



ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR MINERO  
METALURGICO DE MOA  
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

**Ingeniería Eléctrica**  
**Facultad: Metalurgia**  
**Electromecánica**

# *Trabajo de Diploma*

## **En opción al Título de Ingeniero Eléctrico**

*Título: Análisis de la Eficiencia Energética en el accionamiento eléctrico de las bombas de licor en la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Soto Alba.*

Autor: Yamisleydi Pérez Bartutis.

5to año Ingeniería Eléctrica.

Tutores: M. Sc. Gabriel Hernández Ramírez.

Consultante: Ing. Julio Laffita Blanco.

Moa, Holguín

Curso 2013-2014

Año 56 de la Revolución



### DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro ser el único autor del presente Trabajo de Diploma y reconozco al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" y al Departamento de Eléctrica como portadores de los derechos patrimoniales del mismo, con carácter exclusivo.

Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del 2014.

Yamisleydi Pérez Bartutis

\_\_\_\_\_  
**Firma Autor**

M. Sc. Gabriel Hernández Ramírez.

\_\_\_\_\_  
**Firma Tutor**



## PENSAMIENTO



*...El hombre debe transformarse al mismo tiempo que la producción progresa; no realizaríamos una tarea adecuada si fuéramos tan sólo productores de artículos, de materias primas y no fuéramos al mismo tiempo productores de hombres. Y en esta producción, en esta dirección, está comprendida la producción de sí mismos...*

*Ernesto Che Guevara*

**DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a todos los miembros de mi familia, en especial a mis padres Maritza Bartutis y Francisco Pérez, por la educación que me dieron durante toda mi vida, por el amor que me han brindado siempre, por comprenderme y hacer de mí una persona de bien. A mi hermano Raidel Pérez por brindarme su cariño y apoyo incondicionalmente. A mis amigos que de una forma u otra me apoyaron para hacer realidad este sueño.*

**AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecer a mis padres por todo el apoyo que me han dado y por la forma en que me han guiado hacia la realización de mis sueños y que de una forma u otra sin sus consejos y ayuda no hubiera sido posible la culminación de este proyecto.*

*A mi hermano Raidel que es el ejemplo más noble que tengo de fortaleza y dulzura y será uno de mis pilares durante el resto de mi vida.*

*A mi cuñada Dayana por brindarme su ayuda siempre que la necesité y su cariño.*

*A mis amistades que han estado pendientes de mí, dando su apoyo aún sin pedírselo.*

*A mis compañeros de aula por haber compartido todo este tiempo de estudios y sacrificios.*

*A mis tutores Gabriel Hernández y Julio Laffita por compartir sus conocimientos y experiencias y hacer posible la culminación de este trabajo de diploma.*

*A todos los profesores que de una forma u otra aportaron sus conocimientos para mi formación como profesional.*

*A todos los trabajadores del Laboratorio Eléctrico de la Empresa Pedro Sotto Alba por acogerme como un miembro más de su equipo y brindarme toda la ayuda necesaria.*

*Y a las FAR, que gracias a ella pude optar por esta carrera y por contribuir en mi realización como profesional para brindar mi ayuda al desarrollo sostenible del país.*

*A todos Gracias*



## RESUMEN

En este trabajo se presentan una serie de propuestas para mejorar la eficiencia en los accionamientos de las bombas de transporte de licor producto de la Planta de Sulfuros de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, debido a la existencia de limitaciones que no garantizan la total eficiencia. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica de los temas relacionados con la eficiencia energética en los sistemas de bombeo, exponiéndose los fundamentos teóricos de las herramientas utilizadas en la investigación. Además se efectuaron un conjunto de mediciones en el accionamiento eléctrico de las bombas de licor, de la Planta de Sulfuros ubicada en la Empresa Pedro Sotto Alba, para determinar el estado actual de la eficiencia del mismo.

Se detectaron los motivos que afectaban la eficiencia en el proceso productivo y se proponen como medidas para minimizarlos: reducir la presión de vapor a través de la temperatura del líquido transportado; aumentando el NPSH disponible actuando sobre la longitud de la tubería en la succión que podría ser mucho menor.

**ABSTRACT**

In this work they are presented a series of proposals to improve the efficiency in the workings of the bombs of transport of liquor product of the Plant of Sulfurous of the Company Major Pedro Sotto Alba, due to the existence of limitations that you/they don't guarantee the total efficiency. For he was carried out it a bibliographical search of the topics related with the energy efficiency in the systems of pumping, the theoretical foundations of the tools used in the investigation being exposed. They were also made a group of measurements in the electric working of the bombs of liquor, of the Plant of Sulfurous located in Company Pedro Sotto Alba, to determine the current state of the efficiency of the same one.

The reasons were detected that they affected the efficiency in the productive process and they intend as measures to minimize them: to reduce the pressure of vapor through the temperature of the transported liquid; increasing the available NPSH acting on the longitude of the pipe in the suction that could be much smaller.



<b>INDICE</b>	
<b>Declaración de Autoría.....</b>	<b>II</b>
<b>Pensamiento.....</b>	<b>V</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>VI</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IX</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
Situación Problémica .....	2
Problema de la investigación.....	2
Campo de acción.....	2
Objeto de investigación .....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Tareas a realizar.....	3
Hipótesis .....	3
<b>CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
Introducción .....	4
1.1 Definición General .....	4
1.2 Caracterización de la planta de sulfuros.....	6
1.2.1 Factores que influyen en la precipitación de los sulfuros.....	7
1.2.2 Flujo tecnológico del proceso.....	7
1.3 Aspectos generales sobre las bombas.....	9
1.3.1 Bombas Centrífugas .....	10
1.3.2 Principio general de los variadores de velocidad.....	11
1.4 Conceptos para el análisis y evaluación de la eficiencia en el sistema de bombeo.....	11
1.5 Conclusiones del capítulo.....	17
<b>CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES. ....</b>	<b>18</b>
Introducción .....	18
2.1 Métodos y materiales utilizados en el análisis del accionamiento de las bombas de licor.....	18



2.2 Descripción del accionamiento eléctrico de las bombas de licor de la Planta .....	21
2.2.1 Componentes del accionamiento eléctrico. ....	21
2.3 Caracterización de la carga instalada.....	23
2.3.1 Características básicas de licor .....	28
2.4 Resultados de las mediciones realizadas.....	29
2.5 Factores que afectan la eficiencia .....	31
2.6 Factores que incrementan la eficiencia .....	34
2.7 Conclusiones del capítulo.....	34
<b>CAPÍTULO III: PROPUESTA DE SOLUCIÓN DE LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE LA PLANTA. ....</b>	<b>36</b>
Introducción .....	36
3.1 Aplicación del método en el accionamiento de las bombas para determinar la eficiencia. ....	36
3.2 Valoración técnica del trabajo.....	45
3.2.1 Efectos de la cavitación. ....	45
3.2.2 Métodos para eliminar o reducir la cavitación.....	48
3.3 Determinación del consumo de energía y los costos de operación del sistema . ....	48
3.4 Conclusiones del capítulo .....	51
<b>Conclusiones Generales .....</b>	<b>52</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>54</b>
Anexos.....	57



## INTRODUCCIÓN

A raíz de la crisis energética de los años 70' del siglo XX, del progresivo cambio climático y del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la eficiencia energética se convirtió en una preocupación mundial, motivando a los gobiernos a trazar políticas y regulaciones que propendan por el mejoramiento de la calidad y la eficiencia del suministro energético. En la matriz energética, la energía eléctrica prevalece sobre otras formas de abastecimiento de energía, siendo esencial para el desarrollo industrial de los países y el bienestar de la sociedad. La energía eléctrica involucra un campo de aplicación muy amplio: producción, transmisión, distribución y uso final de la energía; en éste último, el motor de inducción desempeña un rol preponderante, siendo calificado en el contexto mundial, como un elemento fundamental en la cadena productiva y un objetivo clave para el ahorro energético.

La literatura reciente propone que en el estudio de la eficiencia energética del motor eléctrico se involucre la eficiencia de los dispositivos asociados a su desempeño, y se analice el conjunto como un sistema, y no como elementos independientes. Este concepto definido comúnmente con el acrónimo EMDS (Electric Motor Driven System), describe la eficiencia del “Sistema Motor Eléctrico – EMS” de manera integral, la cual se compone de la eficiencia del motor eléctrico, la eficiencia del variador de frecuencia, la eficiencia del transformador, la corrección del factor de potencia y la eficiencia de los componentes mecánicos. Otros autores (Falkner & Holt, 2011), proponen un plan de trabajo para desarrollar una política de oportunidades de mejoramiento de la eficiencia energética del Sistema Motor Eléctrico.

En este contexto, es evidente que un componente del Sistema Motor Eléctrico que opere ineficientemente, producirá un efecto negativo en el desempeño global del EMS (Brunner, 2009). En este artículo se usarán los términos EMDS, EMS o “Sistema Motor Eléctrico” con el mismo significado. Los sistemas de transporte de fluido son consumidores de una parte de la energía utilizada con fines productivos en cualquier industria de procesos. Si tomamos en cuenta que más del 60% de la energía total que se consume es a costa de los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de esos más del 55% lo constituyen 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 de los motores y de los subsistemas mecánicos, entonces tiene



importancia atender cualquier medida que técnicamente se justifique y contribuya a mejorar los índices de rendimiento de estos sistemas. La industria cubana del níquel involucrada en un constante ascenso en sus producciones, cada vez aumenta más su consumo de energía, cuyos portadores deciden la rentabilidad de sus Empresas, que están entre las once más grandes consumidoras de energía eléctrica del país. Para cumplir estos portadores a mediano y largo plazo, se necesita que paralelamente con el constante crecimiento de sus producciones se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en el municipio, lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo y con mayor eficiencia.

**Situación Problémica**

La planta de sulfuros es la encargada de la obtención de los sulfuros de níquel y cobalto, producto final de la compañía Moa Nickel S.A. "Pedro Sotto Alba". El accionamiento eléctrico de las bombas de licor, posee en su estructura un variador de velocidad, modelo F7 Yaskawa con un lazo de control el cual garantiza la presión y caudal del licor pero no la eficiencia energética necesaria al no trabajar en el punto óptimo de trabajo de la bomba para este producto ocasionando sobre consumo de energía.

