



Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Tesis en opción al Título de Master en Ciencia
Electromecánica

Estrategias para reducir el consumo de energía eléctrica
y las averías en bombas en el transporte de pulpa
laterítica precalentada

GILBERTO ACOSTA MONJES

Moa 2018

“Año 60 de la Revolución”



Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Tesis en opción al Título de Master en Ciencia Electromecánica

*Estrategias para reducir el consumo de energía eléctrica y
las averías en bombas en el transporte de pulpa laterítica
precalentada*

Autor. Ing. Gilberto Acosta Monjes

Tutor. Dr C. Gabriel Hernández Ramírez

Moa 2018

“Año 60 de la Revolución”

DEDICATORIA

A mis padres que siempre me apoyaron en todas mis decisiones.

A mis hijos y hermanos que tanto me quieren.

A mis familiares que siempre están presentes.

A mis amigos que nunca me abandonaron.

AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas que de una forma u otra me ayudaron a terminar mi trabajo investigativo, a mis tutores y sobre todo al ISMMM.

PENSAMIENTO

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de los parámetros de la pulpa precalentada, tales como: porcentaje de sólidos, densidad de la pulpa, temperatura y la productividad en el consumo energético y averías en el acoplamiento de las bombas centrífugas y las bombas de desplazamiento positivo de la planta de Lixiviación de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba, debido a que existe poco conocimiento de cómo éstas variables influyen sobre la eficiencia energética de dicho equipamiento. Los datos se tomaron a escala industrial y se analizó las bases de datos del proceso tecnológico. Los resultados fueron procesados empleando el software profesional Tierra versión 2.4. ISMM, 2004. En las condiciones de estudio, la productividad (P) resultó ser el parámetro de mayor coeficiente de correlación con un valor de 0,47, lo que demuestra que el consumo de energía de las bombas centrífugas y bomba de desplazamiento positivo depende en gran medida de la productividad por lo que se propone una estrategia de control entre el flujo de salida de la bomba de desplazamiento positivo y el motor de la bomba centrífuga para disminuir las averías y también obtener márgenes de ahorro de energía de aproximadamente de un 30 %.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	6
ESTADO DEL ARTE.....	6
Introducción	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Comportamiento reológico de suspensiones del mineral laterítico	12
1.3 Características químicas y mineralógicas de la pulpa limonítica	14
1.4 Base teórica de la investigación.....	15
1.5. Estrategia de control para la mejora en la eficiencia energética y las averías.....	22
1.6 Comportamiento del consumo energético en la planta de Lixiviación.....	23
Conclusiones parciales	25
CAPITULO II	26
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
Introducción	26
2.1 Materiales	26
2.2. Procedencia de los parámetros	27
2.3 Obtención de las bases de datos de la investigación	29
2.4 Métodos	33
Conclusiones parciales	39
CAPÍTULO III	40
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	40
Introducción	40
3.1 Análisis de las matrices de correlación	40
3.2 Influencia de cada parámetro sobre el consumo energético para la base de datos libre de averías	41
3.2.1 Influencia del porcentaje de sólidos sobre el consumo energético.....	41
3.2.2 Influencia del número de mineral sobre el consumo energético.....	42
3.2.3 Influencia de la densidad de la pulpa precalentada sobre el consumo energético.....	43

3.2.4 Influencia de la temperatura de la pulpa precalentada sobre el consumo energético.....	44
3.2.5 Influencia de la productividad de la planta sobre el consumo energético	46
3.3 Obtención del modelo matemático-estadístico de los parámetros de la pulpa precalentada sobre el consumo energético	47
3.4 Propuesta de acciones de control para reducir consumo energético y averías en las bombas centrífuga y de desplazamiento positivo.	48
3.5 Valoración económica.....	64
3.6. Impacto ambiental.....	67
Conclusiones parciales	68
CONCLUSIONES GENERALES.....	69
RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La problemática del uso racional de la energía en el contexto actual continúa ocupando un lugar prioritario en las investigaciones científicas a nivel mundial, debido a los precios crecientes y a la exigencia de ahorro de energía como vía hacia el desarrollo sustentable, el valor de la eficiencia energética juega un papel fundamental, principio esencial para lograr el desarrollo tecnológico, en Cuba cobra mayor significado por lo limitado de sus recursos energéticos y en la industria cubana del níquel inmersa en un creciente y constante ascenso en sus producciones, y demanda cada vez más un apreciable consumo de energía cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus empresas.

Las bombas han tenido y tienen un papel decisivo en el desarrollo de la humanidad. No es posible imaginar los modernos procesos industriales y la vida en las grandes ciudades sin la participación de estos equipos. Están presentes en las grandes centrales termoeléctricas, en las empresas de procesos químico, en las industrias alimenticias. Están presentes también en los equipos automotores. Tiene un decisivo papel en el confort de los grandes asentamientos humanos con el suministro de agua, evacuación de residuales y suministro de aire acondicionado. Los equipos de bombeo en particular son decisivos en los sistemas de riego para la producción agrícola de alimentos.

En las aplicaciones industriales, se estima que solamente en el accionamiento de bombas, ventiladores, compresores y aplicaciones de tracción mecánica, los motores de inducción consumen cerca del 70% de la energía eléctrica (CE, 2009; Boglietti, et al., 2003; Brunner, 2009; Walde y Brunner, 2011). Estudios publicados entre los años 2006 y 2011 (Ellis, 2007; Guardiola de Cabo; ECI, 2007; Brunner, 2007; Maruszczky, et al., 2009; Bertoldi y Atanasiu, 2009; Almeida, et al., 2009; Brunner, 2009; Mahla, 2009; Walde y Brunner, 2011), coinciden en que los SME demandan entre el 43% y el 46% del consumo total de la electricidad mundial. Este consumo se calculó en unos 6000 TWh en el 2005, y su aporte a la emisión de CO₂ es aproximadamente 4400 Mt que es aproximadamente el 16% de todas las emisiones relacionadas con la energía (Walde & Harrington, 2011). En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) el consumo de electricidad facturado ascendió a 12,8 TWh en el año 2010, siendo

responsable el sector estatal de un 46,8 %; del consumo y dentro de éste, la industria demandó el 86,4 %, donde los motores de inducción constituyen los consumidores principales de la energía total (Oficina Nacional de Estadística, 2010). En la industria del níquel los motores de baja tensión pueden alcanzar hasta el 45,9 % de la potencia instalada (Romero, 2014).

En la empresa cubano-canadiense “Comandante Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A.” (ECPSA) con tecnología de lixiviación ácida a presión del municipio de Moa, se efectúa la disolución de los óxidos de níquel y cobalto en forma de sulfatos a través del ácido sulfúrico como reactivo químico. En el proceso tecnológico de la fábrica intervienen las plantas que le dan tratamiento directo al mineral y las que producen ciertas materias primas. Cada una de estas plantas poseen funciones específicas, las cuales al tener un orden cronológico tributan a obtener como producto final de la entidad un sulfuro mixto de Ni y Co, que en un orden cronológico de producción son: Plantas de Pulpa, Espesadores, Lixiviación, Lavaderos, Neutralización y Precipitación de sulfuros.

En la planta de Lixiviación, comienza el proceso metalúrgico del mineral laterítico después de haber recibido el tratamiento físico en las plantas de Pulpa y Espesadores. Este proceso se efectúa bajo condiciones específicas y apropiadas de operación como son: temperatura, presión y otros factores que influyen y que determinan en este proceso, los cuales son llevados a cabo en un sistema de reactores.

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de la Unión del Níquel y el MINEM, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica y energética de los mismos.

En el costo de la extracción del níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico incide significativamente el tratamiento de las pulpas y en gran medida por el elevado consumo energético. En el tratamiento de las pulpas incide, además, una baja eficiencia operacional cuya causa se requiere precisar para disminuir los costos e incrementar su fiabilidad, se hace necesario investigar los factores que inciden en la variación de los parámetros de las pulpas en los operacionales y en particular

factores tales como: concentración de sólidos, porcentos de arena y gravilla, densidad de la pulpa, número de mineral y otras.

Las bombas centrífugas y bomba de desplazamiento positivo, utilizadas para el trasiego de la pulpa precalentada en la planta referida, juegan un papel esencial dentro del proceso tecnológico. Estas son las encargadas de garantizar la presión y el caudal de pulpa precalentada para mantener la eficiencia operativa de la planta. En la actualidad no es posible dar a las suspensiones lateríticas que se procesan en el área del níquel, una caracterización que garantice un comportamiento reológico predecible; de hecho, en una muestra este comportamiento cambia con el yacimiento, así como con el sitio y la profundidad con que se tome, de este tipo de bombas se han realizado numerosos estudios desde el punto de vista operacional en varios países (Pérez Franco, 1974; Pomper ,1965; Bastha, 1986; Nekrasov , 1968; Henshaw, 1981; Dillon, 1985; Cherkasski, 1986), sin embargo, teniendo en cuenta la influencia de los parámetros del fluido a trasegar son pocos los intentos realizados.

Por este motivo, es necesario conocer los parámetros técnico-organizativos de las bombas y los parámetros de la pulpa que describen el comportamiento de dichas suspensiones con vistas al cálculo y evaluación de los equipos, conductos, sistemas de bombeo y otros. En trabajos previos realizados se han abordado los efectos de las variables antes mencionadas, pero no se han obtenido parámetros racionales de operación para el correcto funcionamiento del sistema de bombeo, teniendo en cuenta los parámetros físico – mecánicos y reológicos de las pulpas.

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 (Mestizo, 1994), más del 60 % de la energía total que se consume en la transportación de fluidos es a costa de 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 (Rojas 2006). Es evidente, entonces, la especial importancia que tiene proponer medidas que contribuyan a mejorar los índices de rendimientos de estos sistemas.

Se presenta como situación problémica:

- a. Se desconoce la dinámica del comportamiento de factores tales como concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de las partículas, la temperatura de la suspensión y la composición mineralógica y no se conoce completamente su influencia en el comportamiento reológico de la pulpa precalentada.
- b. Se desconoce la influencia del comportamiento de los parámetros reológicos de la pulpa precalentada en la eficacia y eficiencia energética del bombeo de la misma hacia el sistema de reactores.
- c. Se carece de un sistema de toma de decisiones tecnológicas que permita configurar la operación de bombeo de manera eficaz y energéticamente eficiente teniendo en cuenta la dinámica de los factores de la pulpa precalentada.

Problema de la investigación

Insuficiente conocimiento científico acerca de la relación que existe entre los factores que caracterizan la pulpa precalentada y el consumo energético de las operaciones de bombeo de las mismas en la planta de lixiviación de la ECPSA, como elemento esencial para la determinación de los parámetros tecnológicos que garanticen la eficacia y la eficiencia energética de esas operaciones.

Objeto de estudio

Sistema de bombeo de pulpa precalentada de la Planta de Lixiviación.

Campo de acción

Consumo de energía.

Objetivo general.

Determinar las potencialidades de ahorro de energía en el sistema de bombeo de pulpa precalentada a través de estrategia de control y su impacto sobre el mantenimiento operacional.

Hipótesis

Si se ejecutan estrategia de control en el acoplamiento de las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo del sistema de bombeo de pulpa precalentada se podrá obtener mayor eficiencia productiva y energética.

Objetivos específicos

1. Actualizar el estado del arte relacionado con el análisis del comportamiento reológico de las pulpas lateríticas y la eficiencia energética de sistemas de bombeo
2. Determinar las causas de los elevados consumos energéticos y los márgenes de ahorro de energía en el acoplamiento de las bombas de pulpa precalentada.
3. Proponer estrategias de control proporcional para el ahorro de energía entre la medición de flujo de la bomba volumétrica y la velocidad de rotación de la bomba centrífuga.

Sistema de tareas

1. Revisión bibliográfica de trabajos investigativos relacionados con el análisis del comportamiento reológico de las pulpas lateríticas y la eficiencia energética de sistemas de bombeo, que se han realizado en los últimos años.
2. Obtención de una base de datos que relaciona los parámetros de la pulpa precalentada con el consumo energético de bombas centrífugas de pulpa y bomba de desplazamiento positivo en la Planta de Lixiviación.
3. Determinación de las causas de los elevados consumos energéticos y de las principales averías de las bombas de pulpa.
4. Elaboración de los modelos matemáticos para determinar la influencia de los parámetros de la pulpa precalentada sobre la eficiencia energética de las bombas de pulpa centrífuga y bomba de desplazamiento positivo en la Planta de Lixiviación.
5. Obtención de base de datos que relacionen el consumo de corriente, embolada y flujo de la bomba de desplazamiento positivo y centrífuga.

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE

Introducción

El objetivo del presente capítulo es establecer el marco teórico de la investigación, a partir del estado del arte del tema basado en el análisis de los trabajos precedentes, la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio.

1.1 Antecedentes

Para la realización de este trabajo se ha hecho una intensa búsqueda bibliográfica, se han consultado una serie de artículos, revistas y otros materiales, donde se pudo comprobar que existe muy poco material relacionado con la influencia de los parámetros de las pulpas lateríticas sobre la eficiencia energética de los sistemas de bombeo. Esta búsqueda estuvo dirigida en dos líneas fundamentales como son: la información relacionada con el enfoque teórico y los trabajos relacionados con análisis de las pulpas lateríticas y la eficiencia energética de sistemas de bombeo, que se han realizado en los últimos años.

En los últimos años se han emprendido estudios con el manejo de las suspensiones lateríticas, tanto en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente como en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), la Facultad de Ingeniería Química del Instituto Superior Politécnico de La Habana y el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) de Moa. Así la información experimental sobre la mineralogía y la distribución del tamaño de partículas de las lateritas cubanas (Puchol R. Q, 1984; Rojas A. L., P. Beyris, 1994; Ariosa J. D. et. Al., 2003; Agyei G., 2006; Falcón H. J., 2006) y su comportamiento durante el proceso de sedimentación (Falcón H. J., 1985; Almaguer A. F., 1996; Beyris P.E., 1997; Beatón B.M., 2001) ha ido incrementándose, propiciando una mejor comprensión acerca de la influencia de los diferentes factores que determinan las características reológicas de las pulpas que se alimentan al proceso productivo (Garcell L., 1991; Cerpa A. et al., 1996; Cerpa A. et

al.,1999; Cerpa A. et al.,2001; Cerpa A. et al., 2003; Pérez L. et. al., 2004; Pérez L. et. al., 2008; Pérez L., Y. Cardero, L. Garcell, 2009).

Sin embargo, estas relaciones de influencia aún poseen un carácter más bien cualitativo, lo que obliga a realizar nuevas caracterizaciones experimentales, para determinar la influencia que existe entre los parámetros de la pulpa precalentada con respecto al consumo energético de los sistemas de bombeo.

Vastos estudios realizados entre los años 2004 y 2011 en materia de eficiencia energética en América Latina y El Caribe (AL&C), analizan la situación y las perspectivas de las acciones e instrumentos implementados para mejorar la eficiencia energética. Dichos estudios se han enfocado principalmente en cinco aspectos: los avances en el marco político, normativo e institucional; los factores clave de la eficiencia energética y su rol efectivo; los recursos y mecanismos de financiación de los programas de eficiencia energética; los resultados de los programas; y en las lecciones aprendidas, (Carpio, et al., 2010; SENER, 2010; Horta, 2010; Lutz, Tecno. Lógicas., No. 30, enero-junio de 2013, 2011, Guzmán, 2009; ENTE, S.C., 2010; McNeil, et al., 2007; Ruchanski & Acquatella, 2010).

En su tesis doctoral (Turiño, 1996) obtuvo modelos matemáticos que reflejan el funcionamiento de las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo, los que toman en consideración el diseño del equipo de bombeo, variaciones de la velocidad de giro, recortes en el diámetro exterior del impelente (bombas centrífugas), regulación por cambio en los volúmenes de trabajo (bombas de desplazamiento positivo) y los efectos que sobre la operación de estos equipos tiene el trasiego de fluidos de naturaleza newtoniana y no newtoniana. Las aplicaciones efectuadas corroboraron la factibilidad de empleo a escala industrial del programa ESBO versión 1.0, y la validez de los modelos matemáticos elaborados por el autor. Este documento profundiza en la importancia de la aplicación de modelos matemáticos para determinar el funcionamiento de las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo, pero no correlacionan los parámetros del fluido a trasegar.

En su tesis doctoral (Turro, 2002) titulada "Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaco", demuestra que la composición mineralógica, la

concentración y temperatura de las muestras ejercen gran influencia sobre el gradiente hidráulico. Se obtuvo las correlaciones gráficas y expresiones matemáticas que describen el flujo de esas colas por tuberías; así como el factor de fricción para régimen laminar y turbulento. El conjunto de correlaciones obtenidas permitió conformar un modelo matemático aplicado para la metodología de cálculo de las instalaciones de transporte de colas trifásicas en el proceso CARON, que permitió calcular las instalaciones, establecer regímenes racionales de trabajo y seleccionar adecuadamente el equipamiento; así como valorar el trabajo de las existentes.

En su tesis doctoral (Rojas, 2006) demuestra que las variables principales que participan en la evaluación de la eficiencia del accionamiento del motor de inducción son: la potencia de entrada P_e , la frecuencia angular de rotación del rotor ω_r y la densidad de la pulpa laterítica ρ , que transporta la bomba centrífuga. Rojas demuestra la necesidad de instalar un controlador difuso para la mejora de la eficiencia energética de los motores de las bombas centrífugas de la planta de Lixiviación y Lavado de la empresa Ernesto Che Guevara y demuestra que con su uso la eficiencia del motor de inducción se mejora en un 8,34 %, en base al control de sus pérdidas para las condiciones de explotación de las plantas minero metalúrgicas, pero no tiene en cuenta la influencia que tienen los parámetros de la pulpa a trasegar en el consumo energético de dichas bombas,. El controlador difuso permite un efecto económico anual de 241 204 CUC pesos convertibles, por concepto de energía dejada de consumir en forma de pérdidas.

En su tesis doctoral (Pérez, 2010) determinó que las principales variables que influyen sobre el comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas que se manipulan en el proceso de Lixiviación Ácida a Presión (LAP) de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, de Moa son: el contenido de sólidos, la composición química, el pH y la distribución de tamaños de las partículas. Como resultado del diseño de experimentos, determinó que el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas puede ser evaluado utilizando como variables respuesta la viscosidad aparente (μ) y el esfuerzo cortante inicial (τ_0), pues sobre el índice de consistencia (K) y el índice de flujo (n) ninguna de las variables analizadas resultó ser significativas. Obtuvo un modelo matemático empírico-teórico que correlaciona la viscosidad relativa de las

suspensiones lateríticas con las principales variables que determinan su comportamiento reológico. El cual es válido en el dominio de operación del proceso, a niveles de: contenidos de sólidos entre 43 y 45 %, número de mineral entre 10 y 20, índice de estabilidad entre 0,03 y 0,12 y coeficiente de poli-dispersión entre 0,74 y 0,79; lo que constituye un aporte del trabajo. Esta tesis describe el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas, pero no hace referencia a la influencia que tienen en la eficiencia energética de las bombas que trasiegan dichas pulpas

En su trabajo de diploma (Abad, 2013) realiza propuestas para mejorar la eficiencia en los accionamientos de bombas de desplazamiento positivo. Determinó las características de explotación de los accionamientos, lo que facilitó la realización de un conjunto de mediciones, que sirvieron de referencia para conocer el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento. Realizó la simulación de los accionamientos eléctricos considerando las condiciones industriales de explotación, sugiriendo como propuesta la aplicación de Lógica Difusa en el motor de inducción. Propuso el uso de filtros de armónicos, además, realizó la valoración económica de los resultados obtenidos con la aplicación de las propuestas, logrando así mejorar la eficiencia en los accionamientos de la bomba de transporte laterítico cuando operan con cargas variables por lo que se obtienen ahorros de energía eléctrica. Con la aplicación del controlador difuso se obtiene un ahorro promedio de energía de 15 586,01 CUC anuales, por concepto de reducción de pérdidas en el sistema de accionamiento eléctrico, aunque no hizo referencia de la pulpa laterítica y su influencia en el consumo energético.

(Favier, 2014) plantea el propósito de determinar la influencia de los parámetros de la pulpa precalentada, tales como: porcentaje de sólidos, densidad de la pulpa, número de mineral, temperatura y la productividad en el consumo energético de las bombas centrífuga y de desplazamiento positivo de la planta de Lixiviación de la empresa comandante Pedro Sotto Alba, debido a que existe poco conocimiento de cómo éstas variables influyen sobre la eficiencia energética de dicho equipamiento. Pero no aborda la posibilidad de estrategia de control para obtener ahorro de energético.

La principal particularidad de la presente tesis es la creación de una nueva base de datos de producción, cuyo parámetro dependiente sea el consumo de energía de la bomba, el cual no se controla sistemáticamente en toda la empresa, sea para ahorrar energía o para la propuesta de medidas técnico-operacionales que garanticen máximos de productividad en condiciones de extrema densidad de pulpa en la planta.

Para lograr este propósito fue necesario utilizar el reporte de averías realizado por el jefe de mantenimiento de la planta de Lixiviación, independientes de los tecnólogos para después conectarlos y clasificar las bases de datos en dos: una que considere las pérdidas de productividad por problemas mecánicos en las bombas y su red de conductos con válvulas; y la segunda, el consumo de energía y la productividad de la planta que quedan dependientes solo de las propiedades de la pulpa que se controlan en la empresa. Esto presupone un trabajo inquisitivo de ingeniería de gran envergadura, así como, la creatividad para organizar las datas, de tal manera, que permita demostrar la necesidad de incluir en el sistema informativo de la empresa las mediciones de los parámetros electro-energéticos de cada bomba por sus implicaciones en la factura energética de la empresa y la productividad de la planta.

