones en el manejo de sólidos en suspensión confirmaron que:

- La caída en la carga desarrollada para una relación de carga volumétrica dada decreció cuando la concentración de sólidos en suspensión aumento.
- La potencia de la bomba operando a una capacidad dada aumenta cuando la concentración del sólido en suspensión aumenta.
- La eficiencia de la bomba a una capacidad dada disminuye cuando la concentración del sólido en suspensión aumenta.

1.3. Proceso de lixiviación ácida a presión para menas lateríticas

1.3.1. Breve caracterización de los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos

La laterita ferroniquelífera juega un rol importante en la industria mundial del níquel. A partir de esta se produce aproximadamente el 40 % del total del níquel comercializable, además se considera que alrededor del 70 % del níquel en la corteza terrestre se encuentra en los yacimientos lateríticos (Gleeson, *et. al.*, 2004; Hernández, *et. al.*, 2010) que es producto del intemperismo químico en ambientes tropicales y subtropicales, desarrollado bajo fuertes condiciones de oxidación (Kenneh, 2008).

En la metalurgia extractiva la composición mineralógica de la mena es un factor importante para lograr resultados con adecuados índices tecnológicos. En particular la presencia de los elementos en las fases minerales es un aspecto importante a tener en cuenta; según Li, *et. al.* (2009) es esencial conocer las fases minerales en las que se encuentran los elementos y en dependencia de ello, así serán los resultados del proceso extractivo. En los estudios de separación desarrollados se observa la tendencia de los metales (Ni, Co, Fe, Al, Mg) a concentrarse en determinados productos, por ejemplo: el níquel lo hace hacia los productos finos y débilmente magnéticos, el aluminio y el magnesio en los productos gruesos (Agyei, 2006; Hernández, *et. al.*, 2010).

Las clases granulométricas de las cortezas de intemperismo presentan contrastes significativos en cuanto al porcentaje en peso de la fracción, contenido químico y mineralógico lo cual resulta de interés desde el punto de vista tecnológico. La meteorización o intemperismo consiste en un grupo de procesos mediante los cuales las rocas y minerales expuestos a la acción de factores atmosféricos pueden ser destruidos

físicamente o desintegrados químicamente, cambiar su color, coherencia, forma, textura y composición (Manceau, *et. al.*, 2000; Ariosa, *et. al.*, 2003; Hernández, *et. al.*, 2010).

Las principales fases mineralógicas que constituyen las menas lateríticas son: Goethita que contiene del 58 al 78 % del níquel presente en las lateritas (Rojas, 2001; Agyei, 2006; Madigan, *et. al.*, 2009; Luo, *et. al.*, 2009; Hernández, *et. al.*, 2010), en la maghemita y magnetita se distribuye del 15 al 25 % y en las asbolanas la presencia de níquel está entre 12 y 17 %. El cobalto se distribuye del 80 al 90 % en las asbolanas, del 10 al 20 % en la maghemita y magnetita, y en menor porcentaje en la goethita. Cabe destacar que en los reactores del proceso de lixiviación en la tecnología ácida a presión, el níquel y cobalto presente en la fracción magnética prácticamente no se lixivian creando dificultades tecnológicas y ocasionando pérdidas en las colas del proceso.

El aluminio se encuentra en la gibbsita, la goethita y las espinelas fundamentalmente, en las dos últimas fases minerales, además de ser menor su concentración no ocasiona serias dificultades en la extracción. Sin embargo, la gibosita, por su pequeña densidad y su forma irregular, es un elemento esencial en la formación de las llamadas mallas que se originan en procesos de sedimentación de la pulpa cruda y que obstruyen su espesamiento.

Según Cerpa, *et. al.* (1999) las lateritas cubanas están compuestas fundamentalmente por Serpentina y Goethita en diferentes proporciones. Es necesario hacer referencia al comportamiento de las fases de acuerdo al diámetro de las partículas; por ejemplo, se destaca la tendencia de la goethita a concentrarse en las clases de tamaño finas; la cromita y gibbsita lo hacen en las clases intermedias, la serpentina se concentra en las partículas de mayor diámetro y la magnetita no ofrece una regularidad en su concentración (Hernández, *et. al.*, 2010; Wilson, *et. al.*, 2006).

El índice de sedimentación I_{sed} surge como necesidad de diferenciar los frentes de minerales durante su sedimentación, basados en las características de los elementos químicos principales que controlan el proceso. Cada frente tiene características químicas diferentes, por lo que así será su comportamiento durante la sedimentación y su índice en cada caso. Este parámetro está dado por la ecuación siguiente (Beyris, 1997):

$$I_{sed} = \frac{\sum \text{contenido de metales ligeros}}{\sum \text{contenido de metales pesados}} = \frac{\%Mg + \%Al + \%SiO_2}{\%Fe + \%Ni + \%Co + \%Mn + \%Cr} \quad (1.1)$$

Se ha comprobado que el proceso de sedimentación se favorece si el $I_{sed} < 0,22$ (Beyris, 1997).

Los materiales de buena sedimentación están compuestos mineralógicamente por fases de óxidos e hidróxidos de hierro: goethita, hematina y magnetita, con cierta cantidad de gibbsita. Estos minerales están presentes tanto en la fracción fina como en la gruesa, pues ambas fracciones poseen prácticamente la misma composición mineralógica, predominando los minerales de metales pesados (ferrosos), lo cual explica la elevada densidad de estos materiales.

En la composición mineralógica de los materiales de mala sedimentación se detecta una marcada diferencia entre la fracción gruesa y la fina, pues mientras que la fracción fina ($< 0,074$ mm) está constituida por fases mineralógicas tradicionalmente conocidas en las lateritas como son: goethita, hematina y magnetita, en la clase granulométrica gruesa están presentes los silicatos de magnesio y sílice: clorita, olivino y cuarzo, que son minerales de metales ligeros (Si y Mg) que le proporcionan una baja densidad; constituyendo su presencia en la pulpa un factor desfavorable para la sedimentación (Rojas y Beyris, 1994).

1.3.2. Caracterización del proceso de lixiviación ácida a presión (PLAP)

Una suspensión de partículas concentradas puede sedimentar de dos maneras, de las cuales interesa para el proceso que se estudia la que se describe a continuación:

Después de un breve período de aceleración inicial, la interfase entre el líquido claro y la suspensión se desplaza hacia abajo con velocidad constante, formándose una capa de sedimento en el fondo del recipiente. Cuando la interfase se aproxima a la capa de sedimento, la velocidad a la que desciende disminuye hasta alcanzar el "punto crítico de sedimentación", cuando se forma una interfase directamente entre el sedimento y el líquido claro. La sedimentación posterior es consecuencia únicamente de la consolidación del sedimento, ascendiendo entonces el líquido hacia arriba alrededor de los sólidos, que forman entonces un lecho en el que las partículas están sueltas pero en

contacto unas con otras.

En el PLAP la sedimentación se realiza mediante un tanque llamado espesador en el que se aumenta la concentración de una suspensión por medio de un proceso de sedimentación. En la mayor parte de los casos la concentración de la suspensión es elevada y tiene lugar una sedimentación impedida. Los espesadores pueden funcionar como unidades continuas o discontinuas, y consisten en tanques relativamente poco profundos de los cuales se retira el líquido claro por la parte superior y el sedimento por el fondo.

Para obtener la mayor capacidad posible en un espesador de un tamaño dado, la velocidad de sedimentación debe ser tan elevada como sea posible. En muchos casos dicha velocidad debe aumentarse artificialmente mediante la adición de pequeñas cantidades de un electrolito, que provoca la precipitación de las partículas coloidales y la formación de flóculos. A menudo se calienta también la suspensión ya que esto disminuye la viscosidad del líquido y facilita el aumento de tamaño de las partículas grandes en suspensión a expensas de las pequeñas más solubles. Además, el espesador dispone frecuentemente de un lento agitador, que provoca una disminución de la viscosidad aparente de la suspensión y colabora también a la consolidación del sedimento como se muestra en el esquema del flujo tecnológico de la planta de Espesadores de la ECPSA (Ver Anexo #2).

El proceso de lixiviación consiste en que el líquido al penetrar en los poros del cuerpo sólidos disuelve los componentes a extraer o entra en reacción con ellos; la sustancia, que pasa a la solución (o el producto de la reacción) se difunde hacia la superficie del cuerpo sólido y pasa a la masa fundamental del líquido. A veces, la sustancia a extraer está disuelta en los poros del material sólidos y en tal caso, pasa directamente al disolvente por difusión (Treybal, 1990).

La lixiviación ácida a presión es un proceso que se efectúa a través de la disolución de los óxidos de níquel y cobalto en forma de sulfatos a través del reactivo químico ácido sulfúrico. La extracción del níquel y cobalto en la planta se realiza a partir de los minerales limoníticos (ricos en hierro), en autoclaves verticales a presión de 525 lb/plg² (3619,746 kPa) y 519 °K, bajo estas condiciones, se logra que la dilución del hierro sea

casi nula y por tanto se logre pasar a la solución los metales de níquel y cobalto selectivamente en mayor cuantía. Este proceso involucra varias reacciones múltiples, por lo que la selectividad para formar el producto deseado constituye un aspecto muy importante. Una selectividad pobre requiere del gasto o pérdida del reactante para lograr la cantidad dada del producto ansiado (Keenan, 1986).

Las variables de trabajo de mayor influencia sobre el proceso de Lixiviación son la: presión, temperatura, intensidad de la agitación, consumo específico de ácido sulfúrico, por ciento de sólidos en la pulpa, relación ácido – mineral, tiempo de retención, granulometría del sólidos alimentado, composición química de la pulpa alimentada. Resulta oportuno resaltar que el sistema de bombeo tiene una estrecha relación con las variables presión, temperatura, por ciento de sólidos en la pulpa, una baja eficiencia o incorrecta operación del mismo ocasiona variación en el consumo específico de ácido sulfúrico y la relación ácido – mineral y por ende en la eficiencia metalúrgica.

1.3.3. Sistemas de bombeo en el proceso de lixiviación ácida a presión

En la industria metalúrgica es frecuente la extracción de minerales que serán sometidos a procesos hidrometalúrgicos, en los que participa la formación de mezclas líquido-sólidos, la lixiviación, el lavado, la precipitación de compuestos poco solubles, el espesamiento, la filtración y otras operaciones que obligatoriamente necesitan de la transportación de materias primas y subproductos en forma de mezclas fluidas líquido-sólidos, que se manejan en caudales muy altos y necesitan para su trasiego, cargas de presiones tales, que se hace imprescindible el uso de aproximadamente 240 bombas, que garantizan el proceso a lo largo de extensas redes de tuberías. Por esta razón resulta prácticamente imposible encontrar una empresa o planta metalúrgica, donde la potencia eléctrica instalada para el transporte de este tipo de fluido no represente una parte considerable de la potencia total instalada en la entidad.

El transporte hidráulico que se realiza en la ECPSA consiste en trasladar pulpas lateríticas por gravedad y a presión. El transporte por gravedad se realiza desde la planta de preparación de pulpa hasta los espesadores de pulpa, con una suspensión de 25 – 30 % de peso en sólidos, por una tubería de hormigón de 610 mm de diámetro y 5 129 m de longitud. El transporte a presión se realiza desde los espesadores de

pulpa hasta la planta de lixiviación con ayuda de bombas centrífugas, como se representa en la figura 1.1.

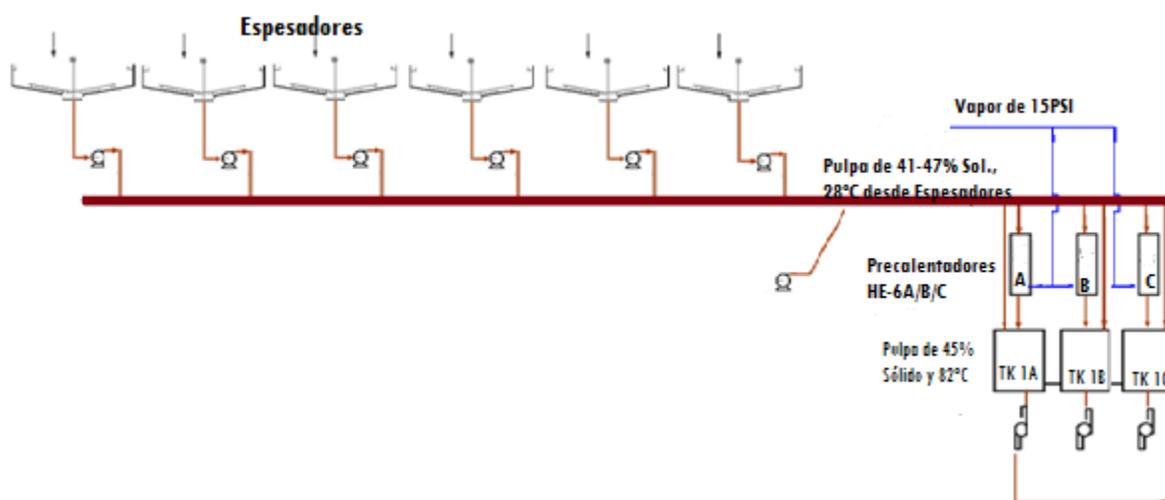


Figura 1.1 Sistema de bombeo de pulpa cruda y precalentada.

En esta fábrica la potencia instalada para el transporte del producto espesado hasta la planta de lixiviación, representa el 98,09 % de toda la potencia instalada en la planta (Legrá, 2014) mientras en la planta de Lixiviación, el 59,52 % de toda la potencia instalada, se dedica al transporte de la pulpa precalentada desde los tanques de almacenajes hasta los reactores (Gómez, 2014). La gran mayoría de las bombas utilizadas para el trasiego de estas mezclas son centrífugas, cuya eficiencia energética depende considerablemente de las características reológicas del fluido trasegado; sin embargo, dado el insuficiente conocimiento disponible de estas características, la selección y explotación de estas bombas se realiza bajo el supuesto de que el comportamiento reológico de los fluidos es newtoniano (Ramírez, 2015).

1.4. Eficacia y eficiencia de los sistemas de bombeo.

Es conocido que en la solución de problemas asociados con proyectos de diseño, ampliación, modernización o diversificación de capacidades de producción en las industrias químicas y metalúrgicas, en las que se manipulan pulpas o suspensiones minerales, o, simplemente, cuando se observan anomalías en los conductos, equipos y aparatos donde circulan y se manipulan dichas suspensiones, adquiere gran importancia el conocimiento sobre las características del flujo de las suspensiones en cuestión

(Pullum, *et. al.*, 2006). Ello resulta más evidente cuando se tratan problemas relacionados con la transportación de la suspensión por conductos, con su calentamiento, o con su procesamiento en los equipos de sedimentación, lixiviación u otros, cuyas soluciones conllevan a elevar la eficiencia de las bombas a partir del estudio de la velocidad específica (N_s), tamaño de la bomba, carga neta positiva de succión (NPSH) y el tipo de bomba seleccionada para las condiciones de servicio.

La **eficacia** de un sistema de bombeo está dada por la garantía de ciertos valores (requeridos por el proceso tecnológico) de caudal y presión de las suspensiones en ciertos puntos del sistema de transporte. La **eficiencia** de estos sistemas está relacionada con el uso mínimo de los recursos humanos y materiales y del tiempo; en este caso reviste la mayor importancia el uso adecuado de la energía, adaptando la potencia de entrada del sistema a la carga mecánica exigida por las bombas en su transporte eficiente de hidromezclas de mineral laterítico.

El **diagnóstico operacional** del sistema, una vez efectuado el diagnóstico a cavitación y no habiéndose detectado anomalías en cuanto a la ocurrencia de este fenómeno, se basa en la verificación de que el sistema se encuentra entregando el flujo requerido al proceso (Q_{req}) para el cual se brinda este servicio de transporte. Esto es posible siempre y cuando el flujo de operación (Q_{Op}) sea mayor o igual al flujo requerido, o sea, $Q_{Op} \geq Q_{req}$. En caso contrario el sistema instalado no brinda los requerimientos industriales necesarios, por lo que se debe actuar para garantizar una operación eficiente mediante cambios en los parámetros de operación, la selección de una nueva bomba o el rediseño del sistema. El criterio económico debe decidir entre las variantes que se formulen.

Parte de este diagnóstico operacional es la comparación entre el flujo de operación y el flujo para el punto de máxima eficiencia (Q_d). Según Karassik (1968), un equipo de bombeo se encuentra operando eficientemente cuando el flujo de operación posee una eficiencia que se diferencia en un 10 % de la eficiencia máxima de la bomba. Los flujos de operación que no se encuentren en esta zona de trabajo indican operaciones ineficientes producto de malas selecciones de los equipos de bombeo.

Para completar el diagnóstico se busca el vínculo entre la potencia eléctrica de entrada del accionamiento, su desarrollo como potencia electromagnética en los devanados del

motor y su conversión a potencia mecánica rotacional en el eje de la bomba centrífuga (ver Figura 1.2).

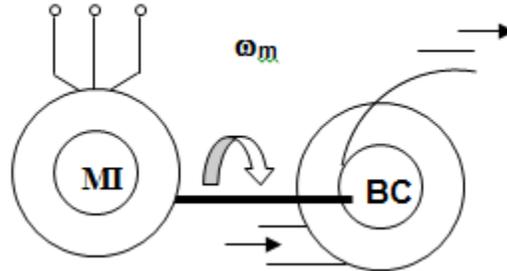


Figura 1.2 Grupo Motor de inducción (MI) con Bomba Centrífuga (BC). Fuente: Rojas, 2006.

La transferencia de potencia electromagnética en mecánica rotacional está asociada con las componentes activas y reactivas de la potencia desarrollada por el motor de inducción MI. Se parte de que la eficiencia del motor de inducción está definida como la relación entre la potencia de salida P_s y la potencia de entrada P_e :

$$\eta_{MI} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + \Delta p} = \frac{P_e - \Delta p}{P_e} \quad (1.2)$$

donde:

P_s – es la potencia de salida en el árbol del motor de inducción, (kW).

P_e – es la potencia eléctrica de entrada del motor de inducción, (kW).

Δp – son las pérdidas totales en el motor de inducción, (kW).

La potencia electromagnética P_{em} y también llamada potencia en el entrehierro P_{AG} es la encargada de enlazar la potencia eléctrica de entrada del motor P_e con la potencia mecánica rotacional de salida P_s , que se manifiesta en el eje de la bomba centrífuga, sobre la base de las pérdidas Δp que se reflejan a través de las principales partes de la máquina eléctrica.

Existen condiciones que afectan negativamente la eficiencia del equipo de bombeo, entre las principales se encuentran: pérdidas volumétricas, hidráulicas y mecánicas; cavitación; características del líquido; y condiciones de instalación.

Entre las condiciones de instalación que influyen negativamente en la eficiencia del equipo de bombeo; podemos citar: pérdidas en motor, acoplamiento y bomba; alineación; impulsores; y recorte de impulsores. El recorte de impulsor es una técnica empleada desde hace mucho tiempo para llenar lagunas en las líneas de fabricación donde las relaciones de afinidad permiten saber si recortando el impulsor se obtiene un punto de operación óptimo.

El rendimiento es máximo en el caudal que determina al llamado de Punto de Diseño de la Bomba (PDB), y disminuye tanto para caudales superiores como inferiores. Usualmente, tanto la potencia como el rendimiento se refieren únicamente a la bomba, sin tener en cuenta el motor que se utiliza para accionarla. Los valores máximos de rendimiento se encuentran entre el 85 y el 90%. La eficiencia garantizada debe concordar con el punto de operación definido por el punto de intersección entre la curva flujo-carga y la línea recta que va desde el origen y pasa a través del punto de operación (Blanco et al., 1994).

El estándar de las Normas ANSI (Institute, , ha editado gráficas que son de gran ayuda para predecir la eficiencia de equipos de bombeo pero en dicha predicción muchas veces no se incluyen otros efectos perjudiciales como el manejo de mezclas viscosas, las cuales se tratan en esta investigación.

Para un sistema de transporte de pulpas lateríticas cruda, es importante considerar la temperatura y presión de operación, la configuración del sistema de impulsión, la longitud y diámetro de la tubería con el costo del material, relacionados estos factores con la velocidad del fluido y sus propiedades físicas y reológicas (Ramírez, 2015). El análisis de los costos de operación del sistema de transporte bajo los factores antes mencionados, conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación.

Son característicos en la formulación del problema de racionalización del transporte de fluidos, el costo atribuible a las tuberías (costos fijos) y el costo energético en cuanto a costos de explotación (costos variables) (Aguirre *et al.*, 1996; Martínez *et al.*, 2007; Hechavarría, 2009). El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación 2.10 (Laurencio, 2010).

En general la eficiencia de las bombas son más bajas que la eficiencia de sus correspondientes motores de inducción, determinadas por las limitaciones que le impone el diseñador y por las restricciones que ofrece la red hidráulica donde van a operar.

Los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales (Bodson, 1994). Asimismo cuando operan con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan drásticamente, y se reduce considerablemente la eficiencia (Kusko y Galler, 1983). Aunque de forma empírica se utilizan coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de la bomba y sus instalaciones, aún no son suficientes para obtener las especificidades que exigen los sistemas de transporte de hidromezclas, es por esto que adquiere importancia estudiar todas aquellas variables que inciden de manera sensible en el comportamiento eficiente relacionado con la distribución de la energía que se transfiere desde el motor hasta el mecanismo (Hernández, 2015).

Los motores eléctricos que accionan bombas centrífugas de pulpa lateríticas operan con mucha variabilidad en sus cargas, debido a las especificidades del proceso tecnológico, y sus eficiencias se ven afectadas por la presencia de regímenes de cavitación en las bombas que ocasionan fuertes vibraciones mecánicas en los mecanismos de hidrot transporte (Reyes, 2007; Hernández, et al., 2015). La eficiencia del motor de inducción que opera a velocidad constante puede caer drásticamente cuando se va reduciendo su carga, especialmente por debajo del 50 % de su momento nominal. La regulación del gasto o caudal por estrangulamiento de las válvulas mecánicas en las bombas, ventiladores y compresores no sólo causan pérdidas de potencia en los motores, sino también se incrementan como pérdidas por fricción en estos sistemas. Mestizo y Santos (2005) obtienen modelos matemáticos que permiten cuantificar los consumos de potencia durante el empleo de diferentes métodos de regulación, los cuales dan la posibilidad de valorar energéticamente el empleo del variador de frecuencia como método de regulación de flujo en bombas centrífugas accionadas por motor eléctrico de corriente alterna.

La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas se ha tratado con el uso alternativo de un accionamiento a velocidad variable por control del caudal de la bomba

centrífuga en lugar de uso de velocidad constante y de válvulas de estrangulación, lo cual muestra mejoras en el consumo de energía partir del aumento del rendimiento de la bomba. Adhikari et al. (2000), incorporaron el concepto de las redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a 5,4% con respecto a los valores experimentales y Rojas (2005) demuestra la necesidad de instalar un controlador difuso para reducir la potencia de entrada de acuerdo a la transferencia de energía que le exigen los subsistemas eléctrico y mecánico utilizados en el transporte de hidromezclas lateríticas.

1.5. Variables que influyen en la operación de bombeo de las pulpas lateríticas.

La eficacia de cualquier operación de bombeo depende de dos grandes grupos de variables:

- a. Las relacionadas con el diseño del sistema de transportación (sistemas de acceso al fluido que se transporta, tubos, codos, bombas, etc.)
- b. Aquellas relacionadas con el fluido que se transporta.

El primer grupo de variables condiciona los componentes estacionarios del sistema de bombeo y algunos elementos dinámicos durante su explotación (tales como las válvulas y los variadores de velocidad). En esta investigación donde el objeto es un sistema de bombeo que ya está en explotación, estas variables se consideran conocidas y forman parte de los datos para el cálculo clásico (Saldarriaga, 1998) de presión y caudal del sistema de bombeo en el punto de destino. Para establecer el segundo grupo de variables se considerarán las propiedades de las hidromezclas que inciden en el gasto específico de energía durante su transporte mediante sistemas de bombeo.