**Problema de la investigación**

Desconocimiento del punto de operación óptimo en el accionamiento eléctrico de las bombas de licor, de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

**Campo de acción**

Eficiencia energética de los Accionamientos Eléctricos de los Sistemas de Bombeo.

**Objeto de investigación**

Accionamiento eléctrico de las bombas de licor, de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.



### **Objetivo general**

Evaluar la eficiencia energética en el accionamiento de las bombas de licor, de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

### **Objetivos específicos**

1. Analizar los trabajos precedentes sobre el accionamiento eléctrico de las bombas centrífugas.
2. Caracterizar el accionamiento eléctrico de las bombas de licor de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
3. Proponer variantes técnicas-operacionales para la disminución del consumo.

### **Tareas a realizar**

1. Caracterización el flujo tecnológico de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
2. Caracterización el sistema de suministro eléctrico, el sistema de bombeo y de red en los autoclaves.
3. Determinar el % que representa el sistema de bombeo de la carga instalada en la planta.
4. Características de los instrumentos de medición y esquema de medición.
5. Obtención de la base de datos y variables de control que da el CITEC.
6. Determinar características de trabajo de las bombas, su rendimiento y la eficiencia del sistema.
7. Mostrar impacto técnico-operacional del trabajo.

### **Hipótesis**

Con la caracterización actualizada del accionamiento de las bombas centrífugas de transporte de licor, es posible proponer un procedimiento para la evaluación de la eficiencia del sistema.



## CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO



### Introducción

En este capítulo se muestra un estudio precedente sobre la temática de accionamientos con motores de inducción que mueven bombas centrífugas, relacionados con los criterios de evaluación de eficiencia, donde se incluyen los variadores de velocidad. Al mismo tiempo se caracteriza el accionamiento eléctrico para las condiciones de explotación en el proceso obtención de los sulfuros de níquel y cobalto, en la Planta de Sulfuros, y su relación con la transferencia de energía.

#### 1.1 Definición General

El sistema de accionamiento eléctrico puede ser estudiado en busca del mejor uso de la energía transferida desde la red de potencia trifásica en sus cuatro principales componentes:

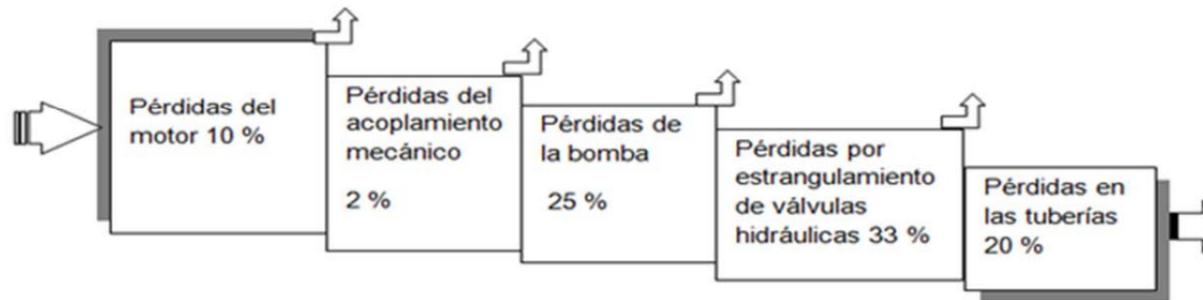
Fuente de suministro de potencia trifásica, usualmente los análisis parten de un sistema trifásico estable simétrico, con tensiones y corrientes sinusoidales con determinado contenido de armónicos de hasta de un quinto orden. [Abrahamsen, 2000].

**Subsistema:** Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico, cuyos estudios basan sus resultados en la simulación de modelos matemáticos linealizados, pero que en ocasiones presentan serias restricciones en el objeto del convertidor, funcionan bajo condiciones iniciales de trabajo limitadas en el objeto Motor.

**Subsistema Mecánico:** constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento y está determinado por el enlace del árbol del motor con el mecanismo, que en este caso es la bomba centrífuga. En él existen posibilidades reales de estudio accediendo a las relaciones mecánicas del subsistema y su concatenación con la máquina eléctrica.

**Subsistema Proceso:** es en nuestro caso la instalación hidráulica de transporte de licor sin incluir la bomba centrífuga que constituye la carga mecánica rotacional; y este subsistema proceso (tuberías, codos, accesorios, recipientes, hidromezclas, etc.) tiene una de las mayores reservas de oportunidades para obtener elevados rendimientos.

Una idea integral con la apreciación que se tiene en términos de rendimiento de un accionamiento de bombas centrífugas, se muestra en la figura 1, siendo este muy típico en cualquier instalación industrial.



**Figura 1 Diagrama de pérdidas en un sistema de accionamiento eléctrico de bombas centrífugas.**

Como se conoce; los motores de inducción tienen una elevada eficiencia cuando operan con sus cargas y torques nominales [Bodson, 1994]. Así mismo operando con cargas ligeras, las pérdidas del hierro se incrementan dramáticamente, reduciendo considerablemente la eficiencia [Kusko y Galler, 1983].

Por otra parte, muchas de las aplicaciones de los motores de inducción corresponden a bombas, ventiladores y compresores y en la mayoría de las cuales, los motores operan significativamente por debajo de sus valores nominales de carga; el voltaje aplicado al estator, crea un campo magnético rotatorio que induce corrientes en el rotor, generándose par en el eje; si no se requiere el par nominal, el máximo campo magnético tampoco se requerirá; la corriente que produce, el campo magnético adicional aumenta las pérdidas del acero, disminuyendo el rendimiento del motor. 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; [D.S. Kirschen y otros, 1984] propusieron un método heurístico para variar el flujo en línea, buscando disminuir la potencia total de entrada para controles de tipo vectorial; [P.



Famouri y otros, 1991] utilizan las ideas de Kirschen para obtener el deslizamiento óptimo para un control U/f; [M.H. Park y S.K. 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; [A. Kusko y D. Galler 1983] calculan el deslizamiento óptimo que minimiza las pérdidas por efecto Joule de la máquina; [S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit, 1992] consideran adicionalmente la energía magnética almacenada en las inductancias; [García y otros, 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]; y además se aplica la condición de flujo óptimo obtenida por S.I. Seleme Jr. y C. Canudas de Wit (1992), adaptado a bombas y ventiladores con resultados experimentales realizados en el Laboratorio de Accionamientos Eléctricos de la Universidad del Valle.

### 1.2 Caracterización de la planta de sulfuros

La planta de sulfuros, en sus inicios fue diseñada para una capacidad de 2500 a 2800 gpm, pero con la nueva tecnología, el aumento de los calentadores y un nuevo sedimentador se incrementó la capacidad de 4000 a 4300 gpm. Esta es la encargada de la obtención de los sulfuros de níquel y cobalto, producto final de la compañía Moa Nickel S.A. "Pedro Sotto Alba". Su principal operación tecnológica consiste en la precipitación de los metales en forma de sulfuros a partir de los sulfatos de níquel y cobalto contenidos en el licor producto, proveniente de la planta de neutralización, con el objetivo de extraer selectivamente el níquel y el cobalto de la solución y separarlos de las impurezas. Este proceso se lleva a cabo utilizando ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) como agente precipitador en las autoclaves bajo condiciones específicas de Temperatura ( $121\text{ }^{\circ}C$ ) y Presión ( $150\text{ lb/pulg}^2$ ). El resto del proceso está en función de recuperar el  $H_2S_{(g)}$  que es el agente precipitante y se encuentra en exceso en la reacción. La Planta está diseñada para procesar el licor, producto de la Lixiviación del mineral después de ser decantados los sólidos en la Planta de Lavaderos y ser acondicionado este licor de Sulfatos de metales ricos en níquel y cobalto, en la Planta de Neutralización, mediante la reducción del hierro, cromo, la precipitación del cobre con la inyección de  $H_2S$  gaseoso a bajas presiones y la neutralización del ácido libre. (Anexo 3)



1.2.1 Factores que influyen en la precipitación de los sulfuros

Los principales factores que influyen en el proceso de precipitación son:

Temperatura y presión parcial del ácido sulfhídrico, el pH de la solución inicial, los iones de los metales inertes, la composición química del licor producto, el área efectiva de cristalización, la concentración de níquel en la solución inicial, el tiempo de retención y la agitación.

1.2.2 Flujo tecnológico del proceso

La planta de sulfuros cuenta con 4 trenes de producción con las mismas funciones y características técnicas y tecnológicas. Cada tren está constituido por un calentador, una bomba centrífuga, un autoclave y un tanque despresurizador.