Por consiguiente, el presente trabajo no usó directamente materiales para realizar experimentos, pero si los datos de producción que la empresa almacenó durante el año 2016. Esto obliga a esclarecer la procedencia de los mismos, así como los métodos y normas empleadas por la empresa para obtenerlos.

(Hernandez, 2017) aborda la composición de la pulpa y su influencia en el proceso productivo y su posible ahorro energético pero no propone estrategia de control.

Es conocido que en la solución de problemas asociados con proyectos de 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 L. 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, conlleva a elevar la eficiencia de las bombas, que está relacionada a 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, también influye las características del fluido a transportar en cuestión. El estándar (ANSI/HI,2010) ha editado gráficas que son de gran ayuda para predecir la eficiencia de equipos de bombeo, pero en la predicción de la eficiencia muchas veces no se incluyen otros efectos perjudiciales como el manejo de mezclas viscosas, las cuales trataremos en esta investigación.

Existen condiciones que afectan negativamente la eficiencia del equipo de bombeo, entre las principales se encuentran: Pérdidas volumétricas; Pérdidas hidráulicas; Cavitación; Pérdidas mecánicas; Características del líquido; Condiciones de instalación. Las condiciones de instalación que influyen negativamente en la eficiencia del equipo de bombeo; podemos citar las siguientes: Pérdidas en motor y acoplamiento; Pérdidas en la bomba; Alineación; Impulsores; Recorte de impulsores, el recorte de impulsor es una técnica empleada desde hace mucho tiempo para cubrir lagunas en las líneas de fabricación; enfatizamos que las relaciones de afinidad permitirán saber si recortando el impulsor tendremos un punto de operación óptimo.

La eficiencia garantizada debe concordar con el punto de operación definido por el Punto de Intersección de la curva flujo-carga y la línea recta que va desde el origen y pasa a través del punto de operación garantizado. La eficiencia en este punto debe ser como mínimo 0.972 de la especificada. Cuando las características específicas difieren a las características de los equipos con impulsores sin recorte, deberá tomarse en cuenta que para alcanzar los valores de gasto y carga (q_v y H).

Las bombas trabajan con eficiencias más bajas que los motores de inducción, determinadas una parte por las limitaciones que le impone el diseñador y otra por las restricciones que le ofrece la red hidráulica donde va operar. Aunque de forma empírica se ponen coeficientes dentro de las expresiones analíticas que intervienen en el cálculo de las potencias y dimensiones de la bomba y sus instalaciones, todavía no es suficiente las especificidades que exigen los sistemas de transporte de hidromezclas, es por esto que adquiere importancia correlacionar 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. Todos estos estudios basan su análisis en minimizar las pérdidas de la máquina de inducción para cargas de tipo ventilador, que con aproximación simulan las condiciones de explotación mecánicas, pero no alcanza tener en cuenta con exactitud los diferentes regímenes de trabajo que exigen los mecanismos de transporte. La mejora del rendimiento de los accionamientos para bombas se ha tratado con el uso de un accionamiento a velocidad variable por control del caudal de la bomba centrífuga, a cambio de velocidad constante y válvula de estrangulación, lo cual muestra mejoras en el consumo de energía; la mejora se obtiene en el aumento del rendimiento de la bomba; para la mejora del rendimiento del motor en régimen estacionario varios autores han buscado los puntos de operación óptimos por diferentes técnicas; (Kirschen et al., 1984) propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; (Famouri, et al., 1991) utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control U/f ; (Park; Sul, 1984) obtienen, experimentalmente, los deslizamientos óptimos para diferentes puntos de operación en controles U/f ; otros autores han atacado el problema de manera analítica (Kusko, Galler, 1983) calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina; (Seleme, Canudas, 1992) consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias, (García et al., 1992) estimando adicionalmente las pérdidas en el núcleo. Se ha presentado un resultado que permite calcular una curva óptima U/f que mejora el rendimiento del motor cuando éste acciona bombas centrífugas o ventiladores, donde el par varía con el cuadrado de la velocidad (Ramírez, 1998). Otras alternativas es el uso de la inteligencia artificial (Rojas, 2006), demuestra la necesidad de instalar un controlador difuso para la mejora de la eficiencia energética de los motores de las bombas centrífugas.

1.2 Comportamiento reológico de suspensiones del mineral laterítico

La dispersión de un sólido en un líquido puede exhibir características de flujo newtoniano o no newtoniano, dependiendo de las interacciones físicas y químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido, así como 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 D. C-H., 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 sólido 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 I.N., D. Panda, P. Bandopadhyay, 1998; Stickel J. J., R. L. Powell, 2005); de ahí la necesidad de especificar claramente bajo qué condiciones se determina las características reológicas de la suspensión.

Además de una dependencia fuerte sobre la velocidad de deformación, la viscosidad de las suspensiones de laterita también depende del tiempo (Blakey B. C., D. F. James, 2003) y sus características de flujo son complejas, sobre todo a las concentraciones requeridas para el proceso productivo que permite separar hidro-metalúrgicamente el Ni y el Co que contienen (James D. F., B. C. Blakey, 2004; Klein A., D. J. Hallbom, 2002).

1.3 Características químicas y mineralógicas de la pulpa limonítica

La laterita ferro-niquelífera juega un rol importante en la industria 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 S. A. *et. al.*, 2004; Hernández A. *et. al.*, 2010). Es un producto del intemperismo químico en ambientes tropicales y subtropicales, desarrollado bajo fuertes condiciones de oxidación (Kenneh F., 2008).

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

Las diferentes clases granulométricas de las cortezas de intemperismo presentan contrastes significativos en cuanto al porcentaje en peso de la fracción, contenido químico y mineralógico que 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, pudiendo cambiar su color, coherencia, forma, textura y composición (Manceau A. *et. al.*, 2000; Ariosa J. D. *et. al.*, 2003; Hernández A. *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 A., 2001; Agyei G., 2006; Madigan C., Y.K. Leong, B.C. Ong, 2009; Luo W. *et. al.*, 2009; Hernández A. *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, pero 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.

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 (< 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 P., P. Beyris, 1994).

1.4 Base teórica de la investigación

En la industria química tiene gran importancia el transporte de productos líquidos y gaseosos por tubería, tanto dentro de la empresa, en instalaciones y aparatos aislados, como fuera de ella.

El movimiento de los líquidos por tuberías y aparatos está vinculado con gastos de energía. En algunos casos, por ejemplo, en caso de movimiento desde un plano superior a otro inferior el desplazamiento del líquido es de marcha natural, o sea, sin gasto de energía externa, debido a la transformación de una parte de su energía potencial en cinética. Para el transporte de líquidos a través de tuberías horizontales y desde un plano inferior a otro superior se emplean las bombas, A. Mariño et al, 1994.

Se denominan bombas a las máquinas hidráulicas que transforman la energía mecánica de un motor en energía de un fluido bombeado, aumentando la presión. El transporte de líquido se basa en la diferencia de presiones en la bomba y la tubería; Kasatkin, 1985.

Parámetros fundamentales de las bombas

Los parámetros fundamentales de las bombas de todo tipo son: el caudal, la altura de elevación y la potencia.

El caudal o capacidad Q (m^3/s) se define como el volumen del líquido impulsado por la bomba en la tubería de descarga en unidad de tiempo.

La altura de elevación o carga desarrollada H (m) caracteriza la energía específica comunicada por la bomba a la unidad de peso del líquido. Este parámetro muestra, en que magnitud aumenta la energía específica del líquido al pasar a través de la bomba y se determina acorde a la ecuación de Bernoulli (Ecuación 1.1) para líquidos no viscosos y viscosos (ecuación 1.2) respectivamente (A. Mariño et al, 1994)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.1)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} + h_1 - h_{pérdidas} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_2 \quad (1.2)$$

donde

P_1 y P_2 : Presiones estáticas absolutas en las secciones I y II, respectivamente, Pa;

ω_1 y ω_2 : Velocidades lineales medias en las secciones correspondientes, $\frac{m}{s}$;

h_1 y h_2 : Alturas geométricas con respecto al plano de referencia, m;

$h_{pérdidas}$: Altura de pérdidas, m.+

La potencia útil N_u , gastada por la bomba para comunicar al líquido la energía de presión, es igual al producto de la energía específica H por el caudal $\gamma \cdot Q$ de pulpa precalentada.

$$N_u = \gamma \cdot Q \cdot H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1.3)$$

La potencia en el árbol de la bomba N_e es mayor que la potencia útil debido a las pérdidas de energía en la propia bomba. La magnitud relativa de esta pérdida se valora por el rendimiento de la bomba η_b .

$$N_e = \frac{N_u}{\eta_b} \quad (1.4)$$

El rendimiento η_b caracteriza la perfección de la estructura de la bomba y su eficacia durante la explotación.

La potencia consumida por el motor o la potencia nominal del motor N_{motor} es mayor que la potencia impulsada en el árbol de la bomba en la magnitud de las pérdidas mecánicas en las transmisiones desde el motor eléctrico hasta la bomba y en el propio electromotor como se muestra en la ecuación 1.5.

$$N_{motor} = \frac{N_e}{\eta_t \cdot \eta_{motor}} = \frac{N_u}{\eta_b \cdot \eta_t \cdot \eta_{motor}} \quad (1.5)$$

El producto $\eta_b \cdot \eta_t \cdot \eta_{motor}$ representa el rendimiento completo de la instalación de bomba.

La potencia total de una instalación N_{ins} es calculada a base de la magnitud N_{motor} teniendo en cuenta las posibles sobrecarga durante la puesta en marcha de la bomba, que surgen con motivo de la necesidad de superar la inercia de la masa del líquido en reposo, se determina mediante la ecuación 1.6, Kasatkin, 1985.

$$N_{ins} = \beta \cdot N_{motor} \quad (1.6)$$

Aquí β es el coeficiente de reserva de potencia; su valor se define a tenor de la magnitud nominal de la potencia del motor N_{motor} , que se expresa en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Coeficiente de reserva de potencia.

N_{motor}	menos de 1	1 a 5	5 a 50	más de 50
β	2 a 1,5	1,5 a 1,2	1,2 a 1,5	1,1

Eficiencia de bombeo

La ecuación 1.7 expresa la eficiencia o rendimiento mecánico de bombeo, que es la relación existente entre la potencia que tiene el líquido a la salida de la bomba y la que se entrega a la bomba, generalmente se expresa en por ciento:

$$\% \eta = \frac{Pot_T}{Potent} \cdot 100 \quad (1.7)$$

Donde:

Pot_T – potencia calculada por la ecuación (1.3), kW;

$Potent$ - potencia entregada, kW.

Características de las bombas centrífugas

Las dependencias gráficas entre la altura de elevación, la potencia consumida, el rendimiento de la bomba y su caudal, siendo el número de revoluciones n constante, se denominan características de la bomba. Estas dependencias se obtienen durante los ensayos de las bombas centrífugas, cambiando el grado de abertura de la válvula en el tubo de impulsión. Dichas características se exponen en los catálogos de las bombas por sus productores.

De la figura 1.1 se deduce que al aumentar el caudal $n = \text{constante}$, la altura de elevación de la bomba disminuye, la potencia consumida aumenta, y el rendimiento pasa al máximo; (Kasatkin, 1985).

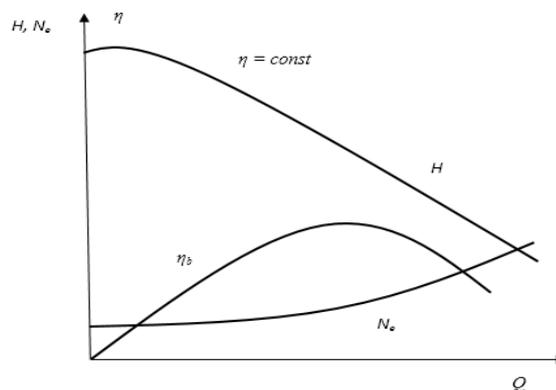


Figura 1.1. Características de la bomba centrífuga

Trabajo de las bombas para las redes

Al elegir la bomba es necesario tener en cuenta las características de la red, es decir, las tuberías y aparatos, por donde se transporta el líquido.

Las características de la red expresan la dependencia entre el caudal del líquido y la altura de elevación necesaria para transportar el líquido por la red dada. La altura de elevación se puede definir como la suma de la altura geométrica de carga H_g y de las pérdidas de carga h_p .

La combinación de las características del sistema y de la bomba viene mostrada en la figura 1.2. El punto A de cruce de estas características se denomina punto de trabajo. Este punto corresponde al caudal máximo de la bomba Q_1 durante su funcionamiento para la red dada. Si se necesita un caudal más grande es necesario aumentar el número de revoluciones del motor eléctrico o bien cambiar la bomba dada por otra de mayor caudal. El aumento del caudal puede también lograrse reduciendo la resistencia hidráulica h_p . En este caso el punto de trabajo se traslada por la característica de la bomba a la derecha; Kasatkin, 1985.

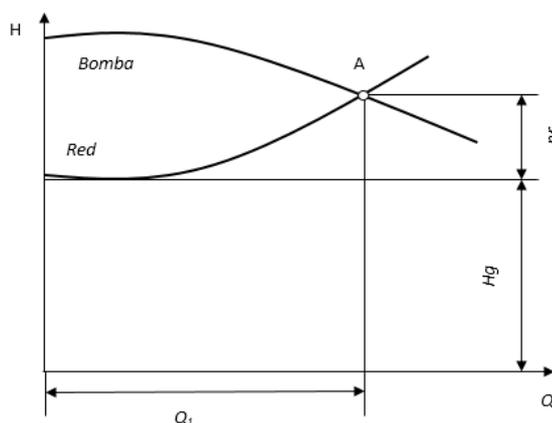


Figura 1.2. Combinación de las características de la bomba con la red

Funcionamiento conjunto de las bombas

En la práctica se emplea la conexión en paralelo o en serie de bombas que funcionan para una misma red.

En caso de la conexión en paralelo la característica total de la bomba se obtiene sumando las abscisas de las características de cada una de ellas para la altura de elevación dada. En la figura 1.3. a, se muestra las características de dos bombas iguales que funcionan paralelamente. La reunión de las características de la red, con

la característica total de la bomba muestra que el punto de trabajo B corresponde al caudal Q_2 mayor, que la capacidad Q_1 de una sola bomba es el punto A.

En el caso de la conexión en serie de las bombas la característica total se obtiene sumando las alturas de elevación de las mismas para un valor de caudal.

En la figura 1.3. b, se muestra la característica total de dos bombas iguales, conectadas en serie. El punto de cruce de estas características con la característica de la red, el punto B, corresponde a la altura de elevación y caudal H_2 y Q_2 totales de las bombas conectadas en serie y que funcionan para la red dada. Para semejante conexión de las bombas se logra aumentar considerablemente la carga desarrollada aún, cuando la característica de la red sea relativamente pendiente; Kasatkin, 1985.

Combinación de las características de la bomba con la red.

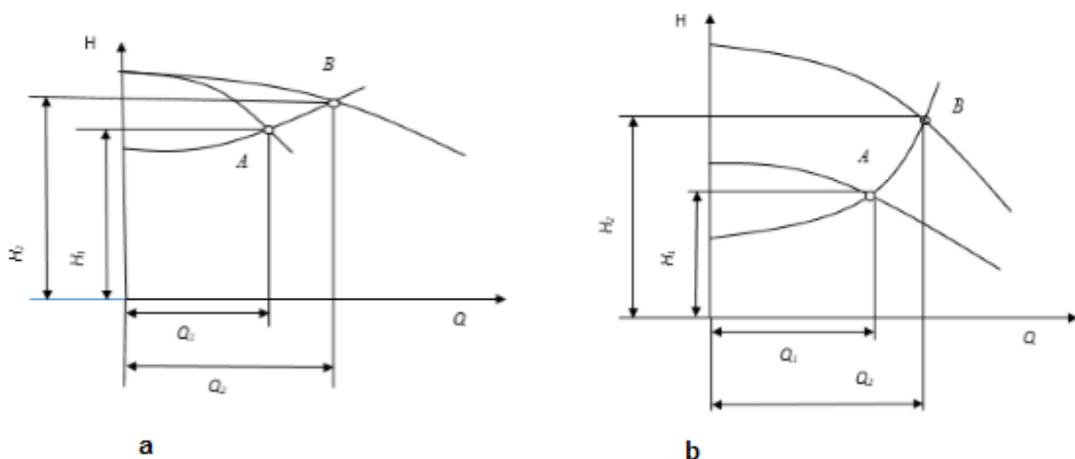


Figura 1.3. Funcionamiento conjunto de la bomba: a) conexión en paralelo, b) conexión en serie.

Característica de las bombas de desplazamiento positivo

En la figura 1.4 se muestra la dependencia entre la carga desarrollada H y el caudal Q de la bomba de émbolo, se representa como una recta vertical. La característica muestra, que el caudal de la bomba de émbolo es una magnitud constante, que no depende de la carga. Prácticamente a causa del aumento de las fugas del líquido a través de las holguras, que crecen al elevar la presión, la característica real no

coincide con la teórica. Con el incremento de la presión la capacidad real de la bomba de émbolo disminuye un poco. Kasatkin, 1985

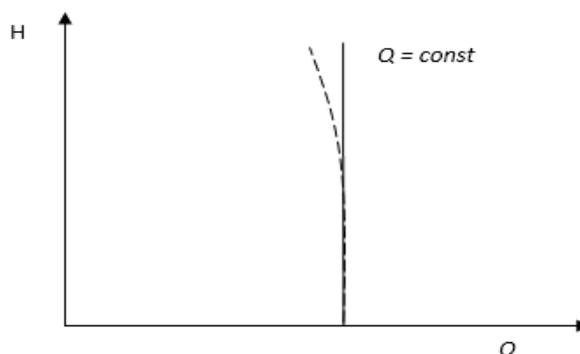


Figura 1.4. Característica de una bomba de émbolo

Tipos especiales de bombas de émbolo y centrífugas

Para transportar líquidos químicos activos y tóxicos, así como también líquidos que contienen suspensiones sólidas se emplean bombas de émbolo y centrífugas de estructura especial.

En este caso se usan bombas de diafragma, que no son más que bombas de émbolo de simple efecto y se usan para trasladar suspensiones y líquidos químicos agresivos. En estas bombas al desplazar el pistón hacia arriba, el diafragma, bajo la acción de las diferencias de presiones sobre sus ambos lados, se acopla hacia la derecha y el líquido a través de la válvula de impulsión es impelido a la tubería de descarga. Todas las piezas de válvulas, se fabrican de materiales acidorresistentes o se protegen por recubrimientos acidorresistentes.

En la industria química obtuvieron la mayor aplicación las bombas centrífugas, pues poseen varias ventajas, al compararlas con las bombas de émbolo. A estas ventajas se refieren: 1) gran caudal y carga uniforme, 2) compactibilidad y rapidez, es decir, facilidad de conexión eléctrica con el motor eléctrico, 3) sencillez de su estructura, lo que permite fabricarlas de materiales químico-resistentes, que resultan difíciles para el maquinado mecánico, por ejemplo de ferrosilicio, cerámica, etc., 4) posibilidad de bombear líquidos que contienen partículas sólidas suspendidas, gracias a las holguras relativamente grandes entre los álabes y a la ausencia de válvulas; 5) posibilidad de montarlas sobre filamentos ligeros.

A las imperfecciones de las bombas centrífugas se deben referir las alturas de elevación relativamente bajas, así como la reducción del caudal al aumentar la resistencia del sistema y la caída brusca del rendimiento al disminuir el caudal.

El empleo de las bombas de émbolo resulta conveniente sólo para relativamente pequeños caudales y altas presiones, para el bombeo de fluidos de alta viscosidad, de fluidos inflamables, así como también para dosificar medios líquidos.

1.5. Estrategia de control para la mejora en la eficiencia energética y las averías

La actuación normal en un sistema de bombeo implica puntos de consigna relativos a las variables que definen su comportamiento, esto es, la presión, el flujo o la altura. Para sistemas acoplados entonces existen parámetros compartidos que deben definir su accionar y conforman la base de una estrategia de control.

Los elementos de acoplamiento suponen un elemento de control o una de las variables o parámetros compartidos.

El acoplamiento centrífugo – desplazamiento positivo de la planta objeto de investigación tiene su acoplamiento por flujo, sin embargo, este flujo no está determinado y no existe modelos directos de su determinación; por lo que la forma normal de trabajo es en régimen de máxima descarga – succión. La succión en este caso se ve como una función de la productividad pedida por la bomba succionadora y determinable a su salida.

El uso de un modelo de acoplamiento usable para simulación permitiría conocer los valores de flujo a suministrar y los márgenes en que no se necesitará un flujo de descarga máximo (estado actual), así como los tiempos en los que se pueden establecer respuestas asociadas, lo que impactaría en su mantenimiento, y en la estabilidad productiva.

La incidencia de averías en sistemas de bombeo está relacionada con la forma en que se mantienen los acoplamientos y en que se manejan los flujos, luego se repite que mientras mayor sea el tiempo en que existe acoplamiento y se tengan márgenes de capacidad mejor será el funcionamiento del sistema de bombeo y mejores resultados se tendrán de sus mantenimientos.

La aparición de cavitación, recirculación interna y agotamiento por esfuerzos de membranas y componentes de las bombas son impactados directamente en el acoplamiento presente en el sistema bajo estudio.