En la actualidad existe un sistema de supervisión denominada CitectSCADA. Versión 7.10 que se dedica a medir, almacenar y procesar estadística y gráficamente muchas variables del proceso pero para el análisis del sistema de bombeo solo considera: la corriente de trabajo de los motores perteneciente a las bombas así como velocidad del variador en porcentaje, caudal de salida, porcentaje de sólidos y densidad del fluido. Es necesario destacar que la eficiencia del objeto de estudio del presente trabajo no se determina a partir, ni mediante, el uso del CitectSCADA, lo cual es un claro argumento

que justifica la investigación.

Considerando que las pulpas lateríticas presentan un comportamiento reológico no newtoniano, con un incremento de la viscosidad aparente en el transporte de pulpas con un alto porcentaje de sólidos en suspensión, puede asumirse que las variables principales que participan en la evaluación de la eficiencia del conjunto bomba-motor son: viscosidad aparente (μ_a), densidad determinada por la concentración del material sólidos, la pérdida de presión (ΔP), el caudal (Q), potencia hidráulica (N_h) y potencia eléctrica (N_m).

1.6. Propiedades reológicas de las hidromezclas lateríticas

La Reología, como una rama independiente de las Ciencias Naturales, surgió hace más de 60 años. Su origen se relaciona con la observación de un comportamiento "extraño" o anormal de muchos materiales de uso común como las pinturas, las soluciones coloidales, las arcillas, el yogurt, los plásticos, pastas farmacéuticas, selladores empleados para la construcción, entre otros. Según (Garcell, et al., 1988), (Malkin, 1994) y (James y Blakey, 2004) la Reología, parte de la Física de los Medios Continuos, es una disciplina científica que estudia la deformación de los materiales, incluyendo el flujo de los mismos.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de equipos de bombeo, se han reportado numerosos resultados que contribuyen al desarrollo de esta esfera de la ciencia.

Según lo planteado por (Bienvenido, 1973); (Roque, 1989); (Turiño, 1999); (Santos y Martín, 1999); (León y Percy, 2000); (Turro, 2002); (Laurencio, 2012) sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacionales de equipos de bombeo, el método más simple para la obtención de los parámetros de funcionamiento y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

La revisión bibliográfica descrita en la presente investigación no da respuesta satisfactoria a la problemática aquí tratada. En la mayoría de los casos se trata la fenomenología de fluidos no newtonianos, que aunque sirven de base para la

investigación no describen en su totalidad el fenómeno estudiado (el transporte de fluidos a temperaturas superiores a la del ambiente y las irregularidades del flujo en régimen turbulento).

Los fluidos newtonianos son aquellos que siguen la Ley de Newton de la viscosidad. Todos los gases y líquidos homogéneos de baja viscosidad, se comportan como fluidos newtonianos. De acuerdo con la Ley de Newton, la viscosidad es una constante independiente de la velocidad de deformación; sin embargo, puede variar considerablemente con los cambios de temperatura, pH, así como con la presión (a presiones mayores de 10^6 Pa para los gases y de 10^7 Pa para los líquidos).

Los fluidos no newtonianos presentan como característica fundamental que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantengan la temperatura y otras condiciones constantes, por lo cual usualmente, se le denomina viscosidad aparente. Sorprendentemente, sistemas tan diferentes como emulsiones densas, pastas coloidales, espumas o materiales granulares tienen muchas propiedades reológicas en común. Todos estos sistemas pueden fluir como un líquido cuando se aplica una tensión externa lo suficientemente alta, pero se atascan en un estado amorfo rígido por debajo de un límite de elasticidad crítica (Coniglio, et al., 2004).

Varios investigadores en el mundo han dedicado sus estudios al campo de la reología de polímeros (Mewis, et al., 1989); (Caram, et al., 2006); (McGuire, et al., 2006) y de emulsiones de petróleo (Ohtake, et al., 1987); (Briceño, et al., 1997); (Briceño, et al., 2001); (Pal, 2002). Otros han analizado el comportamiento reológico de suspensiones de minerales tales como bentonita (Bekkour, et al., 2005); goethita (Blakey y James, 2003) y lateritas procedentes de distintos yacimientos (Bhattacharya, et al., 1998); (Lason, 1999); (Klein & Hallbom, 2002); (Blakey y James, 2003); (Pérez, 2010).

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 (Brown, 1969); (Skelland, 1970); (Garcell, et al., 1988); (Malkin, 1994); (He, et al., 2006), en la tabla 1.1 se muestran los modelos reológicos más difundidos.

Tabla 1.1 Modelos reológicos (Chhabra & Richardson, 1999).

Modelo del fluido	Ecuación constitutiva	Ecuación número.	Números de parámetros	Parámetros
Newtoniano	$\tau_{yx} = \mu \left(-\frac{dVx}{dy} \right)$	(1.3)	1	μ
Plástico Bingham	$\tau_{yx} = \tau_0 + \eta_p \left(-\frac{dVx}{dy} \right)$	(1.4)	2	τ_0 y η_p
Ley de Potencia Oswal de Waele (seudoplástico)	$\tau_{yx} = K \left(-\frac{dVx}{dy} \right)^n$	(1.5)	2	K y n
Bulkley - Herschell	$\tau_{yx} = \tau_0 + K \left(-\frac{dVx}{dy} \right)^n$	(1.6)	3	τ_0 , n y K

Ley de Newton de la viscosidad

Donde en la ecuación (1.3):

μ es la viscosidad

$\left(-\frac{dVx}{dy} \right)$ es el gradiente de velocidad.

Modelo de Bingham:

Donde en la ecuación (1.4):

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

$$\gamma = \left(-\frac{dVx}{dy} \right)$$

γ es la velocidad de deformación (gradiente de velocidad)

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 (1.4) se transforma en la Ley de Newton, donde $\eta_p = \mu$.

Modelo de Oswald de Waele:

La ecuación (1.5) 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, donde $K = \mu$.

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 Bulkley - Herschell:

La ecuación (1.6) se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales.

τ_0 , K y n tienen los mismos significados descritos en los dos modelos anteriores (1.4) y (1.6).

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Estas curvas se denominan curvas de flujo (Figura 1.3).

La curva de flujo es la herramienta básica para el análisis reológico de un sistema de flujo, y de un fluido. Por su forma es posible identificar la naturaleza reológica del material, así como determinar la viscosidad y las características reológicas fundamentales (según el modelo que se utilice) bajo diferentes condiciones de trabajo u operación.

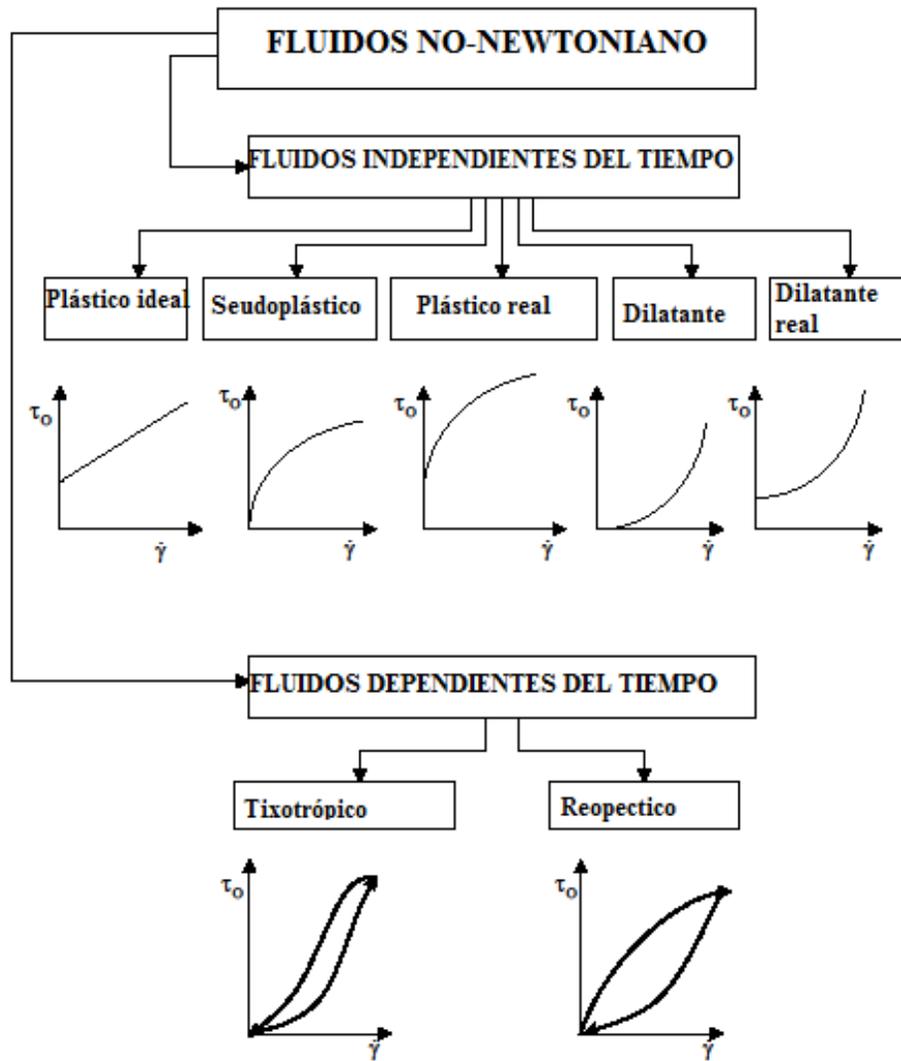


Figura 1.3. Curvas de flujo típica (Paterson & Cooke, 1999)

La dispersión de sólidos en un líquido exhibe características de flujo newtoniano o no newtoniano, según las interacciones físicas y químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido así como de la naturaleza y características de las fases. En la literatura especializada se analizan diversos tipos de interacciones, resumiéndose dentro de tres categorías diferentes (Cheng, 1980):

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

En cada tipo de interacción intervienen una variedad de factores que determinan el comportamiento y las características reológicas de la dispersión. Los factores más importantes son:

1. Las características coloide-químicas de la dispersión (estabilidad), que dependen del pH, de la naturaleza del sólidos y de la superficie de las partículas, y de la composición iónica del medio dispersante.
2. Composición mineralógica.
3. Forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas.
4. Concentración de la fase sólida.
5. Temperatura de la dispersión.

La influencia de cada factor en particular, o de un conjunto de ellos, puede ser muy compleja (Bhattacharya, et al., 1998); (Stickel & Powell, 2005); de ahí la necesidad de especificar claramente bajo qué condiciones se determinan las características reológicas de la suspensión.

Nótese que estos factores tienen relación con las variables que determinan la eficiencia de los sistemas de bombeo tal como se argumentó en el epígrafe 1.5, por lo que se puede entender la estrecha relación de la reología de los hidromezclas lateríticas y la eficiencia de los sistemas de bombeo.

1.7. Factores que influyen sobre las características de las hidromezclas

El comportamiento de dispersiones acuosas coloidales de óxidos inorgánicos no ha dejado de ser un problema importante para la ciencia coloidal moderna, tanto teórica como experimental. Los efectos no hidrodinámicos juegan un papel predominante en el comportamiento reológico, así como en la estabilidad de las suspensiones constituidas por partículas con dimensiones coloidales o cercanas al rango coloidal, como es el caso de las suspensiones lateríticas (Avramidis & Turian, 1991).

Debido a las características complejas de este fluido, sobre todo a las concentraciones requeridas para el proceso productivo que permite separar mediante procesos hidrometalúrgicos el Ni y el Co que contienen (James y Blakey, 2004); (Klein &

Hallbom, 2002), se hace necesario señalar la influencia de los factores antes mencionados sobre las propiedades reológicas de la pulpa:

1.7.1. Composición mineralógica

La composición mineralógica del mineral es de vital importancia para el proceso y complementa la información que ofrece la composición química, ya que, las fases mineralógicas influyen notablemente sobre el comportamiento reológico de la suspensión. El contenido de cada una de ellas en el mineral determina, en gran medida, la estabilidad de las suspensiones, así como los valores del punto de carga cero y del punto isoeléctrico. La forma, tamaño y propiedades superficiales de las partículas están relacionados con las fases mineralógicas presentes en la muestra mineral. (Pérez, et al., 2008).

La composición mineralógica de las fracciones, fundamentalmente las dispersas ($< 37\mu\text{m}$), puede alterar las propiedades reológicas de la suspensión de la pulpa sedimentada (Puchol, 1984). En ocasiones, para simplificar el estudio de las lateritas, se emplean suspensiones de goethita pura, por ser la fase mineralógica mayoritaria en su composición (Blakey & James, 2003).

1.7.2. Forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas

El tamaño de partículas es un factor muy importante en el comportamiento reológico de las suspensiones, probablemente por su contribución a las fuerzas de Van der Waals (Cerpa, et al., 1996). Dada la composición granulométrica de las suspensiones de mineral laterítico, éstas deben analizarse como sistemas coloidales que exhiben características reológicas específicas distintas a las de las sustancias de dispersión gruesa.

Las pulpas preparadas con partículas relativamente grandes ($120\ \mu\text{m}$) no logran estructurarse y muestran un comportamiento newtoniano; en cambio, las que están constituidas por partículas pequeñas (inferiores a $50\ \mu\text{m}$), forman una estructura que le comunican propiedades plásticas y pueden ajustarse al modelo de Bingham. Se

comprueba así que la plasticidad de las pulpas se debe a la presencia de partículas coloidales y, en particular, a sus propiedades superficiales (Pérez, 2004).

1.7.3. Efecto del contenido de sólidos

Las suspensiones diluidas generalmente exhiben un comportamiento newtoniano como consecuencia de la poca interacción entre las partículas, pues prevalecen las fuerzas de repulsión; sin embargo, en las suspensiones concentradas, las partículas se encuentran cerca unas de otras, prevalecen las fuerzas de Van der Waals, que contribuyen a la floculación y formación de estructuras, dando lugar a un comportamiento no newtoniano.

Se ha comprobado, teórica y prácticamente, que el contenido de sólidos influye grandemente sobre la viscosidad de las suspensiones acuosas de laterita, las cuales presentan un comportamiento reológico fuertemente no newtoniano, que se describe por el modelo de Bulkley-Herschel, a concentraciones entre un 25 y un 47 % de sólidos y temperatura ambiente (Avramidis & Turian, 1991); (Garcell, 1991); (Cerpa, et al., 1996); (Pérez, 2004); (Pérez, et al., 2008).

1.8. Modelos reológicos de las hidromezclas lateríticas.

El estudio de la literatura sobre el hidrot transporte evidencia la ausencia de una teoría y un modelo único que explique la estructura del flujo de una pulpa viscoso-plástica. La reología de las pulpas lateríticas es un tema muy discutido. Estudios realizados en pulpas lateríticas han permitido determinar que para concentraciones inferiores al 18 % en peso de sólidos las curvas de flujo prácticamente son independientes de su composición mineralógica y exhiben un comportamiento seudoplástico. Sin embargo, para concentraciones de alrededor de 22 hasta 45 % en peso de sólidos la viscosidad aumenta dependiendo cada vez más de la mineralogía y el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo de Bingham, en algunos casos, o al de Bulkley-Herschel, en otros (Skelland, 1970); (Cheng, 1980); (Garcell et al, 1988); (Avramidis & Turian, 1991); (Cerpa & Garcell, 1998); (Garcell et al., 1998); (Cerpa et al., 1999); (Garcell, 2001); (Izquierdo et al., 2001); (Pérez, 2004); (Pérez et al., 2010),

las suspensiones lateríticas se comportan como flujos no newtonianos con plasticidad, debido a su carácter de materiales polidispersos, con un predominio de granulometría fina (partículas menores de 0,045 mm).

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática, de vital importancia, en el desarrollo de la investigación del flujo de fluidos. En los trabajos de (De la Paz, 2002), (Caldíño y Salgado, 2004), presentan una metodología para obtener funciones reológicas en forma simplificada, de utilidad para ajustar modelos de cálculo para fluidos con altas concentraciones. En los mismos se observó y evaluó la influencia del componente sólidos en el valor de la viscosidad, aunque en ambos casos no se tuvieron en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas, como el pH y diámetro medio de las partículas, lo que limita la aplicación de la metodología.

Los resultados obtenidos por diferentes investigaciones (Branco y Gasparetto, 2003); (Da Silva *et al.*, 2005); (Dak *et al.*, 2007); (Sánchez *et al.*, 2008); (Andrade *et al.*, 2009); (Vandresen *et al.*, 2009); (Trapeznikov, 2011). Se señala como principal limitación de estos trabajos, no tener en cuenta el comportamiento reológico del fluido para variaciones de la temperatura; siendo esta variable de gran influencia en la estructura y propiedades de la materia.

Khatib (2006) propone un modelo matemático que correlaciona la viscosidad de fluidos pseudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo, ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental, nombrado como constante de tiempo de deformación; este modelo se ha relacionado con la viscosidad del fluido cuando el gradiente de velocidad tiende desde cero hasta infinito.

El desconocimiento que se tenga sobre el comportamiento reológico del material que se transportan en un proceso puede provocar la selección y explotación inadecuadas de bombas. Cuando se tiene en cuenta este comportamiento las bombas requieren la potencia que garantiza la presión y el flujo solicitado, tal como ilustran los resultados obtenidos por (Hernández, 2015) al cambiar el contenido del porcentaje másico de sólidos en la pulpa.

Algunos trabajos relacionados con este tipo de fluido hacen referencia al transporte por tubería como (Ivenski, 1957); (Iakovlev y Dalkov, 1961); (Pérez, 1974) donde sobre la base de las investigaciones teóricas y experimentales, determinaron los parámetros y los regímenes racionales de hidrot transporte de diferentes minerales sin determinar las relaciones de las propiedades reológicas

En (Izquierdo, 1989); (Izquierdo *et al.*, 2001) se obtiene, gráfica y analíticamente, la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (λ) y el número generalizado de Reynolds (Re). El análisis se realiza determinándose los diferentes regímenes de transporte de las tuberías. De forma similar, (Suárez, 1998) hace referencia a la elaboración del modelo físico-matemático del movimiento de suspensiones de mineral por tuberías, basado en los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas y la determinación de las pérdidas específicas de presión para el movimiento de las hidromezclas de mineral en régimen turbulento.

(Turro, 2002) a partir del modelo matemático, propone un sistema de correlaciones para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrot transporte de colas, que provienen de los resultados de la caracterización realizada al fluido para diferentes temperaturas. En este trabajo no se tiene en cuenta el estado no estacionario del proceso, al no contemplar en el modelo el gradiente de temperatura durante el recorrido del fluido en las tuberías.

Muchos de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas se limitan al análisis del comportamiento de las tuberías, sin embargo, no existen resultados que permitan determinar la influencia de estas propiedades en la característica operacional de sistemas de bombeo de hidromezclas lateríticas.

Se destacan los resultados obtenidos por (Pérez, 2010) y (Hernández, 2017) al obtener los modelos matemáticos que correlacionan los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas a temperatura ambiente, los resultados obtenidos se ajustan a la pulpa cruda a temperatura ambiente de 28 C°, y a la pulpa precalentada que alcanza valores de temperatura superiores a 82 C°.

1.8.1. Influencia de las propiedades reológicas de las hidromezclas lateríticas en el diseño de sus sistemas de bombeo

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de bombas, se han reportado numerosos trabajos que han colaborado en el desarrollo de esta esfera de la ciencia. Según lo planteado por (Turiño, 1996) no existe una teoría que permita predecir el comportamiento exacto de una bomba cuando manipula un fluido viscoso. El método más simple para determinar los parámetros de funcionamiento (carga, flujo, potencia y eficiencia) y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cada fluido, obtenidos por vía experimental.

(Roque *et al.*, 1989) desarrolló investigaciones experimentales en relación con el bombeo de soluciones azucaradas de naturaleza no newtonianas y propuso coeficientes de corrección que permiten pronosticar la curva característica de estos equipos de bombeo en función de las propiedades reológicas de los fluidos ensayados.

(Pedroso *et al.*, 2000), sobre la base del modelo de Otswald de Waele, obtuvieron la expresión para el cálculo de la velocidad media de transporte de un fluido y los gradientes de velocidad a que son transportadas las mieles y meladuras en un conducto, que permitieron obtener el perfil universal de distribución de la velocidad a través de la sección de un conducto circular, considerando el valor del índice de flujo.

Para tener en cuenta en este modelo matemático el efecto de las propiedades reológicas de los fluidos de naturaleza newtoniana, se deben obtener las ecuaciones de los coeficientes de corrección a partir de los resultados experimentales publicados por el (Instituto de Hidráulica Norteamericano, 1975) en su Carta de Corrección (Anexo 3). Esta información tiene la limitante de que la corrección en la carga de la bomba no es continua en todo el rango de flujos que puede entregar un tipo determinado de bomba centrífuga, ya que se imponen curvas de coeficientes de corrección de la carga (CH) al 60, 80, 100 y 120 % en relación al flujo de diseño. Los coeficientes de corrección del flujo (CQ) y de la eficiencia (Ce) se encuentran referidos a cualquier capacidad de la

bomba, desde cero hasta un valor máximo que depende del diseño de la bomba centrífuga en cuestión.

(Turiño, 1996) plantea que aplicando un programa computacional de regresión lineal múltiple a una gama de más de 1 100 observaciones, obtenidas en todo el rango de valores de carga H (en pies), flujo de diseño, Qd (en gpm) y viscosidad cinemática ν (en centistokes) de la Carta de Corrección, el autor determinó las ecuaciones de regresión que permiten obtener un único factor de corrección de la carga para el rango comprendido entre el 60 y el 120 % en relación con la capacidad de la bomba. Estas ecuaciones son:

$$CH = X_o + X_1R_1 + X_2R_1^2 + X_3R + X_4RR1 + X_5RR1^2 + X_6RR1^2 + X_7(RR1)^2 \quad (1.11)$$

$$R = 19 + 10,634\ln(\nu) - 2,473\ln(H) - 5,173\ln\left(\frac{Qd}{100}\right) \quad (1.12)$$

$$R_1 = \frac{Q}{Qd} \quad (1.13)$$

donde:

Q : es la capacidad para la que se desean obtener los coeficientes de corrección (gpm),

$$X_o = 100$$

$$X_4 = 1,161$$

$$X_1 = -17,464$$

$$X_5 = -6,417 \cdot 10^{-4}$$

$$X_2 = 9,61$$

$$X_6 = -1,753 \cdot 10^{-2}$$

$$X_3 = 8,949 \cdot 10^{-3}$$

$$X_7 = 7,656 \cdot 10^{-3}$$

Para los coeficientes de corrección del flujo (CQ) y la eficiencia (Ce), las ecuaciones de regresión obtenidas son:

$$CQ = X_8 + X_9R + X_{10}R^2 \quad (1.14)$$

$$Ce = X_{11} + X_{12}R + X_{13}R^2 \quad (1.15)$$

donde:

$$X_8 = 80,33$$

$$X_{11} = 91,796$$

$$X_9 = 1,254$$

$$X_{12} = 0,544$$

$$X_{10} = 1,866 \cdot 10^{-2}$$

$$X_{13} = 1,976 \cdot 10^{-2}$$

Las correcciones para la altura de elevación y el caudal se pueden determinar de forma aproximada para la clase y consistencia de las pastas papeleras, a partir de los resultados

publicados en (Warring, 1977), en función de la concentración de la pulpa (Cc). Para el rango permisible de bombeo con equipos centrífugos (0 al 6 % de concentración de la pulpa), estas ecuaciones son:

-Pastas mecánicas y regeneradas:

$$CH = CQ = 63,68 + 24,16^{-2} R_1 + 17,06Cc - 7,069 \cdot 10^{-5} R_1^2 - 7,348 \cdot 10^{-2} R_1 Cc - 1,885 Cc^2 \quad (1.16)$$

-Pastas químicas:

$$CH = CQ = 59,65 + 24,166^{-2} R_1 + 19,25Cc - 1,413 \cdot 10^{-5} R_1^2 - 10,18 \cdot 10^{-2} R_1 Cc - 2,15 Cc^2 \quad (1.17)$$

Los coeficientes de corrección para soluciones azucaradas de naturaleza no newtoniana obtenidos experimentalmente por Roque (1989) están definidos por:

$$CH = \frac{(a_o + c_o R_1)}{(1 + b_o R_1)} + \left(a_1 b_1 + \frac{c_1}{R_1} \right) \ln(\text{Re}^*) + \left(a_2 b_2 R_1 + \frac{c_2}{R_1} \right) (\ln(\text{Re}^*))^2 \quad (1.18)$$

$$CQ = CH^{3/2} \quad (1.19)$$

donde:

$a_o = -34,311 \cdot 10^{-3}$	$a_1 = 1,75$	$a_2 = -74,96 \cdot 10^{-3}$
$b_o = 98,37 \cdot 10^{-2}$	$b_1 = 76,09 \cdot 10^{-4}$	$b_2 = -27,94 \cdot 10^{-5}$
$c_o = -25,33 \cdot 10^{-2}$	$c_1 = -24,02$	$c_2 = 1,01$

El punto de operación de los sistemas de bombeo queda establecido cuando la energía que la bomba le imparte al fluido (carga de la bomba, H) se iguala a la energía necesaria (Hnec) para que el líquido se transporte por el sistema de tuberías, para un mismo flujo o caudal (Q) cuando supera las resistencias hidráulicas que el sistema de tuberías le impone, así como los niveles energéticos de los depósitos de succión y descarga.