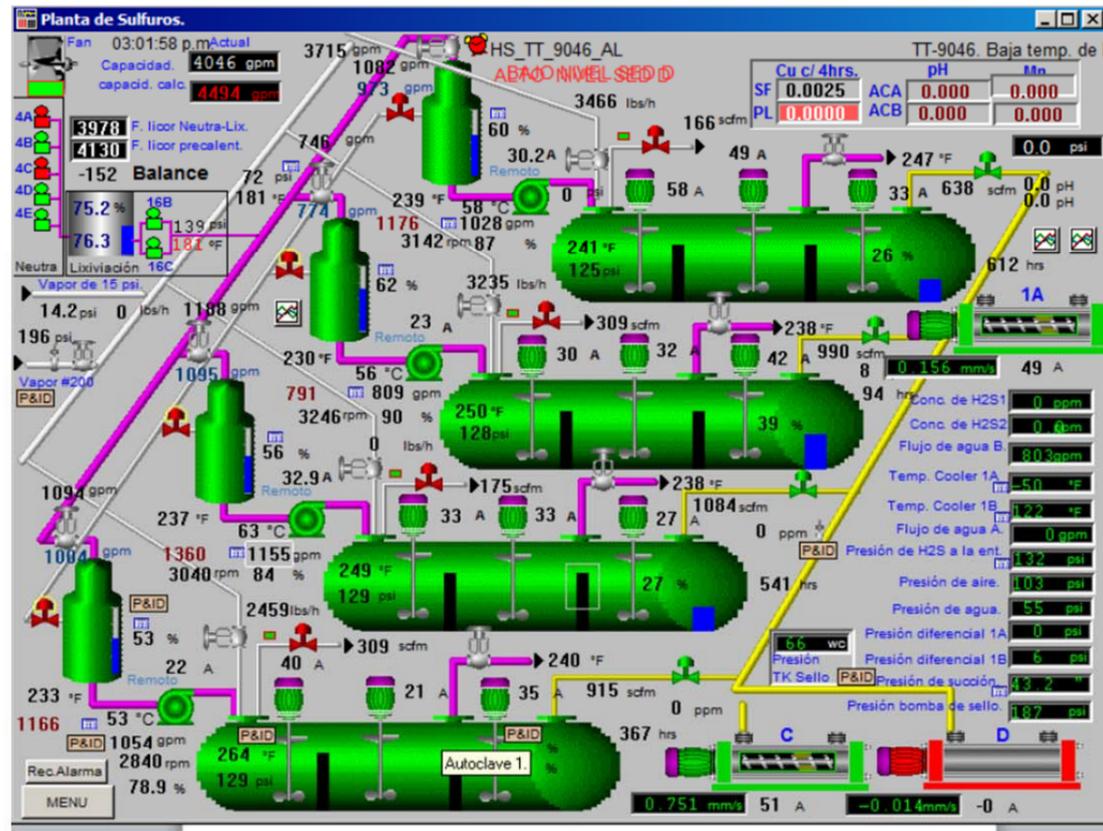


Figura 2 a Vista de los 4 trenes de producción de la Planta de Sulfuros.



La planta además posee los siguientes equipos:

1 enfriador de H<sub>2</sub>S o deshumidificador, 1 tanque de sello, 1 separador, 3 compresores de recirculación de H<sub>2</sub>S, 3 tanques espesadores, 2 tanques de almacenaje, el circuito de semilla, ( el cual está compuesto por los siguientes equipos: 2 bombas de flujo de fondo de los sedimentadores, 1 clasificador, 1 tanque de semilla), 1 circuito de molienda, (el que consta de: 1 triturador, 1 molino de bolas, 1 transportador, 1 bomba centrífuga de impelentes abiertos), 1 tanque de licor de desperdicio.

El licor neutralizado que contiene los sulfatos de Ni + Co, es precalentado a 85 - 88 °C con vapor de 0 lb/pulg<sup>2</sup> en la planta de Lixiviación y desde allí es bombeado a la planta de Sulfuros. Este entra en los calentadores de licor (HE-1... 4), donde por contacto directo y usando vapor de 15 lb/pulg<sup>2</sup>, es calentado hasta una temperatura de 118 - 121 °C. Una vez calentado es bombeado desde el fondo de los calentadores hasta el primer compartimiento de las autoclaves (AC-1... 4). Las autoclaves están divididas interiormente en 3 compartimientos, el tiempo de retención es de alrededor de 17 minutos.

El tamaño de cada compartimiento disminuye ligeramente desde el primero (C), entrada de licor, al último (A), salida de sulfuros. El licor pasa de una división a otra de dos formas, por reboso o a través de los agujeros practicados en la pared de los tabiques.

Los compartimientos "B" y "C" están provistos de agitadores de tipo axial (AG-1B...4B, 1C... 4C) con el objetivo de evitar la acumulación de las partículas mayores, mientras que en el compartimiento "A" (AG-1A...4A) los agitadores son del tipo de turbina de paletas planas. En el compartimiento "C" conjuntamente con el licor se alimenta pulpa de sulfuros que actúa como semilla durante la precipitación de sulfuros (Actualmente no se adiciona semilla)

A las autoclaves se les inyecta vapor de 200 lb/pulg<sup>2</sup> en el compartimiento "C" para garantizar que la temperatura en el seno de la masa en reacción no sea menor de 121°C. Un control automático garantiza el adecuado nivel de líquido dentro del autoclave en el compartimiento "A", dejando escapar hacia el tanque despresurizador (FT-1... 4) la mezcla de pulpa diluida de sulfuros de Ni y Co.



## 1.3 Aspectos generales sobre las bombas

### Concepto de bomba:

Las bombas son dispositivos que se encargan de transferir energía a la corriente del fluido impulsándolo, desde un estado de baja presión estática a otro de mayor presión. Están compuestas por un elemento rotatorio denominado impulsor, el cual se encuentra dentro de una carcasa llamada voluta. Inicialmente la energía es transmitida como energía mecánica a través de un eje, para posteriormente convertirse en energía hidráulica. El fluido entra axialmente a través del ojo del impulsor, pasando por los canales de éste y suministrándosele energía cinética mediante los álabes que se encuentran en el impulsor para posteriormente descargar el fluido en la voluta, el cual se expande gradualmente, disminuyendo la energía cinética adquirida para convertirse en presión estática.

### Objetivo de una bomba:

Aumentar la energía del fluido (principalmente energía de presión interna)

### Clasificación según el principio de funcionamiento:

- Bombas Rotodinámicas (en las que el principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodetes con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo). Estas turbo máquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:
  - Radiales o centrífugas.
  - Axiales.
  - Diagonales o helicentrífugas.
  
- Bombas de Desplazamiento Positivo (en las que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen). Este tipo de bombas pueden subdividirse en:



- Bombas de émbolo alternativo.
- Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas.

### **1.3.1 Bombas Centrífugas**

Las bombas centrífugas son las más usadas en las industrias. Se utilizan para desplazar líquidos o semilíquidos a través de un sistema de tuberías, accionadas principalmente por motores eléctricos y de combustión interna. Estas bombas crean un flujo utilizando la energía cinética de un rodete giratorio para generar el movimiento del fluido.

La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento (el motor) primero en velocidad (o energía cinética) y después en energía de presión. El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado (energía transformada luego en caudal y altura de elevación), según las características constructivas de la bomba misma y en relación con las necesidades específicas de la instalación.

El funcionamiento es simple: dichas bombas usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión. Dentro de una cámara hermética dotada de entrada y salida (tornillo sin fin o voluta) gira una rueda con paleta (rodete), el verdadero corazón de la bomba. El rodete es el elemento rodante de la bomba que convierte la energía del motor en energía cinética (la parte estática de la bomba, o sea la voluta, convierte, en cambio, la energía cinética en energía de presión).

El rodete está, a su vez, fijado al eje bomba, ensamblado directamente al eje de transmisión del motor o acoplado a él por medio de acoplado rígido. El sistema centrífugo presenta infinidad de ventajas con respecto a los otros tipos de bombeo: aseguran un tamaño reducido, un servicio relativamente silencioso y un fácil accionamiento con todos los tipos de motores eléctricos que se encuentran en plaza.

Además presenta una fácil adaptación a todos los problemas del tratamiento de líquidos ya que, por medio de adaptaciones a las determinadas condiciones de uso, es capaz de responder a las exigencias de las instalaciones destinadas.



### 1.3.2 Principio general de los variadores de velocidad.

Los variadores de velocidad, también llamados convertidores de frecuencia, son dispositivos utilizados para regular los procesos industriales.

Se trata de equipos utilizados hoy en día en múltiples aplicaciones, existiendo un buen número de fabricantes y suministradores.

Un variador de frecuencia, VFD por sus siglas en inglés (Variable Frequency Drive) o bien AFD (Adjustable Frequency Drive), es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Otra forma de cambiar la velocidad del motor sería cambiando el número de polos del motor, aunque esta técnica resulta ineficiente ya que habría que cambiar las características físicas del motor.

El principio de funcionamiento del variador de velocidad consiste en convertir el voltaje de CA a un voltaje de CD por medio de un puente rectificador trifásico compuesto por seis diodos para posteriormente convertir ese mismo voltaje de CD a un voltaje de CA por medio de un puente inversor trifásico compuesto por seis transistores de potencia IGBT, los cuales controlan el voltaje de CA variando su frecuencia.

### 1.4 Conceptos para el análisis y evaluación de la eficiencia en el sistema de bombeo.

Carga estática total: Se considera un parámetro constante dentro del sistema de bombeo, se determina conociendo la altura geométrica del nivel del líquido entre los recipientes de succión y descarga y la línea de centros de la bomba.

$$H_{ET} = H_D - H_S + \frac{P_D - P_S}{\gamma} \quad (\text{Ecu 1.1})$$

Dónde:

$H_{ET}$ : Carga estática total, (m)



$H_D$ : Altura de descarga, (m)

$H_S$ : Altura de succión, (m)

$P_D$ : Presión en el recipiente de descarga.

$P_S$ : Presión en el recipiente de succión.

$\gamma$  : Peso específico del fluido, ( $N/m^3$ ).

Carga dinámica: Se origina por la fricción del fluido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes (como por ejemplo intercambiadores de calor), varía proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad del fluido que maneja el sistema.

Cálculo de las pérdidas de presión en la red de tuberías.

Las pérdidas de presión en succión y descarga pueden determinarse por:

- A. Método de estimación de pérdidas mediante uso de manómetros
- B. Método de cálculo mediante el conocimiento completo de la instalación bombeo.

Las pérdidas de carga en tuberías se determinan mediante la ecuación de Darcy - Weisbach:

$$h_L = \frac{f \times L \times v^2}{2 \times D \times g} \quad \text{(Ecu 1.2)}$$

Dónde:

$h_L$  : Pérdida de carga (m),

D: Diámetro de la tubería (m),

L: Longitud de la tubería (m),



$$v: \text{velocidad del fluido (m/s), } v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2} \quad \text{(Ecu 1.3)}$$

g : aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$$f: \text{factor de fricción (adimensional), } f = \frac{0.24}{Re^{0.16}}$$

El Factor de fricción es función de la rugosidad del material, diámetro de la tubería y del número de Reynolds, este último se define como:

$$Re = \frac{D \times v \times \rho}{\mu} = \frac{D \times v}{\gamma} \quad \text{(Ecu 1.4)}$$

Dónde:

D: Diámetro de la tubería (m),

v :Velocidad del fluido (m/s),

$\rho$  :densidad  $(kg/m^3)$

$\mu$  : viscosidad del fluido (Pas)

Carga total del sistema: Es la suma de la carga estática total más la carga dinámica total.

$$\text{Carga total del sistema } H \text{ (Total)} = H \text{ (estática)} + H \text{ (dinámica)} \quad \text{(Ecu 1.5)}$$

Condiciones de succión: Por lo que respecta al líquido, se tomará en cuenta la influencia de su presión sobre la succión.

