

# **Modelación de los parámetros de la pulpa precalentada y reducción del consumo energético a través de acciones de control**

Gilberto Acosta Monjes, Empresa Eléctrica Moa, gilbertoam@elecchol.une.cu

Gabriel Hernández Ramírez, Instituto Superior Minero Metalúrgico, ghdezr@ismm.edu.cu

## **Resumen**

La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de los parámetros de la pulpa precalentada, tales como: porcentaje de sólido, 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 acoplamiento.

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 centrífuga y de desplazamiento positivo depende en gran medida de la productividad por lo que se propone la automatización del proceso de descarga y succión de dichas bombas con un ahorro de energía de aproximadamente del 30 %.

## **1. 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 riegos para la producción agrícola de alimentos.

En la Empresa Cmdte. Pedro Sotto Alba del municipio de Moa se lleva a cabo la tecnología ácida a presión, en la cual 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 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.

Las bombas centrífugas y de desplazamiento positivo poseen una amplia aplicación en la Industria Química y Metalúrgica, acerca de las mismas se han realizado numerosos estudios desde el punto de vista operacional en varios países, sin embargo, respecto al correcto funcionamiento, 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. Teniendo en cuenta estas consideraciones la investigación tiene como objetivo determinar el ahorro de energía en el sistema de bombeo de pulpa precalentada a través de acciones de control.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

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
5. Analizador de red

### **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 sólido, %;
- Densidad de la pulpa, g/m<sup>3</sup>;
- Número de mineral, adimensional;
- Temperatura, °C;
- Productividad de la planta, t/h;
- Consumo energético de la Planta, kWh;

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.

### **Obtención de las bases de datos de la investigación**

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; las cuales se han visto afectadas por problemas técnico-operacionales y averías en el sistema de bombeo.

A continuación se realiza un análisis de las principales averías y su influencia en la productividad de la planta.

Para analizar la influencia de los parámetros de la pulpa precalentada sobre el consumo energético de la planta en el período comprendido por el año 2016,

se analizó una base de datos general que se muestra a continuación una parte de ella en la tabla 1.

Tabla 1. Base de datos general de la planta de Lixiviación

Fecha	% de sólidos	No, Mineral	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Productividad, t/h	Temperatura, °C	Consumo energético total, MWh
03-01-2016	36,87	10,54	1,415	64	8406	23,220
05-01-2016	37,59	12,32	1,411	63	7687	19,700
06-01-2016	37,76	9,537	1,413	63	7484	19,400
11-01-2016	39,76	9,997	1,427	64	7934	20,449
12-01-2016	38,02	10,718	1,409	65	8707	20,162
14-01-2016	38,15	12,477	1,425	64	7555	18,200
15-01-2016	38,46	10,938	1,451	64	7860	18,837
16-01-2016	39,32	10,444	1,422	64	7908	19,528
17-01-2016	38,72	8,392	1,417	64	7534	18,500
18-01-2016	39,31	8,395	1,460	65	7981	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.

### 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.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Análisis de las matrices de correlación

La matriz de correlación para la base de datos con averías se muestra en la tabla 2, que expresa el coeficiente de correlación de cada parámetro al ser correlacionado con los demás.

Tabla 2. Matriz de correlación para la base de datos con averías

Variable	% sólidos	Número de mineral	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Temperatura, °C	Productividad, t/h	Consumo energético, MWh
% 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.

Tabla 3. Matriz de correlación para la base de datos sin averías

Variable	% sólidos	Número de mineral	Densidad, g/cm <sup>3</sup>	Temperatura, °C	Productividad, t/h	Consumo energético, MWh
% sólido	1	-0,1272	0,64998	0,019279	0,447707	0,126378
Número de Mineral		1	-0,07985	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 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 sólido, 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 SiO<sub>2</sub>, Mg, Mn y el Co, disminuye el consumo energético del equipamiento en cuestión.

Obtención del modelo matemático-estadístico de regresión 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).

$$C_{energético} = 2,632 + 0,268 \cdot P_{sólido} - 0,091 \cdot N_{Mineral} + 9,133 \cdot D_{pulpa} + 0,049 \cdot T_{pulpa} + 0,0002 \cdot P \quad (1)$$

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 sólido, 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 0,89, 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 ( $F_t$ ) 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 sólido: 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 de desplazamiento positivo, es la productividad.