Las pérdidas hidráulicas se pueden representar por el modelo $h = KQ^m$ en el cual la constante hidráulica K y el índice m dependen de la naturaleza del fluido y del régimen de circulación establecido (laminar o turbulento).

En las referencias bibliográficas analizadas se aprecia la tendencia de analizar la operación de los sistemas de bombes mediante modelos matemáticos, los cuales presentan la limitante de no considerar los fluidos no newtonianos que son transportados en la industria del níquel con elevadas concentraciones de sólidos y altas temperaturas.

Conclusiones

1. El Proceso de Lixiviación Ácida a Presión (LAP) está caracterizado por el transporte de fluidos no newtoniano donde existe una estrecha relación entre los factores reológicos como la concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de las partículas, el pH, la composición mineralógica y la temperatura de la suspensión. No se dispone de modelos matemáticos que relacionen integralmente estos factores con la eficiencia de los sistemas de bombeo del PLAP.
2. Los sistemas de bombeo de pulpas cruda representa el 98,09 % de la potencia instalada del total de los accionamientos de las plantas de Espesadores, lo que ocasiona un alto grado de incidencia en la eficiencia energética.
3. En las referencias bibliográficas consultadas no existe evidencia de la obtención de coeficientes de corrección de la carga y la capacidad de las bombas para fluidos no newtonianos de hidromezclas lateríticas, lo que ocasiona el inconveniente de asumir que la pulpa posee un comportamiento newtoniano que conlleva a una incorrecta selección y explotación de los sistemas de bombeos.

CAPÍTULO 2. MODELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL SISTEMAS DE BOMBEO DE HIDROMEZCLAS DE LAS PULPAS LATERÍTICAS CRUDA.

2.1. Introducción.

Para el desarrollo de este capítulo se ha requerido de trabajo de laboratorio y procesamiento matemático de los valores experimentales obtenidos así como de un gran volumen de datos históricos del proceso de espesamiento de pulpas que permiten la caracterización de las principales suspensiones minerales que se manipulan en esta etapa del proceso productivo. Asimismo se han desarrollado modelos matemáticos del consumo energético del objeto de investigación y métodos matemáticos de optimización combinatoria para obtener los parámetros de operación eficiente de estos sistemas de bombeo.

2.2. Caracterización operacional del objeto de estudio

Desde el punto de vista operacional básico, el objeto de investigación puede describirse tal como se muestra en la Figura 2.1.

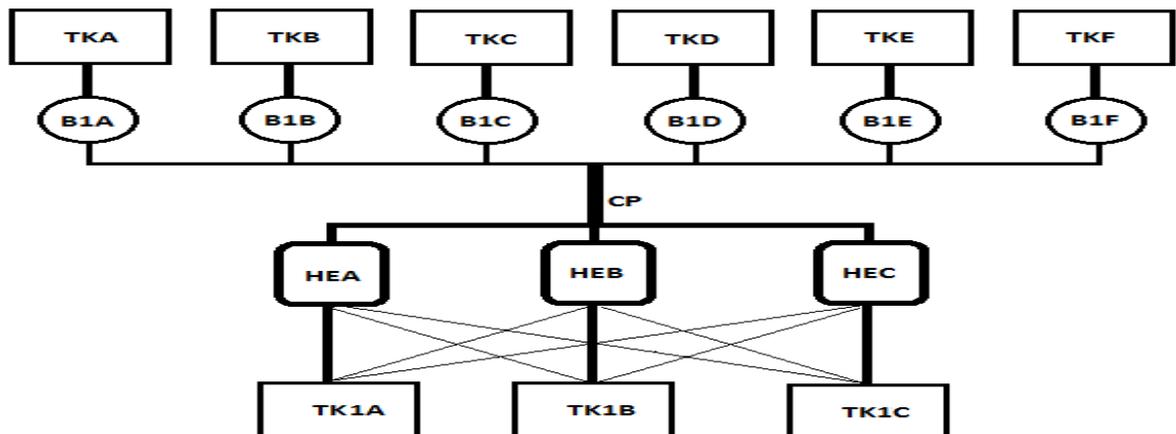


Figura 2.1: Sistemas de bombeos de hidromezclas lateríticas cruda en el proceso de lixiviación ácida.

Donde se precisan sus elementos principales:

- A. Los tanques de espesadores TKA,..., TKF. Se conoce que para cada tanque TK_i se tiene su volumen V_i y la correspondiente concentración de sólidos a su salida P_i (i=A,..., F). La temperatura T₀ en estos tanques es la del ambiente.

B. Las bombas centrífugas B1A,..., B1F. Para cada una de ellas se configuran los flujos de trabajo F_j ($j=A,...,F$) en virtud de lograr en la tubería concentradora CP el flujo total solicitado FT y una concentración PTo (que se conoce que debe estar entre 47% y 48%).

Entonces es imprescindible caracterizar las propiedades reológicas de la pulpa que como ya se ha argumentado inciden de manera esencial en la eficacia y eficiencia de su bombeo.

Se seleccionó para el estudio de la eficiencia energética el sistema de bombeo que va desde los espesadores hasta los tanques TK1A, TK1B y TK1C donde intervienen las bombas B1i ($i=A,..., F$).

2.3. Propiedades reológicas de las hidromezclas de las pulpas cruda a partir de sus propiedades físicas

La influencia de las propiedades superficiales sobre la reología es un fenómeno de carácter universal, donde diferentes factores pueden influir en su comportamiento. En el proceso de explotación de los yacimientos lateríticos, varios factores tienen efecto directo en el comportamiento reológico y en gran medida son aplicados como métodos para mejorar la viscosidad de los mismos. Entre los factores involucrados en el proceso de transporte de hidromezclas que utilizadas en el proceso de Lixiviación Ácida se pueden analizar los efectos de la concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de las partículas, el pH, y la composición mineralógica y temperatura.

Para lograr este conocimiento ha sido necesario utilizar las bases de datos de operación de las Plantas de Espesadores, Casa Bomba, reportadas durante los últimos 5 años, así como los reportes de las características mecánicas y operacionales de las bombas utilizadas en el proceso. Esto obliga a esclarecer la procedencia de los mismos, así como los métodos y normas empleadas por la empresa para obtenerlos.

Manuales de operaciones de las Plantas: son los documentos oficiales de las plantas que establecen los parámetros de operaciones, describen los principales equipos y las principales operaciones. Estos documentos contribuyeron a: la selección de los

parámetros a estudiar; y asumir como referencias los valores de diseño de cada parámetro de interés.

Libros de operaciones de las Plantas: son los documentos normativos que se utilizan para la recolección de incidencias en las operaciones. Se utilizan como referencia para la confección de bases de datos de los procesos, averías y otros datos de interés con fines de mantenimiento, investigativos, etc.

Bases de datos de los parámetros de operación de las plantas: son los documentos donde se recogen el comportamiento diario de los parámetros de operación de las plantas correspondiente a un año natural.

Debe precisarse que en la industria se utiliza para la supervisión del proceso productivo el CitectSCADA, Versión 7.10 Service Pack 3. Este es un Software de Supervisión perteneciente a la compañía Schneider Electric, que permite la supervisión online del proceso industrial.

2.3.1. Factores reológico obtenidos según las normas empresariales

Dentro de los factores que definen las características reológicas de las hidromezclas compuestas por pulpas lateríticas, según Pérez (2010), están:

1. La distribución de tamaños de las partículas
2. Concentración total de sólidos
3. Número de mineral
4. El pH

2.3.1.1. La distribución de tamaños de las partículas

El análisis granulométrico de las suspensiones en la empresa se realiza a través del tamizado convencional, para determinar la granulometría mayor de 0,045 mm (325 mesh); por tamizado vía húmeda, empleando juego de tamices de la serie ASTM con las siguientes aberturas: 0,85; 0,3; 0,15; 0,06; 0,09; 0,075 y 0,045 mm y para partículas menores de 0,045 mm se emplea analizador de tamaños del tipo HORIBA LA-910.

La forma y tamaño que alcanzan las partículas agregadas y los conglomerados de la fase sólida de las suspensiones lateríticas, que se manipulan en el proceso de lixiviación

ácida a presión (LAP), se deben a la combinación de los procesos de disolución y de aglomeración, ya que no son sometidas a operaciones de reducción de tamaño.

2.3.1.2. Concentración total de sólidos

El contenido de sólidos de la pulpa, expresado en porciento en peso, es una de las variables de mayor control, la cual es supervisada cada una hora en los puntos de toma de muestras de las plantas, pues de ella depende la eficiencia del proceso de extracción, así como el consumo de ácido requerido para ello. En las plantas este parámetro se determina mediante la norma NEIB 050302 y a través de la Balanza Secadora RADWAG, MAX 50 SX/1.

Para definir los contenidos de sólidos, se procesaron los datos de operación de las Plantas de Espesadores, como resultado de este análisis se determinó que el contenido de sólidos de la pulpa cruda oscila en 36 - 46 %, de sólidos, aunque el valor de mayor frecuencia se encuentra alrededor del 43 %, lo que demuestra problemas operativos al no alcanzar el valor deseado por diseño de 48% de contenidos de sólidos a la descarga de los sedimentadores, que debe enviarse a Lixiviación, ver tabla 2.1.

Tabla 2.1. Histórico del Concentración total de sólidos pulpa cruda de los últimos años

Mínimo	36,97	Mayor que 45	99	12,39 %
Máximo	46,85	Menor que 40	27	3,38 %
Promedio	43,16678473	Mayor 43	420	52,57 %
DE	1,6239249			
Coef Var.	3,76 %			

2.3.1.3. Número de mineral

El número de mineral, se calcula a partir del conocimiento de la composición química de la pulpa laterítica. Esta composición se obtiene mediante análisis que se realizan en laboratorios de la empresa Pedro Sotto Alba, por la técnica de fluorescencia de rayos X. Los compósitos de materia prima mineral que ingresan al proceso LAP poseen contenidos de Fe en el orden de 35,5 a 53,4 %, incluyendo otros componentes como el Al (de 2,23 a 5,99 %) y el Mg (de 0,1 a 3,3 %), esto confirman la naturaleza ferruginosa

de las muestras de laterita característica típica, en las que abundan los óxidos de hierro (Almaguer, 1996; Rojas, Beyris, 1994; Agyei, 2006).

Según Pérez (2010) el número de mineral determinado por la ecuación 2.1, caracteriza el comportamiento de la pulpa en la sedimentación. Se ha comprobado que cuando $7 < N_{\text{mineral}} < 14$ la pulpa tiene buena sedimentación en el proceso que se estudia.

$$N_{\text{Mineral}} = \frac{\%Mg + \%SiO_2}{\%Co + \%Mn} \quad (2.1)$$

Si se analiza el comportamiento histórico se evidencia que este valor ha estado en 51,68 % del histórico lo que evidencia los problemas de bajo porcentaje de sólidos de la pulpa, ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Datos históricos del Número de mineral

Mínimo	1,60264253	Mayor que 4	2791	99,96 %
Máximo	12,89156627	Menor que 12	2789	99,89 %
Promedio	7,190400773	Entre 7 y 14	1443	51,68 %
DE	1,294094611			
Coef Var.	18,00 %			

2.3.1.4. El pH

Aunque en el proceso lo que se controla es el pH en el agua de reboso de los espesadores de pulpa, se han realizado estudio el efecto de la diferencia del Punto de carga cero (p.c.c-pH), porque se ha determinado que el p.c.c de las suspensiones industriales de laterita se encuentra en valores de pH entre 5,25 y 6,75. Por lo tanto, hay suspensiones con valores de pH próximos a sus p.c.c y otras alejadas de él. Se toman de referencia los resultados obtenidos por (Pérez; 2010) en las cuales se aprecian los valores de los puntos de carga cero en los valores de densidad de carga $\sigma_0=0$, para valores del pH < p.c.c, la carga neta superficial del sólidos es positiva, y para pH > p.c.c, es negativa, los resultados de los parámetros, calculados a partir de las mediciones experimentales, que le permitieron obtener los valores de σ_0 vs pH y demostrar que a medida que aumenta la diferencia de pH disminuye la viscosidad aparente.

2.4. El efecto de la pulpa en el funcionamiento de la bomba.

Cuando las bombas centrífugas son usadas en el manejo de pulpas, es práctico estándar publicar las curvas de funcionamiento de la bomba basado en el funcionamiento del agua limpia. Por lo tanto, para predecir el funcionamiento de las bombas que manejan las mezclas de diversas características, los factores de corrección son aplicados.

Cuando se manejan pulpas, el funcionamiento de la bomba es principalmente afectado por el diámetro de la partícula del sólido, gravedad específica y concentración de sólido. Las partículas muy finas en la pulpa pueden estar en suspensión y causar esto un comportamiento como un líquido Newtoniano homogéneo con una viscosidad aparente. Las pulpas con sólidos muy fino en suspensión (usualmente menor que 100 micrones) conservaría las características como líquido a concentraciones volumétricas muy cerca al punto límite, y los límites son relacionados solo a los efectos de viscosidad alta. La figura 2.2(A) muestra las características de la bomba de pulpa en suspensión típica.

Donde existe una diferencia de la densidad entre el líquido transportador y las partículas sólidas, las partículas tenderán a sedimentar. Usualmente las pulpas con una distribución de partículas más grandes estaría sedimentada, y las partículas y el líquido exhibirían sus mismas características. Como el líquido pasa sobre las partículas, la energía es disipada debido a la fricción del líquido que reduce la carga y eficiencia de la bomba.

Las pruebas actuales indican que para propósitos prácticos, la cantidad de la disminución de la carga sería igual que la disminución de la eficiencia de la bomba. La característica de funcionamiento de una bomba típica para mezcla de pulpa con partículas gruesas se muestra en la figura 2.2(B).

Los factores de corrección del funcionamiento para pulpas son usualmente basados en datos de pruebas previos. En ausencia de tales datos, la referencia se debe hacer al fabricante de la bomba (Val S. Lobanoff, 1992).

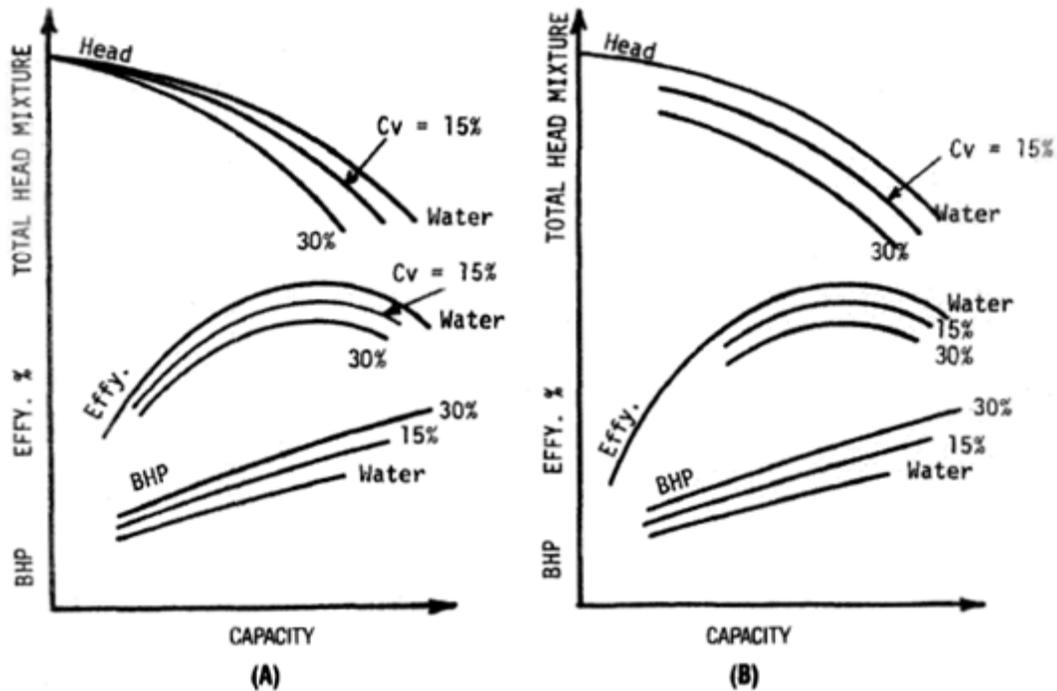


Figura 2.2. (A) Característica de funcionamiento típico de una bomba centrífuga que maneja pulpa no sedimentada; (B) Característica de funcionamiento típico de una bomba centrífuga que maneja pulpa sedimentada. (Val S. Lobanoff, 1992)

2.5. Diseño de experimento para la hidromezcla laterítica

Con el análisis realizado en el epígrafe 2.3.1., los principales factores que determinan la estructuración de las suspensiones de laterita y, por lo tanto, su comportamiento reológico son: el contenido de sólidos, la distribución granulométrica y la composición química del mineral, condicionadas por su composición mineralógica, así como el valor del pH de la suspensión, que puede estar cercano o no a su punto de carga cero (p.c.c) y la temperatura (Garcell L., 1991); (Battacharya I. *et al.*, 1998); (Cerpa A. *et al.*, 2003); (Pérez L., 2004); (Pérez L. *et al.*, 2008). Ante el inconveniente de no conocer cuáles podrían ser las interacciones entre todos estos factores se decidió llevar a cabo un diseño experimental factorial 2^k , donde, k corresponde al número de factores analizados (Chacin F., 2000); (Legrá A. A., O. R. Silva, 2010).

2.5.1 Definición de variables para el diseño

En el diseño de experimentos se tuvieron en cuenta variables que se controlan en el proceso, tales como: la composición química, el contenido de sólidos, granulometría y temperatura; por lo que fue necesario tener en cuenta el comportamiento histórico, para definir el dominio de cada una de ellas, así como varios parámetros estadísticos de interés.

Se determinó que al aumentar en el valor de los parámetros, ocasiona un aumento de la viscosidad de la pulpa, un aumento en el contenido de sólidos ocasiona un aumento en la viscosidad aparente de la pulpa, un incremento en el valor de la diferencia entre el pH de la pulpa y su correspondiente punto de carga cero; a medida que aumenta la diferencia de pH disminuye la viscosidad aparente de la pulpa, que a medida que aumenta el valor del número de mineral, disminuye la viscosidad de la pulpa.

De acuerdo con los razonamientos que han sido planteados por diferentes autores sobre los factores reológicos que caracterizan las pulpas lateríticas a los que se han hecho referencia, a las limitaciones de los modelos obtenidos por (Pérez, 2010) y por la influencia que tiene en la viscosidad de la pulpa y su incidencia en la operación del sistema de bombeo se seleccionan como variables independientes:

- s : parámetro característico de la granulometría (Coeficiente de Polidispersión).
- %S: contenido de sólidos (porcentaje másico de sólidos en la pulpa).
- T: Temperatura de la pulpa.

Como respuestas los parámetros reológicos:

- μ_a : viscosidad aparente de la suspensión.
- τ_0 : Esfuerzo cortante inicial.
- K: índice de consistencia.
- n: índice de flujo.

A las muestras seleccionada se le realizaran análisis químico y se tendrá en cuenta el número de mineral (N_{rmin}) para predecir el comportamiento de la pulpa cruda en la sedimentación, se realizará el control del pH del agua de reboso del espesador de pulpa donde sean tomadas las muestras, se decidió no estudiar el efecto de la diferencia (p.c.c-

pH) como variable, porque se ha determinado que el p.c.c de las suspensiones industriales de laterita no tiene una incidencia significativa en la viscosidad.

La granulometría de la pulpa cruda se determina con analizador de tamaños HORIBA LA-910 para conocer el comportamiento de las partículas menores de 0,84 mm (20 mesh).

El contenido de sólidos de la pulpa, expresado en porciento en peso, es una de las variables de mayor control, sobre todo a la salida de los tanques espesadores, pues de ella depende la eficiencia del proceso de extracción, así como el consumo de ácido requerido para ello.

Se seleccionan dos Unidad Demostrativas Productiva (UDP) para el análisis experimental de la pulpa laterítica se tomaron las siguientes muestras:

La Muestra #1 pulpa laterítica a temperatura ambiente extraídas del fondo del Espesadores convencional (TK-1A) donde ocurre el proceso de sedimentación, con un tiempo de duración de 10 a 15 días, debido a la formación de la cama (tiene alrededor de 2000 t) y a las características físico-químicas y reológicas del mineral, donde debe lograrse un contenido de sólidos óptimo en el cono del espesador entre 46 y 48%.

La Muestra # 2 pulpa laterítica a temperatura ambiente extraídas en la líneas de transferencias (508 mm) de la pulpa espesada hacia la Planta de Lixiviación, esta muestra representa el resultado de la pulpa laterítica espesada en los 6 espesadores de la empresa.

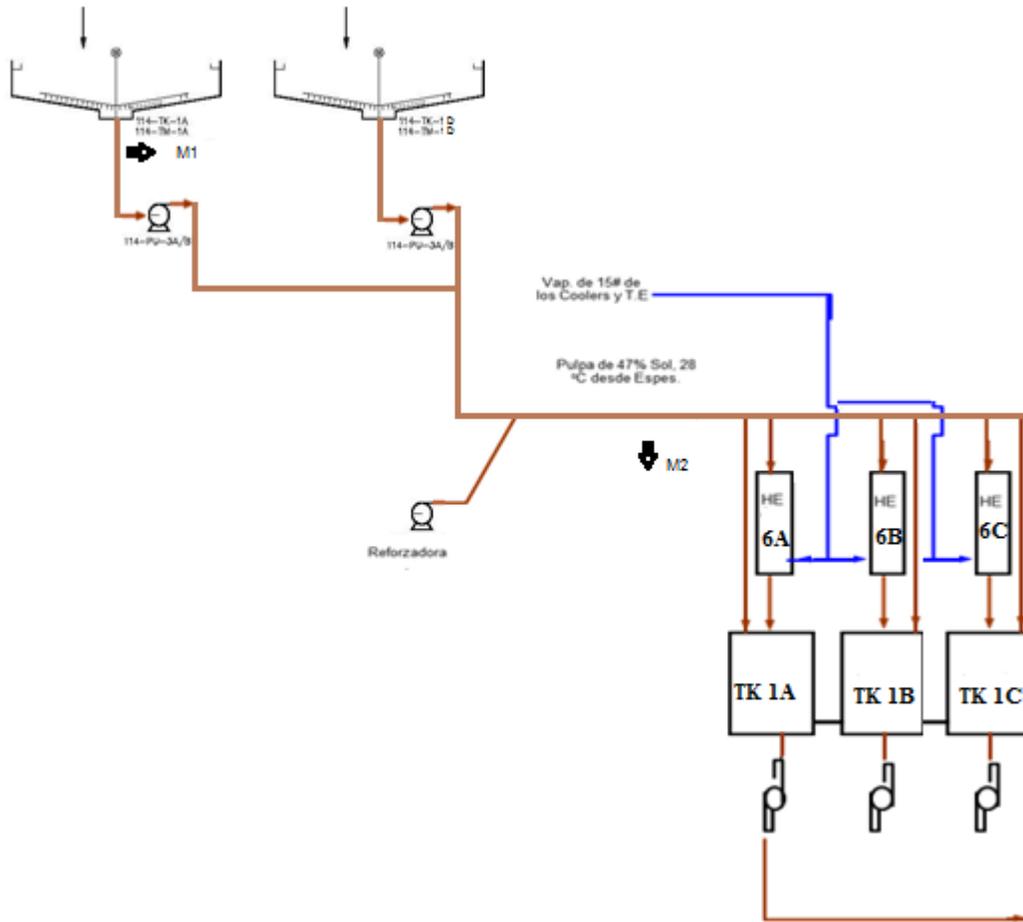


Figura 2.2. Diagrama que representa las tomas de muestras en la UDP.