Acciones de Control y Modelo de Estrategia

Un esquema base para un sistema de control aplicable a un sistema de bombeo puede representarse como sigue:

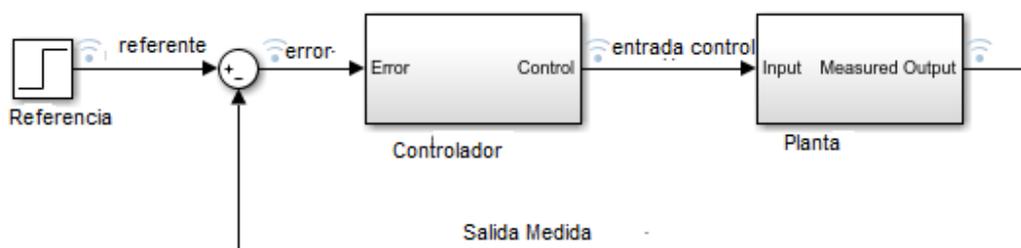


Figura. 1.5 Sistema de control

En cualquier caso, la estructuración de una estrategia de control y ahorro pasa por aclarar, entre otras cosas:

- La referencia
- El referente
- El controlador
- Agregados hardware
- La salida medida
- El modelo de la planta
- Las magnitudes de acoplamiento
- Magnitudes de respaldo

1.6 Comportamiento del consumo energético en la planta de Lixiviación

Los datos del consumo energético, portadores de energía y medios de consumo se extraen del informe del control de electricidad de la planta de Lixiviación, de esta manera se obtienen los datos para conformar nuestras bases de datos.

El diagrama de Pareto es una gráfica en forma de barras que clasifica en forma descendiente los que se analizan en función de su frecuencia, importancia absoluta o relativa. Adicionalmente permite observar en forma acumulada la incidencia total del

consumo energético.

En la tabla 1.2 se establecen los portadores de energía de la planta de Lixiviación y se demuestra que las bombas ocupan el 77,9 % del consumo total de energía.

Tabla 1.2 Portadores de energía de la planta de Lixiviación.

Portadores	Potencia activa, kW	%
Consumo Planta	28608	100,0
Bombas	22296	77,9
Otros	4278	15,0
Luminarias	2034	7,1

En la figura 1.6 se muestra la distribución de la energía en la planta de Lixiviación y las bombas son las mayores consumidoras de energía.

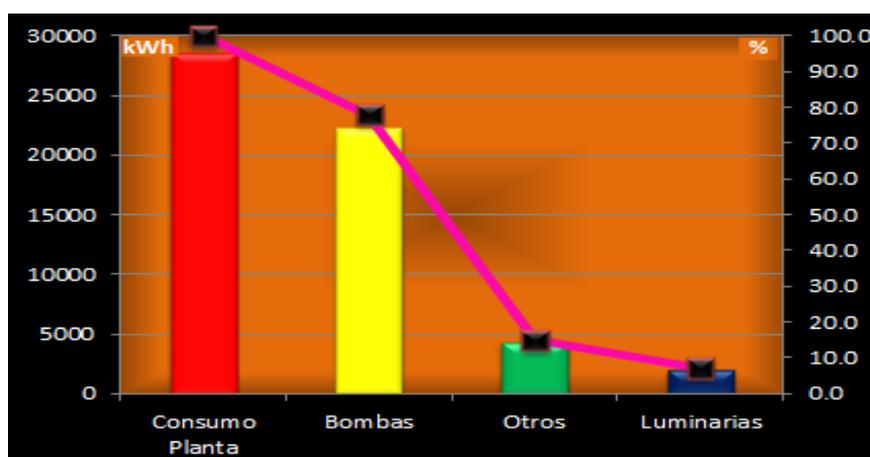


Figura. 1.6 Distribución de la energía en la planta de Lixiviación

En la figura 1.7 se muestra el consumo de energía de los principales medios de consumo de la planta de Lixiviación donde la bomba de pulpa son las más representativas en el consumo de energía con un 57,52 %.

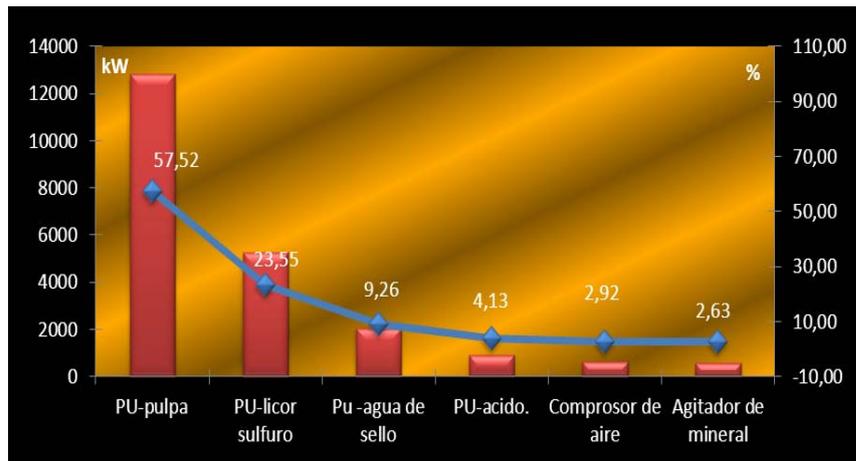


Figura 1.7. Principales medios de consumo

La figura 1.7 muestra que las bombas son el principal portador energético de mayor consumo, y la figura 1.7 demuestra que la pulpa es el medio de consumo de mayor gasto, por esta razón se enfoca la investigación en las bombas de pulpa de la planta de Lixiviación.

Conclusiones parciales

- La aplicación de la teoría relacionada con las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo, permitió establecer las características fundamentales, el estado técnico y la función que ejerce dicho equipamiento dentro del proceso productivo de la planta de Lixiviación.
- Los parámetros de la pulpa que se alimenta a la planta de Lixiviación de la empresa Pedro Sotto Alba, y en especial, la densidad de la misma, es un tema bastante estudiado, sin embargo son pocos los intentos realizados en cuanto a su influencia con respecto a la eficiencia energética de las bombas que la trasiegan, de ahí la importancia de la presente investigación, lo que se manifiesta en la no existencia de una base de datos que las correlacionen, ni se controla sus parámetros eléctricos individuales.

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción

La principal particularidad de capítulo es la creación de una nueva base de datos de producción, cuyo parámetro dependiente es el consumo de energía de la bomba, el cual no se controla sistemáticamente en toda la empresa, y no aparece en la Intranet para actuar sobre esta oportunamente, ya sea para ahorrar energía o proponer medidas técnico-operacionales que garanticen la máxima productividad de la planta en condiciones de extrema densidad de la pulpa.

Para lograr este propósito fue necesario utilizar el reporte de averías realizado por el jefe de mantenimiento de la planta de Lixiviación, independientes de los tecnólogos para después conectarlos y clasificar las bases de datos en dos: una que considere las pérdidas de productividad por problemas mecánicos en las bombas y su red de conductos con válvulas; y la segunda, el consumo de energía y la productividad de la planta que quedan dependientes solo de las propiedades de la pulpa que se controlan en la empresa.

2.1 Materiales

Los materiales utilizados en la investigación se relacionan a continuación:

1. Manual de operación de la planta de Lixiviación.
2. Libro de operaciones de la planta de Lixiviación.
3. Base de datos de los parámetros de operación de la planta de Lixiviación
4. Software de Supervisión CitectSCADA. Versión 7.10 Service Pack 3

Manual de operaciones de la Planta de Lixiviación: es el documento oficial de la Planta de Lixiviación que establece los parámetros de operaciones de la planta, describe los principales equipos y las principales operaciones. Este documento se utilizó para seleccionar los parámetros a estudiar en el presente estudio y tomar como referencia los valores de diseño de los parámetros.

Libro de operaciones de la Planta de Lixiviación: es el documento normativo que se utiliza para la recolección de incidencias en las operaciones de la planta. En este trabajo se utiliza como referencia para la toma de datos, averías y otros datos de interés con fines investigativos para la confección de la base de datos.

Base de datos de los parámetros de operación de la Planta: es el documento donde se recoge el comportamiento diario de los parámetros de operación de la planta de Lixiviación.

Software de Supervisión CitectSCADA. Versión 7.10 Service Pack

En la Empresa Pedro Soto Alba 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.

Los parámetros a analizar son los siguientes:

- Porcentaje de sólidos, %.
- Densidad de la pulpa, g/m³.
- Número de mineral, adimensional.
- Temperatura, °C.
- Productividad de la planta, t/h.
- Consumo energético de la Planta, kW·h.

Para analizar la procedencia de cada parámetro se requiere relacionar el número y nombre de la norma empresarial que se empleó y el lugar de procedencia de los datos tomados.

2.2. Procedencia de los parámetros

Número de mineral

Para determinar el número de mineral, se parte de la composición química de la pulpa. Este análisis se realiza en el laboratorio de la empresa "Pedro Soto Alba", por la técnica de fluorescencia de rayos X (Anexo 5) para determinar la composición química

del mineral laterítico. Se determina el número de mineral para predecir el comportamiento de la pulpa en la sedimentación (Iglesias C., 2010), que se determina por la ecuación 2.1, se decidió utilizarlo como variable representativa de la composición química, en la presente investigación:

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

Se ha comprobado que cuando el número de mineral radica entre 7 y 14 la pulpa tiene buena sedimentación (Pérez L., 2010).

Densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa se obtiene a partir del cálculo establecido por la planta referida (Anexo 6). En esta metodología se divide el volumen de agua y de pulpa para obtener la densidad de la pulpa (Pavlov, 1981).

Porcentaje de sólidos

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 de almacenaje de donde succionan las bombas Centrífuga, pues de ella depende la eficiencia del proceso de extracción, así como el consumo de ácido requerido para ello.

En la planta este parámetro se determina mediante la norma NEIB 050302, (Anexo 7).

Temperatura

Se han realizado muy pocos estudios acerca del efecto de la temperatura en el caso de las suspensiones de laterita, entre ellos están los realizados por Avotins P. A., S. S. Ahlschlager, R. G. Wicker., 2006 (cit. por Pérez L., 2004); Pérez L. (2004); Pérez L. *et al.* (2008) donde, de acuerdo con los resultados obtenidos se confirma que el esfuerzo cortante y a la viscosidad, así como los demás parámetros reológicos, disminuyen al aumentar la temperatura y este es el comportamiento típico esperado en la mayoría de los líquidos y suspensiones. Los problemas de alta viscosidad que en ocasiones se presenta con las pulpas lateríticas ocurren a temperatura ambiente.

En la planta de Lixiviación la temperatura se mide en los precalentadores ubicados encima de los tanques de almacenaje mediante un termopar.

Productividad de la planta

Esto es un cálculo que diariamente y a cada instante se determina. Esta capacidad se basa en la capacidad de bombeo de las bombas. La productividad de la planta la determinan las bombas de desplazamiento positivo mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Emb}{\min} \cdot \frac{kg}{Emb} \cdot \frac{\% \text{ s\u00f3lido}}{100} \quad (2.2)$$

Donde

$\frac{Emb}{\min}$: Se determina a partir de la lectura horaria de los contadores de emboladas;

$\frac{kg}{Emb}$: Es cada kg de pulpa impulsado por la bomba.

Consumo de energ\u00eda

El consumo de energ\u00eda en la planta se obtiene a trav\u00e9s del Citect mediante una PQM, que realiza lecturas de las variables el\u00e9ctricas como: potencia activa, reactiva y aparente, corriente, tensi\u00f3n, factor de potencia, energ\u00eda activa y reactiva. A partir de estas lecturas se pudo determinar el consumo energ\u00e9tico de la planta y de las bombas de pulpa precalentada. Estas lecturas son declaradas diariamente en el informe del control de electricidad de la planta de Lixiviaci\u00f3n.

2.3 Obtenci\u00f3n de las bases de datos de la investigaci\u00f3n

La Planta de Lixiviaci\u00f3n est\u00e1 compuesta por cinco trenes que deben procesar y lixiviar entre 8000 y 10 000 t/d\u00eda de mineral como promedio; las cuales se han visto afectadas por problemas t\u00e9cnico-operacionales y aver\u00edas en el sistema de bombeo.

A continuaci\u00f3n, se realiza un an\u00e1lisis de las principales aver\u00edas y su influencia en la productividad de la planta.

Para analizar la influencia de los par\u00e1metros de la pulpa precalentada sobre el consumo energ\u00e9tico de la planta en el per\u00edodo comprendido por el a\u00f1o 2016, se analiz\u00f3 una base de datos general que se muestra a continuaci\u00f3n una parte de ella en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Resumen de base de datos general de la planta de Lixiviación

Fecha	% de sólidos	No, Mineral	Densidad, g/cm ³	Productividad, t/h	Temperatura, °C	Consumo energético total, MWh
03-01-2016	36,87	10,54	1,415	8406	64	23,220
05-01-2016	37,59	12,32	1,411	7687	63	19,700
06-01-2016	37,76	9,537	1,413	7484	63	19,400
11-01-2016	39,76	9,997	1,427	7484	64	20,449
12-01-2016	38,02	10,718	1,409	8707	65	20,162
14-01-2016	38,15	12,477	1,425	7555	64	18,200
15-01-2016	38,46	10,938	1,451	7860	64	18,837
16-01-2016	39,32	10,444	1,422	7908	64	19,528
17-01-2016	38,72	8,392	1,417	7534	64	18,500
18-01-2016	39,31	8,395	1,460	7981	65	18,600

Esta base de datos es de vital importancia para proceder a la identificación de las principales averías y obtener una base de datos libre de averías y otra donde se contemplen ellas.

En la tabla 2.2 se precisa una parte de las averías ocurridas en el sistema de bombeo de la planta de Lixiviación en el período del año 2016.

Tabla 2.2 Una parte de las averías de las bombas de pulpa de la planta de Lixiviación

Fecha	Tren	Equipo	Modo	tiempo, h	Pérdidas, t
03-01-2016	3	PU-1F	Avería entredós	1,083	16,740
05-01-2016	4	PU-6B	Diafragma ponchado	7,083	80,760
06-01-2016	3	PU-5B	cheque calzado	3,000	32,790
06-01-2016	3	PU-5B	cheque calzado	0,917	10,110
06-01-2016	3	PU-5B	cheque calzado	2,000	38,240
06-01-2016	5	PU-22B	espárragos partidos	5,167	53,810
08-01-2016	4	PU-6B	cheque calzado	0,833	11,990
09-01-2016	4	PU-6B	cheque calzado	2,000	39,670
09-01-2016	4	PU-5A	espárragos partidos	1,333	10,370

Vale aclarar las principales averías antes nombradas en la base de datos para una mejor comprensión:

La avería entredós, se refiere a una avería en la red, el entredós es la unión del reducido empleado para el acoplamiento a la succión y descarga de las bombas.

La avería PU, es la avería que incurre en el cambio total de la bomba, exceptuando la voluta que es la parte externa del equipamiento.

Para reducir la base de datos anterior se realiza la tabla 2.3 donde se recogen las principales averías en que incurrió la planta.

Tabla 2.3 Principales averías

Principales averías	tiempo, h	Pérdidas, t	%
Avería entredós	6,000	47,110	0,150
Diafragma ponchado	179,283	9520,170	30,215
cheque calzado	483,333	9777,820	31,033
espárragos partidos	148,550	3477,440	11,037
Avería PU	328,150	4918,270	15,610
Disparo PU	13,450	186,010	0,590
Instrumentación	8,250	93,580	0,297
Fugas	66,713	1197,570	3,801
Espárragos flojos	1,417	21,030	0,067
Ponche línea calibración	29,533	10,960	0,035
Avería válvula	4,750	140,880	0,447
Avería codo	6,917	157,950	0,501
Avería tenedor descarga	7,500	484,000	1,536
Avería revestimiento	4,250	349,920	1,111
Avería motor	25,033	825,750	2,621
Avería línea de aire	14,250	132,120	0,419
Avería eléctrica	5,433	94,020	0,298
Ponche reducido succión	0,333	6,520	0,021
Avería Cameron	0,950	66,660	0,212
Total	13 34,097	31 508	100,000

De esta manera se demuestra que las principales averías están dadas por los cheques calzados para ambos tipos de bombas centrífugas y bomba de desplazamiento positivo, que expresa un 31 % del total de averías, y los ponches de los diafragmas en el caso de las bombas de desplazamiento positivo que representa un 30 %. Estos tipos de averías comprenden un período de 662, 617 h de trabajo, en las cuales las pérdidas fueron de 19 297,990 t.

El total de averías ocurridas en la planta en el período comprendido, demuestra el elevado valor de pérdidas de productividad, que representa 31 508 t de mineral perdidas en el año 2016.

Al relacionar las averías antes mencionadas se procede a la separación de la base de datos general, para obtener una base de datos donde se contemplan las averías y otra libre de ellas.

La base de datos donde se contemplan las averías se muestra a continuación solo una parte de ella en la tabla 2.7

Tabla 2.7 Una parte de la base de datos donde se contemplan las averías

Base de datos donde se contemplan las averías						
Fecha	% de sólidos	No, Mineral	Densidad, g/cm³	Productividad, t/h	Temperatura, °C	Consumo energético de las bombas, MW·h
03-01-2016	36,870	10,540	1,415	8406	64	17,879
05-01-2016	37,590	12,320	1,411	7687	63	15,169
06-01-2016	37,760	9,537	1,413	7484	63	14,938
08-01-2016	38,490	9,491	1,415	5504	65	13,637
09-01-2016	38,510	8,279	1,540	5634	64	13,358
11-01-2016	39,760	9,997	1,427	7934	64	15,746
12-01-2016	38,020	10,718	1,409	8707	65	15,525
14-01-2016	38,150	12,477	1,425	7555	64	14,014
15-01-2016	38,460	10,938	1,450	7860	64	14,504

Esta base de datos recoge la relación entre las variables referidas en ella por días. De esta manera se aprecia detalladamente la productividad lograda por la planta y su respectivo consumo energético con respecto a la cantidad de bombas en operación. Con esta base de datos se realiza el diagnóstico de las principales causas de los elevados consumos energéticos.

En la base de datos libre de verías se recogen los mismos parámetros lo que difiere de la anterior es que están en operación los 10 sistemas de bombeo, a continuación, se muestra una parte de ella en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Una parte de la base de datos libre averías

Base de datos donde se contemplan las averías						
Fecha	% de sólidos	No, Mineral	Densidad, g/cm ³	Productividad, t/h	Temperatura, °C	Consumo energético de las bombas, MW·h
01-01-2016	38,670	10,540	1,428	8921	64	19,499
02-01-2016	37,490	11,499	1,412	8551	64	18,930
04-01-2016	35,730	12,051	1,394	7538	64	16,898
07-01-2016	36,730	11,111	1,411	6496	65	13,544
10-01-2016	39,440	8,609	1,423	7526	65	15,074
13-01-2016	37,730	12,360	1,410	8251	63	16,446
23-01-2016	39,590	10,106	1,430	8249	63	19,008
31-01-2016	39,310	12,911	1,420	9323	63	17,459
02-02-2016	38,210	11,210	1,420	9039	64	17,964
05-02-2016	36,810	12,516	1,406	8688	64	14,628

Con la base de datos libre de averías se obtiene un modelo matemático-estadístico, por el método del mínimo cuadrado para la correlacionar los parámetros antes descritos, y determinar cuál de ellos tiene mayor influencia en el consumo energético de las bombas de pulpa precalentada Centrífuga y bomba de desplazamiento positivo de la planta referida.

2.4 Métodos

Al tomar los datos del sistema de control automatizado de la empresa, el Citect, se pueden producir errores, tanto en la operación como al organizarlos. Por eso debe realizarse la depuración de datos a partir de métodos estadísticos. La estadística está relacionada con los métodos científicos para la recolección, organización, tabulación, presentación y análisis de los datos, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables en base a ese análisis.

Cuando se realizan observaciones a partir de mediciones está latente la posibilidad de que se incluyan valores anómalos o atípicos.

Para probar la anomalía de un dato x_s pueden realizarse las siguientes pruebas:

- Regla de MAD (Desviación de la Mediana Absoluta).

- Criterio de los Cuartiles.
- Regla de Chauvenet.
- Regla de Grubb.
- Regla de Dixon (o también llamada Q de Dixon).
- Prueba de Cochran.
- Prueba de Bartlett

De estas pruebas una de las más sencillas es la regla de la desviación de la mediana absoluta, que por su sencillez y efectividad fue la utilizada en esta investigación.

Regla de MAD (Desviación de la Mediana Absoluta)

La desviación de la mediana absoluta se calcula por la ecuación 2.4:

$$C = \left| \frac{x_s - M}{M_m} \right| \quad (2.4)$$

Donde:

M : Mediana de los datos a analizar;

M_m : Mediana de las diferencias $|x_i - M|$;

x_s : Dato a analizar.

Si $C < 4,5$ entonces se dice que x_s es un número anómalo.