En el proceso productivo de la planta existen variaciones que tienen incidencia directa con el funcionamiento del acoplamiento bomba centrífuga y 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 bomba centrífuga no tienen ninguna acción de control que permita 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.



Por estas razones se propone una acción 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 centrífuga.

La acción de control que estamos proponiendo tendría un diseño como el que mostramos en la figura 1.

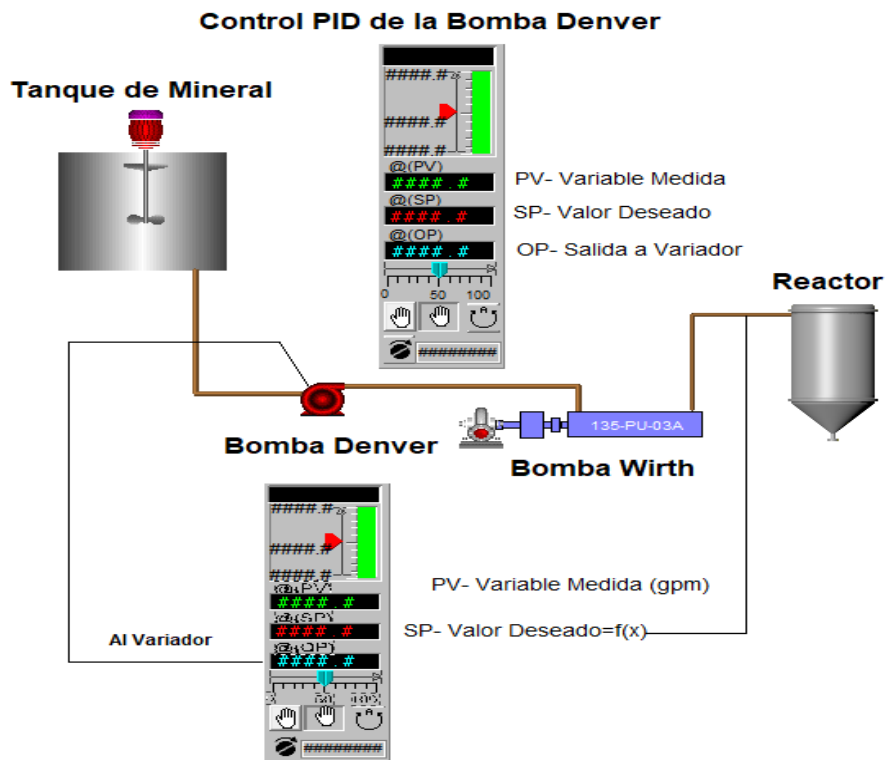


Figura 1. Acción de control

En la figura 1 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 embolado 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 bomba centrífuga y con ello una acción de control entre la salida del caudal de la bomba de desplazamiento positivo vamos a tener como resultado que cuando exista una disminución del flujo también vamos a tener una disminución

de la velocidad de la bomba centrífuga y una disminución de la corriente y la potencia con su correspondiente ahorro de consumo de energía.

#### **4. CONCLUSIONES**

- 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.
- Se demostró a través de la investigación que hay una relación directa entre los parámetros corriente de la bomba de desplazamiento positivo  $I_w$ , corriente de la bomba centrífuga  $I_d$ , embolada y flujo.
- Que la productividad es el parámetro de más influencia dentro del consumo de energía en la planta y dentro de esta el acoplamiento bomba centrífuga y de desplazamiento positivo.

#### **5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. 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.
2. Nuez M. V. Simulación y control del motor de inducción por Campo Orientado. Tesis Doctoral. La Habana, 1998.

3. 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.
4. 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.
5. Abad B. A. Eficiencia energética en los accionamientos de transporte laterítico de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Dr. ANJ. Moa, Holguín, 2013.
6. 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.
7. 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.
8. ENTE, S.C. Situación actual de la energía y eficiencia energética en América Latina. México: Preparado por ENTE, S.C. (Energía, Tecnología y Educación) para la International Copper Association Latinoamérica, 2010.
9. Guzmán O. Eficiencia energética. Un panorama regional. Buenos Aires, Argentina: Nueva Sociedad., 2009.
10. Manual de Operaciones de la Planta de Lixiviación de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
11. Legrá L. A. Software Tierra. Versión 2.4. ISMM, 2004.
12. Manual de operaciones de la planta de Lixiviación. Normas de operaciones, 1988.
13. Informe del control de electricidad de la planta de Lixiviación, 2016.
14. Reporte de averías de la planta de Lixiviación, 2016.