Carga neta de succión positiva (NPSH): Es la presión disponible o requerida para forzar un gasto determinado, en litros por segundo, a través de la tubería de succión, al ojo del impulsor, cilindro o carcasa de una bomba. En el bombeo de líquidos la presión en cualquier punto en la línea de succión nunca deberá reducirse a la presión de vapor del líquido.



NPSH disponible: Esta depende de la carga de succión o elevación, la carga de fricción, y la presión de vapor del líquido manejado a la temperatura de bombeo. Si se varía cualquiera de estos puntos, la NPSH puede alterarse. Donde  $D_1$ , diámetro del impulsor nominal (m);  $D_2$ , diámetro para la condición final (m);  $N_1$ , velocidad nominal de la bomba (rpm);  $N_2$ , velocidad de trabajo (rpm);  $H_1$  carga nominal (m);  $H_2$  carga específica (m).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{(Ecu 1.6)}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad \text{(Ecu 1.7)}$$

NPSH requerida: Esta depende sólo del diseño de la bomba y se obtiene del fabricante para cada bomba en particular, según su tipo, modelo, capacidad y velocidad.

Presión de vapor: Si un líquido se encuentra a una temperatura arriba de su punto de ebullición, sufre evaporación en su superficie libre. En el seno del líquido se origina una presión que se llama presión de vapor y que está en función directa con la temperatura del líquido.

Presión de bombeo: Destinemos una bomba cualquiera para bombear un líquido. Al funcionar la bomba, tiende a formar un vacío en el seno del líquido. Éste succionar se conoce como presión de bombeo.

Cebado de las Bombas: Consiste en la extracción del aire de la tubería de succión de la bomba para permitir un correcto funcionamiento. Esta operación se realiza en todas las bombas centrífugas ya que no son autocebantes, generalmente cuando ésta se encuentra en una posición superior al tanque de aspiración.

Potencia Absorbida (P): Representa la potencia requerida por la bomba para transferir líquidos de un punto a otro y la energía requerida para vencer sus pérdidas.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad \text{(Ecu 1.8)}$$



Donde:  $D_1$ , diámetro del impulsor nominal (m);  $D_2$ , diámetro para la condición final (m);  $N_1$ , velocidad nominal de la bomba (rpm);  $N_2$ , velocidad de trabajo (rpm);  $Q_1$  caudal nominal de la bomba ( $m^3/s$ );  $Q_2$  caudal de trabajo de la bomba ( $m^3/s$ );  $P_1$  potencia nominal (kW);  $P_2$  potencia de trabajo (kW).

Potencia Hidráulica ( $P_H$ ): Potencia cedida al líquido en el proceso de su transferencia de un punto a otro.

$$P_H = \rho \times Q \times H \times g \quad \text{(Ecu 1.9)}$$

Dónde:

$\rho$ : Peso específico del fluido, ( $kg/m^3$ )

$Q$ : Caudal, ( $m^3/s$ )

$H$ : Carga total, (m)

$g$ : aceleración de la gravedad, ( $m/s^2$ )

Rango de Operación: Es la zona en la cual la bomba opera en forma eficiente. Esta zona se determina como:

$$Q_1 = 0.90 \times Q_{max} \quad \text{(Ecu 1.10)}$$

$$Q_2 = 0.85 \times Q_0 \quad \text{(Ecu 1.11)}$$

Dónde:

$Q_{max}$  : Caudal máximo que puede impulsar la bomba.

$Q_0$  : Caudal a la máxima eficiencia.

El rango de operaciones se delimita entre  $Q_1$  y  $Q_2$  .



Eficiencia del motor: Redefine en términos de la relación entre la potencia eléctrica de entrada al motor y la potencia requerida por la bomba en el eje.

$$\eta_{motor} = \frac{P_3}{P_e} \times 100 \quad (\text{Ecu 1.12})$$

Dónde:

$\eta_{motor}$ : Rendimiento del accionamiento, (%)

$P_e$ : Potencia eléctrica a la entrada del motor, (kW )

$P_3$  : Potencia requerida por la bomba en el eje, (kW )

La potencia eléctrica que consume un motor es el producto del voltaje, la intensidad de corriente y el factor de potencia. Se define como potencia que consume el motor trifásico.

$$P_e = \sqrt{3}U_L \times I_L \times \cos \varphi \quad (\text{Ecu 1.13})$$

Curva Característica: Las prestaciones de una bomba centrífuga se pueden evidenciar gráficamente por medio de una curva característica que, normalmente, tiene datos relativos a la altura geodésica total, a la potencia efectiva del motor (BHP), a la eficiencia, al NPSHr y al nivel positivo, informaciones indicadas en relación con la capacidad de la bomba.

Cada bomba centrífuga se caracteriza por su particular curva característica, que es la relación entre su caudal y su altura de elevación.

Esta representación gráfica, o sea, la trasposición de esta relación en un gráfico cartesiano, es la mejor manera para conocer qué caudal se puede obtener a una determinada altura de elevación y viceversa.

Generalmente este tipo de curvas se obtienen para velocidad constante, un diámetro del impulsor específico y un tamaño determinado de carcasa, realizando la representación gráfica de la carga



hidráulica (curva de estrangulamiento), potencia absorbida y eficiencia adiabática contra la capacidad de la bomba.

Estas curvas son suministradas por los proveedores de bombas, de tal manera que el usuario pueda trabajar según los requerimientos de la instalación sin salir de los intervalos de funcionamiento óptimo, además de predecir qué ocurrirá al variar el caudal manejado, sirviendo como una gran herramienta de análisis y de comprensión del funcionamiento del equipo.

### 1.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se abordó:

- El estado del arte sobre los accionamientos eléctricos con bombas centrífugas.
- Se definieron conceptos significativos relacionados con la investigación.
- Y se presentaron las principales expresiones que serán utilizadas en el desarrollo de este trabajo investigativo.



#### Introducción

En este capítulo se describirá el accionamiento eléctrico y presentaremos hechos en forma de datos constituyen razones para la realización de este trabajo investigativo. Además se hace referencia a los métodos y materiales utilizados en el análisis del accionamiento eléctrico de las bombas de licor de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.

#### 2.1 Métodos y materiales utilizados en el análisis del accionamiento eléctrico de las bombas de licor.

En la actualidad los sistemas de monitoreo son muy diversos, para censar y realizar mediciones en tiempo real de variables tanto eléctricas, así como de variables de procesos industriales, siendo de vital importancia para la toma de decisiones determinada situación.

Una de las herramientas para ello, son los programas destinados para estos fines, basado en la toma de una muestra de la variable a través de diferentes vías de comunicación, en este caso a través del sistema SCADA, con la comunicación del Multilin SR-469, y de los equipos analizadores de redes (PQM. Por sus siglas en inglés Power Quality Meter).

#### Esquema del experimento para monitoreo.

A continuación se representa el esquema monolineal de monitoreo, que se concibió para realizar las mediciones de las variables eléctricas en las bombas de licor, de la Planta de Sulfuros.

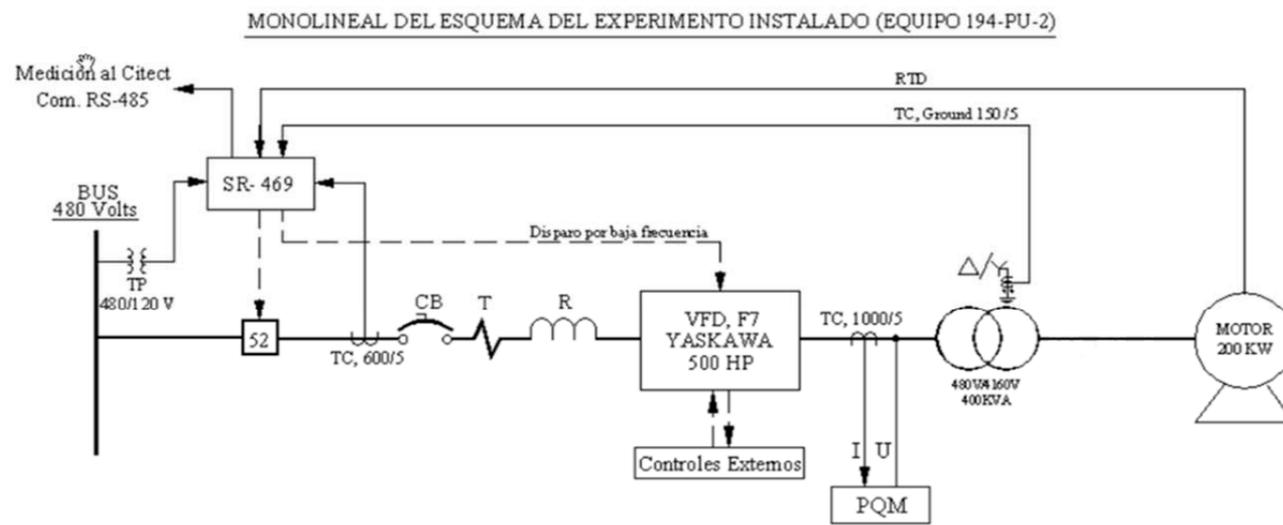


Figura 2.1 Esquema de monitoreo para la evaluación de la red del accionamiento.

**Descripción del sistema de monitoreo.**

Para el estudio de la red, se instaló un analizador de red, reflejado en el monolineal, en la salida del variador (en este caso una PQM portátil), para censar las variables del variador de velocidad F7, a través de la medición directa a través de sus propios sensores de medición (TP / TC).