De esta manera se limpia la base de datos de números anómalos que impidan la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Método de los mínimos cuadrados

Sean los n datos $(P_i; Y_i)$ donde $p=(X_1, X_2, \dots, X_v)$. Se quiere encontrar un modelo descrito por una ecuación $Y_i=f(P)$ y en particular encontrar una función f tal que para cualquier índice i , los valores de $f(P_i)$ sean “cercaños” a los valores Y_i

En su forma más simple, este método se aplica cuando los datos son de la forma $(X_i; Y_i)$ y consiste en hallar los valores de **a** y **b** de manera que la suma de los

cuadrados de las diferencias entre Y_i y $Y_{ti} = f(X_i) = a X_i + b$, sea mínima. Formalmente se trata de hallar los valores a y b para los cuales la función $d(a,b) = \sum_{i=1}^n (aX_i + b - Y_i)^2$ tiene su valor mínimo. Si para buscar los posibles puntos de extremo derivamos esta función respecto a las variables a y b , se obtiene:

$$\begin{cases} d'_a = 2 \sum_{i=1}^n X_i (aX_i + b - Y_i) \\ d'_b = 2 \sum_{i=1}^n (aX_i + b - Y_i) \end{cases}$$

Igualando a cero las derivadas se tiene:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n X_i (aX_i + b - Y_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^n (aX_i + b - Y_i) = 0 \end{cases} \quad \text{Que se puede escribir de la siguiente forma:}$$

$$\begin{cases} \left[\sum_{i=1}^n X_i^2 \right] a + \left[\sum_{i=1}^n X_i \right] b = \left[\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right] \\ \left[\sum_{i=1}^n X_i \right] a + [n] b = \left[\sum_{i=1}^n Y_i \right] \end{cases}$$

Los valores de a y b se pueden encontrar resolviendo ese sistema de ecuaciones lineales.

Nótese que en este procedimiento estamos encontrando cuales son los valores de a y de b que minimizan la suma $\sum_{i=1}^n (aX_i + b - Y_i)^2$.

No siempre es conveniente tomar un modelo de la forma $Y_t = f(X) = a X + b$ pero los métodos para determinar a $f(X)$ como un modelo no lineal se hacen muy complejos excepto en los casos en que usemos una técnica de cambios de variables para reducir nuestro modelo no lineal en un modelo lineal, por esa razón conviene generalizar algunos aspectos de los modelos de regresión.

La regresión lineal puede generalizarse para varias variables en el **Modelo Lineal Generalizado**. En el caso más general, si consideramos las variables independientes X_1, X_2, \dots, X_V (que de manera general podemos denotar por \mathbf{X}) y la variable dependiente \mathbf{Y} , el modelo de regresión tiene la forma:

$$(\mathbf{A}) = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_k \end{pmatrix} \quad (\mathbf{I}) = \begin{pmatrix} [\sum_{i=1}^n f_0(X_i)Y_i] \\ [\sum_{i=1}^n f_1(X_i)Y_i] \\ \dots \\ [\sum_{i=1}^n f_k(X_i)Y_i] \end{pmatrix}$$

Ahora es necesario aclarar algo de suma importancia. Cuando se hallan los coeficientes de un modelo de regresión, estamos obteniendo la mejor caracterización posible de un tipo de modelo para los datos y esto implica dos cosas:

1. Si cambian los datos, los valores de los coeficientes a_i han de cambiar. Esto es de suma importancia cuando para integrar alguno de nuestros modelos solo seleccionamos algunas de las variables disponibles o una parte de los valores de las mismas.
2. La selección de las funciones f_k es parte del trabajo creativo que debemos efectuar y para esto podemos auxiliarnos de alguna aplicación informática, pero es la experiencia y un profundo conocimiento del problema que estamos modelando lo que nos permite seleccionar al más conveniente entre varios tipos de modelos.

Un criterio práctico elemental para seleccionar uno entre varios modelos de los mismos datos es tomar aquel que tenga mejor coeficiente de correlación, pero también es conveniente considerar algunas pruebas de hipótesis relacionadas con estos modelos y para su exposición nos basaremos en el caso lineal generalizado.

Para ello se deben precisar los siguientes parámetros:

- N: número de datos (\mathbf{X}_i, Y_i) .
- K: número de funciones en el modelo.
- V: número de variables independientes $\mathbf{X}=(X_1, \dots, X_V)$
- Variación Explicada V_e . Donde Y_{t_i} es el resultado de evaluar en el modelo a los valores medidos \mathbf{X}_i . Tiene K-1 grados de libertad.
- Variación Residual V_r . Tiene N-K grados de libertad.

- Variación total V_t . Tiene $N-1$ grados de libertad

- Error estándar de estimación $e_s = \sqrt{\frac{V_r}{N-K-1}}$

- Error probable de una estimación $e_p = 0.6745 \sqrt{\frac{V_r}{N-K}}$

- Coeficiente de correlación r

Intervalo de confianza (r_1, r_2) del coeficiente de correlación.

Para hallarlo se dan los siguientes pasos:

a. Se le aplica la transformada z al valor r y se obtiene el valor $r_z = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right)$

b. Se calcula: $a = r_z - \frac{Z_{(1+\alpha)/2}}{\sqrt{N-3}}$; $b = r_z + \frac{Z_{(1+\alpha)/2}}{\sqrt{N-3}}$ donde Z se obtiene resolviendo la

ecuación $\frac{1+\alpha}{2} = \int_{-\infty}^z N(0;1) dz$.

c. Ahora se obtienen los valores r_1 y r_2 aplicando la anti-transformada de z , es decir

se calculan: $r_1 = \frac{e^{2a} - 1}{e^{2a} + 1}$ y $r_2 = \frac{e^{2b} - 1}{e^{2b} + 1}$.

Prueba F de Fisher para todo el modelo.

Se calcula $F_{\text{exp}} = \frac{r^2 (N-K)}{(1-r^2) (K-1)}$ y se toma de la tabla correspondiente de la

distribución F de Fisher: $F_{\text{teor}} = F_{K, N-K-1, 1-\alpha}$. Si $F_{\text{teor}} > F_{\text{exp}}$ entonces se acepta el modelo.

Debe ser conocido por el lector que desea profundizar en estos temas que en la literatura especializada se explican pruebas para decidir la aceptación o rechazo de los coeficiente a_1, \dots, a_k en un modelo dado.

Finalmente, para quienes sea de mayor interés trabajar con modelos más complejos, es conveniente señalar la existencia de métodos para obtener modelos de regresión

no lineales. Por ejemplo, puede ser encontrada una explicación breve del Método de Levenberg-Marquard en la ayuda del software CurveExpert Versión 1.3, de Daniel Hyams (1997).

Para la obtención de los modelos matemático por el método del mínimo cuadrado, se utilizó el Software Tierra. Versión 2.4. ISMM, 2004.

Conclusiones parciales

- Se demostró la necesidad de crear una nueva base de datos con el consumo de energía de las bombas para demostrar la hipótesis científica mediante los métodos y metodologías expuestas.
- Se establecen las variables independientes y dependientes a partir de la obtención de las bases de datos con y sin averías para evitar confusiones en los resultados de los modelos matemáticos estadísticos previstos a obtener.
- Se fundamentó la base del cálculo del consumo de energía para las bombas de la planta de lixiviación.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Introducción

Para la realización de este capítulo se hace un estudio de la influencia de los parámetros por ciento de sólidos, temperatura, número de mineral y la productividad en el consumo energético de la planta de Lixiviación y se definen las estrategias de control.

3.1 Análisis de las matrices de correlación

La matriz de correlación para la base de datos con averías se muestra en la tabla 3.1, que expresa el coeficiente de correlación de cada parámetro al ser correlacionado con los demás.

Tabla 3.1 Matriz de correlación para la base de datos con averías

Variable	% sólidos	Número de mineral	Densidad, g/cm ³	Temperatura, °C	Productividad, t/h	Consumo energético, MW·h
% sólidos	1	-0,028285	0,573949	0,043095	0,409655	0,188014
Número de mineral		1	-0,025954	0,027693	-0,04563	-0,079849
Densidad			1	0,006068	0,26967	0,258003
Temperatura				1	0,068932	0,163474
Productividad					1	0,474645
Consumo energético						1

De esta tabla se infiere que la productividad es la variable de mayor influencia con respecto al consumo energético, al tener un coeficiente de correlación de 0,474; que se encuentra en el rango de 0,4 a 0,6 que a escala industrial se considera significativo. Como parámetro de la pulpa precalentada la densidad resulta también significativa, aunque existen disciplinas tecnológicas que impiden que los datos sean estrictamente confiables, de ahí su bajo coeficiente de correlación. La matriz de correlación para la base de datos sin averías se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Matriz de correlación para la base de datos sin averías

Variable	% sólidos	Número de mineral	Densidad, g/cm ³	Temperatura, °C	Productividad, t/h	Consumo energético, MW·h
% sólidos	1	-0,127274	0,64998	0,019279	0,447707	0,126378
Número de Mineral		1	-0,079851	0,008891	-0,057688	-0,06102
Densidad			1	0,090296	0,308939	0,153542
Temperatura				1	0,018379	0,136254
Productividad					1	0,472413
Consumo Energético						1

De la tabla 3.2 se infiere que la productividad es la variable de mayor influencia con respecto al consumo energético, al tener un coeficiente de correlación de 0,47; que se encuentra en el rango de 0,4 a 0,6 que a escala industrial se considera significativo. El porcentaje de sólidos, el número de mineral, y la densidad de la pulpa influyen positivamente con respecto al consumo energético de las bombas de pulpa, pero en menor proporción. Sin embargo, el número de mineral ejerce una influencia negativa en la variable de respuesta a analizar, esto significa, que, con el aumento de los contenidos de elementos y compuestos de composición química de la pulpa precalentada, como el SiO₂, Mg, Mn y el Co, disminuye el consumo energético del equipamiento en cuestión.

3.2 Influencia de cada parámetro sobre el consumo energético para la base de datos libre de averías

3.2.1 Influencia del porcentaje de sólidos sobre el consumo energético

El modelo matemático-estadístico de correlación lineal (ecuación 3.1) entre las variables consumo energético y porcentaje de sólidos, demuestra que al aumentar el porcentaje de sólidos aumenta el consumo energético, pero con muy bajo coeficiente de correlación, lo que evidencia la poca significación de este parámetro.

$$C_{\text{energético}} = 15,788 + 0,202 \cdot P_{\text{sólido}} \quad (3.1)$$

Al correlacionar el consumo energético con el porcentaje de sólidos se observa que existe muy poca correlación. La figura 3.1 muestra la curva del modelo de correlación

lineal, donde se ubican los puntos alejados de la recta, lo que determina un coeficiente de correlación de 0,126; esto hace que esta correlación sea poco significativa dentro del fenómeno de los elevados consumos energéticos existentes en el sistema de bombeo de la planta de Lixiviación. De esta manera se demuestra que, al aumentar el porcentaje de sólidos, aumenta el consumo energético, con poca significación.

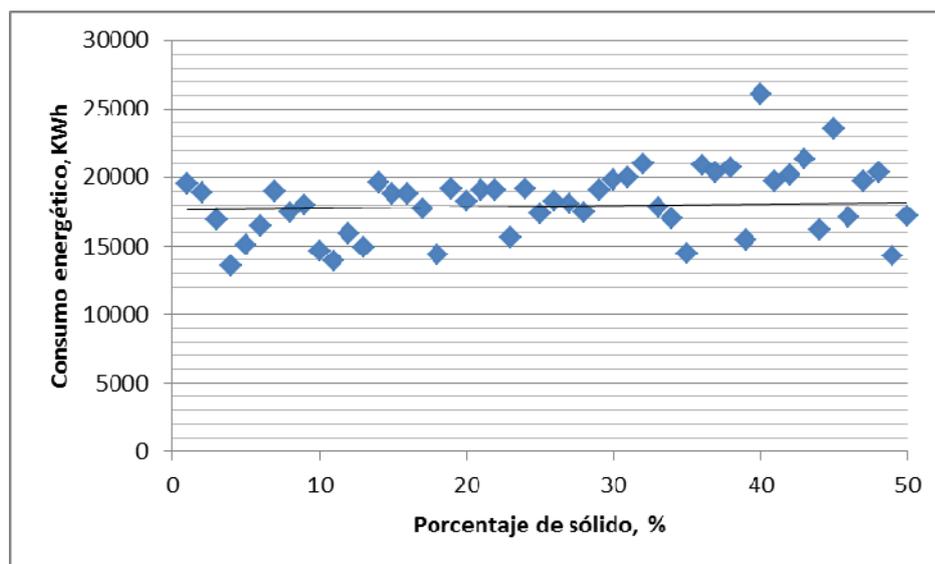


Figura 3.1. Influencia del porcentaje de sólidos sobre el consumo energético

Se realiza la prueba F de Fisher con un nivel de confianza 0,95 y se demuestra que el valor de la F de Fisher calculada (F_c) para el ajuste es 5,519 y la F de Fisher teórica (F_t) tiene un valor de 3,022. De esta manera se explica que el ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

3.2.2 Influencia del número de mineral sobre el consumo energético

En el modelo matemático-estadístico de regresión lineal (ecuación 3.2) se observa la baja correlación existente entre el consumo energético y el número de mineral, es decir, que con el aumento del número de mineral disminuye el consumo energético con un coeficiente de correlación de -0,061.

$$C_{energético} = 25,419 - 0,118 \cdot N_{Mineral} \quad (3.2)$$

La figura 3.2 demuestra que el parámetro número de mineral no tiene gran influencia en los indicadores de elevados consumos en las bombas de pulpa centrífuga y bomba de desplazamiento positivo de la planta de Lixiviación.

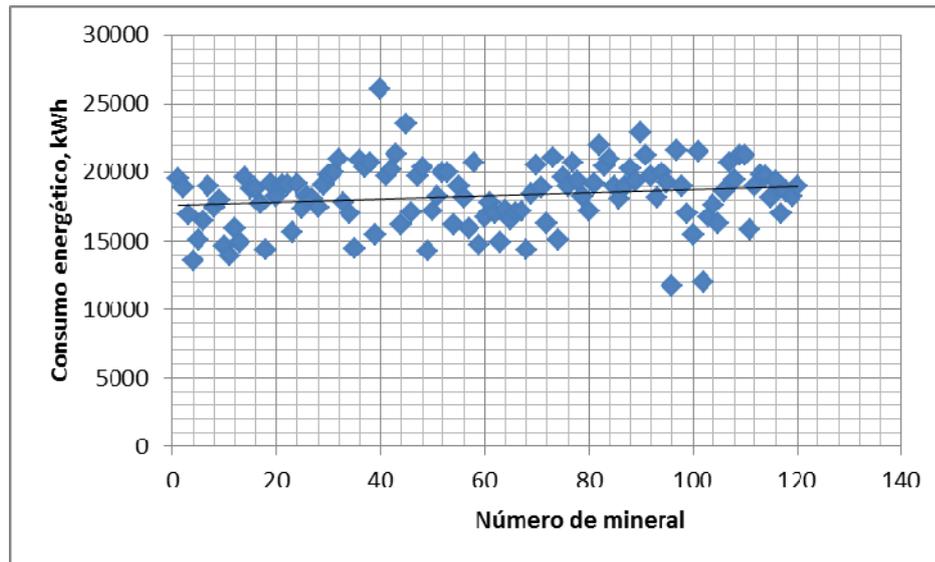


Figura 3.2 Influencia del número de mineral sobre el consumo energético

El modelo obtenido refleja que el número de mineral presenta muy poca correlación con el consumo energético, pero vale aclarar que ejerce un comportamiento negativo, es decir que, con su aumento, disminuye el consumo energético, pero con muy poca significación.

Se realiza la prueba F de Fisher con un nivel de confianza 0,95 y se demuestra que el valor de la F de Fisher calculada (F_c) para el ajuste es 1,271 y la F de Fisher teórica (F_t) tiene un valor de 1,271. De esta manera se explica que el ajuste no es estadísticamente significativo ya que $F_c < F_t$.

3.2.3 Influencia de la densidad de la pulpa precalentada sobre el consumo energético

Al correlacionar las variables densidad de la pulpa precalentada y consumo energético se obtiene un modelo matemático-estadístico de regresión lineal (ecuación 3.3) que con el aumento de la densidad aumenta el consumo energético con un coeficiente de correlación de 0,153. Esto determina la baja correlación existente entre ambas variables.

$$C_{energético} = 2,004 + 15,287 \cdot D_{pulpa} \quad (3.3)$$

La figura 3.3 muestra la curva del modelo de correlación lineal, donde se ubican los puntos muy alejados de la recta, lo que determina un coeficiente de correlación de

0,154; esto hace que esta correlación no sea significativa dentro del fenómeno de los elevados consumos energéticos existentes en el sistema de bombeo de la planta de Lixiviación.

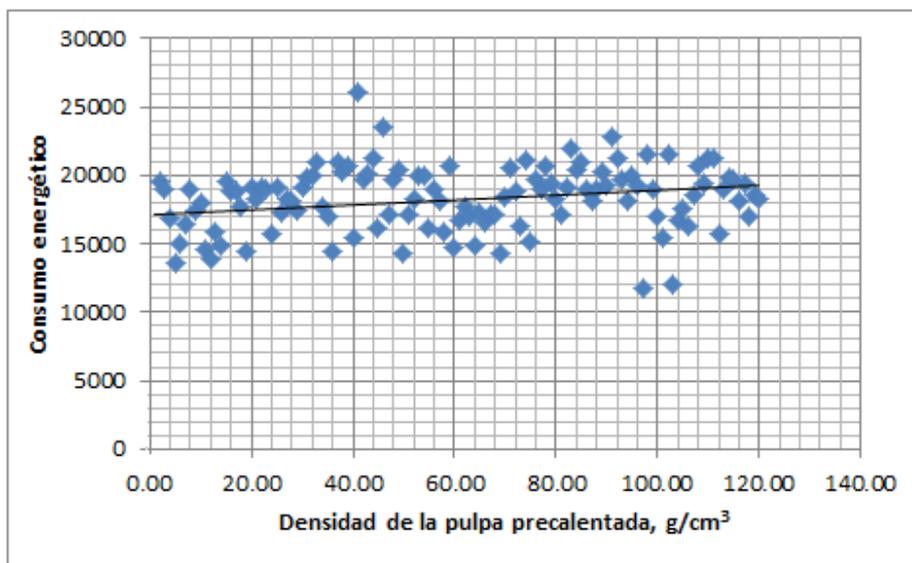


Figura 3.3 Influencia de la densidad de la pulpa precalentada sobre el consumo energético

El modelo refleja que, con el aumento de la densidad de la pulpa, aumenta el consumo energético, pero este comportamiento ocurre con muy bajo coeficiente de correlación.

Al realizar la prueba F de Fisher con un nivel de confianza 0,95 se demuestra que el valor de la F de Fisher calculada (F_c) para el ajuste es 8,209 y la F de Fisher teórica (F_t) tiene un valor de 3,022. De esta manera se explica que el ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

3.2.4 Influencia de la temperatura de la pulpa precalentada sobre el consumo energético

Para determinar la influencia de la temperatura de la pulpa precalentada sobre el consumo energético se obtiene un modelo matemático-estadístico de regresión múltiple (ecuación 3.4). De esta manera se demuestra que con el aumento de la temperatura aumenta el consumo energético con un coeficiente de correlación de 0,136. Esto determina la baja correlación existente entre ambas variables.

$$C_{\text{energético}} = 20,411 + 0,551 \cdot T_{\text{pulpa}} \quad (3.4)$$

Al correlacionar el consumo energético con la temperatura de la pulpa precalentada se observa que existe muy poca correlación. La figura 3.4 muestra la curva del modelo de correlación lineal, donde se ve la temperatura bien definidas alrededor de los 80 y 90 grado centígrado que independiente de los valores nominales que se manejan en el manual de operaciones en la realidad se comportan como se muestran en la gráfica 3.4 . De igual manera este comportamiento con un coeficiente de correlación igual a 0,136 hace que esta correlación no sea significativa, dentro del fenómeno de los elevados consumos energéticos existentes en el sistema de bombeo de la planta de Lixiviación.

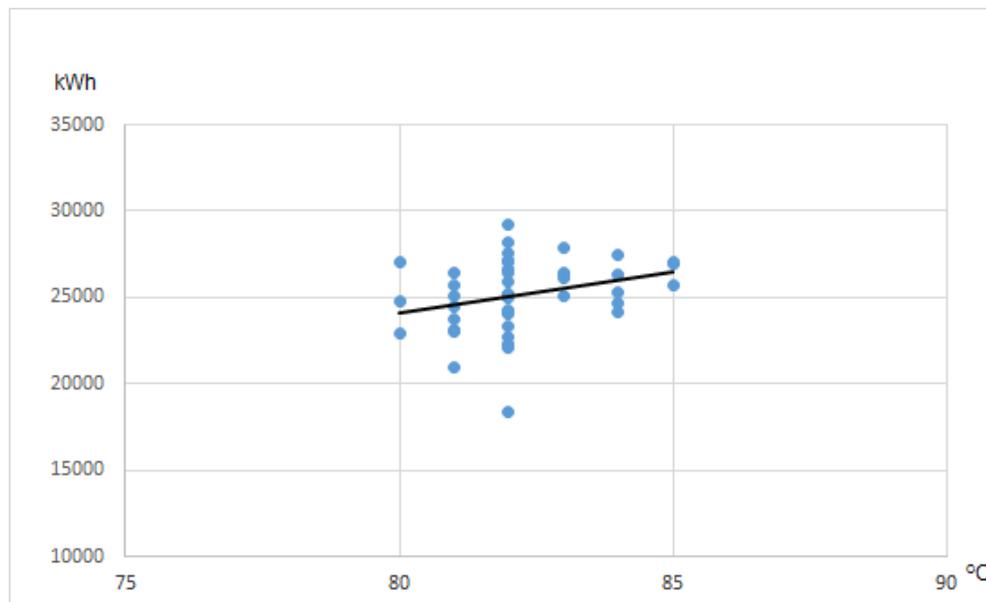


Figura 3.4 Influencia de la temperatura de la pulpa precalentada sobre el consumo energético

Al realizar la prueba F de Fisher con nivel de confianza 0,95 se demuestra que el valor de la F de Fisher calculada (Fc) para el ajuste es 6,432 y la F de Fisher teórica (Ft) tiene un valor de 3,022. De esta manera se explica que el ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

3.2.5 Influencia de la productividad de la planta sobre el consumo energético

Para determinar la influencia de la productividad de la planta sobre el consumo energético se obtiene un modelo matemático-estadístico de regresión lineal (ecuación 3.5). Este modelo demuestra que, con el aumento de la productividad de la planta, aumenta el consumo energético con un coeficiente de correlación de 0,472. Esto determina que existe correlación entre ambas variables, ya que el coeficiente de correlación se encuentra dentro del rango de 0,4 a 0,6, que a escala industrial se considera una correlación significativa.

$$C_{\text{energético}} = 8,533 + 0,002 \cdot P \quad (3.5)$$

La figura 3.5 muestra la curva del modelo de correlación lineal, donde se ubican los puntos cercanos a la recta, esto hace que esta correlación sea significativa dentro del fenómeno de los elevados consumos energéticos existentes en el sistema de bombeo de la planta de Lixiviación.