2.5.2 Planeamiento experimental.

Durante ocho semana alternas cada una hora de 7 am a 4 pm se recogió muestra en los puntos seleccionado para preparar un composito en un recipiente de 20 L. Se prepararon en total cuatro muestras de 200 g con tres réplicas cada una por UDP, contenidas en frascos tapados de 250 mL. Para la dilución de la pulpa inicial se añadió agua y para obtener concentraciones superiores al 40 % de sólidos se dejó sedimentar la pulpa y se le extrajo agua por decantación, según se indica en la tabla 2.3, empleando las ecuaciones que aparecen a continuación:

$$M_s = \%S \cdot M_{susp} \quad (2.2)$$

$$M_{pulp} = \frac{M_s}{0,40} \quad (2.3)$$

$$M_a = M_{susp} - M_{pulp} \quad (2.4)$$

Tabla 2.3. Preparación de las muestras.

Masa de suspensión <i>M_{susp.}</i>		200(g)		
No.	% S	Masa sólidos <i>M_s</i> (g)	Masa pulpa concentrada <i>M_{pulp}</i> (g)	Masa agua añadir <i>M_a</i> (g)
1	35	70	159,3	40,7
2	40	80	182,1	17,9
3	43	86	195,7	4,3
4	45	90	204,8	-4,8

Equipos y utensilios.

Equipos:

- Analizador de tamaños del tipo HORIBA LA-910.
- Reómetro rotacional Rheotest 2 de fabricación alemana.
- Balanza técnica digital.
- Balanza de sólidos por secado.
- Agitador mecánico con impelente metálico.

Utensilios:

- Probetas: 100 y 1000 mL.
- Beaker de 100 mL.
- Recipientes de 5 L y 20 L
- Jeringuillas de 20 mL.
- Frascos de 250 mL.

Determinaciones reológicas

Las mediciones de viscosidad se realizaron mediante ensayos reológicos, empleando un reómetro Rheotest II de fabricación alemana. Este es un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos. El principio de medición de este equipo consiste en la rotación sobre el eje del cilindro interior o rotor, el cual gira a una velocidad angular constante,

mientras que el otro cilindro (vaso) permanece estático. Mediante un selector de velocidades se logra el cambio de la velocidad angular (ω) del cilindro rotor. Cada valor de velocidad angular da un valor de velocidad de deformación (γ). En este equipo puede apreciarse el valor del esfuerzo cortante de acuerdo al torque a que se somete el rotor, brindando lecturas en una escala graduada en unidades Skt (α), las cuales son proporcionales al esfuerzo cortante (τ). Cuando se grafica τ vs. γ , se obtienen las curvas de flujo.

Se toman como valores de (γ) los de la variable Dr que da el fabricante del equipo. Los valores de τ se determinan mediante la ecuación:

$$\tau = Z_i \cdot \alpha \quad (2.5)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

Z_i : Coeficiente de torsión elástica. Constante del cilindro rotor (Pa/Skt)

α : Lectura del instrumento. Resulta proporcional a la resistencia que ofrece el fluido al giro del rotor (Skt).

De acuerdo a las especificidades de las suspensiones de lateritas utilizadas se usó el cilindro del tipo S₂.

Tabla. 2.4 Constantes del cilindro utilizado

Cilindros	Escala	Z (Pa/Skt)
S ₂	I	0,9353
	II	9,5113

2.6. Obtención experimental de los parámetros operacionales de la bomba centrífuga.

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó en la estación experimental de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Ver Anexo #4 y Anexo #5.

De la muestra #2 obtenida de la línea de transferencia, se trasladó pulpa mineral para la estación experimental y se realizaron varias corridas con agua y con pulpa mineral a 41,93% de sólidos y a 42,36% de sólidos.

La bomba para la prueba fue probada a varios números de revoluciones y regulando una válvula de estrangulación para variar el flujo.

Instrumentación utilizada para la medición y toma de datos.

La instalación experimental de hidrotransporte cuenta con los instrumentos que se relacionan a continuación:

- Sensores de presión (SITRANSP) de 4... 20 mA.
- Termoresistencia PT-100 (SA TERMIBEL N.V).
- Flujómetro Electromagnético ABB, 4 pulgada de diámetro emplatillados en los extremos.
- Densímetro DT 301 (DensityTransmitter).
- Analizador de red PQM II GE Multilin.

La instalación consta de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos CitectSCADA (figura 2.3).

Datos del Motor-Bomba 1G de arena de la instalación de hidrotransporte del ISMMM.

- Caudal: 160 m³/h
- Altura: 40 m
- Altura neta de succión positiva requerida (NPSH)_r= 5 m
- Eficiencia: 56 %
- Velocidad de rotación 1740 r/min
- Zona de utilización de la Bomba: 80-175 m³/h del caudal.

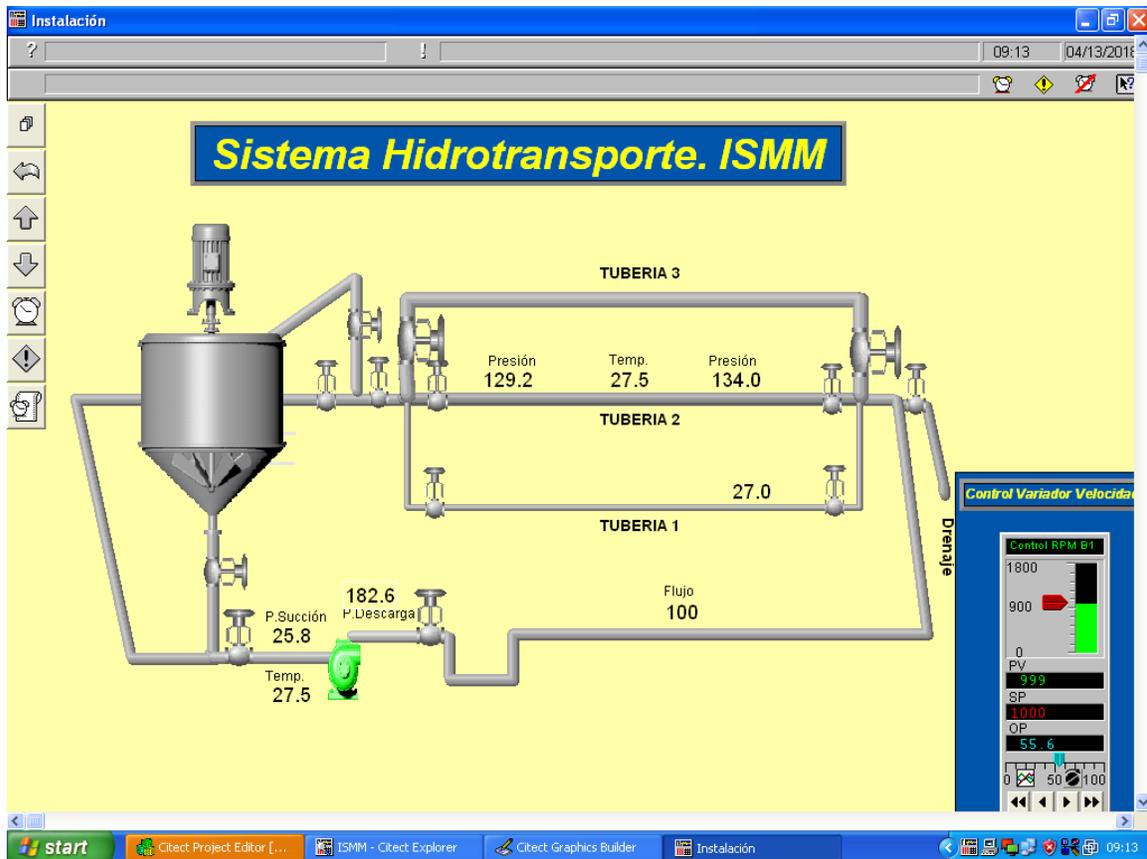


Figura 2.3. Esquema del sistema CitectSCADA para la estación experimental de hidrotransporte del ISMM de Moa.

2.6.1. Procedimiento experimental para la obtención de los parámetros de hidrotransporte.

El procedimiento experimental requiere de varias operaciones de las cuales las tres más importantes son:

- La calibración de los instrumentos
- La determinación de las propiedades del fluido viscoso
- La determinación de las características de la bomba

El propósito de la prueba de la bomba es establecer las características de funcionamiento cuando bombea fluidos de diferentes materiales. Esta característica es expresada trazando en un gráfico la carga, la eficiencia y la potencia contra el flujo. Las características de funcionamiento de la bomba se experimentan como sigue:

- Calentamiento del equipamiento para bombeo y recirculación del fluido por un tiempo de 30 minutos aproximadamente y así obtener una buena homogeneidad de la mezcla.
- Se drenan las válvulas de la parte superior para eliminar el aire del sistema de tubería y evitar errores de medición de los instrumentos.
- Se fija un número de revoluciones con el variador y se comienza a variar el flujo con la válvula de estrangulación comenzando a válvula cerrada (flujo cero).
- Los datos son obtenidos en el sistema SCADA y exportados a una tabla Excel para su posterior procesamiento.
- El procedimiento se repite para los diferentes fluidos experimentados.

2.6.2. Principales variable medidas en la experimentación

En la obtención de los datos durante el experimento se midieron las siguientes variables:

- P_s , presión de succión en la bomba (kPa).
- P_d , presión de descarga de la bomba (kPa).
- Q , caudal (m^3/h).
- Número de revoluciones (r/min).
- P_m , potencia del motor (kW).

2.6.3. Principales fórmulas matemáticas usadas en el experimento.

2.6.3.1. Carga de la bomba.

La energía que adquiere en la bomba cada unidad de peso de líquido, es decir, el incremento de su energía específica, tiene dimensión lineal y, representa la altura que crea la bomba.

$$H_b = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{\alpha_2 \cdot V_2 - \alpha_1 \cdot V_1}{2 \cdot g} \right)$$

El segundo término por lo común es considerablemente menor que el primero e igual a cero, si los diámetros de las tuberías son iguales a la entrada y a la salida la formula anterior queda (Nekrasov, 1968):

$$H_b = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \quad (2.6)$$

Donde, $P_1 = P_s$, $P_2 = P_d$

γ , peso específico del líquido (N/m^3) y se expresa por:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.7)$$

Donde,

ρ , densidad del líquido (kg/m^3)

g , aceleración de la gravedad, con valor $9,81 \text{ m/s}^2$

2.6.3.2.Potencia de la bomba

La potencia de la bomba centrífuga es dada por (Nekrasov, 1968):

$$N_b = \rho \cdot g \cdot H_b \quad (2.8)$$

2.6.3.3.Eficiencia de la bomba

La eficiencia de la bomba es la relación entre la potencia de la bomba y la potencia del motor (Nekrasov, 1968):

$$\eta_b = \frac{N_b}{N_m} \quad (2.9)$$

η_b , rendimiento

2.6.3.4.Costo de bombeo

El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación (Laurencio, 2010):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_b \cdot 10^{-3} \quad (2.10)$$

Donde: C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC(año). N_b - potencia hidráulica; (W). t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC(kWh). t_t - tiempo de trabajo del equipo; (h(año). η_b - rendimiento de la bomba; (adimensional). η_m - rendimiento del motor eléctrico; (adimensional).

2.6.3.5. Obtención de los coeficientes del modelo matemático de la operación del equipo de bombeo.

A partir de la información suministrada por el fabricante del equipo de bombeo sobre la característica operacional de carga (H)-capacidad (Q), se procede al ajuste de dicha curva característica según una ecuación parabólica para obtener los coeficientes a, b y c de la ecuación (2.11)

$$H = a \left(\frac{n}{n_1} \right)^2 \left(\frac{D_2}{D_{21}} \right)^2 CH + b \left(\frac{n}{n_1} \right) \frac{CH}{CQ} Q - c \left(\frac{D_{21}}{D_2} \right)^2 \frac{CH}{CQ^2} Q^2 \quad (2.11)$$

Si el fluido a transportar es newtoniano y posee a la temperatura de bombeo una viscosidad mayor o igual a 4,3 centistokes, los coeficientes de corrección de la carga (CH) y del flujo (CQ) pueden calcularse por las ecuaciones (1.11) y (1.14) respectivamente.

Si el fluido es una solución azucarada de naturaleza no newtoniana los coeficientes de corrección se determinan por las ecuaciones (1.18), (1.19) y si se trata de una pasta papelera por la ecuación (1.17).

Para fluidos no newtonianos, de los que no se dispongan coeficientes de corrección, se debe emplear la característica real brindada por el fabricante o realizar una determinación experimental de dicha curva en un banco de ensayos de bombas. En ambos casos al ajustar la curva a una ecuación parabólica se obtienen los coeficientes a, b y c a utilizar en la ecuación (2.11) con la condición de que tanto CH como CQ sean iguales a la unidad.

Diversos autores como (Stepanoff, 1959; Bienvenido, 1973; Talwar, 1983; Walton, 1986;) brindan un modelo sencillo expresado a través de la ecuación (2.12) para describir la característica operacional de carga-capacidad de las bombas centrífugas de diseño radial. Las constantes a, b y c de este modelo deben obtenerse a partir de un

ajuste de las curvas características que brinda el fabricante de estos equipos. Generalmente esta información, publicada en catálogos comerciales (Sihi, 1995), es para agua limpia a condiciones de presión y temperatura normales, así como para un diámetro exterior y velocidad de giro constantes. Por lo que dicho modelo no contempla la operación a otras velocidades de giro y diámetro exterior del impelente ni la aplicación de estos equipos en el bombeo de fluidos viscosos.

$$H = a + b \cdot Q - c \cdot Q^2 \quad (2.12)$$

Donde a, b y c son coeficientes que se pueden obtener de análisis de la curva característica suministrada por el fabricante.

(Santos y Martín, 1999) a partir de un análisis estadístico de la forma de la característica de trabajo de un equipo de bombeo de tipo centrífugo, obtiene modelos que recalculan los coeficientes a, b y c de la ecuación (2.12) con la velocidad específica con un nivel de confianza de un 95 %. Donde.

$$a = 0,875 \cdot H_D + 0,002396 \cdot H_D \cdot n_e \quad (2.13)$$

$$b = 0,748 \cdot \frac{N_D}{Q_D} + 0,00315 \cdot \frac{N_D}{Q_D} \cdot n_e \quad (2.14)$$

$$c = 0,2878 \cdot \frac{H_D}{Q_D^2} \quad (2.15)$$

n_e : Velocidad específica, SI. Q_D : Caudal de diseño. H_D : Altura de diseño, N_D : Potencia de diseño de la bomba.

Las características de operación de carga que brindan los fabricantes relacionados a bombas centrifugas, generalmente es para agua limpia y a condiciones de presión y temperaturas normales, velocidad de giro y diámetro exterior constante (Turiño, 1996; Turro, 2002). Dicho modelo no contempla la operación a otras velocidades de giro, diámetro exterior del impelente, ni la aplicación de estos equipos en el bombeo de fluidos no newtonianos.

Mediante la sustitución de las leyes de semejanza (Lorenzo, 1990) en el modelo de la característica de la bomba, se ha propuesto la siguiente relación (Turiño, 1996).

$$H = a \cdot \left(\frac{n}{n_1} \right)^2 + b \cdot \left(\frac{n}{n_1} \right) \cdot Q - c \cdot Q^2 \quad (2.16)$$

Al obtener los coeficientes de corrección de carga y capacidad de las bombas centrífugas para fluidos viscosos, es posible corregir la característica operacional de estos equipos mediante las conocidas relaciones siguientes.

$$\frac{H_{EXP}}{H_{agua}} = C_H \quad (2.17)$$

$$\frac{Q_{EXP}}{Q_{agua}} = C_Q \quad (2.18)$$

Sustituyendo estas expresiones en la de semejanza ecuación (2.16) se obtiene.

$$H = a \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \cdot C_H \pm b \cdot \left(\frac{n}{n_1}\right) \cdot \frac{C_H}{C_Q} \cdot Q - c \cdot \frac{C_H}{C_Q^2} \cdot Q^2 \quad (2.19)$$

Para las condiciones donde solo se cambia el tipo de fluido la expresión quedaría de la siguiente forma.

$$H = a \cdot C_H + b \cdot \frac{C_H}{C_Q} \cdot Q - c \cdot \frac{C_H}{C_Q^2} \cdot Q^2 \quad (2.20)$$

2.7. Diseño del experimento para determinar las características de funcionamiento de la bomba

Las situaciones en las que se puede aplicar el diseño de experimento son muy numerosas, en los cuales se observan una o más variables experimentales dependientes o respuestas (y) cuyo valor depende de los valores de una o más variables independientes (x) controlables llamadas factores (Montgomery, 1991).

Para la determinación de la influencia que ejerce el porcentaje de sólidos en peso contenido en la hidromezcla laterítica y el número de revoluciones del motor de la bomba sobre la caída de presión experimental se utilizó un diseño de experimento multifactorial con ayuda del software STAGRAPHICS Centurion XV.

Los factores experimentales a considerar son: el número de revoluciones del motor de la bomba n en r/min, el cual se regula con ayuda del variador de frecuencia y el porcentaje de apertura de la válvula. Las variables de respuestas son el caudal m^3/h , la presión de entrada y salida de la bomba en kPa y la potencia del motor eléctrico en kW.

El número de revoluciones del motor de la bomba igualmente se estudió a cuatro niveles (1 000; 1 200, 1 400 y 1 600) rev/min y se establecieron cuatro niveles (25; 50; 75 y 100) % de apertura de la válvula.

La expresión matemática que describe el experimento factorial multinivel quedaría como se muestra en la ecuación 2.21 (Delgado, 2004):

$$Ne = n^k \quad (2.21)$$

Donde:

Ne, número de experimentos;

k, número de factores experimentales;

n, número de niveles.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que $k = 2$ luego considerando cuatro niveles, el número de experimento sería: $Ne = 4^2 = 16$ experimentos para cada número de revoluciones.

2.7.1. Formulación de la hipótesis estadística

La idoneidad del modelo para la predicción de la caída de presión se realiza a través de la comprobación de que hay una relación significativa entre la variable de salida o si es resultado de la aleatoriedad.

Sobre la base de los planteamientos anteriores se establecen las hipótesis siguientes:

$$H_0 : |t_{obs}| > t_{\frac{\alpha}{2}; n-1}; \text{ para } n-1 \text{ grados de libertad}$$

$$H_t : |t_{obs}| > t_{\frac{\alpha}{2}; n-1}; \text{ para } n-1 \text{ grados de libertad}$$

Donde:

H_0 - Hipótesis nula;

H_t - Hipótesis alternativa;

t_{obs} - Estadístico "t" observado.

La toma de decisiones se realiza teniendo en cuenta que si bajo la hipótesis estadística asumida se cumple la desigualdad $t_{obs} > t_{0,05}$, entonces se rechaza H_0 y se concluye que la

diferencia entre las varianzas es significativa. El valor $t_{0,05}$ se selecciona para un nivel de significación $\alpha_1 = 0,05$ y $V_1 = N - 1$ grados de libertad.

2.7.2. Matriz del experimento

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial, determinándose 64 corridas, 16 experimentos y tres replicas para cada medición. Obteniéndose la matriz del experimento como se muestra en la tabla 2.5, es importante destacar que el experimento se realizó no aleatorio. En la tabla 2.6 se muestra el análisis de varianza del experimento.

Tabla 2.5 Matriz de planificación del experimento.

Número de experimento	Porcentaje de apertura de la válvula.	Numero de revoluciones n (r/min)	Caída de presión ΔP (kPa)			Caudal Q (m ³ /h)			Potencia del motor N (kW)		
			ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	Q ₁	Q ₂	Q ₃	N ₁	N ₂	N ₃
Diseño de experimento			ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	Q ₁	Q ₂	Q ₃	N ₁	N ₂	N ₃
1	A	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	B	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	C	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	D	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	A	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	B	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	C	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	D	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	A	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	B	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	D	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	A	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	B	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	C	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	D	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2.6 Análisis de varianza del experimento.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	F
Repeticiones	r-1	SR	$MSR = \frac{SR}{r-1}$	$F_1 = \frac{MSR}{MSE}$
A	a-1	SA	$MSA = \frac{SA}{a-1}$	$F_2 = \frac{MSA}{MSE}$
B	b-1	SB	$MSB = \frac{SB}{b-1}$	$F_3 = \frac{MSB}{MSE}$
C	c-1	SC	$MSC = \frac{SC}{c-1}$	$F_4 = \frac{MSC}{MSE}$
D	d-1	SD	$MSD = \frac{SD}{d-1}$	$F_5 = \frac{MSD}{MSE}$
AB	(a-1)(b-1)	SAB	$MSAB = \frac{SAB}{(a-1)(b-1)}$	$F_6 = \frac{MSAB}{MSE}$
BC	(b-1)(c-1)	SBC	$MSBC = \frac{SBC}{(b-1)(c-1)}$	$F_7 = \frac{MSBC}{MSE}$
CD	(c-1)(d-1)	SCD	$MSCD = \frac{SCD}{(c-1)(d-1)}$	$F_8 = \frac{MSCD}{MSE}$
DA	(d-1)(a-1)	SDA	$MSDA = \frac{SDA}{(d-1)(a-1)}$	$F_9 = \frac{MSDA}{MSE}$
ABCD	(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)	SABCD	$MSABCD = \frac{SABCD}{(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)}$	$F_{10} = \frac{MSABCD}{MSE}$
Error	(abcd-1)(r-1)	SE	$MSE = \frac{SE}{(abcd-1)(r-1)}$	
Total	N=abcdr	ST		

Conclusiones.

1. Se definieron los procedimientos para el análisis químico, mineralógico y reológico de pulpas cruda que permite obtener información experimental de las muestras seleccionadas.
2. Se definieron los procedimientos para obtención experimental de los parámetros operacionales de bombas centrífugas en la mini-planta de hidrotransporte.

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO: IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DE PULPAS LATERÍTICA

3.1. Introducción.

En los trabajos revisados durante la investigación se han detectado problema en la selección de sistemas de bombeo de pulpas laterítica considerando el fluido newtoniano, también la utilización de la carta de corrección del instituto hidráulico para calcular el factor de corrección de carga CH lo cual no se consideran los fluidos con material en suspensión y solo se limita a los fluidos derivados del petróleo y semejanza en la viscosidad.

El objetivo de este capítulo es determinar el análisis químico, tamaño de la partícula y propiedades reológicas de la muestra #2 estudiada, así como obtener las curvas características de la bomba centrífuga y obtener de forma experimental el CH y compararlo con el resultado de (Hernández, 2017).

3.2. Resultados del experimento y análisis de varianza.

De la muestra seleccionada para esta investigación los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Análisis químico de la muestra tomada de pulpa cruda o fría (Muestra #2).

Elementos	%	Elementos	%	% Sólidos	Densidad (g/mL)
Ni	1,136	Al	4,24	41,93	1,426
Co	0,133	SiO ₂	6,07		
Fe	40,8	Mn	0,77		
Mg	1,77	Número de mineral	8,7		

Como se puede apreciar, en la Tabla 3.1, la pulpa poseen un alto contenido de hierro, característica típica de las lateritas cubanas, en las que abundan los óxidos de hierro.

3.3. Distribución de tamaño de las partículas que conforman la fase sólida de las muestras utilizadas.

Las distribuciones granulométricas que se muestran en la figura 3.1, para la muestra se determinaron en un analizador de tamaños de partículas del tipo “HORIBA”, el cual permite obtener fracciones de partículas menores de 0,045 mm (325 mallas), que no pueden ser determinadas mediante el uso de tamices y que ejercen un efecto importante sobre el comportamiento de estas pulpas.

El análisis granulométrico de las muestras reveló que la pulpa laterítica está constituida por partículas pequeñas inferiores a $50 \mu m$, por lo que forman una estructura que le comunican propiedades plásticas.