El segundo punto de medición se basó en el Multilin SR-469, a través de la base de datos interna que presentan los mismos, con la comunicación del sistema SCADA (Citect) de la Empresa. (Anexo 4)

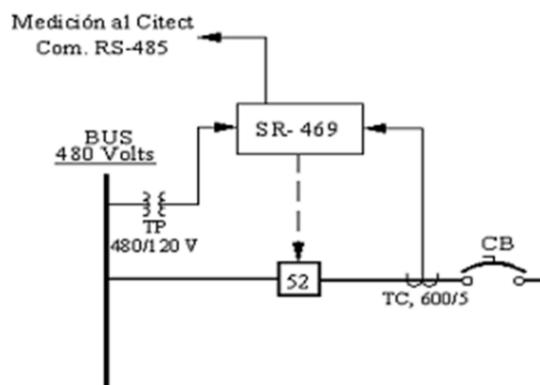
**Partes del sistema de monitoreo.**

Las partes que componen el sistema de monitoreo instalado fueron:

- ✚ Multilin SR-469.
- ✚ PQM portátil.

**Descripción del monitoreo a través de Multilin SR-469.**

Como se ilustra en la figura 2.2 el Multilin SR-469 censa los valores que pertenecen a la alimentación del cubículo del variador de velocidad, en este caso a una tensión de 480 V, tiene la opción de medir diversas variables eléctricas a través de la opción interna (Actuales Valores).



**Figura 2.2 Monitoreo a través de Multilin SR-469.**

El Multilin censa los valores a través de transformadores de corriente de 600/5 A, y transformadores de potencial de 480 a 120 VAC. La comunicación con el sistema SCADA (Citect), se realiza a través de los puertos auxiliares RS-485 del propio Multilin, que se comunica con cable profibus, con un convertidor de RS-485 a Ethernet (Nport 4030)

**Descripción del monitoreo a través de PQM portátil.**

Entre los componentes analizadores de redes se encuentran los PQM (Por sus siglas en inglés Power Quality Meter), está destinado al análisis y captura de variables eléctricas, en este caso se utilizó para las mediciones de las variables en la salida del variador de velocidad, perteneciente al laboratorio eléctrico, la misma es de uso portátil y puede ser movida con facilidad. Esta presenta ganchos de medición (transformadores de corrientes), de 1000/5 A, y puntas para la medición de tensión, hasta los 600 V.



### **2.2 Descripción del accionamiento eléctrico de las bombas de licor de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.**

El accionamiento eléctrico está conformado en su parte de fuerza por un interruptor Siemens de alimentación (52), que alimenta al cubículo del variador de velocidad, modelo F7 Yaskawa de 500 HP, equivalente a 373 kW, con una tensión de 480 V. Este a su vez suministra energía a un transformador elevador de 400 kVA, de 480V a 4160V con cinco derivaciones por el lado secundario, el cual es el encargado de alimentar al motor de 200 kW (268 HP), y a su vez mueve una bomba centrífuga acoplada en su eje, encargada de bombear el flujo de licor desde el tanque de precalentamiento hacia el autoclave, asociado a esto se encuentran otros elementos tales como: Multilin SR-469 destinado a las protecciones eléctricas, transformadores de potencial y de corrientes destinados para señales de medición, interruptores de control y elementos asociados al variador; los cuales operan en el funcionamiento del sistema.

En la actualidad, en la Empresa “Pedro Sotto Alba”, se han implementado varios tipos de accionamientos eléctricos, los cuales han trabajado de forma beneficiosa tanto para el sistema productivo, como para la realización de estudios que han aportado soluciones y mejoras de otros sistemas.

#### **2.2.1 Componentes del accionamiento eléctrico.**

El sistema de bombeo de licor de la Planta de Sulfuros de los autoclaves se realiza a través de una bomba centrífuga de par cuadrático, movida a través de todo un sistema de accionamiento eléctrico representado en la figura 2.3

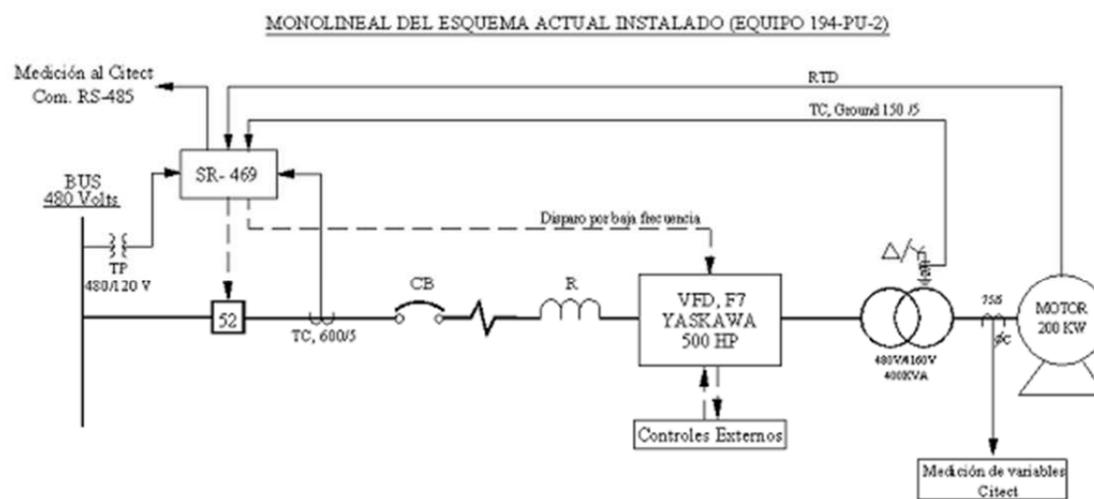


Figura 2.3 Esquema monolineal actual instalado del accionamiento eléctrico.

**Elementos que componen el accionamiento eléctrico**

**Esquema de fuerza:**

1. **Interruptor general (52).** Este es un interruptor del modelo Siemens de 2000 A al vacío, 50/60 Hz, Modelo 3WS1570-OWA66-1JA6-Z, fabricado en Alemania, con una tensión de operación permisible hasta 690 V.(Anexo 3)
2. **Interruptor de alimentación en cubículo del VFD.** Modelo NZM 12-800-NA Klockner Moeller de 800 A, a una tensión permisible de 600 V, con protección térmica.
3. **Reactor de entrada al variador de velocidad.** Modelo MTE RL-75003, 0.048mH, 750 A,  $I_n=938A$ , tensión máxima 690 V, 50/60Hz, trifásico.
4. **Variador de velocidad.** Este es de la firma Yaskawa, modelo F7, trifásico (CIMR-F7U4300) de 500 HP (373 kW), a una tensión de 460 V y 510 kVA, con una corriente nominal de 675 A y una frecuencia de entrada a 60 Hz.



**5. Transformador de fuerza elevador.** STEIN INDUSTRIES INC, de tensión por el lado primario (LV) a 480V, y por el secundario (HV) a 4160V con cinco derivaciones por el lado de media tensión, que opera sin carga, con una potencia de 400 kVA, del tipo ONAN, Z=6,3 % a 65 0C, con conexión delta / estrella aterrada, frecuencia de trabajo de 60 Hz, trifásico, masa = 2,4 t, con un volumen de 605,6 lts de aceite. Tiene fusible por las tres fases de 100A tipo (K).

El transformador de fuerza es el encargado de elevar la tensión de salida del VFD (480 V máximo), hasta el valor nominal del motor (4 160 V), sumergido en aceite, de construcción convencional, actualmente se encuentra ajustado en el Tap #. E, que corresponde a un valor de tensión de 3 952 V, para amortiguar las sobretensiones.

**6. Motor eléctrico asincrónico.** De la firma Loher, modelo DHSW-355MB-02A, de 200 kW (equivalente a 268 HP), con una tensión de operación de 4160V en estrella, de corriente nominal 32,5 A,  $\cos \Phi=0.91$ , a una frecuencia de 60 Hz, FS.1.15, IP. 65, con una masa de 1,64 t y una velocidad de 3575 rpm.

El motor asincrónico, con rotor en jaula de ardilla, una tensión nominal de 4 160 V, 200 kW, 3575 rpm, 32.5A y factor de servicio (FS) de 1.15, el mismo tiene acoplado en su eje una bomba centrífuga, con cinco sensores de temperatura, tres en el enrollado y dos en los cojinetes (RTD tipo, PT-100), que brindan la temperatura real del motor al Multilin SR-469.

Además tiene implícito una resistencia de calentamiento de 300 W, para mantener el motor caliente en el tiempo que se encuentre parado, para evitar alojamiento de humedad en los enrollados.

### 2.3 Caracterización de la carga instalada

En el año 2013 el consumo en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba se comportó de la siguiente manera:

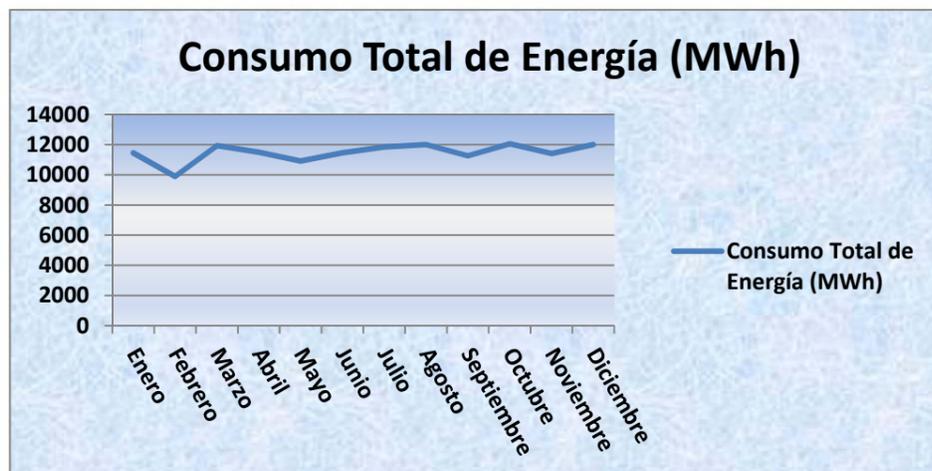


Grafico 2.1 Total de Energía Eléctrica consumida por la empresa en el año 2013.

En este gráfico podemos apreciar como el consumo de energía en la empresa supera mensualmente los 10 000 MWh consumidos.