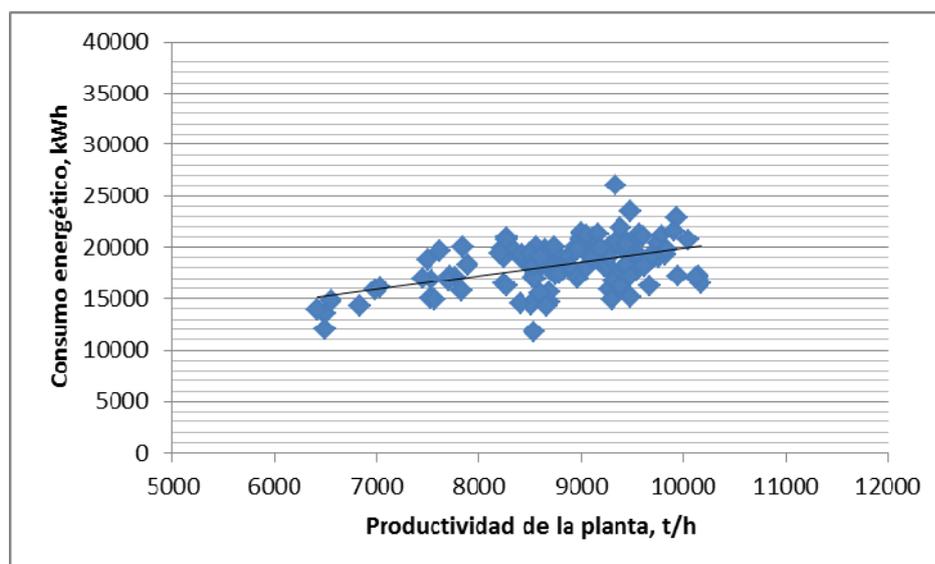


Figura 3.5 Influencia de la productividad de la planta sobre el consumo energético

Al realizar la prueba F de Fisher con nivel de confianza 0,95 se demuestra que el valor de la F de Fisher calculada (F_c) para el ajuste es 92,474 y la F de Fisher teórica (F_t) tiene un valor de 3,022. De esta manera se explica que el ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

De esta manera se demuestra que a medida que aumenta la productividad de la planta, aumenta el consumo energético de las bombas Centrífuga y bomba de desplazamiento positivo, de manera significativa, es decir, que este parámetro es el que representa mayor influencia en el análisis de correlación entre las demás variables analizadas.

Esto significa que por la ecuación de potencia de la bomba están involucrados el caudal de la bomba y la densidad de la pulpa, que a su vez se relaciona con el porcentaje de sólidos.

De manera general se puede decir que existe muy poca correlación entre los parámetros estudiados. La densidad, el porcentaje de sólidos, la temperatura influye positivamente con menor coeficiente de correlación que la productividad que evidentemente es quien influye con mayor significación en el modelo obtenido.

3.3 Obtención del modelo matemático-estadístico de los parámetros de la pulpa precalentada sobre el consumo energético

El modelo matemático-estadístico general donde se correlacionan los parámetros de la pulpa precalentada con el consumo energético se expresa en la ecuación (3.6).

$$C_{energético} = 2,632 + 0,268 \cdot P_{sólido} - 0,091 \cdot N_{Mineral} + 9,133 \cdot D_{pulpa} + 0,049 \cdot T_{pulpa} + 0,0002 \cdot P \quad (3.6)$$

Este modelo expresa la influencia de cada parámetro de la pulpa precalentada sobre el consumo energético. A continuación, se determina la influencia de cada parámetro:

- Al aumentar el porcentaje de sólidos, aumenta el consumo energético
- Al aumentar el número de mineral, disminuye el consumo energético
- Al aumentar la densidad de la pulpa, aumenta el consumo energético
- Al aumentar la temperatura de la pulpa, aumenta el consumo energético
- Al aumentar la productividad de la planta, aumenta el consumo energético

Esta correlación general realizada a partir de la base de datos libre de averías presenta un coeficiente de correlación de 0,49, lo que para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0,95, se demuestra que el valor de la F de Fisher calculada (F_c)

para el ajuste es 21,869 y la F de Fisher teórica (F_c) tiene un valor de 2,126. De esta manera se explica que el ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Los coeficientes de correlación parcial de cada parámetro son:

- Porcentaje de sólidos: 0,126
- Número de mineral: 0,061
- Densidad de la pulpa: 0,153
- Temperatura: 0,136
- Productividad: 0,472

De esta manera se demuestra que el parámetro de mayor influencia en el consumo energético de las bombas centrífuga y bomba de desplazamiento positivo, es la productividad, por el bajo nivel de correlación del número de mineral no se tendrá en cuenta en el modelo propuesto.

3.4 Propuesta de acciones de control para reducir consumo energético y averías en las bombas centrífuga y de desplazamiento positivo.

Teniendo en cuenta que el parámetro de mayor influencia en el consumo de energía de la planta es la productividad y dentro de ella el acoplamiento bomba centrífuga y bomba de desplazamiento positivo, realizamos un estudio para encontrar algunos márgenes de ahorro de energía y disminución de las averías:

- Conociendo que la bomba centrífuga trabaja a régimen nominal independiente de la variación de embolada y de flujo de la bomba de desplazamiento positivo teniendo como referencia que 1 embolada es igual a 12,8 galones por minutos.
- La bomba centrífuga esta acoplada a la succión de la bomba de desplazamiento positivo la cual es la encargada de mantener un flujo determinado constante y una presión positiva en la succión de la misma ya que es parte de su funcionamiento.
- El flujo de la bomba centrífuga no es medido, solo se tiene una referencia a la salida o descarga de la bomba de desplazamiento positivo.
- El motor que acciona la bomba centrífuga es de 22 kW, 1800 rev/min. 60 Hz y 440 V de alimentación.

- En el acoplamiento de las bombas centrífuga y bomba de desplazamiento positivo existe un compromiso desde el punto de vista productivo entre ambas, la bomba centrífuga tiene que ser capaz de mantener flujo y presión a la bomba de desplazamiento positivo independiente de la capacidad de la planta, la bomba de desplazamiento positivo es la demandante y la centrífuga la suministradora.

Analizando los accionamientos de ambos sistemas podemos decir que la bomba de desplazamiento positivo tiene medición de flujo, embolada y velocidad no así en la centrífuga, por eso que nuestra propuesta después de hacer varios ensayo y análisis se concluye que en el accionamiento de la bomba centrífuga es donde podemos actuar para encontrar márgenes de ahorro de energía y disminución de las averías ya que la misma trabaja a régimen nominal y recirculando en el interior de la bomba la pulpa que no es demandada por el proceso productivo independiente de la demanda de la succión de la bomba de desplazamiento positivo.

Relacionando los parámetros de I_d , I_w , flujo de la bomba de desplazamiento positivo y embolada pudimos demostrar cual era el comportamiento de estas variables.

Tabla: 3.2 Comportamiento de la bomba de desplazamiento positivo

Fecha	Horas	I_{Pu} volum, A	Embolada	Flujo, m^3/h	I_{Pu} centrf, A
14/06/2017	12:18:01 AM	223,93	11,45	69,72	17,25
14/06/2017	1:47:47 AM	225,54	11,36	66,547	17,19
14/06/2017	3:17:33 AM	223,81	10,70	65,184	16,92
14/06/2017	4:47:19 AM	224,76	10,70	65,160	16,81
14/06/2017	6:17:05 AM	225,22	10,70	67,456	16,83
14/06/2017	7:46:51 AM	223,85	11,30	67,683	17,15
14/06/2017	9:16:37 AM	225,05	10,78	64,276	16,92
14/06/2017	10:46:23 AM	221,38	11,69	80,402	17,45
14/06/2017	12:16:09 PM	224,43	12,54	74,724	17,82
14/06/2017	1:45:55 PM	224,77	12,24	72,907	17,72
14/06/2017	3:15:41 PM	225,66	12,31	75,405	17,89
14/06/2017	4:45:27 PM	224,64	12,20	73,361	17,74
14/06/2017	6:15:13 PM	224,52	12,05	71,544	17,73
14/06/2017	7:44:59 PM	222,55	11,21	64,957	17,18
14/06/2017	9:14:45 PM	222,39	10,69	65,866	16,89
14/06/2017	10:44:31 PM	223,70	11,15	67,683	16,96

Donde:

I Pu Volum: corriente de la bomba Volumétrica o de pistón.

I Pu Centf: corriente de la bomba centrífuga.

Embolada: Son las veces que el pistón de la bomba volumétrica hace el recorrido registradas por el contador de la misma.

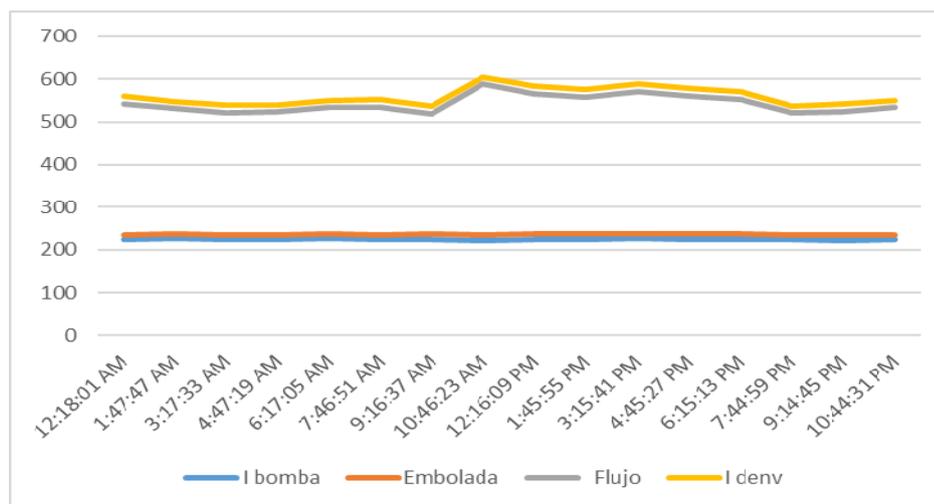


Figura. 3.1 comportamiento de la bomba de desplazamiento positivo y corriente de la centrífuga.

En la figura 3.1 se muestra la forma de los cambios de la relación de flujo y es apreciable la pendiente y su duración, lo que permite estimar o ajustar los valores de cambios de velocidad, también se aprecia que en las pendientes tanto ascendentes como descendente el tiempo de recuperación de la variación es de 90 minutos con un cambio en el comportamiento de la corriente de la bomba centrífuga de aproximadamente 0,2 A y siendo el motor de 440 V, esto traducido en potencia es de 880 W.

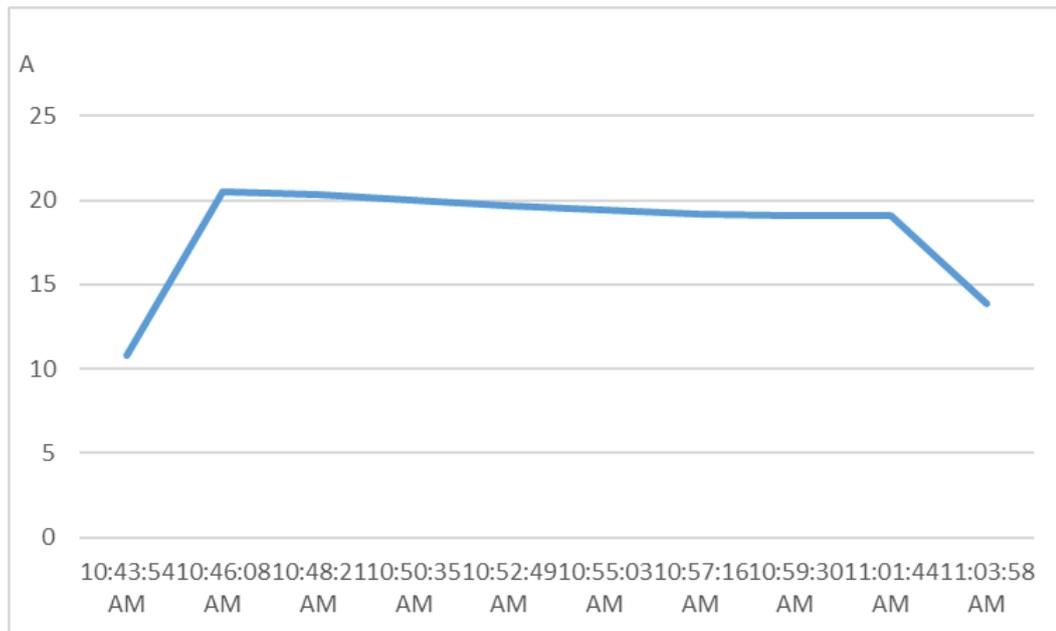


Figura 3.2 Comportamiento de la corriente de la bomba centrífuga en recirculación.

En la figura 3.2 se observa la influencia de la recirculación en el consumo de la bomba centrífuga, que a su vez aporta a las variaciones de flujo en la bomba de desplazamiento positivo y se pudo apreciar que cuando la bomba centrífuga trabaja con succión 0 los valores de corriente varia de la forma que se muestra en la tabla 3.3 y en el gráfico 3.2.

Tabla 3.3 Corriente de la bomba centrífuga en recirculación.

Fecha	Hora	Corriente, A
27/09/2017	10:43:54 AM	10,84
27/09/2017	10:46:08 AM	20,53
27/09/2017	10:48:21 AM	20,36
27/09/2017	10:50:35 AM	19,99
27/09/2017	10:52:49 AM	19,70
27/09/2017	10:55:03 AM	19,38
27/09/2017	10:57:16 AM	19,17
27/09/2017	10:59:30 AM	19,12
27/09/2017	11:01:44 AM	19,09
27/09/2017	11:03:58 AM	13,84

En el proceso productivo de la planta existen variaciones que tienen incidencia directa con el funcionamiento del acoplamiento bomba centrífuga- bomba de desplazamiento positivo, cuando hay una disminución de la capacidad de la planta, directamente hay una disminución del flujo y como el accionamiento de la centrífuga no tienen elemento que permitan también bajar su capacidad se mantiene a régimen nominal y cae en un proceso de recirculación consumiendo energía sin respaldo productivo, el mismo proceso de recirculación trae aumento de temperatura disminuyendo el tiempo de vida útil de la bomba es decir incrementando las averías y las pérdidas de producción por este concepto.

Por estas razones se propone una estrategia de control que me permita accionar sobre la velocidad del motor de la bomba centrífuga teniendo como referencia la medición de flujo en la salida de la bomba de desplazamiento positivo.

Se propone un diseño de modelado dinámico para sistemas de dirección de bombas con la utilización del programa MATLAB /SIMULINK para controlar la velocidad del motor. En este modelo se utilizó la implementación del programa MATLAB para reducir el consumo de energía a través del Convertidor de Frecuencia Variable.

Para el estudio y la estimación se proponen esquemas de simulación basados en las referencias clásicas y en la recolección de datos que se ajustan con los modelos.

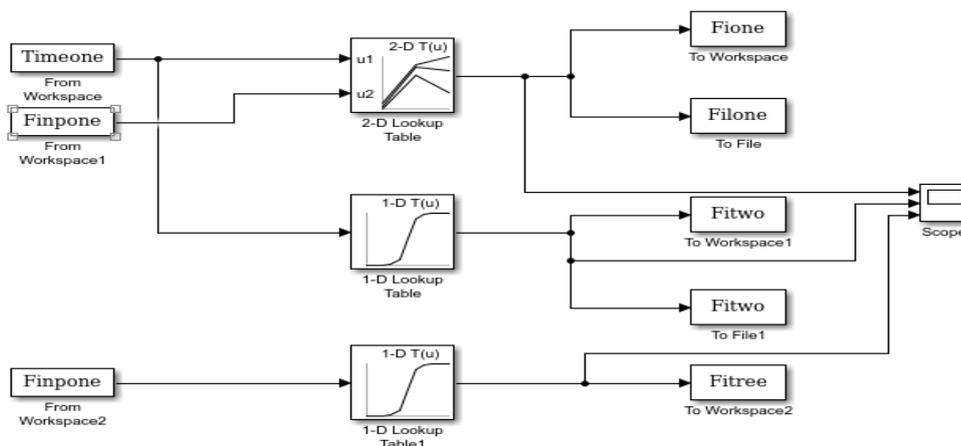


Figura. 3.3 Diseño de modelación dinámica

Mediante tablas de búsqueda (*lookup tables* 1-D y 2-D, D-dimensión) permiten asociar los límites, marcados por los intervalos de cambio de las pendientes en las gráficas 3.1 y 3.2, con los márgenes de operación para los flujos de la bomba de desplazamiento positivo, que como se ha dicho imponen la referencia o demanda de flujo por succión a la bomba centrífuga y que corresponden con los datos de planta.

Finpone - Flujo inicial.

Timeone - intervalo de pendiente.

Fione - Flujo de salida buscada inferior.

Fitwo - Flujo de salida buscada superior.

Filone, Fithree - Flujo a comparar por sugerencia.

Estos flujos son calculados alrededor de las variaciones de pendiente en las figuras 3.1 y 3.2

Estos valores se guardan en archivos y con marcas en los valores recomendados, medios, notables o extremos que son el punto de inicio para las acciones de control sobre el flujo. La incidencia directa se refleja en la disminución de la recirculación en la bomba centrífuga y la obtención de valores de referencia.

Esquema de simulación que relaciona las variables que permite la obtención de la productividad de referencia.

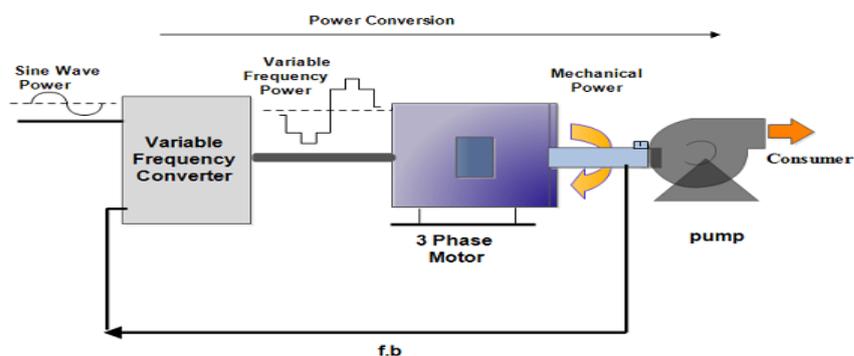


Figura 3.4 Esquema acción de control

La acción sobre la bomba centrífuga se propone según el principio de variación de la velocidad por frecuencia de alimentación del motor que la acciona y referida a la productividad según la bomba de desplazamiento positivo.

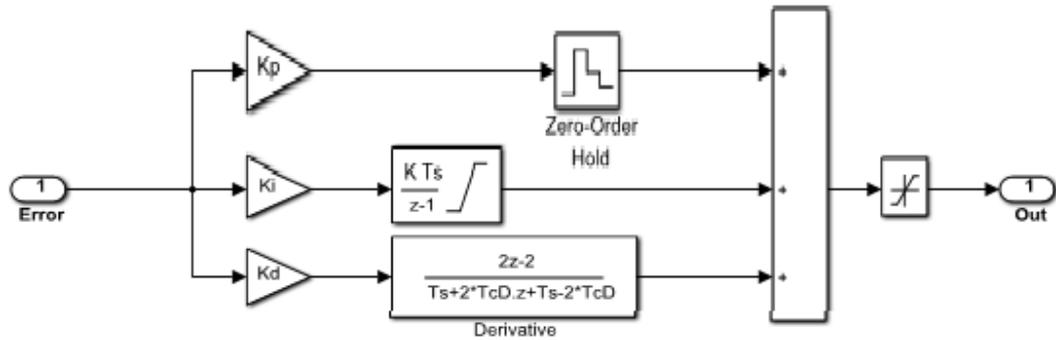


Figura 3.5 Simulación de un controlador discreto.

Para el caso discreto de un controlador automático, el modelo de simulación se aprecia en la figura 3.5, con las acciones P, I, D regidas por Kp, Ki y Kd. Este modelo se parametriza en función de incorporarse al esquema completo para la variación de velocidad que se presenta en la figura 3.6.

La figura 3.6 contiene el esquema de simulación Motor-Bomba que permitiría estudiar los comportamientos según el flujo de succión y la productividad.

Los bloques componentes son:

- Convertidor de frecuencia - bloques coloreados amarillos.
- Visualizadores - bloques coloreados verdes.
- VFD - bloques coloreados azules y blancos.
- Controlador - bloque coloreado en gris.

También se incluyen el modelo del motor y de la bomba.