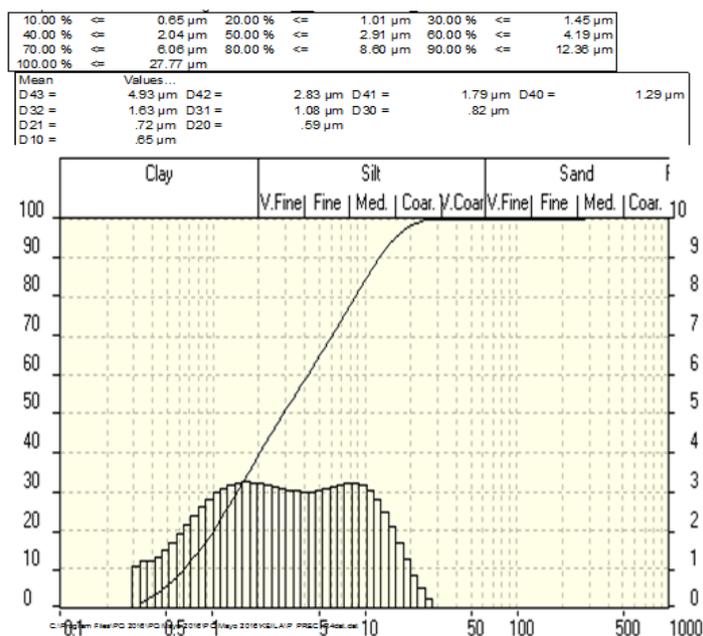


Figura 3.1 Análisis granulométrico de la muestra M2

Se comprueba de esta manera que la plasticidad de las pulpas se debe a la presencia de partículas coloidales y, en particular, a sus propiedades superficiales (Garcell L., Cerpa A., 1992; Pérez L.2004).

Tabla 3.2. Parámetros granulométricos que describen el modelo de polidispersión (Pérez, 2010).

Muestras	Y ₅₀	D ₅₀	B _N	s	R
TK-A	54,59	0,893	0,156	0,5318	0,9840
Línea 20''	58,42	0,799	0,156	0,4993	0,9602

3.4. Resultados reológicos de las muestras

A continuación se relacionan Modelos matemáticos de Mínimos Cuadrados obtenidos por (Hernández, 2017):

$$\mu_a = -1,8231510 - 0,0245581 s + 0,0757792 \%S - 0,0124297 t + 0,0077888 N_{rmin} \quad (3.1)$$

$$\tau_0 = -7,5155524 - 12,5114987 s + 2,0090722 \%S - 0,4978136 t + 5,5938357 N_{rmin} \quad (3.2)$$

$$K = -7,7626341 - 0,5617544 s + 0,4372325 \%S - 0,1077145 t + 0,3126353 N_{rmin} \quad (3.3)$$

$$n = 0,4832387 + 0,0416324 s + 0,0007904 \%S + 0,0022183 t - 0,0262450 N_{rmin} \quad (3.4)$$

Al representar gráficamente los datos experimentales de gradiente de velocidad (γ) contra esfuerzo de corte (τ) se trazaron las curvas de flujo a partir del diseño de una aplicación informática figura 3.2. Los resultados fueron ajustados al modelo Bulkley-Herschel para plásticos reales, indicando la presencia de un esfuerzo de corte inicial.

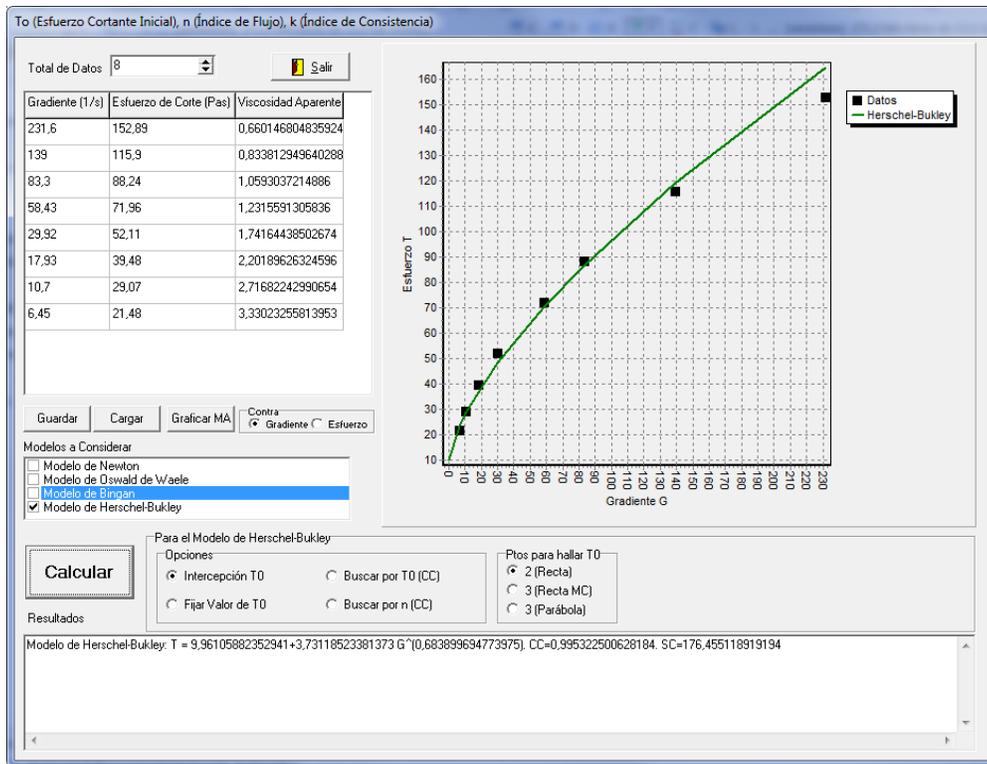


Figura 3.2. Aplicación informática para modelo reológico. Fuente (Hernández, 2017)

En la Tabla 3.3, describe el comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas MC 2. A medida que aumenta la concentración de sólidos, los esfuerzos de corte (τ) se

incrementan, al igual que el valor de las viscosidades aparentes para un valor fijo de gradiente de velocidad (γ)

Tabla 3.3 Parámetros reológicos según el Modelo de Bulkley-Herschel

% Sólidos	$\tau = \tau_0 + K\gamma^n$			
	τ_0	K	n	R
41,9	9,96	3,7	0,68	0,9953

3.5. Procedimiento para la selección de parámetros energéticamente óptimos de operación eficaz de las bombas centrífugas.

El diagnóstico operacional de sistemas de bombeo tiene como característica fundamental la obtención de los parámetros energéticos del sistema (flujos, cargas, pérdidas hidráulicas, potencia y eficiencia) en el punto de operación, el cual exige una serie de datos, los cuales responden a la nomenclatura mencionada.

Con los datos obtenidos a diferentes r/min y variando el caudal con una válvula de estrangulación se encuentran las expresiones matemáticas de curvas características de la bomba de la instalación con una serie de puntos representativos y se aplica el Método de los Mínimos Cuadrados para encontrar las expresiones matemáticas correspondientes (Pérez Franco, 2012).

Las ecuaciones que modelan las curvas características de diseño de las bombas rotodinámicas son (Turiño, 1996), (Pérez Franco, 1999), (Martínez, 2011), (Martínez, 2018):

- Curva carga-capacidad, (H-Q):

$$H = A \pm B \cdot Q - C \cdot Q^2 \quad (3.5)$$

Donde: H : carga que desarrolla la bomba, (m); A : coeficiente del polinomio representativo de la curva $H-Q$ que define el valor de la carga que desarrolla la bomba para caudal cero o válvula cerrada (m); B y C : coeficientes del polinomio representativo de la curva $H-Q$ que están en función de las pérdidas de carga en el interior de la bomba (s/m^2), (s^2/m^5) respectivamente y Q : caudal impulsado por la bomba (m^3/s).

- Curva potencia-capacidad, (P-Q):

$$P = D \pm E \cdot Q \mp F \cdot Q^2 \quad (3.6)$$

Donde: P : potencia absorbida por la bomba, (kW); D : coeficiente del polinomio representativo de la curva $P-Q$, que define el valor de la potencia consumida por la bomba para caudal cero (kW) y E y F : coeficientes del polinomio representativo de la curva $P-Q$ dependientes de las pérdidas de potencia de la bomba ($s \cdot kW/m^3$), ($s^2 \cdot kW/m^6$), respectivamente.

- Curva eficiencia-capacidad, ($\eta-Q$):

$$\eta = G \cdot Q - H \cdot Q^2 \quad (3.7)$$

Donde: η : eficiencia de la bomba (adimensional) y G y H : coeficientes del polinomio representativo de la curva $\eta-Q$ (s/m^3), (s^2/m^6) respectivamente.

Procesamiento estadístico de los datos.

El procesamiento de los datos se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son:

- Altura que desarrolla la bomba a diferentes números de revoluciones.
- Potencia hidráulica.
- Rendimiento.

3.6. Resultados de las curvas características de la bomba.

Las curvas características de la bomba centrífuga fueron experimentadas primeramente con agua. Los resultados obtenidos de la carga, la eficiencia y la potencia a diferentes números de revoluciones se resumen en las tablas y figuras siguientes:

Tabla 3.4. Modelos de las curvas carga – capacidad con agua.

r/min	Modelo carga – capacidad (H-Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1 600	$H_{1600}(Q) = 72,8436 - 0,005147 \cdot Q - 0,00071 \cdot Q^2$	0,97	0,98
1 400	$H_{1400}(Q) = 56,6415 - 0,008479 \cdot Q - 0,00057Q^2$	0,98	0,58
1 200	$H_{1200}(Q) = 42,7798 + 0,001342 \cdot Q - 0,00064 \cdot Q^2$	0,98	0,43
1 000	$H_{1000}(Q) = 31,3192 - 0,01112 \cdot Q - 0,00014 \cdot Q^2$	0,96	0,25

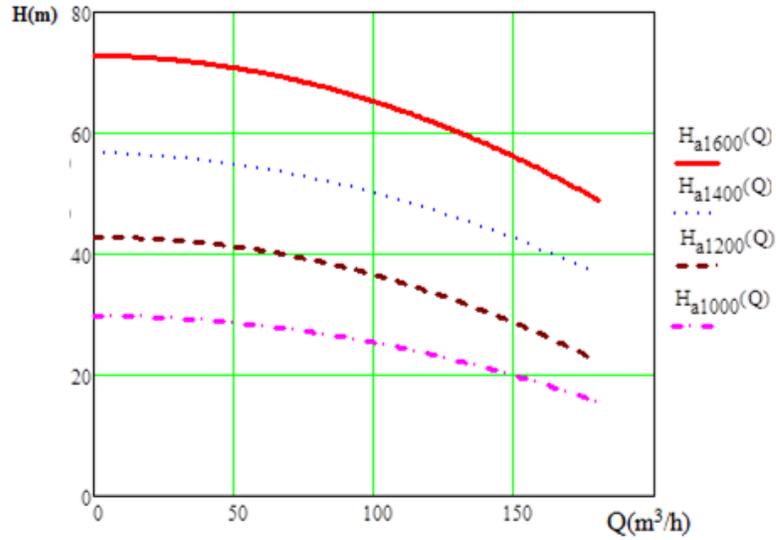


Figura 3.3 Curvas de carga – capacidad (H-Q) a diferentes números de revoluciones (1 600, 1 400, 1 200 y 1 000 r/min)

Tabla 3.5 Modelos de las curvas potencia – capacidad con agua.

r/min	Modelo potencia – capacidad (P-Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1 600	$P_{1600}(Q) = 0,0172 + 0,209 \cdot Q - 0,00033 \cdot Q^2$	0,99	0,16
1 400	$P_{1400}(Q) = 0,03926 + 0,1594 \cdot Q - 0,00024 \cdot Q^2$	0,99	0,08
1 200	$P_{1200}(Q) = -0,03344 + 0,1241 \cdot Q - 0,00023 \cdot Q^2$	0,99	0,06
1 000	$P_{1000}(Q) = -0,026 + 0,08844 \cdot Q - 9,689 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	0,99	0,05

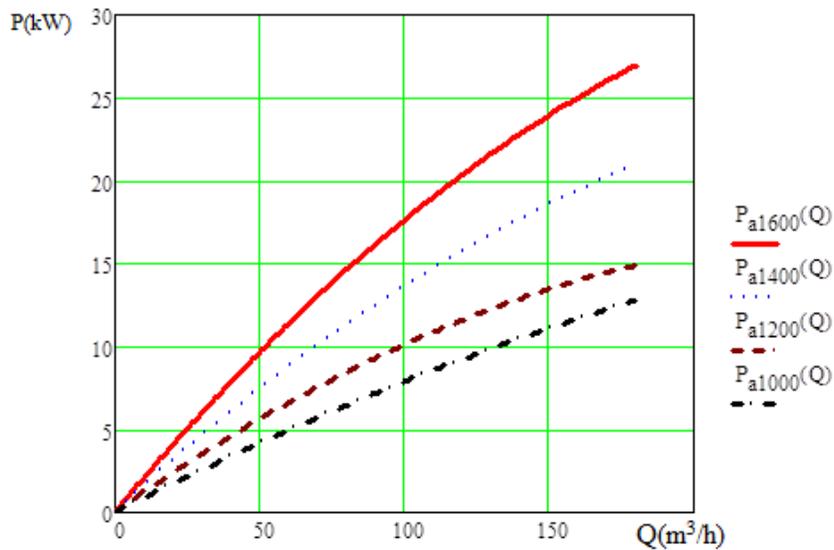


Figura 3.4 Curvas de potencia – capacidad (P-Q) a diferentes números de revoluciones (1 600, 1 400, 1 200 y 1 000 r/min)

Tabla 3.6 Modelos de las curvas rendimiento – capacidad con agua.

r/min	Modelo rendimiento – capacidad (η -Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1 600	$\eta_{1600}(Q)=0,004273 \cdot Q - 6,5754 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2$	0,96	0,06
1 400	$\eta_{1400}(Q)=0,006452 \cdot Q - 1,348 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	0,99	0,02
1 200	$\eta_{1200}(Q)=0,009937 \cdot Q - 4,3541 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	0,99	0,02
1 000	$\eta_{1000}(Q)=0,01188 \cdot Q - 3,5837 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	0,97	0,06

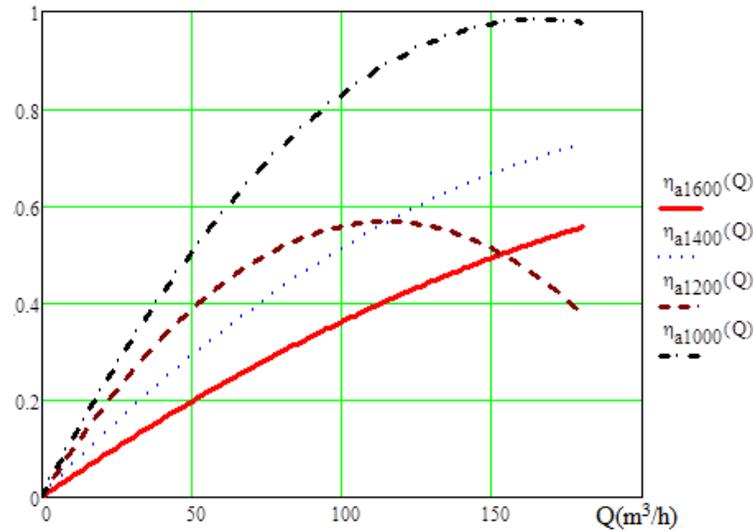


Figura 3.5 Curvas de rendimiento – capacidad (η -Q) a diferentes números de revoluciones (1 600, 1 400, 1 200 y 1 000 r/min)

Luego se obtuvieron las curvas características de la bomba centrífuga experimentada con hidromezcla laterítica al 41,93 % de sólidos y 42,36 %. Los resultados se resumen en las tablas 3.7 y 3.8, y las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

Tabla 3.7 Modelos de las curva carga – capacidad con pulpa al 41,93 % de sólidos.

r/min	Modelo carga – capacidad (H-Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1400	$H_{p1400}(Q) = 31,71 - 0,037 \cdot Q - 0,0001Q^2$	0,99	0,13

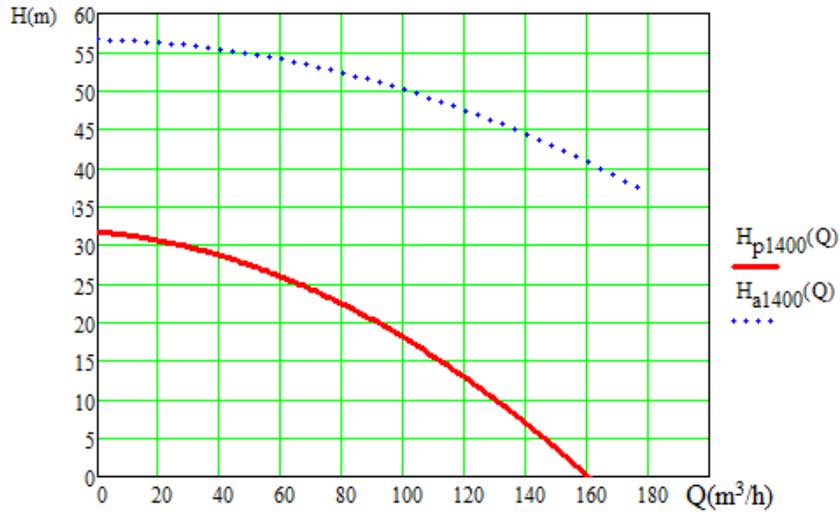


Figura 3.6 Curvas de carga – capacidad (H-Q) a 1400 r/min de la pulpa (41,93% de sólidos) y agua.

Tabla 3.8 Modelos de las curva carga – capacidad con pulpa al 42,36% de sólidos.

r/min	Modelo carga – capacidad (H-Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1400	$H_{p1400}(Q) = 29,852 + 0,089 \cdot Q - 0,0032 \cdot Q^2$	0,96	0,87

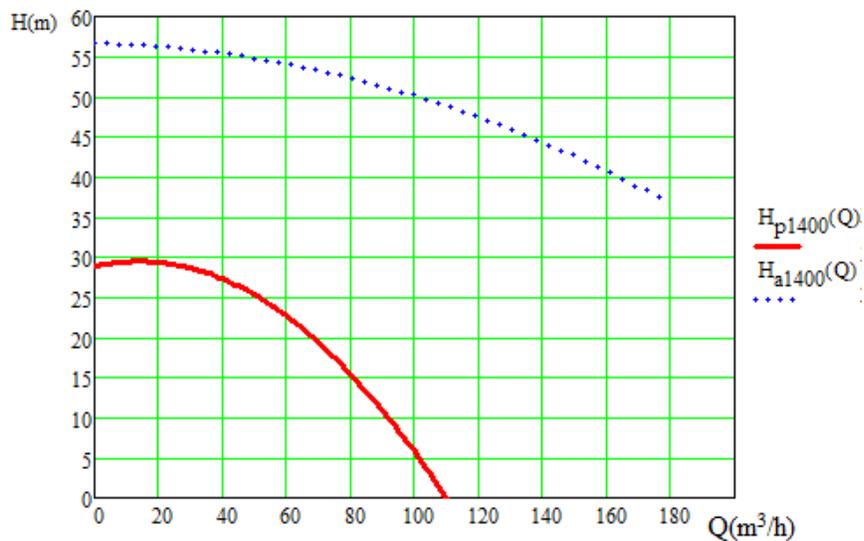


Figura 3.7 Curvas de carga – capacidad (H-Q) a 1400 r/min de la pulpa (42,36 % de sólidos) y agua.

Como se observa en las figuras 3.6 y 3.7 la carga de la bomba disminuye cuando se bombea hidromezcla laterítica al 41,93 y 42,36 % de sólidos en suspensión.

También se obtuvieron las curvas de rendimiento - capacidad de la bomba centrífuga experimentada con hidromezcla laterítica al 41,93 y 42,36 % de sólidos en suspensión. Los resultados se muestran en las tablas 3.9 y 3.10, y las figuras 3.8 y 3.9 respectivamente.

Tabla 3.9 Modelos de las curva rendimiento – capacidad con pulpa al 41,93% de sólidos.

r/min	Modelo rendimiento – capacidad (η -Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1400	$\eta_{p1400}(Q)=0,004244 \cdot Q - 1,1957 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	0,99	0,0093

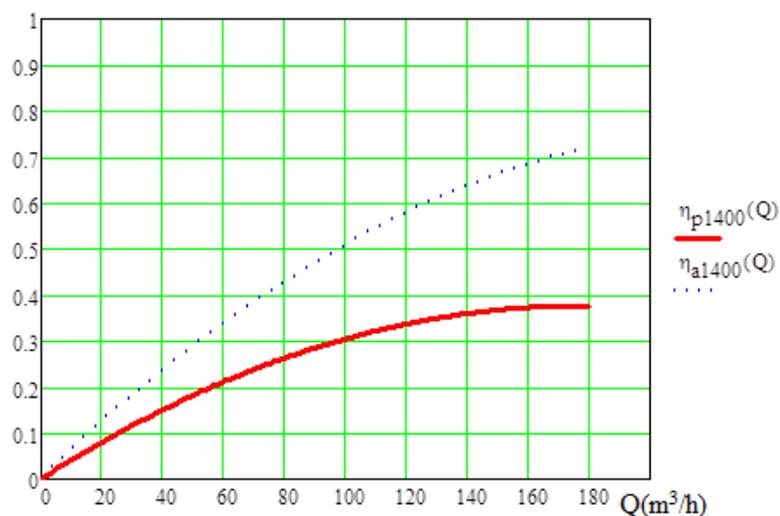


Figura 3.8 Curvas de rendimiento – capacidad (η -Q) a 1400 r/min de la pulpa (41,93% de sólidos) y agua.

Tabla 3.10 Modelos de las curva rendimiento – capacidad con pulpa al 42,36% de sólidos.

r/min	Modelo rendimiento – capacidad (η -Q)	Factor de correlación (r)	Error estándar (S)
1400	$\eta_{p1400}(Q)=0,005153 \cdot Q - 3,2407 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	0,98	0,011

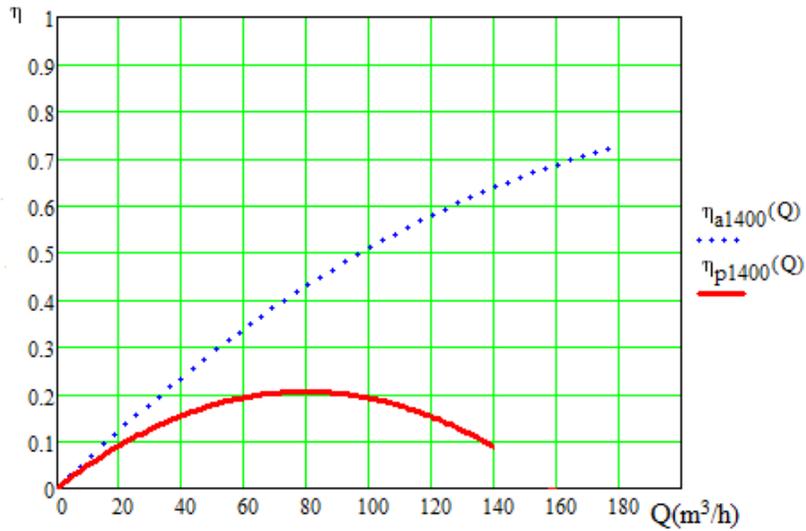


Figura 3.9 Curvas de rendimiento – capacidad (η - Q) a 1 400 r/min de la pulpa (42,36 % de sólidos) y agua.

En las figuras 3.8 y 3.9 el rendimiento de la bomba disminuye cuando se bombea hidromezcla laterítica al 41,93 y 42,36 % de sólidos en suspensión, corroborándose lo planteado en las literaturas consultadas.

3.7. Comportamiento de la curva carga – capacidad

Para el análisis del comportamiento de las curvas carga – capacidad se determinó a 1 400 r/min para el agua, pulpa laterítica a 41,93 % y 42,36 % de sólidos. En la figura 3.10 se muestra las curvas para los diferentes fluidos.