La Planta de Sulfuros siendo una de las más importantes en el proceso de producción llegan los alimentadores de corriente, UG-3 y UG-5 procedentes de la planta de fuerza de la empresa. También suministran energía eléctrica a la planta otros alimentadores expresos desde la termoeléctrica (Main - 2, Sección # 200) y el Feeder # 2, común a planta de Ácido.

También existen 3 transformadores para la alimentación de corriente general de la planta en secciones de 480 volts a través de sus interruptores en la pizarra alimentadora.

Los MCC son los encargados de distribuir la corriente eléctrica al resto de los equipos de la planta y el alumbrado.

El sistema general de fuerza de la planta en el cuarto eléctrico es por bandeja y a la salida de este es por bandejas y líneas eléctricas con recubrimiento plástico.

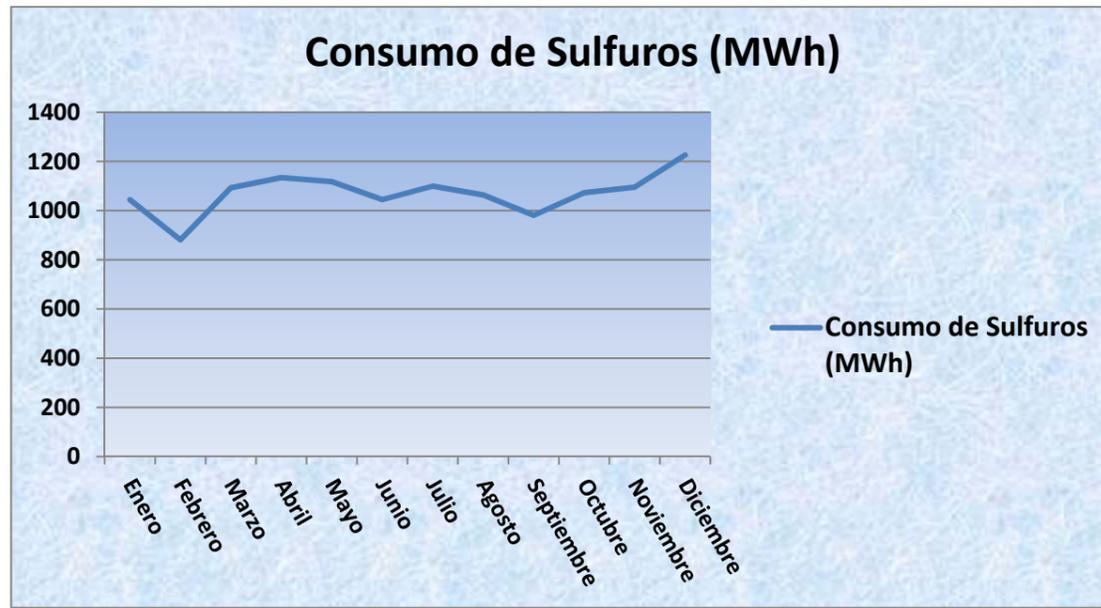


Grafico 2.2 Energía Eléctrica consumida por la Planta en el año 2013.

Esta Planta tiene un consumo bastante significativo, pues supera los 20 MWh diarios en la obtención de los sulfuros de níquel y cobalto, como se muestra en el gráfico 2.3

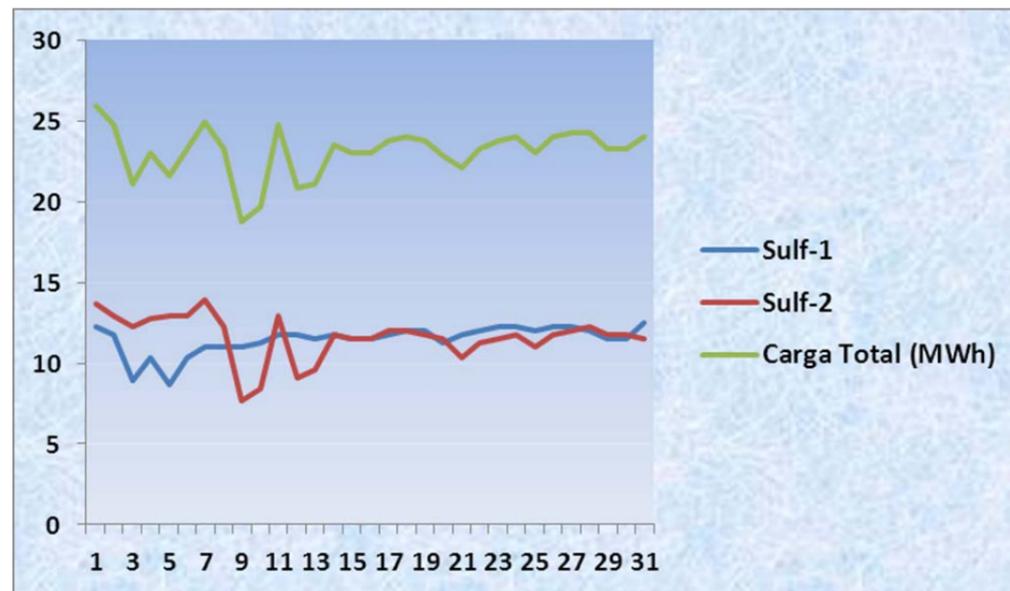


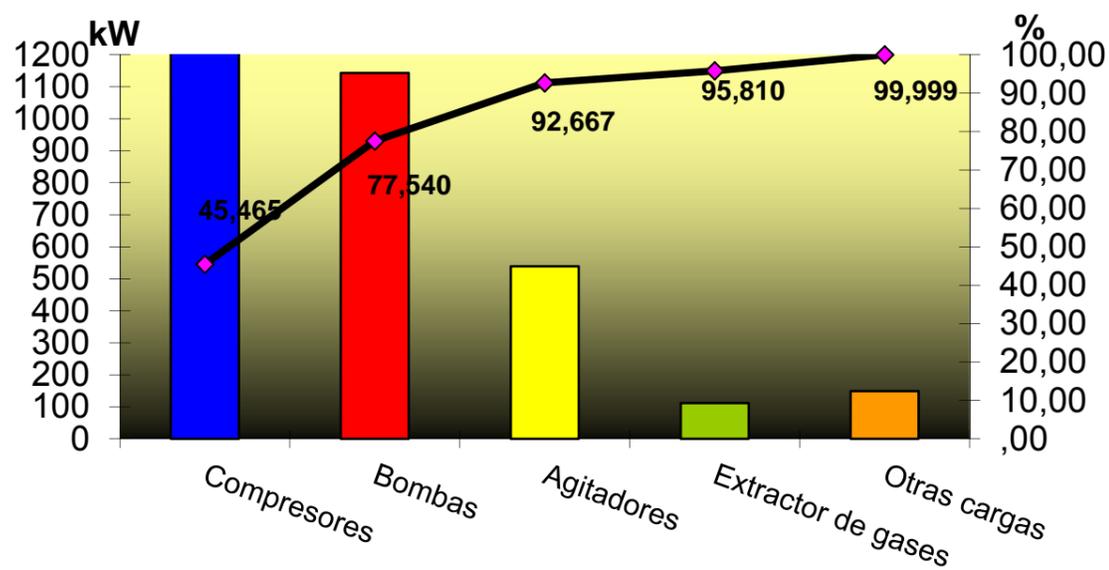
Grafico 2.3 Consumo diario de energía eléctrica de la Planta en diciembre.

Todos los sistemas de bombeo deben ser evaluados periódicamente con objeto de calificar su eficiencia electromecánica.

Una forma de conocer las condiciones en que operan los equipos, es evaluando su eficiencia a través de la medición de parámetros, tales como: gasto de operación, nivel estático, nivel dinámico, factor de potencia, potencia activa, aparente, corriente y tensión eléctrica, entre otros.

Conociendo la eficiencia electromecánica con la que trabaja el equipo, estamos en condiciones de determinar las causas que limitan su operación eficiente y en función de esto, proponer acciones para sustituir, dar mantenimiento o rehabilitar el equipo según sea el caso, con la finalidad de incrementar dicha eficiencia. Para la misma potencia de entrada y para igual eficiencia, las bombas centrífugas se caracterizan por presentar una presión relativamente alta con un caudal relativamente bajo.

En la Planta de Sulfuros de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba el sistema de bombeo representa un 32,2% de la carga instalada.



**Gráfico 2.4 Carga instalada de la Planta de Sulfuros**



Las bombas de licor representan un 26,9% del consumo en el sistema de bombeo motivo por el cual centraremos la investigación en estas.

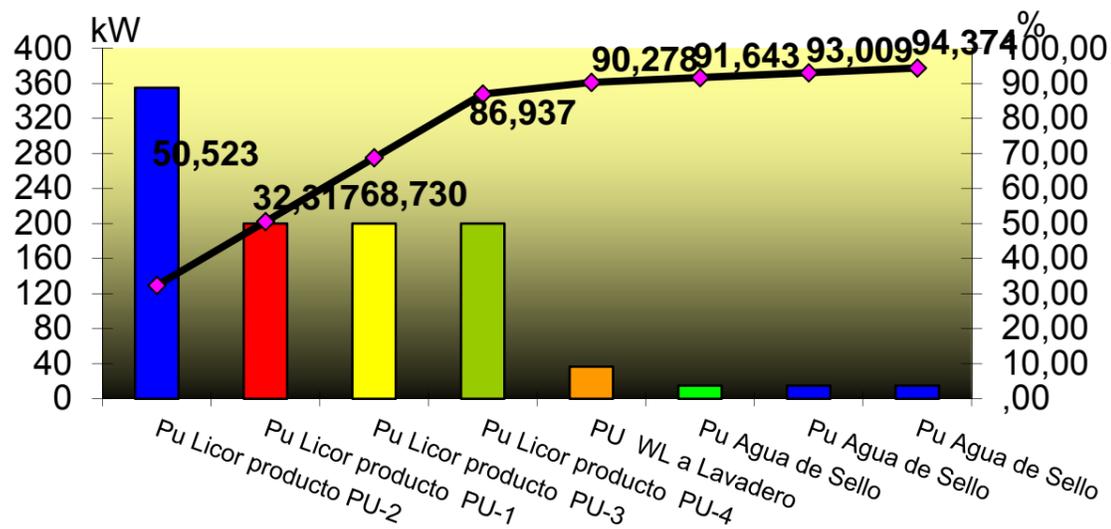


Gráfico 2.5 Consumo de las bombas de la planta de Sulfuros, en kW.