Las referencias son la productividad, la velocidad y el flujo.

El flujo Q según las características internas es la variable resultante.

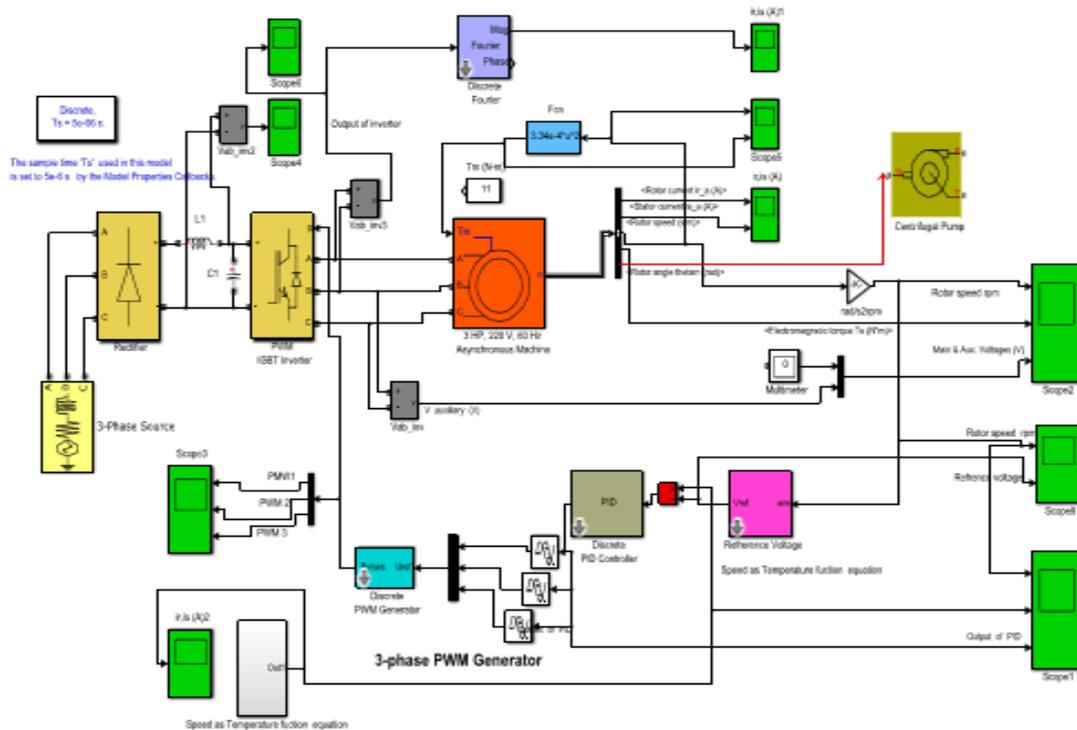


Figura 3.6 Esquema de simulación Motor-Bomba.

Formalización del problema

Las características internas de las bombas centrífugas pueden ser descritas por la siguiente ecuación.

$$H_1 = 3,7 Q^2 - 0,17Q - 3 \quad (3.7)$$

La característica de la red de tuberías es una curva parabólica

$$H_2 = 1.2 + 2.75Q^2 \quad (3.8)$$

En el punto de operación de la bomba, se debe cumplir la siguiente relación:

$$H_1 = H_2 \quad (3.9)$$

Consideración de la Ley de Afinidad:

El Modelo Clásico de control se conforma como sigue:

La acción de control implica cambiar la frecuencia y la velocidad del motor que influye directamente sobre la bomba centrífuga.

Los resultados de uso del modelo Motor-Bomba se acercan a los de uso directo de un modelo clásico de control, figura 3.7, para los que se usan los parámetros y valores asociados a las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 que conllevarían a los apreciables en la figura 3.8.

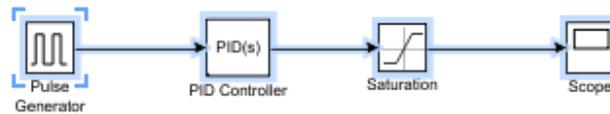


Figura 3.7 Modelo clásico de control

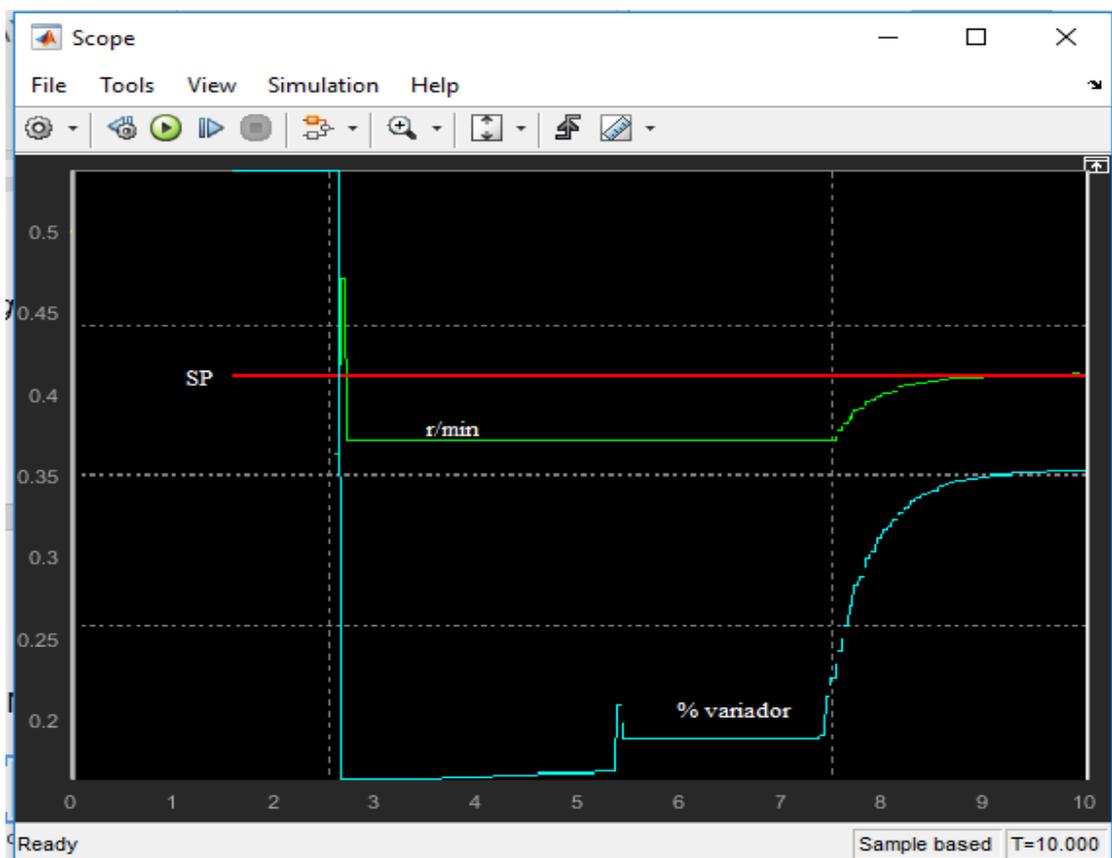


Figura 3.8 Repuesta obtenida del PID Convencional

Si el flujo disminuye entonces la velocidad cambia (valores buscados) y la energía del motor cambia según la corriente.

La eficiencia operacional es influida por la recirculación y la potencia del motor con referente la productividad y los márgenes de flujo (succión o salida de bomba centrífuga) con la presión como implícita.

Tomando los valores respuesta y combinando con las tablas de búsqueda, las variaciones de flujo se controlan con el esquema figura 3.9, para el motor (función de potencias) y la respuesta figura 3.10.

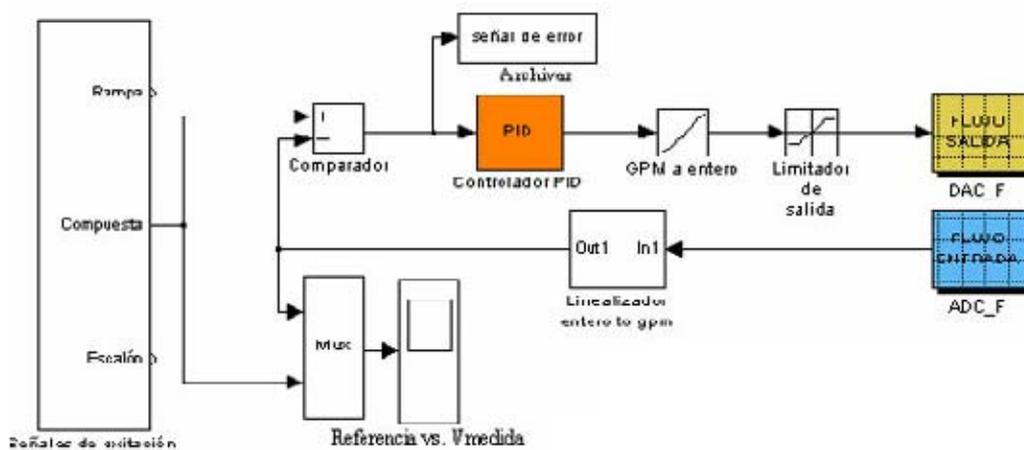


Figura 3.9 Modelo MATLAB desarrollado

La respuesta muestra en régimen normal de planta las razones de cambio (disminución) de las emboladas.

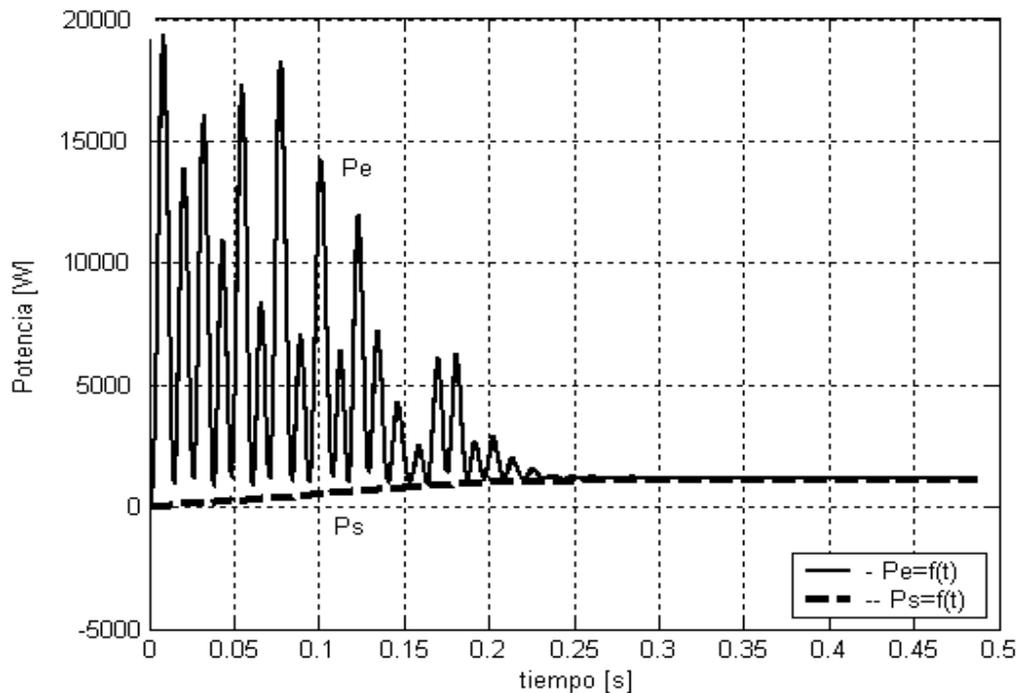


Figura 3.10 Potencias de entrada P_e y salida P_s durante el trabajo del controlador en el motor de 22 kW

En la figura 3.10 se muestra el comportamiento de la potencia del motor cuando este accionado por la propuesta de la estrategia de control de la investigación, como el motor va a trabajar en su máxima potencia en el arranque y en la medida que el flujo de salida varié entonces también vamos a tener variación de la velocidad del motor de la bomba centrífuga y con ella su potencia encontrando los márgenes de ahorro de energía que nos estamos proponiendo.

La acción de control tendría un diseño como el que mostramos en la figura 3.11, un variador de velocidad que podamos accionar sobre la velocidad del motor de la bomba centrífuga en dependencia de la variable consigna el flujo de salida de la bomba de desplazamiento positivo, flujo que estas condicionado a la disponibilidad del equipamiento de la planta, de la calidad y cantidad de la materia a procesar, esta acción de control tendrá todos los elementos mostrado como son el PC, PLC, *transducer*, flujómetro, manómetro y por supuesto el variador de velocidad con el motor a controlar.

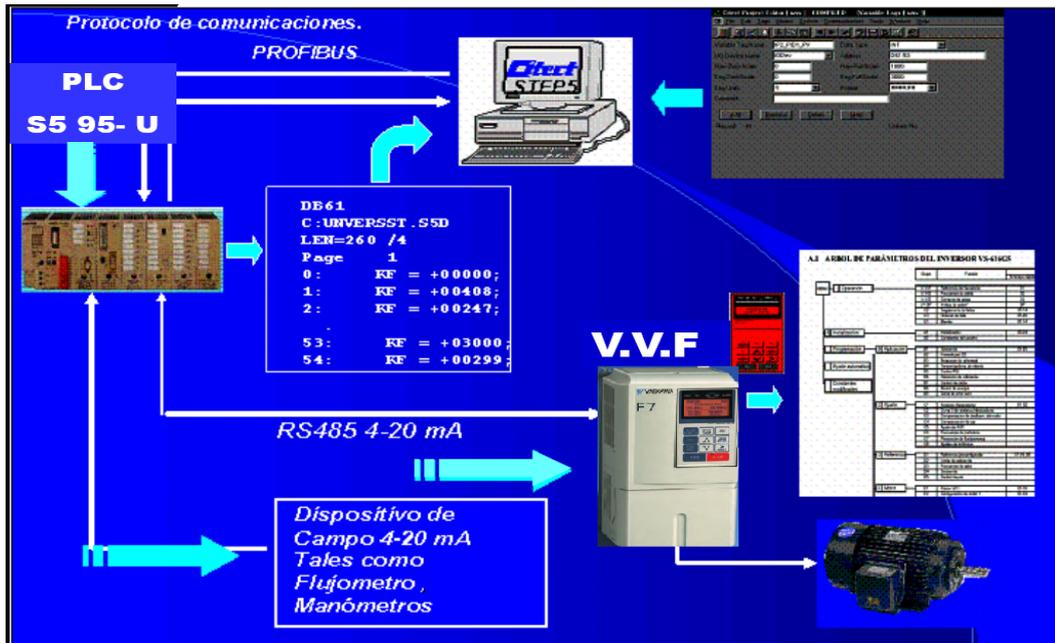


Figura 3.11. Acción de control

Control PID de la Bomba Denver

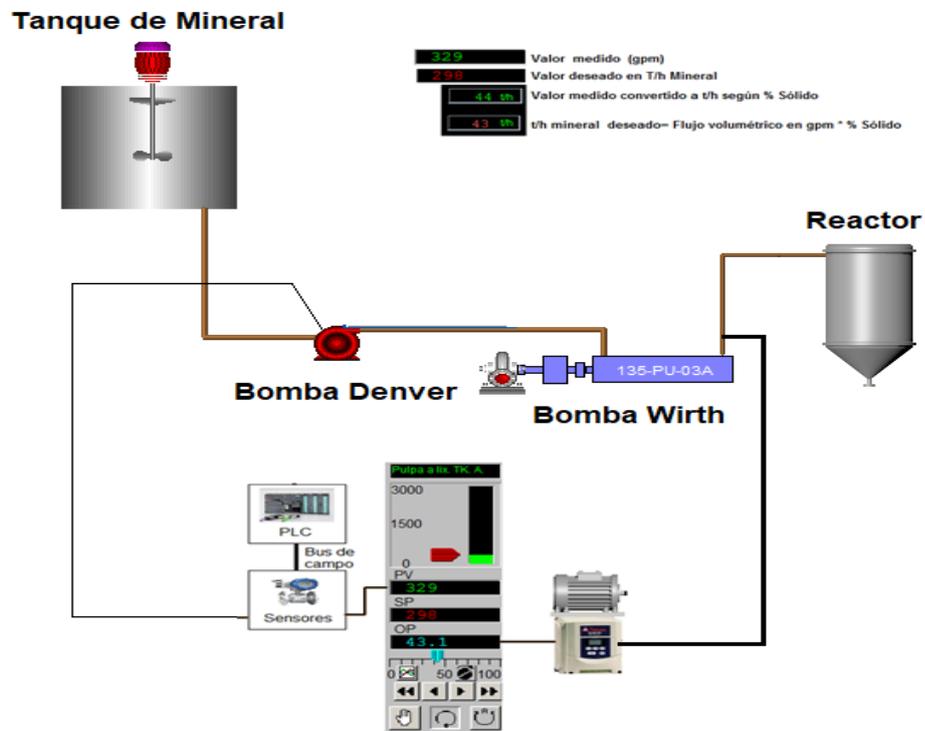


Figura 3.12 Control propuesto

En la figura 3.12, mostramos la acción de control de flujo de la bomba de desplazamiento positivo y velocidad de la bomba centrífuga, con la disminución del flujo de salida de la bomba de desplazamiento positivo vamos a tener una disminución de velocidad de la bomba centrífuga.

Actualmente en el proceso normal de la planta cuando se disminuye las emboladas y con ello el flujo de salida de la bomba de desplazamiento positivo el motor de la bomba centrífuga continua trabajando a parámetros nominales, con la propuesta de la instalación de un variador de velocidad al motor de la centrífuga y con ello una estrategia de control entre la salida del caudal de la bomba de desplazamiento positivo vamos a tener como resultado que cuando allá una disminución del flujo también vamos a tener una disminución de la velocidad de la centrífuga y una disminución de la corriente y al potencia con su correspondiente ahorro de consumo de energía, también vamos a tener una disminución de las averías de las bombas centrífuga ya que la misma trabajará en un punto de operación que satisfaga la producción y se tenga mayor eficiencia operacional disminuyendo así la sobre presiones y la recirculación del mineral no succionado por la bomba de desplazamiento positivo.

Con la aplicación informática desarrollada en la investigación de (Hernández, 2017) se determinó las relaciones de presión descarga de la bomba centrífuga y la succión de la bomba volumétrica. Para aumentar la productividad en la operación de este subsistema de bombeo debe encontrarse un valor de presión de salida de la bomba centrífuga (igual a la presión de succión de la bomba volumétrica). El sistema de bombeo debe proporcionar el volumen con el cual la pulpa alimentada que pueda reaccionar con el ácido sulfúrico de 98 % de concentración, se logra la extracción del níquel y cobalto bajo condiciones de presión de 3619,746 kPa (525 Lbs/pg²) y temperatura de 246 °C. Los reactores se diseñaron para una extracción de 95 % con una producción diaria de mineral 5495,9 t. Para lograr esto se necesita un tiempo de retención de 112 min, con los 4 reactores en serie para lo cual se requiere un volumen en cada reactor de 60,46 m³. El volumen de diseño requerirá una adición de pulpa de 56,3 m³ a una altura de 10,26 m.

La eficiencia de la bomba centrífuga se calcula mediante el modelo propuesto por (Hernández, 2017), a partir de los valores de diseño $Q_A = 113,56235 \text{ m}^3/\text{h}$ y $H_{des} = P_s$ seleccionada, entonces solo es necesario calcular la velocidad n y la potencia P de esta operación. La eficiencia energética de la bomba volumétrica es prácticamente constante (0,94 en este caso) pero la velocidad y la potencia varían en dependencia del valor de P_s . En la figura 3.13, se muestra la ventana de trabajo para la búsqueda de $H_{des} = P_s$.

Los resultados obtenidos muestran que para una pulpa con las propiedades que se muestran y una presión de descarga de 4478,55 kPa, el valor que define la mejor eficiencia energética es $H_{des} = P_s = 146,00 \text{ kPa}$. Para este valor de presión se calculan las velocidades de cada bomba y sus potencias que permiten configurar la operación eficientemente.

Optimización de sistema de bombeo de pulpas precalentadas

Requerimientos del proceso en un reactor

Volumen Total Solicitado (1 h) y define el valor de Q: 500 gpm, 113,56235 m³/hora

Presión Solicitada. Es el valor de P: 650 Libras/pulg², 456,9953456 mca, 4480,346525 kPa

Características de la pulpa en CP1

Volumen Disponible: 560 Ma (Viscosidad aparente): 0,4082647771704

% de Sólido: 45 T0 (Esfuerzo cortante inicial): 4,76168895212775

Temperatura: 82 K (Índice de consistencia): 1,77811795813693

Número de Mineral: 7,5 n (Índice de flujo): 0,75123680384561

de (densidad): 1477,62747138396

Características del Motor de la Bomba Volumétrica

U = 480 I = 190 Cos(F) = 0,90 N =

Datos de bomba de desplazamiento positivo

Presión de succión: 60 lib/pulg², 42,184147037 mca, 413,57006895 kPa

Presión de diseño: 65,5 bar

QT: 170

ng (chapa): 1200

qw: 0,141666666666666 C

Rendimiento Volumétrico: 94

Gasto en Fugas q1: 10,2 C

Datos y Cálculos de una Bomba Centrífuga

Velocidad Estándar: 800 Velocidad Máxima: 2400

a: 13,391356666 b: 0,0071061254 c: 0,0003558946

d: 2,2065 e: 0,0084859450 f: 3,3984561625

Resistencia de la Red: 3,895 Diámetro Tubería: 0,1524

Altura Geométrica de Impulsión: 7,75 Longitud Tubería: 43

Hagua: 12,786808885869 con velocidad estándar ne

Hpulpa: 8,44651857525419 CH: 0,660565012791318

Hdes: 42,1841857522 60,0000000000 413,5704485505

n: 1787,82889294364 Na: 24,6300059717047

Np: 19,2695943963386 R: 0,395801503889188

Optimizar

Criterio (FO): Menor Potencia Total Mayor Media de Eficiencias

Valor Mínimo de Presión de Succión: 12,69506190 mca TV

Valor Máximo de Presión de Succión: 100 mca

Paso de Búsqueda: 0,1 mca

Presión de Succión: 12,695061900 mca 18,0566176 lib/pulg²

nc: 980,773059050322 nd: 1107,5582151245

SN: 147,132028396819 RP: 0,166464224919681

Velocidad Máxima Bomba de Desplazamiento Positivo: 2400

Salir

Figura. 3.13 Aplicación informática, optimización de bombeo de pulpas precalentadas

En las tablas 3.4 y 3.5 se definen las relaciones de flujo, embolada, potencia y rev/min que permitirán realizar las acciones de control entre ambas bombas.