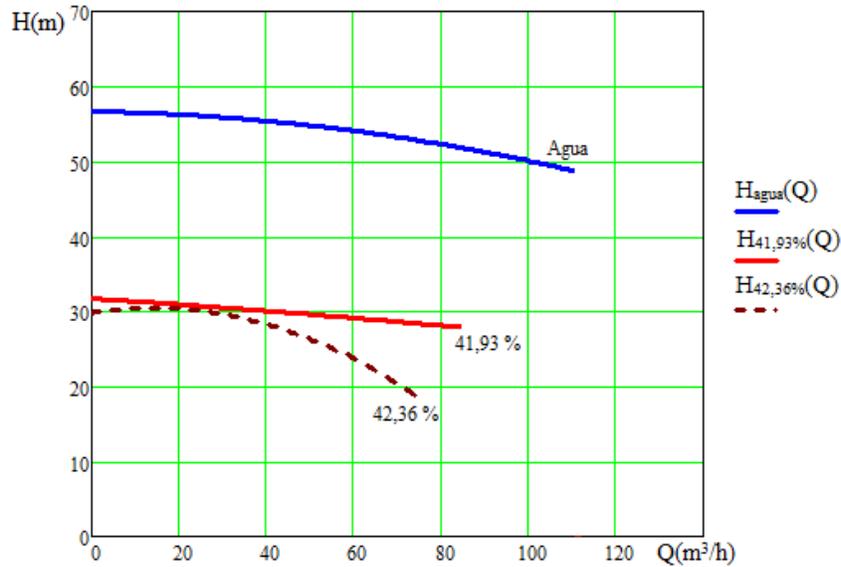


Figura 3.10 Curvas características de carga – capacidad (H-Q) para el agua y la pulpa laterítica a 41,93 % y 42,36 % de sólidos, a 1 400 r/min.

La figura 3.10 muestra la disminución de la carga de la bomba cuando maneja sólidos en suspensión, aun cuando la variación del porcentaje de sólidos es pequeña la caída de la carga se incrementa.

3.8. Cálculo del coeficiente de corrección experimental (C_{Hexp}) para la pulpa a 41,93 % de sólidos.

En una hoja de Excel se calcula el coeficiente de corrección experimental mediante la relación de los modelos de las curvas de carga de la bomba cuando maneja pulpa laterítica al 41,93 % de sólidos y el agua. Los resultados se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resultados del cálculo del coeficiente de corrección.

Caudal (m ³ /h)	0	19,2	38,4	57,6	76,8	96	115,2	134,4	153,6	172,8	192
Ha (m)	56,64	56,27	55,48	54,27	52,65	50,60	48,14	45,26	41,96	38,24	34,11
Hp (m)	31,71	30,96	30,14	29,25	28,28	27,24	26,12	24,93	23,67	22,33	20,92
C _{Hexperimental}	0,56	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,55	0,56	0,58	0,61
C _{H promedio}	0,56										

3.9. Cálculo del coeficiente de corrección experimental según modelo matemático de Hernández (2017).

Utilizando la ecuación (3.8) y los resultados del análisis químico de la muestra M#2, donde el porcentaje de sólidos de la pulpa es de 41,93 %, la temperatura ambiente 27 °C y el número de mineral Nm es 8,7.

$$CH = 1,5436605 - 0,0290001 \%S + 0,0040620 T + 0,0085463 Nm \quad (3.8)$$

$$CH = 0,512$$

Comparando los resultados del CH experimental con el CH propuesto por (Hernández, 2017) en su investigación; se puede comentar que se considere para la pulpa laterítica para un porcentaje de sólidos mayor a 40 %, un 50 % de la carga que cuando se maneja agua en los sistemas de hidrotransporte.

3.10. Análisis Económico y Medio Ambiental

Para proyectar y explotar con efectividad el equipamiento de las instalaciones de hidrotransporte es necesario la selección correcta del equipamiento de bombeo para las condiciones concretas de explotación, determinación y análisis del régimen de trabajo de las bombas en correspondencia con los requerimientos exigidos y, al considerar mínimos los gastos de energía eléctrica, influyen en los indicadores técnico-económicos.

En la Tabla 3.12, se refleja la desproporción de caudal entregado por bombas idénticas que operan a velocidades de giro similares con una diferencia de 3 % de concentración de sólidos.

Tabla 3.12 Comparación del funcionamiento de las bombas

Condiciones de funcionamiento	Bomba centrífugas B1	Bomba centrífugas B1
Concentración de sólidos, %	44	41
Caudal, m ³ /h	72	187
Velocidad, r/min	891	879
Corriente de trabajo, A	150	122

Bajo estas condiciones de funcionamiento ninguna de las dos bombas podrá alcanzar su

caudal de diseño máximo de 454 m³/h para estas velocidades. Sin embargo, la medición del motor constató que este se encontraba trabajando aproximadamente al 50 % de su capacidad. El fabricante de la bomba recomienda en la hoja de datos que el motor para este tipo de bomba sea de 110 kW, el instalado actualmente es de 160 kW, lo que demuestra un bajo coeficiente de carga y un incremento de pérdidas de energía.

Para un 44 % de sólido y 891 r/min, la bomba necesita 6 h 15 min para bombear el caudal de diseño de 454 m³/h, equivalente a un consumo de 565,8 kWh, y para un 41 % de sólido y 873 r/min, la bomba requiere 2 h 10 min aproximadamente, para un consumo de 173,2 kWh. El consumo para un 44 % de sólido es tres veces mayor que para un 41 %, ver Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Comparación del incremento del tiempo de bombeo y el consumo

Condiciones de funcionamiento	Bomba centrífugas B1	Bomba centrífugas B1
Concentración de sólidos, %	44	41
Caudal, m ³ /h	454	454
Velocidad, r/min	891	879
Tiempo de bombeo, horas	06 h 15	02 h 10
Consumo, kWh	565,8	173,2

El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido con una variación del 3 % de sólido, sin regular la velocidad de giro y la potencia, asciende a 219 040 CUC/año.

La protección del medio ambiente, es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años, ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas.

En el proceso de la actividad productiva, el hombre actúa como un factor decisivo provocando cambios considerables en la naturaleza por lo que, realizando un análisis del impacto medioambiental se percibe que la máquina no está expensa a los efectos que pudiera ocasionar el ser humano.

Las bombas por las características que poseen tienen grandes consecuencias, puesto que el ruido que genera produce esfuerzo de la emisión de la voz, esfuerzo intelectual que puede provocar situaciones de inseguridad, mareos, vómitos y otras alteraciones en el sistema nervioso, además las vibraciones traen consigo grandes problemas como, lesiones en las articulaciones que provocan dolores y limitaciones en los movimientos, estas afectaciones degenerativas se manifiestan en las radiografías, provocan trastornos vasculares, principalmente con falta de sensibilidad en los dedos y trastornos digestivos.

Conclusiones.

1. La pulpa laterítica cruda presenta un comportamiento de plásticos reales ya que disminuye su viscosidad con el incremento del gradiente de velocidad; el cual teniendo en cuenta los resultados de los experimentos reológicos se ajusta a un modelo de Herschel Bulkley.
2. La variación de los porcentajes de sólidos tienen gran influencia sobre los parámetros reológicos que se presentan en estas suspensiones lateríticas.
3. La caída en la curva de la carga-capacidad varía con el aumento de la concentración de sólidos.

CONCLUSIONES

1. Se obtienen modelos matemáticos de parámetros energéticos que determinan la productividad del sistema de bombeo de hidromezclas lateríticas cruda como flujos, cargas, pérdidas hidráulicas, potencia y eficiencia en función de los parámetros reológicos de los fluidos que transportan.
2. Se demostró con el diagnóstico de operación que en las instalaciones analizadas se reduce la capacidad, la carga y el rendimiento de bombeo cuando se manipula hidromezclas lateríticas cruda con sólidos en suspensión.
3. Se determinó el coeficiente de corrección de carga – capacidad para los sistemas de bombes de hidromezclas lateríticas cruda.

RECOMENDACIONES

1. Establecer e implementar un sistema de toma de decisiones a partir de los resultados de la presente investigación, para la operación eficiente en el sistema de hidrotransporte en los tanques espesadores de pulpa laterítica en la ECPSA.
2. Continuar investigación del comportamiento de los parámetros de hidrotransporte para las materias prima del proceso de lixiviación ácida (pulpa precalentada, carbonato de calcio, cola) presentes en la industria del níquel.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adhikari B., Jindal V.K. Artificial Neural: A New Tool for Prediction of Pressure Drop of Non-Newtonian Fluid Foods Through Tubes. *Journal of Food Engineering*: 46, 43-51, 2000.
2. Aguirre, A. Pérez, R. y Martínez, D., *Mecánica de Fluidos*, Editorial Universo Sur, Cuba 1996.
3. Agyei G.: “Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA níquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba”. Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Holguín, 2006.
4. Almaguer A.F., “Composición de las pulpas limoníticas de la planta Pedro Sotto Alba” (Parte II). Período de Crisis de Sedimentación. *Revista Minería y Geología*, Vol. XIII, N° 1, 27-30, 1996.
5. Andrade, R., Torres, R. y Montes, E., “Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas”. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 26(3) 599-612, 2009.
6. Ariosa J.D., W. Lavaut Copa, P. S. Borgues Garrido, R. Díaz Martínez, “Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí – Baracoa de Cuba Oriental”. *Rev. Minería y Geología*. Vol. (1-2), 2003.
7. Avramidis K. S., R. M. Turian, “Yield Stress of Laterite Suspensions”. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol.143 (1) 54, 1991.
8. Baha E. Abulnaga, P.E. “Slurry Systems Handbook, Part II, Equipment and Pipelines”. Mazdak International, Inc. 2002
9. Basharat Salim , Hawas Yahya Bajawi and Ziyadh Suhaibani. “Performance of a Centrifugal Slurry Pump with Clinker Slurry”. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8, June 2015.
10. Bhattacharya I.N., D. Panda, P. Bandopadhyay, “Rheological behaviour of nickel laterite suspensions”. *Int. J. Miner. Process*. Vol. 53, 251–263, 1998.
11. B. K. Gandhi, S. N. Singh & V. Seshadri. “Prediction of performance characteristics of a centrifugal slurry pump handling clear liquid”. *Indian Journal of Engineering &*

- Materials Sciences. Vol. 5, June 1998, pp. 91-96.
12. B.K.Gandhi, V.Seshadri, S.N.Singh, *Journal of Fluids Engineering*. 123 (2001) 271-280.
 13. Beatón, B. M. “Análisis de factores que influyen sobre el proceso de sedimentación de pulpas lateríticas”. Tesis de Maestría en Ingeniería de Procesos. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2001.
 14. Bekkour K., M. Leyama, A. Benchabane, O. Scrivener, “Time-dependent rheological behavior of bentonite suspensions: An experimental study”. *J. Rheol.* 49 (6) 1329-1345, 2005.
 15. Beyris. P. E., “Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa Comandante “Pedro Sotto Alba” (Moa Níkel SA.). Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Holguín, 1997.
 16. Bhattacharya I.N., D. Panda, P. Bandopadhyay, “Rheological behaviour of nickel laterite suspensions”. *Int. J. Miner. Process.* Vol. 53, 251–263, 1998.
 17. Bienvenido, J., “Modelo de un sistema de bomba, tanque y red”. *Voluntad Hidráulica*. 3(28) 11-32, 1973.
 18. Blakey B.C., D. F. James, “Characterizing the rheology of laterite slurries”. *Int. J. Miner. Process.* Vol.70, 23– 39, 2003.
 19. Blanco, M. E, Velarde. S .S, Fernández. J.F. *Sistemas de bombeo*. ISBN 84-604-9677-5. Depósito Legal AS-880-94. Gijón. 1994
 20. Bodson J. Digital control improves variable speed drives. *EPE Journal*. Vol. 2. No. 4. December 1994 pp 243 – 248.
 21. Branco, I. y Gasparetto, C., “Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices”. *Science and Alimentary Technologic*. 23(1) 166-171, 2003.
 22. Breff, A., Falcón, J., Góngora, N. Evaluación de trabajo de un hidrociclón para la clasificación de la pulpa de cienos carbonatados. *Tecnología Química*, XXXIV (2). 2014.

23. Briceño M. I., M. Ramirez, J. Bullón, J.L. Salager, “Customizing Drop Size Distribution to Change Emulsion Viscosity”. 2nd World Congress on Emulsion CME2, Proceedings Paper 2-1-094. Bordeaux France September 23-26, 1997
24. Briceño M., J.L. Salager, J. Bertrand, “Influence of the dispersed phase viscosity on the mixing of concentrated oil-in-water emulsions in the transition flow regime”. International Symposium on Mixing in Industrial Processes – ISMIP4, Toulouse (France). Mayo, 2001.
25. Brown, G., “Operaciones Básicas de la Ingeniería Química”, Edición Revolucionaria, La Habana, 1969.
26. Caldiño, V., Salgado, M. 2004. Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris. *Evento 7mo Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México.
27. Caram Y., F. Bautista, J.E. Puig, O. Manero, “On the rheological modeling of associative polymers”. *Rheol Acta*. Vol. 46, 45–57, 2006.
28. Cerpa A., P. Tartaj, M. T. García-González, C. J. Serna, A. García, “Estudio comparativo del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes yacimientos que procesa la Empresa Moa Níquel S.A”. *Rev. Latin. Am. Met. Mat.* 23 (1) x-x, 2003.
29. Cerpa A., P. Tartaj, M. T. García-González, J. Requena, L.R. Garcell, C. J. Serna, “Rheological properties of concentrated lateritic suspensions”. *Progr Colloidi Polym Sci.* 100 (número) 266-270, 1996.
30. Cerpa A., P. Tartaj, M. T. García-González, J. Requena, L.R. Garcell, C. J. Serna, “Mineral-content and particle-size effect on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions”. *Clays and Clay Minerals.* 47 (4) 515-521, 1999.
31. Cerpa, A. y Garcell, L., “Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas”, *Evento Metalurgia 98*, La Habana, 1998.
32. Cerpa, A., *Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloide-químicas. Tesis de Doctorado*, Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997. 99p

33. Chacin F., "Diseño y análisis de experimentos I". ISBN: 980-00-1690-2. Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2000.
34. Cheng D. C-H., "Viscosity-concentration equations and flow curves for suspensions". Chemistry and Industry. Vol. 17, 403-406, 1980.
35. Chhabra, R.P. & Richardson, J.F. Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999.
36. Coniglio A., A. Fierro, H.J. Herrmann, M. Nicodemi, "Unifying Concepts in Granular Media and Glasses". Editorial Elsevier B.V, 2004.
37. Da Silva, F., Guimaraes, D. y Gasparetto, C., "Rheology of acerola juice, effects of concentration and temperature". Science and Alimentary Technologic. 25(1) 121-126, 2005.
38. Dak, M., Verma, R. y Jaaffrey, S., "Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar". Journal of Food Engineering. 28(4) 1011-1015, 2007.
39. Darby, R., "Take the mystery out of non-newtonian fluids". Chemical Engineering. 9(3) 66-73, 2001.
40. De la Paz N. Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida. Centro de Investigación y Desarrollo de Medicamentos, Rev Cubana Farm 2002;36(1):21-7
41. Delgado, M. 2004: Diseño de experimentos (Parte I). Apuntes para una monografía, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", 38 p.
42. Díaz, A., Manual de hidráulica aplicada, Ediciones ISPJAM, Santiago de Cuba, 1990.
43. Falcón H. J., "Elementos para cursos de metodología de la investigación" (digital). Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, 2008.
44. Falcón H. J., "Sedimentación de minerales limoníticos". Revista Minería y Geología. Vol. 2, 1985.
45. Garcell L., "Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas". Revista Minería y Geología. 1(91) 19-23, 1991.
46. Garcell L., A. Díaz y G. Surís, "Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa", Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1988.

47. Garcell L., M. P. Morales, M. Andres-Vergés, P. Tartaj y C.J. Serna, “Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions”. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 205, 470-475, 1998.
48. Garcell, L., Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
49. Garcell, L., Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001.
50. Gillies, G., Shook, A., y Wilson, K., “An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow”. *Canadian Journal Chemical Engineer*. 8(69) 173-178, 1991.
51. Gleeson S. A., R. J. Herrington, J. Durango, C. A. Velázquez, G. Koll, “The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. ©2004 by Economic Geology. Vol. 99, 1197–1213, 2004.
52. Gómez, L. “Eficiencia Energética de los Sistemas de Bombeo de la Empresa Moa Nickel S.A. Pedro Sotto Alba”. Tesis de Grado. 2014.
53. Guardiola de Cabo, L. (s.f.). Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos, 2011.
54. Guzmán, O. Eficiencia energética. Un panorama regional. Buenos Aires, Argentina: Nueva Sociedad, 2009
55. He M., Y. Wang, E. Forssberg, “Parameter studies on the rheology of limestone slurries”. *Int. J. Miner. Process*. Vol. 78, 63– 77, 2006.
56. He M., Y. Wang, E. Forssberg, “Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review”. *Powder Technology*. Vol. 147, 94–112, 2004.
57. He Peng Cheng, Song Peng Yun. “A simple correlation equation to predict pump performance for slurry”. *Applied Mechanics and Materials Vols. 365-366 (2013) pp 365-369*. www.scientific.net/AMM.365-366.365
58. Hechavarría, J., Optimización del diseño de redes de distribución de agua bajo criterios técnico-económicos. Tesis de Doctorado, Universidad de Holguín, Cuba, 2009. 105p
59. Henshaw, T.L.: Reciprocating pumps. *Chemical Engineering*, vol. 88, No. 19, 1981

60. Hernández, G., Martínez, R., Durán, C. & Pérez, O. 2015a. Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería y Geología*, 31 No.3. 2015
61. Hernández, G., Rosa, Y., Duran, C. 2015b. Influencia de la temperatura del fluido en la eficiencia energética de los sistemas de bombeos. Evento CINAREM 2015, ISMMM. Moa. Holguín.
62. Hernández, G., Legrá, A., Garcell, L., Martínez, R. 2016a. Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado. *Geología y Minería*, 32 (3).
63. Hernández, G., “Modelación de los parámetros reológicos de las pulpas lateríticas y su influencia en el sistema de bombeo”. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. 2017
64. Hernández, A., Legrá, A. A., Trujillo, R., Toirac, M. 2010. Beneficio de la mena laterítica: actualidad y perspectivas. *Minería y Geología*, 26 (1).
65. Hydraulic Institute: Hydraulic Institute Standards, 13th. Ed. Cleveland, Ohio, 1975
66. Hunt, A. W and R. F. Faddick. The effects of solids on centrifugal pump characteristics. In *Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and Its Application*, I. Zandi (Ed.), New York: Pergamon Press. 1971.
67. Iakovlev, S. y Dalkov, M., “Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales”, Gosstroishdat, Moscú, 1961.
68. Institute, H. 1994: ANSI/HI. In A.N.S.
69. Ivenski, B., “Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías”, Gosstroishdat, Moscú, 1957.
70. Izquierdo, R., “Estudio de la instalación de hidrot transporte a presión de la pulpa laterítica de la Empresa Cmdte Pedro Soto Alba”. *Minería y Geología*. 2(3) 16-22, 1989.
71. Izquierdo, R., Turro, A. y Nikolaev, A., “Hidrot transporte del mineral laterítico en régimen estructural”. *Minería y Geología*. 18(2) 53-59, 2001.
72. James D. F., B. C. Blakey, “Comparison of the rheologies of laterite and goethite suspensions”. *Korea-Australia Rheology Journal*. 16 (3) 109-115, 2004.
73. Karassik, I.; Carter, R.: *Bombas centrífugas. Selección, operación y mantenimiento*. Ed. Revolucionaria. La Habana, 1968.

74. Keenan, H. J., Keyes, G. 1986: Thermodynamics Properties of Steam.
75. Kenneh F., “Mechanism of arsenic sorption onto laterite iron concretions”. Submitted to the faculty of New Mexico Tech in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Earth and Environmental Science with Dissertation in Geochemistry. New Mexico Institute of Mining and Technology, Department of Earth and Environmental Science. Socorro, New Mexico, Enero, 2008.
76. Khatib, M., “The development of poiseuille flow of a pseudoplastic fluid”. The Arabian Journal for Science and Engineering. 31(1) 102-117, 2006. www.sciencedirect.com/science
77. Klein A., D. J. Hallbom, “Modifying the rheology of nickel laterite suspensions”. Minerals Engineering. Vol. 15, 745-749, 2002.
78. Kusko, A; Galler, D. “Control means for minimization of losses in AC and DC motor drives”, IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 19, No.4, pp. 561-564. 1983.
79. Lason R.G., “The Structure and Rheology of Complex Fluids”. Oxford University Press. Library of Congress Cataloging-in- Publication Data. New York, 1999.
80. Laurencio, H., “Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados”, ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2010.
81. Laurencio A. H. Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Dr. ANJ. Moa, Holguín, 2012.
82. Laurencio, H. y Delgado, Y., “Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua”. Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. 16(2) 244-250, 2008. <http://redalyc.uaemex.mx>.
83. Laurencio, H. y Delgado, Y., “Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado”. Minería y Geología. 24(2) 56-77, 2008. www.ismm.edu.cu/revistamg.
84. Legrá A. A., O. R. Silva, “La investigación científica: conceptos y reflexiones”. Inscrito en el CENDA: 2384-2007. Libro en formato digital por editar, 2010.

85. Legrá, A. “Eficiencia Energética de los accionamientos con bombas en los tanques E y F de la Planta de Espesadores perteneciente a la Empresa Pedro Soto Alba”. Tesis de Grado. 2014.
86. León, A. y Percy, F., “Ahorro de energía por control de velocidad en el sistema de bombeo de Guarapo”. *Centroazucar*. 1(32) 27-38, 2000. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>.
87. Leonhard, W. 1996. *Control of Electrical Drives*. Event 2nd edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
88. Li J., X. Li, Q. Hu, Z. Wang, Y. Zhou, Junchao Zheng, W. Liu, L. Li, “Effect of pre-roasting on leaching of laterite”. *Hydrometallurgy*. Vol. 99, 84–88, 2009.
89. Liu D.M., “Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions: Φ_m determination and viscosity prediction”. *Journal of Materials Science*. Vol. 35, 5503 – 5507, 2000.
90. Lorenzo, R: *Manual de bombas para el jefe de maquinaria*. Ed. Dirección de Maquinaria Industrial. MINAZ. La Habana, 1990
91. Luo W., Q. Feng, L. Ou, G. Zhang, Y. Lu, “Fast dissolution of nickel from a lizardite-rich saprolitic laterite by sulphuric acid at atmospheric pressure”. *Hydrometallurgy*. Vol. 96, 171–175, 2009.
92. Madigan C., Y.K. Leong, B.C. Ong, “Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects”. *Int. J. Miner. Process*. Vol. 93, 41–47, 2009.
93. Malkin A.Y., “*Rheology Fundamentals*”. Chem Tec Publishing ISBN 1-895198-09-7. Toronto-Scarborough, Ontario M1E 1C6, Canada, 1994.
94. Manceau A., M. L. Schlegel, M. Musso, V. A. Sole, C. Gauthier, P. E. Petit, F. Trolard, “Crystal chemistry of trace elements in natural and synthetic goethite”. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 64 (21) 3643–3661, 2000.
95. *Manual de Operaciones de la Planta de Espesadores y Lixiviación de la ECPSA*.
96. Martínez, V., Monteagudo, J. Y Jáuregui, S. 2007: *Mecánica de los Fluidos y Máquinas de Flujo*. Universo Sur, Cienfuegos, Cuba.

97. Martínez, R.; Hernández, G. “Caracterización reológica de pulpas de cieno carbonatado”. *Revista Minería y Geología*. / v.31 n.4 / octubre-diciembre / 2015 / p. 70-83 ISSN 1993 8012.
98. Martínez, R. Caracterización de las propiedades físico mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrot transporte por tuberías. Tesis de Maestría. 2009.
99. Martínez Y. “Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto”, Tesis de doctorado, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (Cujae), La Habana, Cuba. 2011
100. Martínez Y. “Deducción analítica de las curvas características de las bombas rotodinámicas en paralelo”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXXIX, No. 1, Ene-Abr 2018, p. 112-126.
101. McGuire M.J., J. Addai-Mensah, K.E. Bremmell, “The effect of polymer structure type, pH and shear on the interfacial chemistry, rheology and dewaterability of model iron oxide dispersions”. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. Vol. 275, 153–160, 2006.
102. Mestizo C. J. Evaluación energética sobre el empleo del variador de frecuencia como método de regulación de flujo en bombas centrífugas accionadas por motor eléctrico de corriente alterna. Centro Azucar. 1994
103. Mestizo. C. R, Santos F. Evaluación energética sobre el empleo del variador de frecuencia como método de regulación de flujo de bombas centrífugas accionadas por motor eléctrico de corriente alterna. *Centro Azúcar* 32(2): 59-63, abril-junio, 2005
104. Mewis J., W.J. Frith, T.A. Strivens, W.B. Russel, “The Rheology of Suspensions Containing Polymerically Stabilized Particles”. *AIChE Journal*. 35 (3) 415-422, 1989.
105. Montgomery, D. 1991: *Diseño y Análisis de Experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica, Mexico D.F, 591 p.
106. Nekrasov B., *Hidráulica*. Editorial MIR, Moscú, URSS, 1968.
107. NEMA Standards Publication ANSI/NEMA. *Motors and Generators*. Rosslyn, USA: National Electrical Manufacturers Association, 2010.