Las bombas de licor (194-PU-1, 2, 3,4) tienen como función succionar el licor proveniente del calentador y suministrarlo a través de una válvula de control automático a las autoclaves.

Poseen un sistema de lubricación que acciona sobre el eje y los dos rodamientos que regulan su temperatura. Poseen una camisa de agua de enfriamiento para el control de la temperatura de aceite del sistema de lubricación.

Se les inyecta agua de proceso en la cajuela de los sellos para impedir que el licor salga al exterior y un sistema de freno en la parte trasera que impide que el motor gire en sentido contrario debido al retroceso de la presión del autoclave cuando se dispara este equipo.

Presenta un eje con dos rodamientos sumergidos en aceites lubricantes que transmiten el movimiento del motor al impelente a través de una unión.

- Modelo..... ZE 150 – 135
- Capacidad de bombeo..... 340 m<sup>3</sup>/h



- Altura (H)..... 133.2 m
- Ø impelente..... 315 mm
- Velocidad..... 3550 rpm
- Material..... Hastelloy-C276

Tabla 2.1 Características de la red hidráulica

Tramos de tubería	$D_N$ (Pulgada)	Di (m)	sch	$L_{T\ Recta}$ (m)	Accesorios
0-1 Succión	10	0.25	40s	12.2	- 5 Codos RL 90 <sup>0</sup> . - 1 Reducido concéntrico 10x8 pulgadas.
1-2 Descarga	8	0.20	40s	18	- 5 Codos RL 90 <sup>0</sup> . - 1 Válvula automática

El funcionamiento de éste equipo es supervisado constantemente por su régimen de trabajo, así como su sistema de lubricación y de agua de enfriamiento también las vibraciones producto al alineamiento con el motor o de rodamiento y el impelente provocan la parada de éste equipo y con ello el tren.

**2.3.1 Características básicas de licor**

$\rho = 948.15 \text{ kg/m}^3$

$\mu = 2.455 \cdot 10^{-4} \text{ Pas}$

$T = 114 \text{ } ^\circ\text{C}$



2.4 Resultados de las mediciones realizadas

Tomando como base las mediciones realizadas se hicieron los siguientes gráficos los cuales sirvieron de referencia para conocer el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento eléctrico objeto de estudio.(Anexo 1)

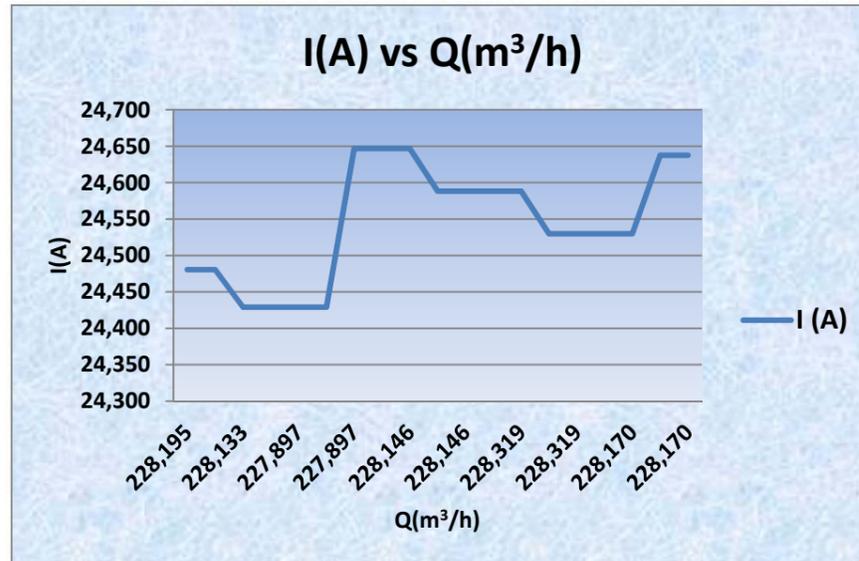


Gráfico 2.6 Comportamiento de la corriente.

El gráfico 2.6 muestra el comportamiento de la corriente, se puede concluir que para esos valores de flujo, casi la mitad de la capacidad de la bomba, la corriente es muy cercana al máximo que esta puede alcanzar.

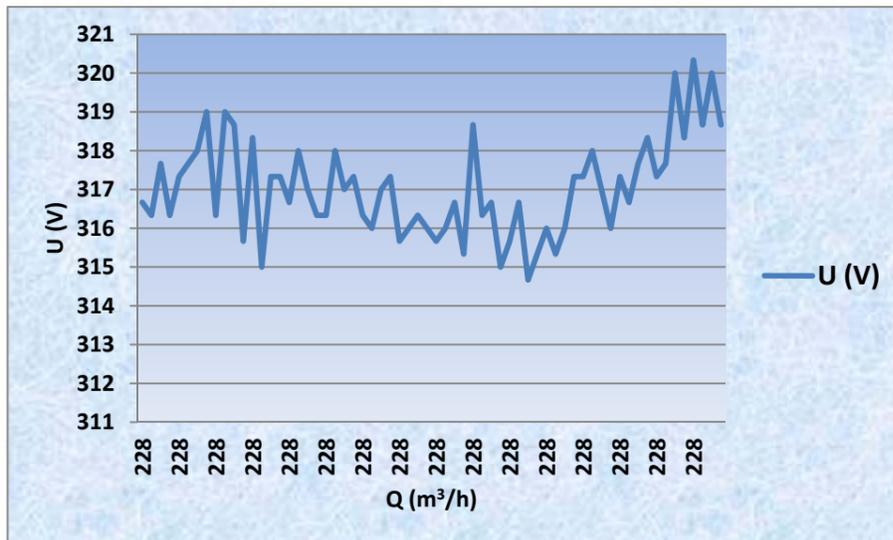


Gráfico 2.7 Comportamiento de la tensión entre fases a la salida del VFD.

En el gráfico 2.7 se puede apreciar la variación de la tensión para valores de caudal casi constantes en un período de tiempo.

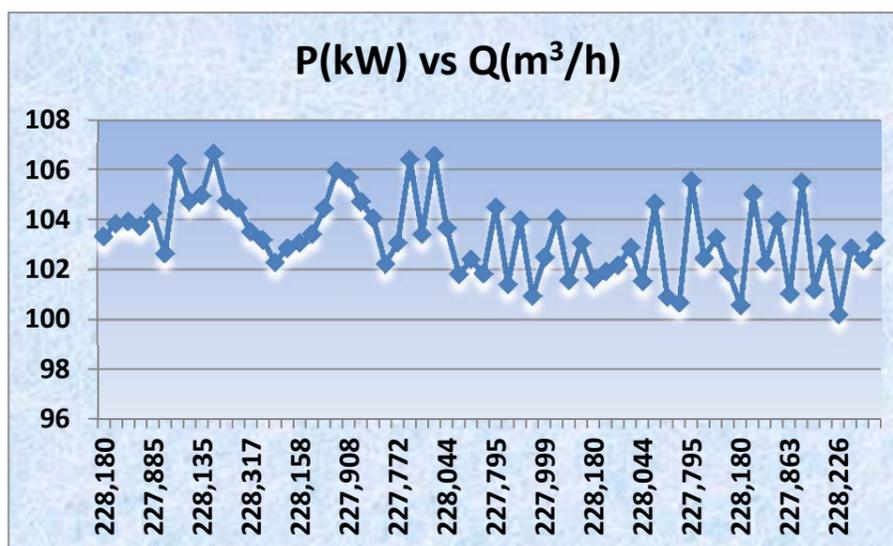


Gráfico 2.8 Comportamiento de la potencia trifásica a la salida del VFD.

En el gráfico 2.8 se aprecia el comportamiento de la potencia para valores de que están a la mitad de la capacidad de bombeo del equipo.

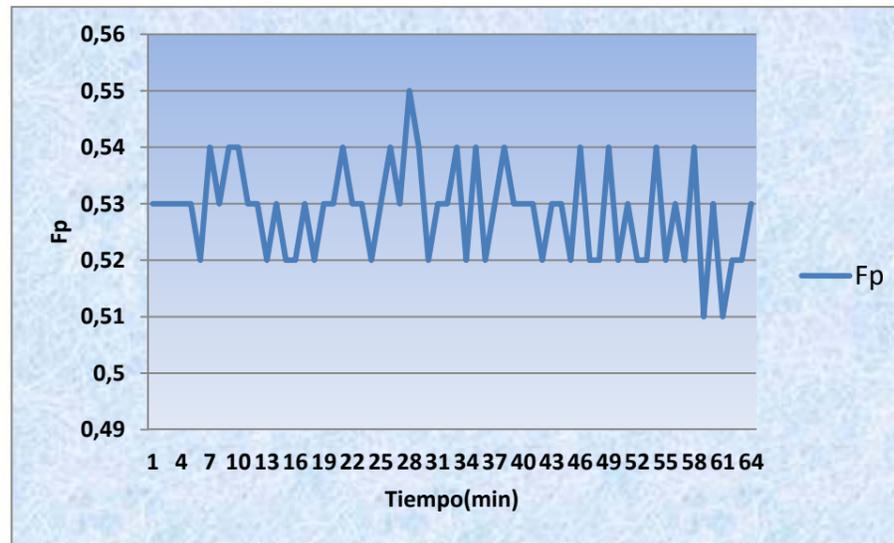


Gráfico 2.9 Comportamiento del Fp a la salida del VFD.

## 2.5 Factores que afectan la eficiencia

Existen condiciones que afectan negativamente la eficiencia del equipo de bombeo, en general corresponde a la fabricación del diseño del equipo. Entre las principales se tienen las siguientes:

- ❖ Pérdidas volumétricas

Estas pérdidas son indicativas de una circulación de flujo del lado de alta presión al de baja presión del impulsor; aunque en general, estas pérdidas son pequeñas, pueden tomar importancia bajo condiciones de desgaste o desajuste de la bomba.