Tabla. 3.4 comportamiento de la PU - bomba de desplazamiento positivo

Flujo en m ³ /h	Embolada	Potencia activa, kW	rev/min
158,98	52	256	1720
136,27	48	220	1630
113,56	42	190	1510
90,84	36	160	1250
68,13	30	125	1120
45,42	24	95	940

Tabla 3.5 comportamiento PU bomba centrífuga

Flujo en m ³ /h	Potencia activa, kW	rev/min
158,987	22	1750
136,274	20	1625
113,562	18	1510
90,849	16	1300
68,137	14	1150
45,424	12	920

Comportamiento de la velocidad de giro de la bomba centrífuga y de desplazamiento positivo para variación de la productividad figura 3.14, permitirá el ajuste de la acción de control.

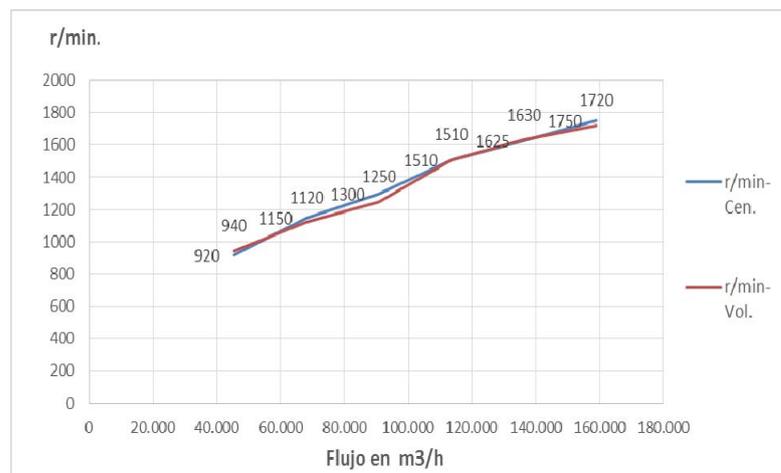


Figura.3.14 Relación de flujo y velocidad de giro de las bombas centrífuga y de desplazamiento positivo.

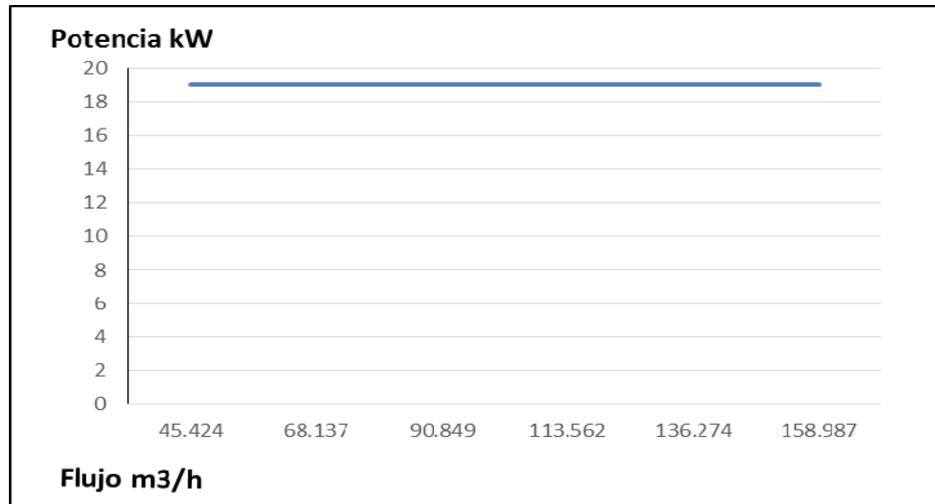


Figura.3.15 Comportamiento de la potencia y el flujo actual.

En la figura 3.15 se muestra el comportamiento de la potencia de la bomba centrífuga con relación al flujo de salida de la bomba de desplazamiento positivo o volumétrica, la misma trabaja a potencia constante o poco variable ya que no tiene ninguna acción de control que relaciones la variaciones de flujo de salida con la velocidad y con ello la potencia del motor que mueve la bomba centrífuga. Para variación de flujo potencia constante.

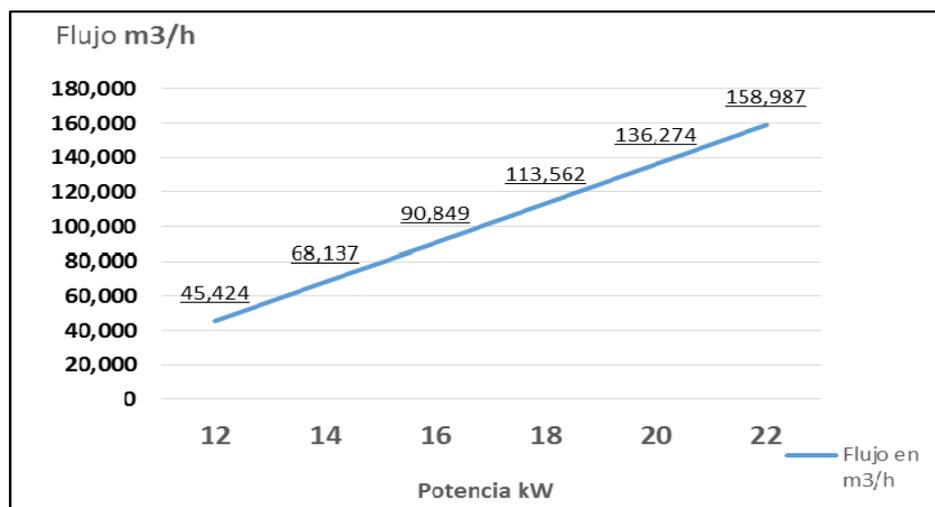


Figura.3.16 Comportamiento de la potencia y el flujo después de la instalación de la acción de control.

En la figura 3.16 se muestra el comportamiento de la potencia del motor que mueve la bomba centrífuga con relación a la variación de flujo ya con la acción de control, es decir que para cambio de flujo también vamos a tener variación de la velocidad de la bomba centrífuga y con ella cambio en la potencia, evidenciándose que tenemos ahorro de energía.

3.5 Valoración económica

Una gran parte de los gastos capitales durante el transporte, lo constituyen los gastos de energía eléctrica, su economía es una de las direcciones estratégicas de la producción en la actual etapa. Una correcta selección y organización en la explotación del equipamiento de bombeo en régimen económico permite el ahorro de la energía eléctrica y aumenta la efectividad del transporte de fluidos, teniendo siempre presente los problemas que esta puede causarle al medio circundante (Laurencio, 2004).

Costos en la pulpa precalentada

La Planta de Lixiviación está compuesta por cinco trenes que deben procesar y lixiviar entre 8000 y 10 000 t/día de mineral como promedio; los cuales se han visto afectadas por problemas técnico-operacionales y averías en el sistema de bombeo, en este caso se realiza un análisis de las principales averías que presentan las bombas centrífugas 5x4 encargadas de mantener un flujo continuo a las bombas de alta presión de desplazamiento positivo, así como su influencia en la productividad de la planta. En la tabla 3.6 se precisa de un resumen de las principales averías ocurridas en el sistema de bombeo de la planta de Lixiviación en el período del año 2016.

Tabla 3.6. Principales averías en el período 2016

Principales averías	tiempo, h	Pérdidas, t	%
Avería entredós	6,000	47,110	0,150
Avería filtro	1.000	19.990	30.2
cheque calzado	483,333	9777,820	31,033
espárragos partidos	148,550	3477,440	11,037
Avería PU	328,150	4918,270	15,610
Disparo PU	13,450	186,010	0,590
Instrumentación	8,250	93,580	0,297
Fugas	66,713	1197,570	3,801
Espárragos flojos	1,417	21,030	0,067
Ponche línea calibración	29,533	10,960	0,035

Avería válvula	4,750	140,880	0,447
Avería codo	6,917	157,950	0,501
Avería tenedor descarga	7,500	484,000	1,536
Avería revestimiento	4,250	349,920	1,111
Avería motor	25,033	825,750	2,621
Avería línea de aire	14,250	132,120	0,419
Avería eléctrica	5,433	94,020	0,298
Ponche reducido succión	0,333	6,520	0,021
Avería Cameron	0,950	66,660	0,212
Total	13 34,097	22 007,82	100,000

De esta manera se demuestra que las principales averías están dadas por los niveles de sobrecarga a la que operan realmente estas bombas (centrífugas) del total de averías. Es notable que el total de averías ocurridas en la planta en el período comprendido, demuestre el elevado valor de pérdidas de productividad, que representa 22 007,82 t de mineral pérdidas en el año 2016.

El análisis de la relación de los costos del proceso de transporte de pulpa, garantiza el establecimiento de las condiciones donde los costos del proceso sean mínimos, es decir, no se establecerían parámetros erróneos que aumentarían el gasto de energía y disminuirían el rendimiento de la instalación.

Durante el trabajo investigativo realizado se obtuvieron resultados que demuestran la influencia del porcentaje de sólidos, productividad y la temperatura de la pulpa sobre el consumo energético del sistema de bombeo.

El costo de bombeo que se incurre al transportar el fluido, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_{b-L}} \cdot P_H \cdot 10^{-3} \quad (3.11)$$

Donde

C_{bom} : Costo de bombeo de la instalación, (CUC/año).

P_H : Potencia hidráulica, (W).

t_{el} : Tarifa eléctrica, (CUC/ kW·h).

t_t : Tiempo de trabajo del equipo, (h/año).

η_b : Rendimiento de la bomba, (adimensional).

η_m : Rendimiento del motor eléctrico, (adimensional).

L: Longitud total de la tubería, (m).

Al analizar el punto de operación de la bomba, las alturas de operación de la bomba para 866 (r/min) y 1580 (rev/min) así como la red hidráulica, la realización de esta curva denotan que la bomba para un caudal entre 76-89 m³/h trabajó a un 40% aproximadamente.

Para estas condiciones de trabajo (Q=100 m³/h, H 24,47 m, g=9,81m/s², ρ =1428 kg/m³, η =40%) de la bomba se obtuvo que la potencia hidráulica de la bomba es de Ph= 13,31 kW .

La potencia de salida del motor es de 13,31 kW, la de entrada es de 16 kW y una eficiencia de un 83,18 %, al multiplicarlo por la eficiencia de la bomba (40 %), obtenemos que la eficiencia del sistema es de un 33.2 %. Esto es el producto de la eficiencia del motor con la de la bomba.

Como se puede apreciar la eficiencia es baja producto a que este accionamiento no tienen regulación, la misma se realiza por la demanda de la bomba de desplazamiento positivo. Se propone la regulación a través de un variador de velocidad Yaskawa A1000 con el objetivo de poder regular el flujo de la pulpa entregada mediante el control de la velocidad del motor, con el variador de velocidad, se elevaría la eficiencia del motor a un 92 % y la de la bomba a un 65 %, el costo del variador de velocidad propuesto (Yaskawa A1000 50 hp [36,77 kW]) es de 4 000 CUC.

El costo del consumo de la bomba al año según la fórmula 3,11 asciende a 25 954,5 CUC/año.

El costo de la energía ahorrada se puede determinar a partir de la diferencia obtenida entre el costo por consumo de estas bombas para un 33,2 % de eficiencia y un 41 % de sólidos con el variador se eleva a 60 % de eficiencia, este costo asciende aproximadamente a 39 000 CUC año.

Se obtiene un ahorro de 13 045,5 CUC.

Como se pudo observar en los cálculos de pérdida de la productividad en el año por avería en las bombas es de aproximadamente 22 007,82 toneladas al año lo cual significa una pérdida del producto final de 2420,86 t/año, si la tonelada estas a 11 145,2 USD cuando se hizo el trabajo entonces tenemos un ahorro de 26 980,96 USD/año y si se logra disminuir las averías de las bombas centrífugas al 60 % tendremos un ahorro entonces de 16 188,58 USD/año.

El tiempo de amortización de esta inversión se obtiene mediante la fórmula 3.12 y es de 3 meses.

$$T_{\text{amortización}} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Energía Ahorrada}} \quad (3.12)$$

Donde:

$T_{\text{amortización}}$: es el tiempo de recuperación de la inversión.

Inversión: es lo que se invierte en la compra del producto.

Energía ahorrada: es la energía que se ahorra con el producto que se propone comprar en (CUC).

3.6. Impacto ambiental

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 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.

También el personal que opera directamente con la máquina está expuesto al desprendimiento de cualquier componente de la máquina tales como derrame de pulpa, averías en la red de tuberías, rotura de algún perno, problemas en las válvulas de seguridad, entre otras, por las siguientes razones estas personas deben preservarse más y cumplir estrictamente con las exigencias de la planta, es decir, usar los medios de seguridad, puesto que en una violación pueden ser los máximos damnificados.

Conclusiones parciales

- Se determinan las causas de los elevados consumos energéticos y las pérdidas de caudal de las bombas de pulpa precalentada centrífuga y de desplazamiento positivo en el año 2016, a partir de la base de datos donde se contemplan las averías.
- Se proponen medidas para contribuir al mejoramiento de las operaciones de las bombas con el propósito de disminuir su consumo energético.
- Se realizó el análisis estadístico de las variables de entrada y de salida. El mismo mostró que la correlación de la productividad con el consumo energético es significativa para las 2 bases de datos, y es la de mayor influencia en el modelo matemático – estadístico de regresión.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se determinan las potencialidades de ahorro de energía en el sistema de bombeo de pulpa precalentada a través de estrategia de control y su impacto sobre el mantenimiento operacional aportando un ahorro de 16 188,58 USD/año.
- Se realizó el análisis de correlación de los parámetros: porcentaje de sólidos, número de mineral, densidad de la pulpa, temperatura y productividad con respecto al consumo energético de las bombas centrífuga y bomba de desplazamiento positivo de la planta de Lixiviación; y se demostró que el parámetro de mayor influencia en el consumo energético de las bombas Centrífuga y bomba de desplazamiento positivo, es la productividad. Esto significa que a medida que aumente la productividad, aumenta el consumo energético de forma significativa, con un coeficiente de correlación de 0,49; mostrándose según el siguiente modelo matemático-estadístico ajustado:

$$C_{\text{energético}} = 2,632 - 0,268 \cdot P_{\text{sólidos}} + 9,133 \cdot D_{\text{pulpa}} + 0,049 \cdot T_{\text{pulpa}} + 0,0002 \cdot P$$

- Se propusieron variantes para disminuir las pérdidas por concepto de tiempo de bombeo y costo de consumo del mismo, el ahorro asciende a 13045,5 CUC al año.
- De esta manera se demuestra la influencia que ejercen los parámetros de la pulpa precalentada sobre el consumo energético de las bombas centrífuga y bomba de desplazamiento positivo de la planta de Lixiviación, mediante modelos de correlación, entonces se podrá mejorar la eficiencia energética de dicho equipamiento con la implementación de las acciones de control.

RECOMENDACIONES

- Se requiere fundamentar las mediciones de los parámetros electroenergéticos de cada bomba e incluirla Software de Supervisión CitectSCADA para que se pueda ahorrar energía en correspondencia con las particularidades operacionales de estas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kasatkin A. G. "Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química", Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1985.
2. Maruszczuk, J., Lhenry, M., Helinko, M., & Korendo, Z.. En armonía. Definición de normas mundiales de eficiencia energética. (A. A. Ltd., Ed.) Revista ABB, 50-55, 2009
3. 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
4. Turiño, I., "Determinación aproximada de la característica de funcionamiento de una bomba centrífuga". Centro azúcar. 3(1) 58-73, 1999. <http://revistas.mes.edu.cu/eduniv>. [Consultada: 23 mayo de 2014]
5. 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.
6. Ruchansky, B., & Acquatella, J. Eficiencia energética y desarrollo sustentable: Una propuesta metodológica para la evaluación de las políticas públicas en eficiencia energética. III Seminario Latinoamericano Y del Caribe de Eficiencia Energética. Panamá, 2010.
7. Agyei G.: "Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la mena niquelífera 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.
8. ROJAS, A., BEYRIS, P. 1994. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". Minería y Geología., XI (1).
9. Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., & Pastorelli, M. *International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: a Critical Analysis of the Stray-Load*

- Lost Determination*. Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, 2 (2), pp.; 841- 848. Politecnico di Torino, Italy, 2003
10. Brunner, C. U. Global Motor Systems Network: The International Energy Agency 4E EMSA Project. En P. B. ATANASIU (Ed.), Proceedings of the 6° International Conference eemods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems (págs. 3-13). Nantes, FRANCE: European Commission. (2009).
 11. Brunner, C. U. Efficient Electric Motor Systems. Stockholm, Swedish: EMSA, 2012.
 12. Brunner, C. U., Waide, P., & Jakob, M. Harmonized Standards for Motors and Systems. Global progress report and outlook. 7th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems 2011-EEMODS'11. Alexandria, VA: 4E Electric Motor Systems Annex EMSA, Operating Agent.
 13. Guzmán, O. Eficiencia energética. Un panorama regional. Buenos Aires, Argentina: Nueva Sociedad, 2009
 14. Horta, L. Elementos-Clave de una política eficaz en eficiencia, 2010
 15. Almeida, A. Standards for Super-Premium Efficiency Class for Electric Motors. Motor Summit, 2009.
 16. BHATTACHARYA, I. N., PANDA, P. 1998. Rheological behaviour of nickel laterite suspensions. Int. J. Miner. Process, 53.
 17. BLAKEY, B. C. 2003. Characterizing the rheology of laterite slurries. Int. J. Miner. Process, 70.
 18. 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 Azoccar 32(2): 59-63, abril-junio, 2005
 19. Beyris. P. E. "Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa Comandante "Pedro Sotro Alba" (Moa Níkel SA.). Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Moa, Holguín, 1997.

20. Brown, G., "Operaciones Básicas de la Ingeniería Química", Edición Revolucionaria, La Habana, 1969.
21. HERNÁNDEZ, A., LEGRÁ, A. A., TRUJILLO, R., TOIRAC, M. 2010. Beneficio de la mena laterítica: actualidad y perspectivas. *Minería y Geología*, 26 (1).
22. PUCHOL, R. Q. 1984. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento de Moa (I): análisis granulométrico. *Revista Minería y Geología*, (3).
23. Cerpa A., P. Tartaj, M. T. García-González, J. Requena, L.R. Garcell, C. J. Serna, "Rheological properties of concentrated lateritic suspensions". *Progr Colloi Polym Sci*. 100 (número) 266-270, 1996.
24. BASTHA, T. M. 1986: Hidráulica en la construcción de maquinaria. Editorial Felix Varela.
25. ALMAGUER, F. 1996. Composición de las pulpas limoníticas de la planta Pedro Sotto Alba" (Parte II). Período de Crisis de Sedimentación. *Revista Minería y Geología*, XIII (1), 27-30.
26. BEYRIS, P. E. 1997. Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa Comandante "Pedro Sotto Alba" (Moa Níkel SA). Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Moa, Holguín.
27. BEATÓN, B. M. 2001. Análisis de factores que influyen sobre el proceso de sedimentación de pulpas lateríticas. Tesis Maestría. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.
28. FALCÓN, H. J. 1985. Sedimentación de minerales limoníticos. *Revista Minería y Geología*, 2.
29. HERNÁNDEZ, G., ROJAS, L. 2013b. Eficiencia energética en accionamientos para el hidro-transporte de colas lateríticas. Evento CINAREM, ISMMM. Moa. Holguín.
30. CHERKASSKI, V. M. 1986: Bombas, ventiladores y compresores. Ediciones Revolucionaria.

31. 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.
32. CHENG, D. C. 1980. Viscosity-concentration equations and flow curves for suspensions. Chemistry and Industry, 17.
33. ROJAS, L. 2006. Accionamiento eléctrico asincrónico para el transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Pág 112.
34. AVOTINS, A. P., AHLSCHLAGER, S. S., WICKER, R. G. 1979. *The Rheology and Handling of Laterite Slurries*. Evento Internacional *Lateritic Symposium* CIPIMM.
35. Falcón H. J., "Sedimentación de minerales limoníticos". Revista Minería y Geología. Vol. 2, 1985.
36. STICKEL, J. J., POWELL, R. L 2005. Fluid mechanics and rheology of dense suspensions. Annu. *Fluid Mechanic*, 37.
37. Famouri P, Cathey J. J., "Loss Minimization Control Induction Motor Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, January/February 1991.
38. García G., Mendes J., Stephan L., Watanabe E., An efficient controller for an adjustable speed induction motor drive. IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol. 41. No. 5. Pp 533 – 539. October 1994.
39. Kostenko M, Piotrovski L. Máquinas Eléctricas. Tomo II. Editorial Mir. Moscú, 1976.
40. Nuez M. V. Simulación y control del motor de inducción por Campo Orientado. Tesis Doctoral. La Habana, 1998.
41. Arsdén D.D. Efecto del Ph en dependencia de la temperatura, densidad y viscosidad cinemática. Revista Sudáfrica, Instituto de Minas y Metalurgia. No.6; 1962.