- 108.Oficina Nacional de Estadística, 2016
- 109.Ohtake T., T. Hano, K. Takagi, F. Nakashio, “Effects of viscosity on drop diameter of w/o emulsion dispersed in a stirred tank”. Journal of Chemical Engineering of Japan. 20 (5) páginas, 1987.
- 110.Pal, R. y Masliyah, J., “Rheology of oil in water emulsions with added solids”. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 68(3) 24-28, 1990.
www.sciencedirect.com/science
- 111.Pal R., “Novel shear modulus equations for concentrated emulsions of two immiscible elastic liquids with interfacial tension”. J. Non-Newtonian Fluid Mech. Vol. 105, 21–33, 2002.
- 112.Paterson, A. & Cooke, R. 1999. The design of slurry pipeline systems. Short course presented at the Cape Technikon, Cape Town, 24 – 26 March, 1999.
- 113.Pedroso, I., Turiño, I., Jáuregui, S. y González, G., “Gradiente de velocidad para la transportación de mieles y meladuras en conductos circulares”. Centroazucar, 2(3)53-68, 2000. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>.
- 114.Pérez Franco, D.: Equipos de bombeo. Ed. Pueblo y Educación. La Habana, 1974
- 115.Pérez Franco D. “Máquinas Hidráulicas Rotodinámicas”, Editorial ENPSES, ISBN 03887-3887, La Habana, Cuba. 1999.
- 116.Pérez Franco D. “Estaciones de Bombeo”, Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-1379-8, La Habana, Cuba. 2012.
- 117.Pérez G.L. Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Tesis doctoral. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2010.
- 118.Pérez L., “Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloidquímicas de las suspensiones lateríticas. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2004.
- 119.Pérez L., L. Garcell, “Efecto de la granulometría y de las propiedades superficiales sobre la reología de suspensiones concentradas de laterita”, Revista Tecnología Química Vol. XXVI, No 1, 2006.

120. Pérez L., Y. Cardero, Y. Lamoth, L. Garcell, “Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita”, Revista Tecnología Química Vol. XXVIII, No. 1, 2008.
121. Pérez L., Y. Cardero, Y. Lamoth, L. Garcell, “Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita”, Revista Tecnología Química Vol. XXVIII, No. 1, 2008.
122. Pérez, L; Garcell, L; Rojas, A; Simoes, R. Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. Minería y Geología, 2010.
123. Puchol R. Q., “Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento de Moa (I): análisis granulométrico”. Revista Minería y Geología. Vol. 3, 1984.
124. Pullum L., L. Graham, M. Rudman, R. Hamilton, “High concentration suspension pumping”. Minerals Engineering. Vol. 19, 471–477, 2006.
125. Ramírez, I. Y. 2015. Influencia de los parámetros reológicos de la pulpa cruda y precalentada en la eficiencia del sistema de bombeo de la empresa comandante Comandante Pedro Sotto Alba Tesis Ingeniería. Instituto Superior Minero Metalurgico.
126. Reyes. C.J, Izquierdo. P. R. Diagnóstico de instalaciones de transporte de hidromezclas afectadas por cavitación. Minería y Geología / v.23 n.3 / 2007.
127. Rojas A. L, “Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas”. Rev. Minería y Geología. XVIII (3-4) 21-31, 2001.
128. Rojas A. L, P. Beyris, “Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". Revista Minería y Geología. Vol XI 1/94, 1994.
129. Rojas, L. D. " Identificación difusa de accionamiento de bombas centrifugas para el transporte eficiente de pulpa laterítica", p. 87-98, 2005.
130. Rojas L.D. Accionamiento eléctrico asincrónico para el transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Dr. ANJ. Moa, Holguín, 2006.

- 131.Rojas. P. L, Turro. B. A, Pérez. B. R, Izquierdo, P. R . Identificación difusa de accionamiento de bomba centrífuga para el transporte eficiente de pulpa laterítica. Minería y Geología. Nos. 3-4, 2004.
- 132.Romero, Ignacio. “Procedimiento a partir de un modelo de motor agregado para la caracterización energética de motores de inducción”. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. 2014.
- 133.Roque, D.; Juregui, S.; Lorenzo, C.: Tipificación de bombas centrífugas en la industria azucarera. Memorias del VI Encuentro Nacional de Jefes de Maquinaria. MINAZ. Santa Clara, 1989
- 134.Roque, D. Método de recálculo de las características de funcionamiento de las bombas centrífugas que manipulan soluciones azucaradas. Memorias del VI Encuentro Nacional de Jefes de Maquinaria. MINAZ. Santa Clara, 1989
- 135.Ruchansky, B., de Buen, O., Januzzi, G., & Romero, A. Eficacia institucional de los programas nacionales de eficiencia energética: los casos del Brasil, Chile, México y el Uruguay. Santiago de Chile: Naciones Unidas, 2011.
- 136.Saldarriaga, J. G., "Hidráulica de tuberías". Colombia: D'VINNIL TDA, 1998. 564 p. ISBN 958-600-831-2.
- 137.Sánchez, C., Oria, R. y Sánchez, A., “Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés”, Simposio Poscosecha, Orihuela, Valencia, España, 2008.
- 138.Santos, F. y Martín, M., “Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrífuga”. Centro azúcar. 1(3) 58-67, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>.
- 139.Senapati P. K., B. K. Mishra, A. Parida, “Modeling of viscosity for power plant ash slurry at higher concentrations: Effect of solids volume fraction, particle size and hydrodynamic interactions”. Powder Technology. 2009.
- 140.Shojaei A., R. Arefinia, “Analysis of the sedimentation process in reactive polymeric suspensions”. Chemical Engineering Science. Vol. 61, 7565 – 7578, 2006.
- 141.Sierou A., J. F. Brady, “Rheology and microstructure in concentrated noncolloidal suspensions”. J. Rheol. 46 (5) 1031-1056, 2002.
- 142.Sihi Halberg m.i.b.s.a.: Bombas para fluidos. Ed. Gráficos Orión. Madrid, 1995

143. Skelland A. H. P., "Non Newtonian Flow and Heat Transfer", Ediciones Revolucionarias, La Habana, 1970.
144. Stepanoff, A. J. Gravity flow of bulk solids and transportation of solids in suspension. New York: Wiley. 1969.
145. Stepanoff, A.: Centrifugal and axial flow pumps. Ed. John Wiley & Sons. New York, 1959
146. Stickel J. J., R. L. Powell, "Fluid mechanics and rheology of dense suspensions". Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 37, 29-149, 2005.
147. Streeter, V., Benjamin, E. y Bedford, K., Mecánica de fluidos. Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 2000.
148. Suárez, M., Determinación de los parámetros del hidrot transporte de las pulpas del mineral serpentínico. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1998. 98p
149. Talwar, M.: Analyzing centrifugal-pump circuit. Chemical Engineering, vol. 90, No. 17, 1983
150. Teh E-Jen, Y.K. Leong, Y. Liu, A.B. Fourie, M. Fahey, "Differences in the rheology and surface chemistry of kaolin clay slurries: The source of the variations". Chemical Engineering Science. Vol. 64, 3817 – 3825, 2009.
151. Trapeznikov, S., Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente. Tesis de Doctorado, Instituto de Minas de San Petersburgo, Rusia, 2011. 95p.
152. Treybal R. E., "Operaciones de Transferencia de Masa". 2da Edición, 1990.
153. Turiño, I. M. (1996). "Procedimientos metodológicos para el diagnóstico operacional en sistemas de bombeo mediante modelos matemáticos", Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de las Villas Marta Abreu (UCLV), Santa Clara, Cuba.
154. Turiño, I. M. "Modelo matemático de la operación de bombas de desplazamiento positivo". Construcción de Maquinaria, No. 1, 1996
155. Turiño, I. M. "Modelación matemática del punto de operación de los sistemas de bombeo". Centro Azúcar, No. 1, 1993

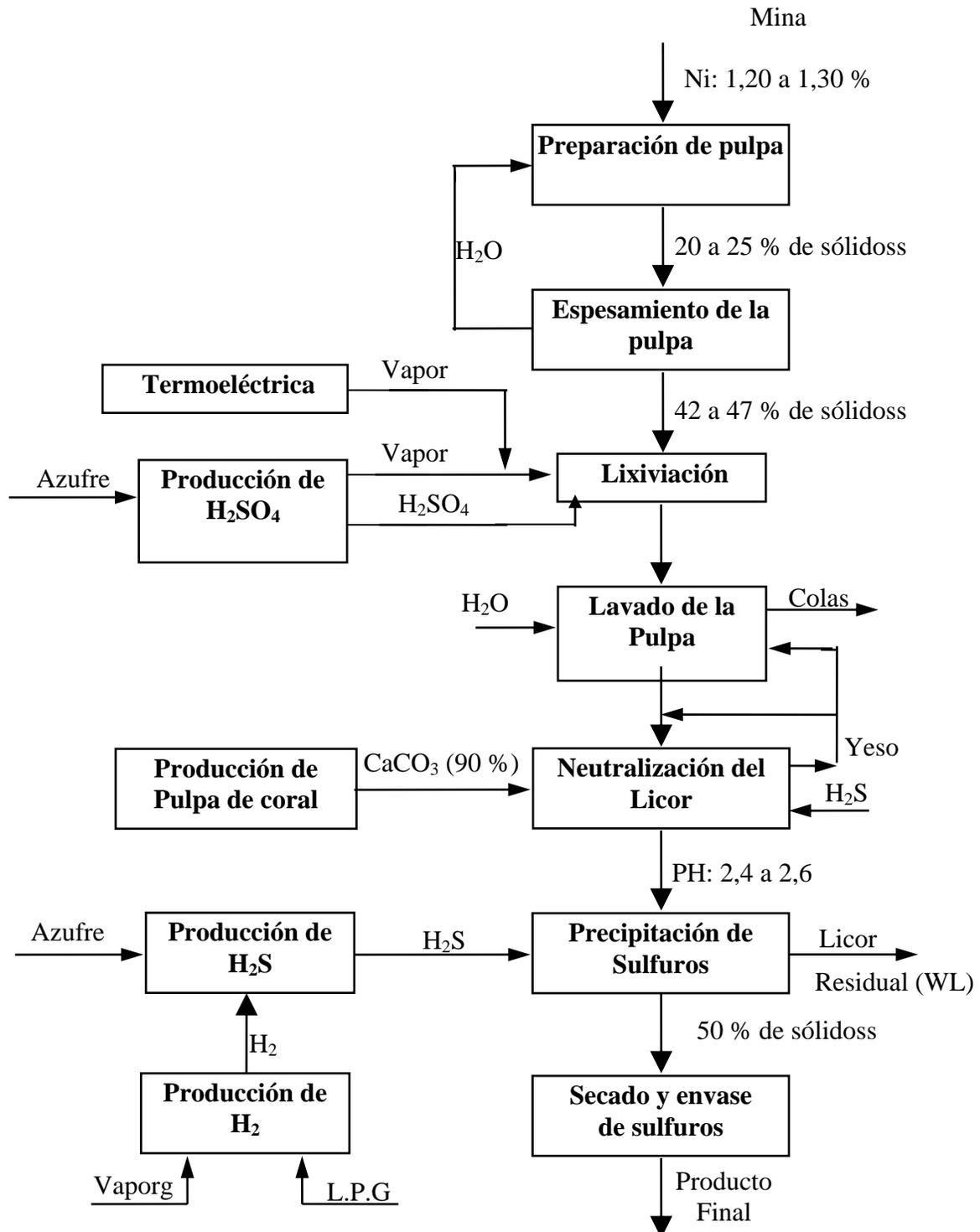
156. Turiño, I. M. "Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga". Centro azúcar. 3(1) 58-73, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>.
157. Turiño, I.M.: Análisis de la operación de sistemas de bombeo tópicos de la industria azucarera. Memorias del I Evento Nacional de Sistemas y Equipos de Bombeo para la Industria Azucarera. ISTC, Cienfuegos, 1991
158. Turiño, I. M. "Determinación aproximada de las características de funcionamiento de una bomba centrífuga". Centro Azúcar, No. 1, 1994
159. Turiño, I. M. "Modelación matemática del proceso de transporte industrial de fluidos". Memorias de la 2da. Reunión Internacional de Fluidodinámica y sus Aplicaciones. CUBA'96. Matanzas, 1996
160. Turiño, I. M. "Modelo matemático de la operación de bombas centrífugas". Construcción de Maquinaria, No. 1, 1996
161. Turro, A., "Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal". Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2002. 114p
162. Turro. B. A, Izquierdo, P. R, Garcell. L. Parámetros y regimens del hidrotransporte de colas lateríticas en el proceso Caron. Minería y Geología / v.24 n.4 / 2008
163. Val S. Lobanoff, Robert R. Ross. Centrifugal Pumps: Design and Application. Second Edition. 1992.
164. Vandresen, S., Quadri, M., De Souza, J. y Hotza, D., "Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices". Journal of Food Engineering. 29(3) 269-274, 2009.
165. Walde, P., & Brunner, C. Energy efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. France: International energy agency- OECD/IEA, 2011.
166. Walde, P., & Harrington, L. Success and CO2 Savings from Appliance Energy Efficiency Harmonisation. Part 2: An Assessment of Test Procedures and Efficiency Metrics. London, UK: Collaborative Labeling and Appliance, (CLAPS), 2011.
167. Walton, T.A.: PC Program helps monitor efficiency by describing pumps, compressor impeller curves. Oil & Gas Journal, vol. 84, No. 35, 1986
168. Warring, P.H.: Selección de bombas, sistemas y aplicaciones. Ed. Labor S.A.

Madrid, 1977.

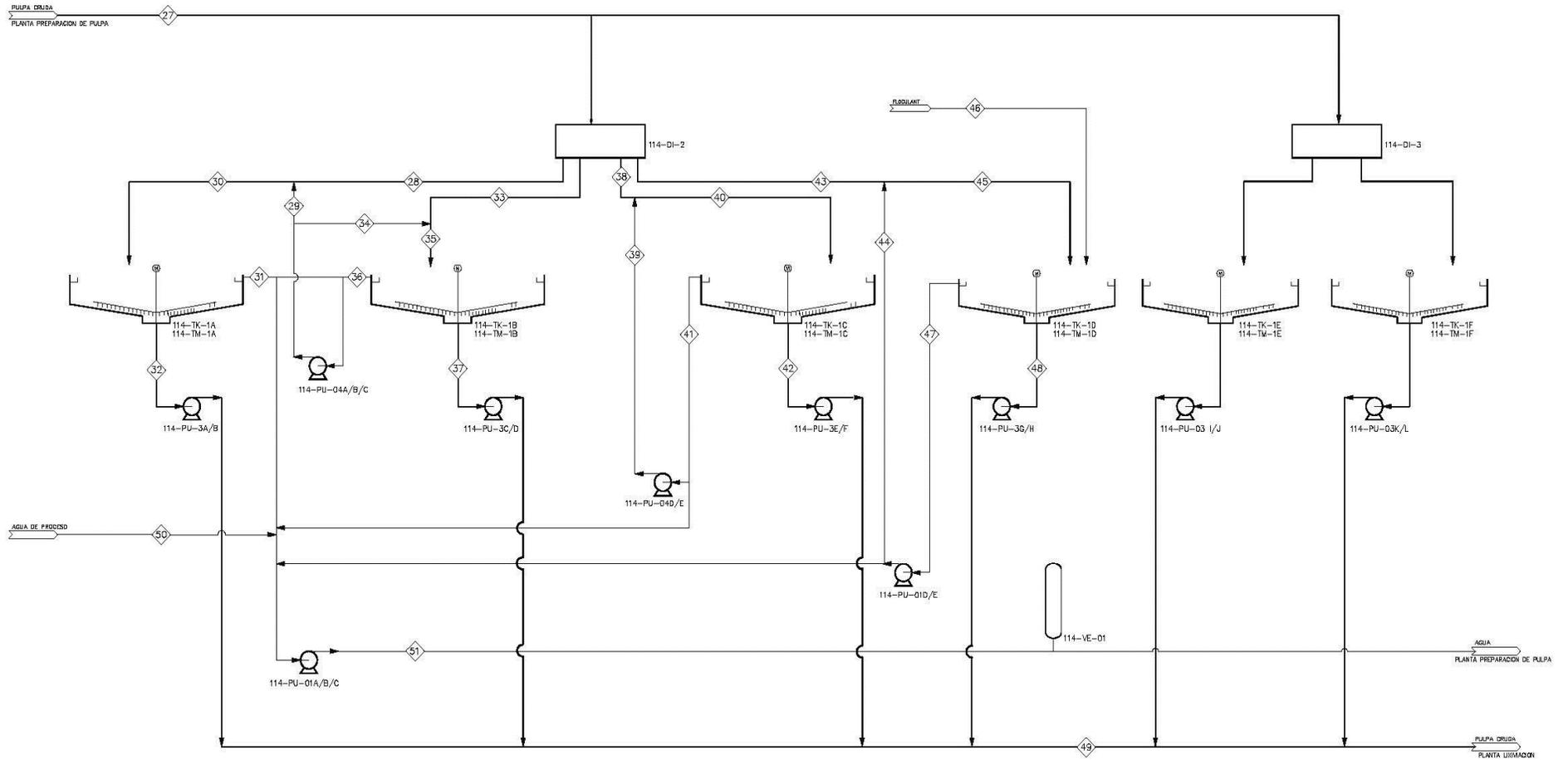
169. Watanabe T., M. Aoshima, A. Satoh, "Rheological properties and particle behaviors of a nondilute colloidal dispersion composed of ferromagnetic spherocylinder particles subjected to a simple shear flow: Analysis by means of mean-field approximation for the two typical external magnetic field directions". *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 302, 347–355, 2006.
170. Weng L., W. H. Van Riemsdijk, L.K. Koopal, T. Hiemstra, "Ligand and Charge Distribution (LDC) model for the description of fulvic acid adsorption to goethite". *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 302, 442-457, 2006.
171. Wilson J., D. Savage, J. Cuadros, M. Shibata, K. Vala Ragnarsdottir, "The effect of iron on montmorillonite stability. (I) Background and thermodynamic considerations". *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 70, 306–322, 2006.
172. Wu A. Q., L. J. Guo, C. S. Liu, E. G. Jia, Z. G. Zhu, "The experimental viscosity and calculated relative viscosity of liquid In–Sn alloys". *Physica B*. xx (x) xx-xx, 2007.
173. Yang X., C. Aldrich, "Rheology of aqueous magnetite suspensions in uniform magnetic fields". *Int. J. Miner. Process*. Vol. 77, 95– 103, 2005.
174. Yoghi B., "Rheology of oil-in-water emulsions containing fine particles". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Vol. 40, 103– 110, 2003.
175. Zhou Z., P.J. Scales, D. V. Boger, "Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions". *Chemical Engineering Science*. Vol. 56, 2901-2920, 2001.

ANEXOS

ANEXOS #1: Esquema tecnológico principal de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba.



ANEXO #2 Diagrama de flujo de la planta de espesadores de pulpa



114-TK-1A
114-TM-1A
SEDIMENTADOR Y
MECANISMO DE RASTRILLO

114-PU-3A/B
BOMBA DE FONDO DEL
SEDIMENTADOR
114-PU-04A/B/C
BOMBA REBOSO DE
SEDIMENTADOR

114-TK-1B
114-TM-1B
SEDIMENTADOR Y MECANISMO
DEL RASTRILLO
114-PU-04A/B/C
BOMBA AGUA DE DILUCION

114-DI-2
CAJA DISTRIBUIDORA

114-TK-1C
114-TM-1C
SEDIMENTADOR Y MECANISMO
DE RASTRILLO

114-PU-3C/D
BOMBA FONDO
DEL ESPESADOR
114-PU-3E/F
BOMBA DE REBOSO
DEL SEDIMENTADOR

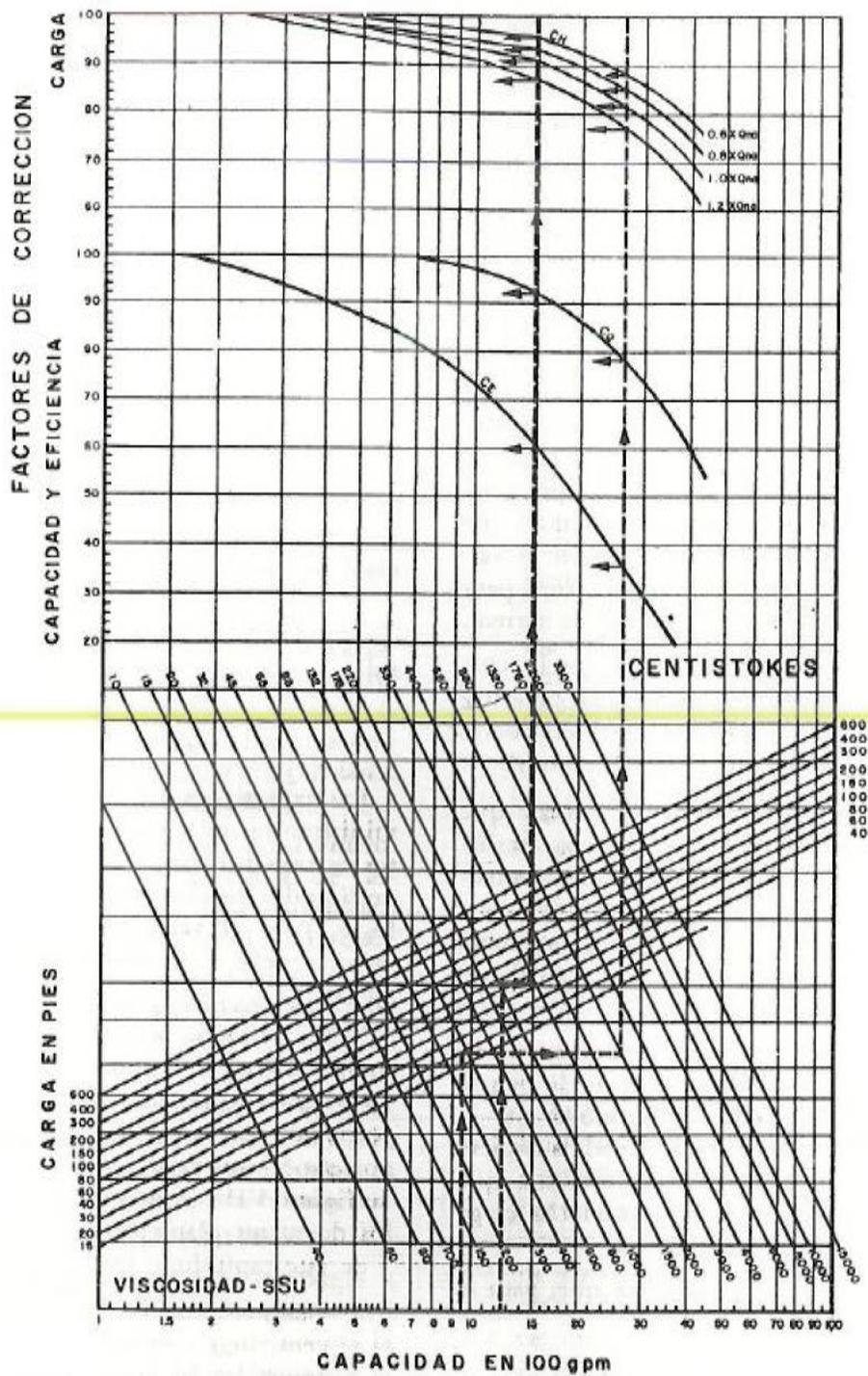
114-PU-01D/E
BOMBA REBOSO
DEL SEDIMENTADOR

114-PU-3G/H
BOMBA FONDO
DEL SEDIMENTADOR

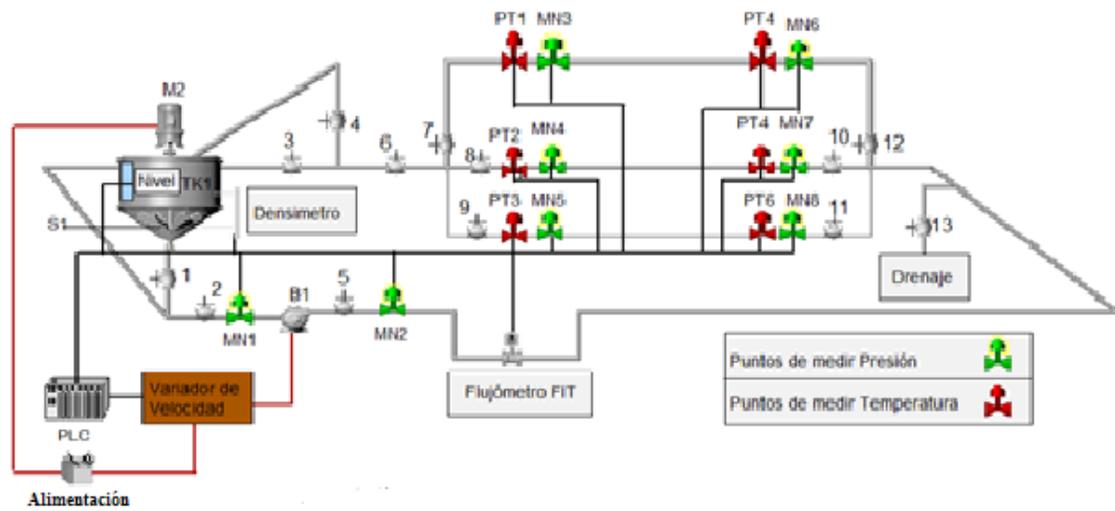
114-TK-1D
114-TM-1D
SEDIMENTADOR Y
MECANISMO DEL RASTRILLO

114-VE-01
TANQUE AMORTIGUADOR

ANEXO #3 Diagrama para el cálculo de los factores de corrección para líquidos viscosos, de las distintas características de las bombas centrífugas.