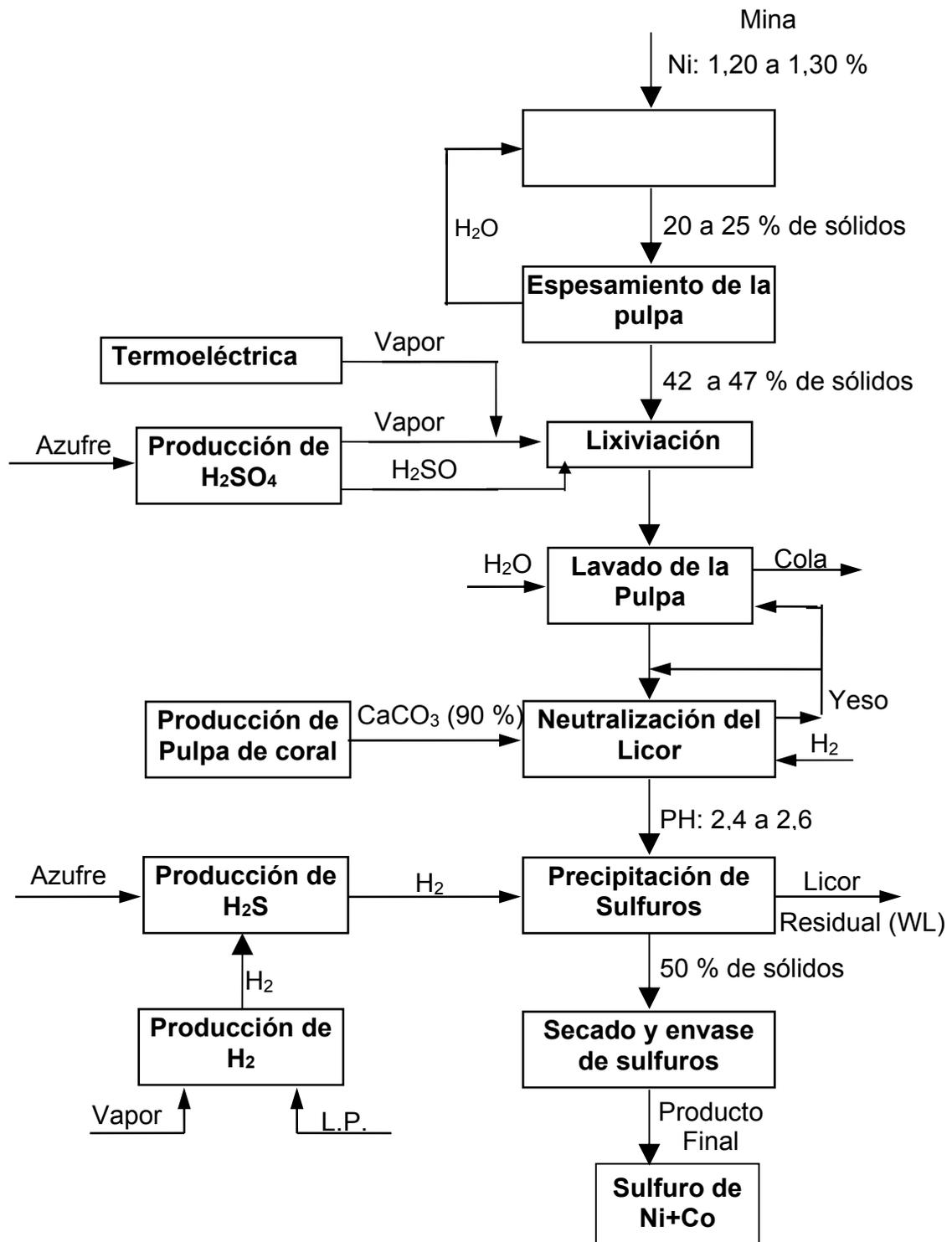
42. Gleeson S. A., R. J. Herrington, J. Durango, C. A. Velázquez, G. Koll, "The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. ©2004 by Economic Geology. Vol. 99, 1197–1213, 2004.
43. AGYEI, G. 2006. Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa. Tesis Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Pág 106.
44. TURRO, A. 2002. Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. pp.: 114.
45. PULLUM, L., GRAHAM, L., RUDMAN, H., Y HAMILTON, R. 2006. High concentration suspension pumping. *Minerals Engineering*, 19.
46. PÉREZ, G. L. 2010a. Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Tesis Doctorado. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. pp.: 134.
47. ARIOS, J. W., LAVAUT P. S., BORGUES, G., DÍAZ, R. 2003. Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí – Baracoa de Cuba Oriental. *Minería y Geología*, 1.
48. 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.
49. Turini H. M. Procedimientos metodológicos para el diagnóstico operacional de sistemas de bombeo mediante modelos matemáticos. Tesis doctoral. Universidad Central de las Villas. Santa Clara, 1996.
50. TURIÑO, I. M. 1996. Procedimientos metodológicos para la determinación del punto de operación en sistemas de bombeo mediante modelos matemáticos. Tesis Doctorado. Universidad Central de las Villas. pp.: 110.

51. GARCELL, L. 1991. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. *Minería y Geología*, 8 (1-3).
52. CERPA, A., GARCÍA, J., SERNA, C. J., ARTAJ, P. 2001. *Relationship Between the Colloidal and Rheological Properties of Mineral Suspensions*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79.
53. CERPA, A., TARTAJ, P., GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T., SERNA, C. J., GARCÍA, A. 2003. 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)
54. PÉREZ, L. 2004. Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloides de las suspensiones lateríticas. Tesis Maestría. Universidad de Oriente. Cuba. Pág 70.
55. PÉREZ, L., CARDERO, Y., LAMOTH, Y., GARCELL, L. 2008. Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita. *Revista Tecnología Química*, XXVIII (1).
56. Abad B. A. Eficiencia energética en los accionamientos de transporte laterítico de la empresa Comandante Pedro Sotro Alba. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Dr. ANJ. Moa, Holguín, 2013.
57. Turro B. A. Estudio del hidrot transporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Dr. ANJ. Moa, Holguín, 2002.
58. ROJAS, L. 2006. Accionamiento eléctrico asincrónico para el transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. pp.: 112.
59. 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.

60. Rojas L. D; Columbié, A. Identificación del accionamiento del motor de inducción con bomba centrífuga usando lógica difusa. Trabajos Teórico Experimentales. Energética Vol. XXV, No. 3/2004.
61. Pavlov K. F; Romankov P. G.; Noskov A. A. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. La Habana. Editorial Abril, 1981.
62. ROJAS, A., BEYRIS, P. 1994. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". Minería y Geología., XI (1).
63. Pérez F. Equipos de Bombeo. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1983.
64. Guzmán O. Eficiencia energética. Un panorama regional. Buenos Aires, Argentina: Nueva Sociedad., 2009.
65. Manual de Operaciones de la Planta de Lixiviación de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
66. Legrá L. A. Software Tierra. Versión 2.4. ISMM, 2004.
67. Gómez Y. L. Análisis de la eficiencia energética del sistema de bombeo de pulpa de la planta lixiviación de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A. Bomba Centrífuga (135 - PU – 01C). Tesis de grado. ISMM, 2014.
68. Manual de operaciones de la planta de Lixiviación. Normas de operaciones, 1988.
69. Informe del control de electricidad de la Planta de Lixiviación, 2016.
70. Reporte de averías de la Planta de Lixiviación, 2016.
71. ROMERO, I. 2014. Procedimiento a partir de un modelo de motor agregado para la caracterización energética de motores de inducción Tesis Doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico. pp.: 114.

ANEXOS

Anexo 1. Esquema tecnológico principal de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.



Anexo 2. Flujo tecnológico de la Planta de Lixiviación.

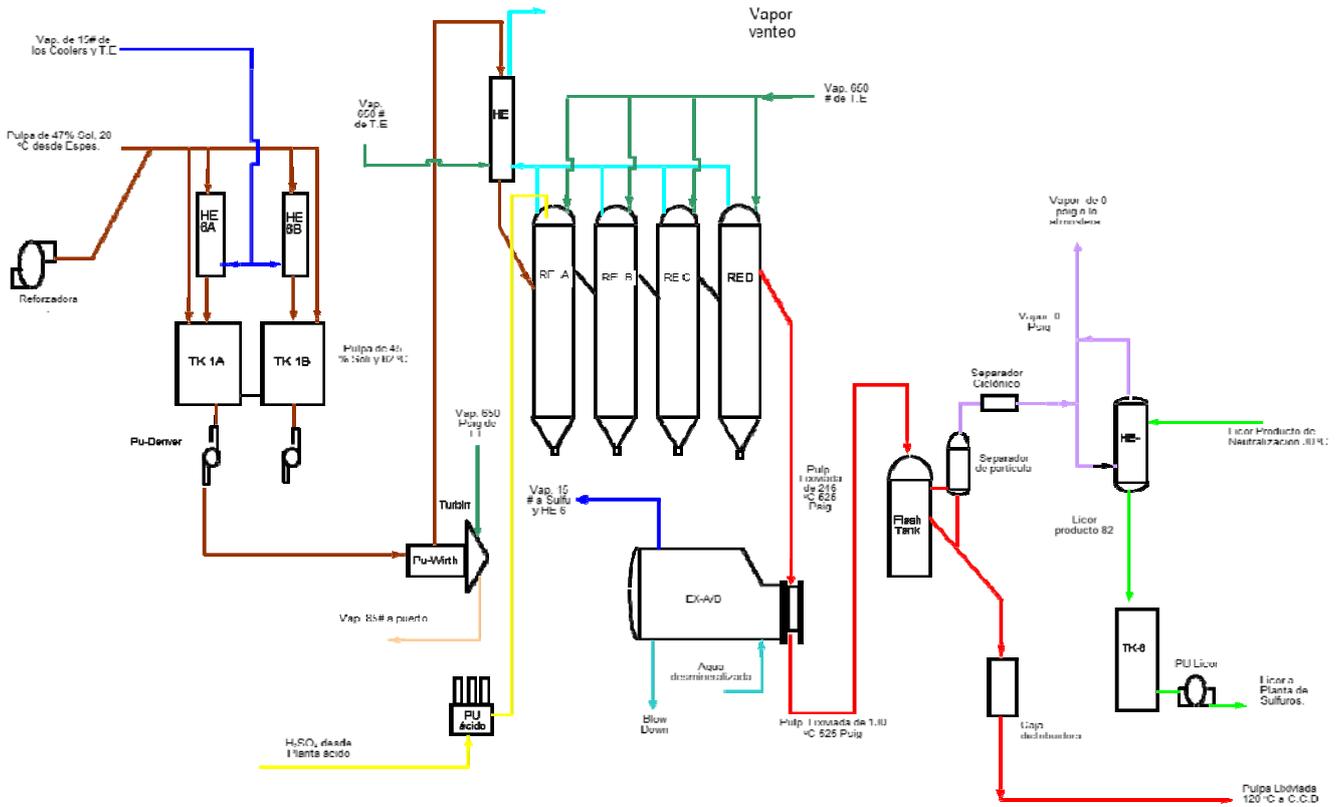
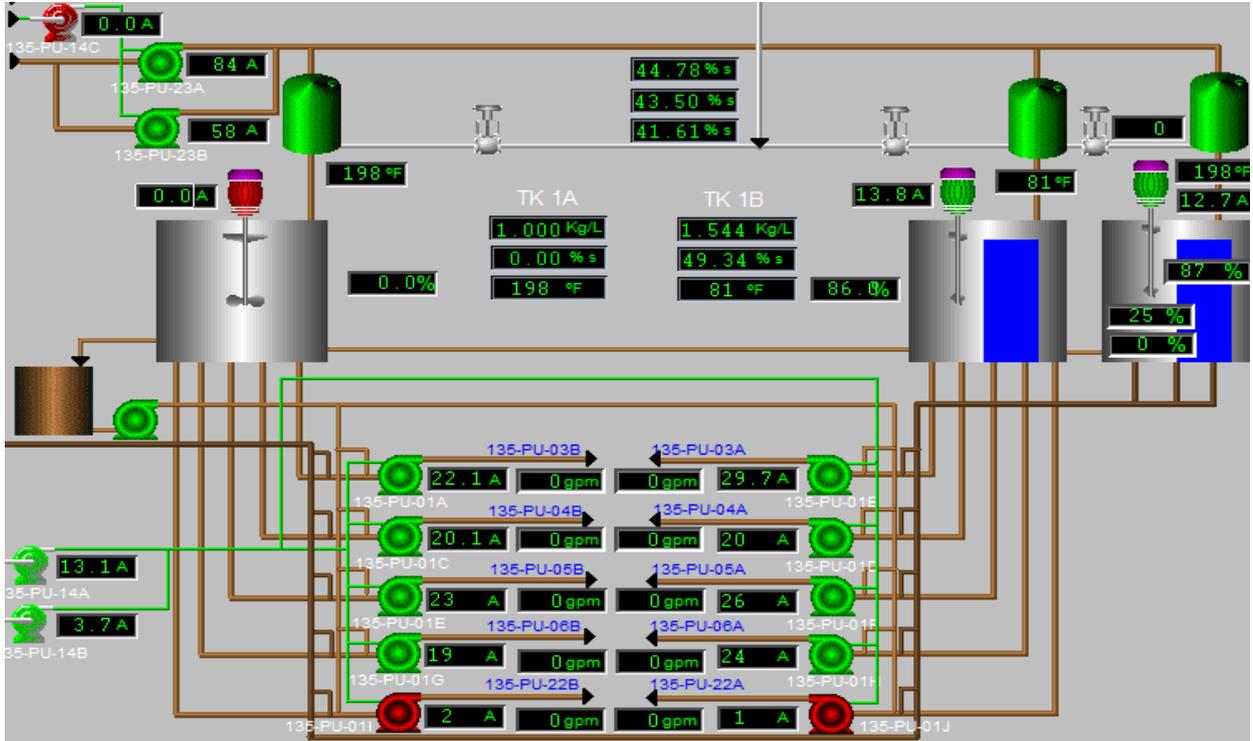
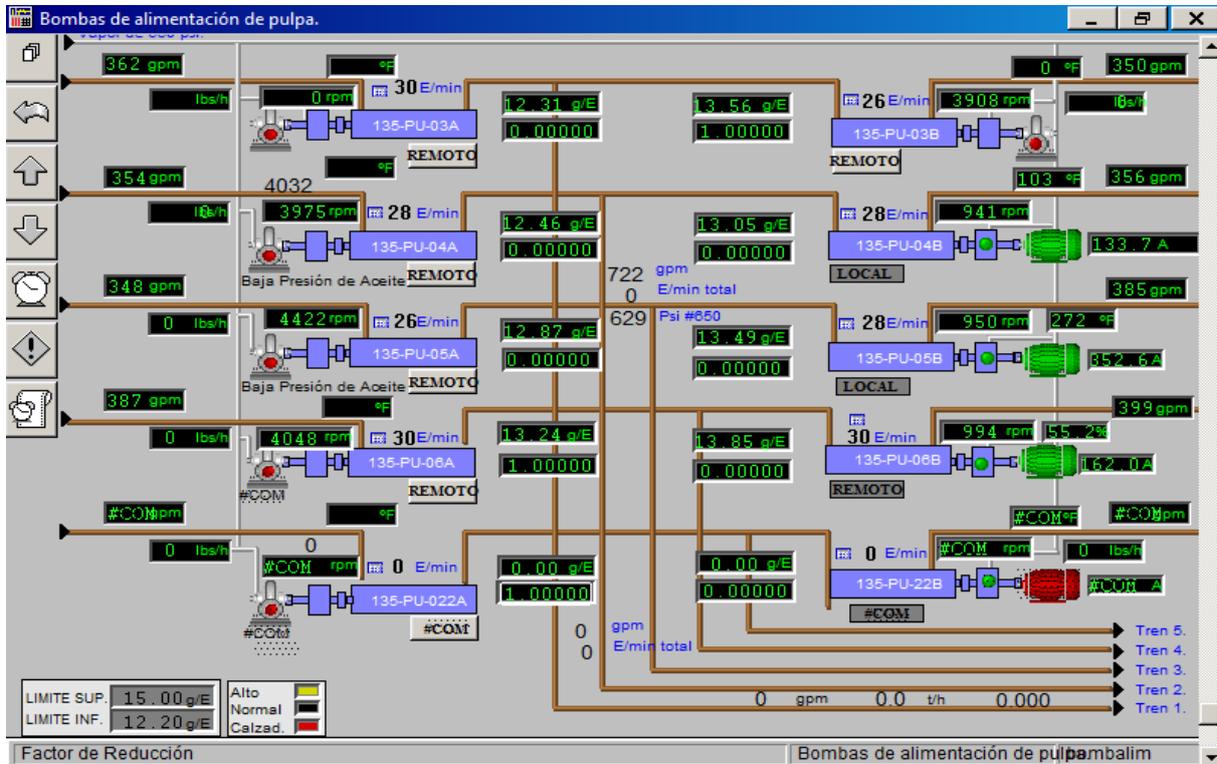


DIAGRAMA DE FLUJO TECNOLÓGICO DE PLANTA DE LIXIVIACION

Anexo 3. Bombas Centrífugas de la Planta de Lixiviación



Anexo 4. Bombas de desplazamiento positivo de la Planta de Lixiviación



Anexo 5. Técnica de fluorescencia de Rayos X para determinar la composición química del mineral laterítico empleada por la empresa

Para la determinación de la composición química de la pulpa alimentada a la planta de Lixiviación, en el laboratorio de la empresa emplean el método de fluorescencia de Rayos X. Este espectrómetro secuencial automático de rayos es un instrumento compacto y de alta velocidad el cual se usa para el análisis de los elementos desde Bromo hasta Uranio. Es de alta flexibilidad, controlado por el microprocesador.

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de la composición química del mineral limonítico alimentado a la planta de lixiviación:

Tabla 2.1. Composición química del mineral limonítico alimentado

Elementos y compuestos	Ni	SiO₂	Co	Fe	Cu	Mg	Al	Sólidos
Contenido, %	1,38	7,5	0,14	45	0,024	0,8	5	45

Anexo 6. Determinación de la densidad de la pulpa en la planta de Lixiviación

Tabla 1. Valores de la densidad del agua

T, °C	T, °F	ρ , g/cm ³	T, °C	T, °F	ρ , g/cm ³
31	87,2	0,99537	46	114,8	0,98982
32	89,6	0,99505	47	116,6	0,98940
33	91,4	0,99440	48	118,4	0,98894
34	93,2	0,99437	49	120,2	0,98852
35	95,6	0,99406	50	122,0	0,98807
36	96,8	0,99371	51	123,8	0,98762
37	98,6	0,99336	52	125,6	0,98715
38	100,4	0,99229	53	127,4	0,98669
39	102,2	0,99262	54	129,2	0,98621
40	104,0	0,99224	55	131,0	0,98573
41	105,8	0,99186	60	140,0	0,98324
42	107,6	0,99147	65	149,0	0,98059
43	109,4	0,99107	70	158,0	0,97781
44	111,2	0,99069	75	167,8	0,97489
45	113,0	0,99025	80	176,8	0,97183

Cálculo de la masa de agua añadida a la pulpa

La masa de agua añadida a la pulpa se calcula por la ecuación 2.1.

$$M = M_{pD} - M_p$$

donde:

M : Masa de agua añadida a la pulpa, g;

M_{pD} : Masa de pulpa con agua según el paso 3, g;

M_p : Masa de pulpa antes de la dilución determinada en el paso 2, g.

Cálculo del volumen de agua añadido

El volumen de agua añadido se determina por la ecuación 2.2.

$$V = \frac{M}{\rho_{H_2O}}$$

donde :

V : Volumen de agua añadido a la pulpa, en cm^3 .

M : Masa de agua determinada por la expresión 1.

ρ_{H_2O} : Densidad del agua a la temperatura de la pulpa. Determinada en el paso 5 del procedimiento.

Cálculo del volumen de pulpa

El volumen de pulpa se determina por la ecuación 2.3:

$$V_{pulpa} = 1000 - V$$

donde

1000 : Volumen del volumétrico, en gr/cm^3 .

V : Volumen de agua determinado por la expresión 2, en cm^3 .

V_{pulpa} Volumen de pulpa, cm^3 .

Cálculo de la densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa se calcula por la siguiente fórmula:

$$\rho_{pulpa} = \frac{M_{pulpa}}{V_{pulpa}}$$

donde :

ρ_{pulpa} : Densidad de la pulpa, en g/cm^3

M_{pulpa} : Masa de pulpa determinada por el paso 2 del procedimiento, en g.

V_{pulpa} : Volumen de pulpa calculado por la expresión 3, cm^3 .

Anexo 7. Determinación del porcentaje de sólidos por el método matemático

Este método matemático que aquí se explica es válido para pulpas precalentadas y sin precalentar.

Con los datos obtenidos experimentalmente de densidad de la pulpa, se determina el porcentaje de sólidos por la siguiente expresión

$$x = \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{susp}}} \quad \text{y} \quad V = \frac{m}{\rho}$$

De esta manera si al obtener la masa del sólido y de la suspensión se determina el porcentaje de sólidos, esto se recoge en la norma NEIB 050302.