ANEXO #4 Estación experimental de hidrot transporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.



ANEXO #5 Descripción de la instalación de hidrotransporte del ISMMM.

La función fundamental de la instalación de hidrotransporte es su utilización como laboratorio de la asignatura de Mecánica de los Fluidos, con el objetivo de estudiar varios fluidos en movimiento a través de un sistema de red de tuberías y equipos conectados en paralelo, donde las líneas de descarga independientes de ambas bombas van hacia una línea de transporte común. La instalación está dotada de equipos, dispositivos eléctricos y accesorios mecánicos, que permiten realizar corridas de agua y pulpa para llevar a cabo investigaciones científicas, permitiendo hacer mediciones de diferentes variables como: presión, temperatura, densidad, nivel y flujo, registrando sus valores para un mejor análisis del proceso, según se muestra en el Anexo #4 se presenta un esquema de la instalación.

La misma cuenta con:

- Un tanque con un volumen de $5,187 \text{ m}^3$ en el que se deposita el material a transportar.
- Un agitador para homogenizar la mezcla.
- Una moto bomba centrífuga $\pi\text{G } 126/25$ que es la encargada de bombear el fluido de forma continua.
- Un motor reductor que es el que mueve el agitador.

La instalación semi-industrial está compuesta por una tubería DN 100, de longitud recta de 75 m, nueve codos de 90 grados DN 100 estándar, dos codos DN 150 de 90 grado estándar en la tubería trasera que se utiliza en la investigación, nueve válvulas de compuerta DN 100, emplantillada clase 150 lb, donde la mayoría de ellas son de vástago elevable con rosca externa y solo una en la descarga al tanque que tiene el vástago no elevable con rosca interna y tres válvulas de la misma clase y denominación DN 150 en la tubería trasera y en la salida del tanque, cuatro válvulas de globo DN 60 de la misma clase y una válvula de bola DN 32 además se cuenta con una válvula de venteo, un reducido y cuatro ensanchamientos, diez acoplamientos de platillos. La instalación también cuenta con dos Y y siete T. Además cuenta con instrumentación de control y medición actualizados como son toma de presión en los puntos sensores capacitivos en diferentes puntos de la instalación, en la succión y salida de la bomba, en los tramos de

tuberías de diámetro DN 150 donde están separados por longitudes de tubos de hasta 15,4 m respectivamente, con el objetivo de determinar las pérdidas hidráulicas; con el fin de medir la temperatura se instalaron termo-resistencias PT-100 con convertidores incorporados en el cabezote que convierten la señal de ohmioje a corriente de 4 a 20 mA, se utilizó un flujómetro magnético para conocer la cantidad de material que circula por la tubería; se montó un medidor de nivel por radar, para mantener una determinada cantidad de material dentro del tanque, mientras se realiza la corrida; además un densímetro, para medir la densidad con diferentes porcentos de sólidos. Las mediciones realizadas llegan a un autómata programable Simatic S7 300, el cual se encarga de procesar los datos y enviarlo por una red de comunicación Ethernet a una PC, donde se visualizan y registran por medio de un Software de Scada Citect. Al concluir la corrida se limpia la instalación en circuito abierto mediante la válvula de drenaje.

ANEXO #6 Resultados de la prueba con agua a 1 600 r/min.

Ps (kPa)	Pd (kPa)	Q (m3/h)	H (m)	Potencia Util kW	Potencia Motor kW	Rendimiento
16,86	724,90002	0,14375	72,1753333	0,02827243	32,759375	0,00086303
16,7325	724,40002	4,46875	72,1373619	0,87844145	34,559375	0,02541833
15,5175	717,70001	32,19375	71,5782375	6,27941338	31,51875	0,19922787
15,2225	718,02502	39,96875	71,6414393	7,80281617	39,209375	0,19900384
15,28	719	42,6125	71,7349643	8,32979681	35,0390625	0,23772887
15,3225	720,17499	45,46875	71,8504067	8,90243379	35,0390625	0,25407169
15,3225	719,42499	47,68125	71,7739541	9,32569079	39,209375	0,23784339
15,3875	719	48,975	71,7240061	9,57206172	39,66875	0,24129981
15,5175	718,45001	49,53125	71,6546901	9,67142386	39,1796875	0,24684791
15,325	720,22498	49,9625	71,8552477	9,78293479	42,8796875	0,22814846
15,51	715,70001	50,7125	71,3751284	9,86344052	36,5890625	0,26957347
15,4075	720,04999	50,95625	71,829	9,97387191	37,96875	0,26268634
12,975	657,09998	70,4375	65,6600387	12,6029315	38,4390625	0,32786782
11,37	653,27502	86,14375	65,4337431	15,3600293	41,309375	0,37182914
11,315	653,17499	88,6625	65,4291529	15,8080309	43,809375	0,36083671
11,385	653,42499	94,45	65,4475015	16,8446325	43,4796875	0,38741384
11,33	652,84998	98,3375	65,3944934	17,523742	36,01875	0,48651722
11,3575	652,90002	101,3875	65,396791	18,0678867	40,109375	0,45046543
11,3725	653,625	100,25625	65,4691641	17,8860631	38,1390625	0,46896966
11,2575	653,95001	101,81875	65,5140173	18,1772633	40,31875	0,45083896
11,1825	642,65002	102,8375	64,3697778	18,0384836	40,2796875	0,44783077
9,7925	625,375	113,4875	62,7505097	19,4058108	40,5890625	0,47810444
9,495	622,34998	117,225	62,472475	19,9560903	40,2796875	0,49543806
9,47	623	116,39375	62,5412844	19,8364048	37,959375	0,52256932
9,495	623,27502	116,41875	62,5667706	19,8487508	33,1890625	0,59805096
9,4775	622,52502	119,825	62,4921019	20,4051164	27,2296875	0,7493702
9,725	621,625	119,9	62,3751274	20,3796694	29,11875	0,69988133
9,5775	621,07501	121,95	62,3340989	20,7144782	29,609375	0,69959187

ANEXO #7 Resultados de la prueba con agua a 1 400 r/min.

Ps (kPa)	Pd (kPa)	Q (m3/h)	H (m)	Potencia Util kW	Potencia Motor kW	Rendimiento
16,89	568,27502	0,08125	56,2064241	0,012444454	18,81875	0,00066128
16,935	566,84998	0,10625	56,0565729	0,01623013	21,4390625	0,00075704
16,03	565,54999	25,4	56,0163089	3,877168818	26,61875	0,14565556
15,945	564,42499	32,5	55,9102946	4,951555465	25,7796875	0,19207197
15,8425	564,67499	36,5	55,9462273	5,564551635	24,1390625	0,23052062
16,0675	564	39,5	55,8544852	6,012037153	24,86875	0,24175068
15,945	564,42499	40,8	55,9102946	6,216106553	24,7390625	0,25126686
15,8175	564,65002	42,2625	55,9462304	6,443065105	25,5	0,25266922
15,8425	565,54999	42,7125	56,035422	6,522050324	25,1390625	0,25943888
16,0625	562,79999	43,21875	55,7326697	6,563697471	25,5390625	0,2570062
13,3275	517,5	69,28125	51,3937309	9,702694727	28,9	0,33573338
12,255	507,5	86,85	50,4836901	11,94778563	25,76875	0,46365406
12,24	508,10001	93,6125	50,5463823	12,894082	25,76875	0,5003767
12,1225	506,625	95,41875	50,408002	13,10689178	27,21875	0,48153908
12,1825	507,64999	96,475	50,50637	13,27784058	25,909375	0,51247244
11,9	504,17499	97,15625	50,1809368	13,28544222	26,359375	0,50401203
11,375	497,70001	101,8125	49,5744149	13,75387919	25	0,55015517
11,4925	497,10001	103,0125	49,5012752	13,89545656	28,309375	0,49084293
11,4375	496,72501	101,75625	49,4686555	13,71695477	27,809375	0,4932493
11,2975	496,92499	103,0125	49,5033119	13,89602828	26,4390625	0,52558703
11,5	496,875	101,5875	49,4775739	13,69667578	29,359375	0,46651796
11,5325	496,72501	103,78125	49,4589715	13,98719033	26,6390625	0,52506316
11,515	497,375	104,4625	49,5270133	14,09837507	26,3390625	0,53526488
11,39	496,92499	104,05	49,4938828	14,03330992	27,45	0,51123169
11,4375	496,70001	105,9375	49,466107	14,27986032	27,31875	0,5227128
11,435	497,35001	105,7625	49,5326208	14,27544062	27,65	0,5162908
11,495	495,89999	105,825	49,3786942	14,23948835	27,71875	0,51371322
11,37	494,75	107,8125	49,27421	14,47622396	27,5390625	0,52566147
11,33	493,32501	108,69375	49,1330285	14,55273476	27,809375	0,52330319
11,2925	493,22501	108,1125	49,1266575	14,47303569	27,91875	0,51839841
11,215	492,10001	109,5625	49,0198787	14,63526775	26,76875	0,54672959
11,0875	492,375	109,04375	49,0609072	14,57816495	27,46875	0,53071818
11,11	491,32501	111,5875	48,951581	14,8849979	25,759375	0,57784779

ANEXO #8 Resultados de la prueba con agua a 1 200 r/min.

Ps (kPa)	Pd (kPa)	Q (m3/h)	H (m)	Potencia Util (kW)	Potencia Motor (kW)	Rendimiento
17,175	434,57501	0,83125	42,548421	0,09637882	10,5	0,00917894
17,015	435,29999	8,6625	42,638633	1,00649826	10,6390625	0,09460404
16,5125	430,29999	13,775	42,1801723	1,58331185	12,609375	0,12556624
16,2825	431,39999	26,85625	42,3157482	3,0968053	13,45	0,23024575
16,1975	430,42499	31,88125	42,2250245	3,66835838	13,9796875	0,26240632
16,1975	430	35,85	42,1817023	4,12078323	14,7390625	0,27958245
16,13	430,75	38,2375	42,2650357	4,40389785	14,2	0,31013365
16,1225	431,14999	39,3875	42,3065739	4,54080424	12,95	0,35064125
16,08	430,95001	40,0125	42,2905209	4,61111073	13,8296875	0,33342093
16,1475	430,42499	40,8	42,2301213	4,69514489	13,0796875	0,35896461
16,225	431,10001	41,0875	42,2910306	4,73504916	13,2390625	0,35765744
16,2175	430,57501	41,525	42,2382783	4,77949878	14	0,34139277
16,09	430,79999	41,66875	42,274209	4,80012414	13,859375	0,34634492
15,3275	407,75	49,40625	40,0022936	5,38559004	14,159375	0,38035507
14,05	398,02499	63,5875	39,1411814	6,78222491	15,4390625	0,43928994
13,9925	398,35001	67,61875	39,1801743	7,21938177	15,959375	0,45235993
13,935	398,04999	71,375	39,1554526	7,61561317	16,4796875	0,46212121
13,9975	398,25	73,975	39,1694699	7,89585519	16,409375	0,48117952
13,905	398,29999	74,9375	39,1839949	8,00155543	15,71875	0,50904528
13,94	397,72501	76,23125	39,1218155	8,12678085	16,41875	0,49496952
13,9175	398,35001	77,31875	39,1878196	8,25662254	17,51875	0,47130204
13,96	397,89999	77,6875	39,1376137	8,28537166	14,959375	0,55385814
13,9925	398,17499	77,99375	39,1623333	8,32328697	16,5796875	0,50201712
13,8725	398,02499	77,9875	39,1592752	8,32197009	15,66875	0,53111895
13,91	398,17499	78,48125	39,1707431	8,37711021	16,2890625	0,51427823
14,0125	398,29999	78,1	39,1730367	8,3369036	15,5796875	0,53511366
13,9475	398,42499	77,83125	39,1924047	8,31232323	15,659375	0,53082088
13,81	397,85001	78,33125	39,1478094	8,3562039	15,959375	0,52359218
13,4425	390,5	80,85	38,4360347	8,46808302	16,25	0,5211128
13,2275	385,97501	83,575	37,9966881	8,65343699	16,31875	0,53027572
13,1375	385,07501	85,5875	37,9141193	8,84255601	16,159375	0,54720904
12,8825	385,32501	86,63125	37,9655973	8,9625445	16,6890625	0,53703103
12,89	384,45001	88,24375	37,8756381	9,10773573	16,0296875	0,56817924
12,835	385,375	89,2625	37,9755352	9,23718104	17,81875	0,51839669
13,0075	385,125	88,55	37,9324669	9,15305684	16,61875	0,55076687
13,02	385,52499	89,08125	37,9719664	9,21755837	15,75	0,5852418
12,92	384,97501	88,9375	37,9260968	9,19156735	17,36875	0,52920143
13,0525	385,57501	89,6	37,9737523	9,27167136	16,5	0,56191948
12,795	383,27499	90,7	37,7655443	9,33403753	17,2796875	0,54017398
12,735	382,77499	91,29375	37,7206922	9,38398287	17,0390625	0,55073352
12,8825	382,85001	91,3	37,7133038	9,38278713	17,709375	0,52982034
12,7225	383,04999	91,65	37,749999	9,42792068	16,7296875	0,56354434
12,8025	382,79999	91,89375	37,7163598	9,44457135	18,109375	0,52152939

ANEXO #9 Resultados de la prueba con agua a 1 000 r/min.

Ps (kPa)	Pd (kPa)	Q (m ³ /h)	H (m)	Potencia Util (kW)	Potencia Motor kW	Rendimiento
17,2575	324,64999	0	31,3346065	0	6,4890625	0
16,6	319,04999	23,875	30,8307839	2,005831531	6,5	0,30858947
15,8325	311,04999	47,91875	30,093526	3,929570305	8,4296875	0,46615848
15,685	311,32501	54,2625	30,1365963	4,456157234	8,5296875	0,52242913
15,76	311,29999	60,275	30,1264006	4,948242471	9,41875	0,52536085
15,6575	311,22501	63,2375	30,1292059	5,19193067	8,4296875	0,61591022
15,6275	311,35001	66,75	30,1450061	5,483188206	9,05	0,60587715
15,73	311,47501	67,75	30,1472997	5,565756785	7,809375	0,71270195
15,7175	311,67499	68,55625	30,1689592	5,636037687	9,459375	0,59581502
15,6325	311,47501	71,0125	30,1572385	5,835698956	8,559375	0,68179031
15,59	311,47501	78,3	30,1615708	6,435498968	7,7296875	0,8325691
15,61	311,29999	79,63125	30,1416911	6,540600977	8,9	0,73489899
14,6875	295,42499	94,8125	28,6174811	7,393728686	7,6	0,97285904
14,53	296,42499	97,68125	28,735473	7,648848609	8,8296875	0,86626493
14,5525	296,35001	99,35	28,7255362	7,776828505	9,1390625	0,85094379
14,51	295,54999	99,45625	28,648317	7,76421764	9,259375	0,83852502
14,515	296,14999	102,5375	28,7089694	8,021707719	8,7890625	0,91269208
14,57	295,875	103,975	28,6753313	8,124635382	9,46875	0,8580473
14,475	296,45001	104	28,74363	8,145944733	10,5796875	0,76996081
14,33	295,54999	104,2125	28,6666656	8,140732836	9,1796875	0,88682026
14,51	295,625	104,56875	28,6559633	8,165512266	9,96875	0,81911095
14,21	291,79999	107,20625	28,2966351	8,266494963	9,61875	0,85941468
14,495	295,04999	107,21875	28,5988777	8,355765371	10,15	0,82322812
14,285	292,42499	107,3125	28,3527003	8,291082688	9,7390625	0,85132246
14,165	293,125	107,5375	28,4362895	8,332961389	10,55	0,78985416
14,18	292,47501	107,8125	28,3685025	8,334355768	10,5796875	0,78776956
14,1775	292	107,81875	28,3203364	8,320687409	9,9296875	0,83796065
14,1975	291,97501	108,025	28,3157503	8,33525431	10,46875	0,7962034
14,4825	296,22501	108,1125	28,7199297	8,461079753	9,65	0,87679583
14,105	291,82501	108,15	28,3098889	8,343171967	10,96875	0,76063106
14,225	291,54999	108,64375	28,2696218	8,369340801	11,4796875	0,7290565
14,2425	292,57501	108,825	28,3723252	8,413759834	10,0890625	0,83394863
14,2425	292,52499	109,35	28,3672263	8,452830634	10,0390625	0,84199402
14,6	295,29999	109,58125	28,6136585	8,544293272	9,7390625	0,87732195
14,225	292,57501	109,7	28,3741091	8,48194336	9,56875	0,88642125
14,205	292,32501	110,54375	28,3506636	8,540119127	10,06875	0,84818067

ANEXO #10 Resultados de la prueba con pulpa a 41,96 % de sólidos a 1 400 r/min.

Ps (kPa)	Pd (kPa)	Q (m ³ /h)	H (m)	Potencia Útil (kW)	Potencia Motor kW	Rendimiento
20,985	465,42188	0,80625	31,7745424	0,09953534	24,05	0,00413868
20,9275	464,96875	0,475	31,7462573	0,05858878	23,9390625	0,00244741
20,875	463,32813	0,38125	31,6327163	0,04685702	24,3796875	0,00192197
18,31	262,59375	16,225	17,4648071	1,10097329	23,1890625	0,04747813
17,115	334,73438	29,24375	22,70786	2,58010604	26,6390625	0,09685424
15,9575	423,26563	41,96875	29,1200619	4,74839252	29,15	0,16289511
15,6475	431,82813	48,58125	29,7543919	5,6162709	31,41875	0,17875539
15,57	429,875	51,03125	29,6202957	5,87291723	30,309375	0,1937657
15,4125	421,625	52,425	29,041731	5,91546953	31,51875	0,18768097
15,5825	406,57813	53,2375	27,9538171	5,7821194	30,66875	0,18853456
15,5175	411,07813	54,48125	28,2801869	5,98628821	30,609375	0,19557042
15,56	402,78125	55,85625	27,6839718	6,00797971	28,709375	0,20926891
14,7575	384,35938	59,44375	26,4242936	6,10292271	27,8890625	0,21882854
13,295	408,17188	70,00625	28,2313029	7,67884711	32,059375	0,23951955
13,3475	408,96875	72,49375	28,2845208	7,96668555	32,459375	0,24543558
13,25	410,57813	73,56875	28,4065524	8,11970385	32,91875	0,24665894
13,265	411,65625	74,725	28,4825591	8,26938504	30,859375	0,26796995
13,1925	410,67188	75,60625	28,4173659	8,34775705	33,7890625	0,24705501
13,2	406,76563	75,76875	28,1375565	8,28332662	32,4	0,25565823
13,135	407,71875	76,5625	28,2103459	8,3917551	32,809375	0,25577309
12,965	415,39063	77,15	28,7709928	8,62420482	35,2	0,24500582
12,5575	412,9375	79,275	28,6247426	8,81670125	32,7	0,26962389
12,585	410,20313	80,175	28,4272857	8,8552871	33,95	0,2608332
12,615	404,23438	80,4375	27,9984114	8,75024552	34,36875	0,25459889
12,5125	406,28125	81,0875	28,1520783	8,86936764	33,659375	0,26350363
12,53	405,46875	82,3875	28,0927384	8,99256702	36,1890625	0,24848853
13,395	408,625	83,15	28,2565488	9,12871514	34,259375	0,26645889
13,28	411,67188	83,44375	28,4826041	9,23425345	31,759375	0,29075678
13,28	410,0625	83,83125	28,3675432	9,23965915	34,409375	0,26852156

ANEXO #11 Resultados de la prueba con pulpa a 42,36 % de sólidos a 1 400 r/min.

Ps (kPa)	Pd (kPa)	Q (m ³ /h)	H (m)	Potencia Útil (kW)	Potencia Motor (kW)	Rendimiento
20,27625	457,4	1,35312	31,13417	0,1643	22,52969	0,007293
18,76125	442,5	2,88438	30,18082	0,339507	21	0,016167
17,46125	438	2,975	29,9529	0,347529	24,17969	0,014373
17,39375	407,5125	2,95937	27,78624	0,320696	23,08438	0,013892
16,22	377,95	25,74375	25,76425	2,586746	25,48984	0,101481
16,3425	378,375	27,575	25,78579	2,773068	24,46875	0,113331
16,4675	382,1375	29,47812	26,04487	2,99424	24,13438	0,124065
15,145	356,9875	40,6375	24,34776	3,858784	25,77422	0,149715
14,52	372,8875	49,96563	25,52475	4,973905	29,53906	0,168384
14,29	393,225	53,31562	26,98967	5,611987	29,28906	0,191607
14,2575	386,7	54,1875	26,52724	5,606036	28,92969	0,193781
14,1775	394,925	54,76875	27,11877	5,792518	27,36484	0,211677
13,6275	373,025	55,23125	25,59811	5,513881	26,2	0,210453
13,97375	326,45	56,81875	22,25614	4,931808	30,09922	0,163852
13,885	363,5125	59,9125	24,90224	5,818627	29,12969	0,199749
13,91	343,25	60,50625	23,45726	5,535313	28,30938	0,195529
13,73375	324,4875	61,28437	22,13346	5,290096	28,30938	0,186867
13,755	320,475	62,1125	21,84615	5,291985	27,62891	0,191538
13,72625	326,075	62,72813	22,24706	5,442515	28,37891	0,19178
13,7	306,2	62,70937	20,83333	5,095136	27,76406	0,183516
13,67	316,7	64,25625	21,58333	5,40877	27,65	0,195616
13,755	299,6125	64,51563	20,36022	5,122854	26,11875	0,196137
13,7625	312,5625	65,9625	21,28205	5,474888	25,91875	0,211233
13,67	303,85	66,43437	20,66809	5,354979	27,57969	0,194164
13,66625	301,275	67,42188	20,48495	5,386423	28,50938	0,188935
13,58625	300,7125	67,69375	20,45059	5,39907	28,55	0,189109
13,63625	306,625	69,20937	20,86814	5,632657	28,73438	0,196025
13,625	310,8375	70,10313	21,16898	5,787646	27,63438	0,209436
13,79125	313,5375	70,15	21,34945	5,840889	26,96953	0,216574
13,55	297,6	75,30937	20,23148	5,942119	29,54375	0,201129