- ❖ Pérdidas hidráulicas

Constituyen la diferencia entre la carga que podría obtenerse de la energía disponible en el impulsor y aquella que realmente se desarrolla; las más importantes son por choque de entrada, generadas por el cambio de dirección del líquido y por fricción del líquido, al fluir.



### ❖ Cavitación

Cavitación: El término cavitación, se refiere a ciertas condiciones dentro de la bomba, cuando debido a una pérdida de presión localizada, el fluido manejado hierve en ese punto, formando burbujas o cavidades llenas de vapor. Esas cavidades desaparecen cuando las burbujas llegan a regiones de la bomba con mayor presión. La cavitación puede ocurrir a lo largo de partes estacionarias de la carcasa o sobre el impulsor. La reducción de la presión absoluta por debajo de la presión del fluido puede ser generalizada en la bomba, o solamente local. Cuando la reducción es generalizada, puede ser resultado de:

- Un incremento en la altura de succión.
- Un decremento en la presión atmosférica.
- Un decremento en la presión absoluta del sistema cuando se está bombeando de un recipiente.

Obstrucciones en la succión que provoca incremento en las pérdidas:

- Un incremento en la temperatura del fluido en la succión.

Cuando la reducción es local:

- Un incremento en la velocidad.
- Al resultado de cambios de velocidad en el flujo, distorsiones en el mismo, cuando hay un cambio repentino en la dirección el flujo.

La cavitación se nota por ruido y vibración, una disminución en la carga y capacidad de la bomba, así como en la eficiencia y produce erosión, en los álabes de los impulsores.

### ❖ Pérdidas mecánicas

Se deben principalmente a la fricción de cojinetes, empaques o sellos y a la fricción del disco generada entre los lados del impulsor y el líquido.

### ❖ Características del líquido

Las condiciones del fluido a manejar, tienen consecuencias sustantivas sobre la operación de las bombas centrífugas. Ya que pueden afectar la construcción del equipo, y por lo tanto, el



rendimiento y la potencia. Entre las más importantes tenemos la corrosión, temperatura a manejar, tamaño de partículas en el líquido y uso al que se destinará, entre otras.

Mientras más desfavorables sean las condiciones, mayores serán las exigencias constructivas en cuanto a materiales, metalurgia, tipo de impulsores, accesorios propios de la bomba, etc.

### ❖ Condiciones de instalación

Existen condiciones de instalación que influyen negativamente en la eficiencia del equipo de bombeo; podemos citar las siguientes:

#### 1. Pérdidas en motor y acoplamiento

Aunque son externas a la bomba, es conveniente saber que estos componentes influyen en la eficiencia global. Es importante aclarar que el montaje apropiado del conjunto bomba-motor es necesario, para asegurar la máxima eficiencia.

#### 2. Pérdidas en la bomba

Las vibraciones, ruido, movimientos y desbalance del equipo tienen consecuencia en la operación hidráulica, ya que se afectan tolerancias y cargas, reduciendo la capacidad real del mismo, requiriendo para ello una mayor potencia y como consecuencia disminuye la eficiencia.

La densidad menor de la mezcla líquido-vapor, provoca una reducción en el volumen real bombeado y por lo tanto la eficiencia disminuye.

Asimismo, se inducen vibraciones y si el fenómeno es severo, puede causar daños internos a otras instalaciones y equipos e incluso el colapso del propio impulsor.

Estas consideraciones son solo algunas de muchas causas de ineficiencia. Asimismo, uno de los parámetros más importantes y que condiciona las eficiencias electromecánicas de los equipos, es el gasto o caudal de operación.

En muchos casos, las eficiencias de los equipos se ven determinadas por los bajos gastos de producción. Se justifica un bajo rendimiento en los equipos, si tomamos en cuenta que los



acuíferos sufren abatimientos y que esto conlleva a que las cámaras de bombeo se reduzcan paulatinamente, provocando con esto bajos caudales de extracción.

Además, el bajo rendimiento de los aprovechamientos puede estar relacionado a la falta de mantenimiento de los equipos, ya que al paso del tiempo, se van generando irregularidades, tales como: incrustaciones en la tubería ranurada, que obstruye la circulación libre del acuífero, reduciendo consecuentemente los gastos de extracción.

Ante estas circunstancias, es evidente la realización de un diagnóstico más detallado que permita llevar a cabo mediciones directamente en todos los aprovechamientos y de esta manera, poder identificar con precisión y total certeza, las causas que ocasiona la baja eficiencia con la que operan actualmente los aprovechamientos.

### 2.6 Factores que incrementan la eficiencia

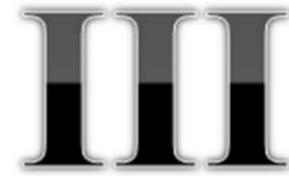
Para mantener, prever o controlar la eficiencia, podemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Selección del equipo de bombeo (motor-bomba) apropiado, teniendo el conocimiento pleno del sistema.
- Acabado de la superficie de los impulsores.
- Selección adecuada de la velocidad específica de succión.
- Control de líquidos viscosos.

### 2.7 Conclusiones del capítulo

- Se realizó una descripción de los métodos y materiales utilizados en la investigación, así como del accionamiento eléctrico de las bombas de licor de Planta de Sulfuros.
- Se caracterizó el consumo la carga instalada en la Planta.
- A través de las mediciones realizadas se analizó el comportamiento de la eficiencia energética en el accionamiento.





#### Introducción

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. Es por esto que es de gran importancia la utilización de un método que nos permita evaluar la eficiencia con que trabajan estos accionamientos eléctricos, para proponer mejoras en su operación.

#### 3.1 Aplicación del método en el accionamiento eléctrico de las bombas de licor de la planta de sulfuros para determinar la eficiencia.

Es importante conocer las condiciones de operación de la bomba para poder establecer las oportunidades de ahorro que puedan aplicarse, como pueden ser:

- Recorte de impulsor de la bomba para mejorar su punto de operación.
- Sustitución por una bomba de mayor eficiencia (o un arreglo de bombas).
- Aplicación de convertidor de frecuencia en el sistema de bombeo.
- Disminución de pérdidas en el sistema de bombeo.
- Instalación de equipos de control.
- Administración del Bombeo y Aprovechamiento de tarifas horarias.
- Eliminar la operación de la bomba con cavitación.



### Operación del Sistema

La operación del sistema queda definida al determinar:

- La curva del sistema.
- El punto o puntos de operación de la bomba.
- La eficiencia de la bomba.
- La potencia al freno o absorbida por la bomba
- El NPSH (carga neta de succión positiva) disponible
- La potencia entregada por el motor
- El consumo de energía
- Los costos de operación

Una vez bien establecidos estos parámetros se podrán definir las oportunidades de ahorro que son susceptibles de aplicar.

### Procedimiento

1. Obtener la Curva Característica de la Bomba.

Las curvas características de la bomba son similares de un fabricante a otro, todas presentan información semejante, en general incluyen:

- a. La curva de carga – gasto. Trazada para diferente diámetro de impulsor y a velocidad constante.
- b. La curva de NPSH – gasto.
- c. La curva de eficiencia – gasto. O curvas de isoeficiencia.
- d. La curva de potencia – gasto.

En caso de que la base de datos no incluya la bomba que se desea evaluar, se podrán utilizar curvas de referencia por tamaño de bomba





### 2. Construir la curva del sistema.

La curva del sistema queda definida por la carga estática total y las pérdidas de presión en el sistema de bombeo.

- a. Cálculo de la carga estática total. (Ec.1.1)
- b. Cálculo de las pérdidas de presión en la red de tuberías.

Las pérdidas de presión en succión y descarga pueden determinarse por:

#### A. Método de estimación de pérdidas mediante uso de manómetros

Una forma práctica de estimar las pérdidas es a través de mediciones en campo, instalando manómetros por ejemplo:

- En la descarga de la bomba (inmediatamente después de la brida) y al final de la línea de suministro
- Antes y después de un equipo o accesorio

#### B. Método de cálculo mediante el conocimiento completo de la instalación bombeo

Las pérdidas de carga se originan por la fricción del fluido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes como pueden ser intercambiadores de calor. Estas pérdidas varían proporcionalmente con el cuadrado del flujo del sistema. También varían de acuerdo con el tamaño, tipo y condiciones de las superficies de tubos y accesorios y las características del líquido bombeado.

(Ecu 1.2, 1.3 y 1. 4)

En el cálculo de las pérdidas en tuberías se consideran todas las características del sistema de bombeo:

- Gasto o gastos de operación
- Características del fluido
- Características de tuberías y accesorios



Tabla 3.1 Resultados del cálculo de las pérdidas de presión en el sistema de bombeo

Q (m <sup>3</sup> /s)	v s (m/s)	v d(m/s)	Re succ	Re desc	λ succ	λ desc	R succ	R desc	R total	H (m)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	636,29	2766,84	3403,13	91,88
0,03	0,88	1,57	68331,88	91109,18	0,04	0,04	638,41	2718,77	3357,17	94,47
0,06	1,77	3,15	136663,77	182218,36	0,04	0,03	617,40	2578,77	3196,16	101,75
0,08	2,65	4,72	204995,65	273327,54	0,03	0,03	606,14	2503,79	3109,93	113,48
0,11	3,54	6,29	273327,54	364436,72	0,03	0,03	598,59	2453,47	3052,06	129,56
0,14	4,42	7,86	341659,42	455545,90	0,03	0,03	592,97	2416,00	3008,96	149,93
0,17	5,31	9,44	409991,31	546655,08	0,03	0,03	588,52	2386,36	2974,88	174,52
0,19	6,19	11,01	478323,19	637764,26	0,03	0,03	584,86	2361,97	2946,83	203,30

3. Determinar el punto o puntos de operación de la bomba.

En la intersección de la curva de la bomba correspondiente al diámetro de operación y la del sistema se obtiene el punto de operación real. Al trazar una línea horizontal y otra vertical que pase por este punto pueden obtenerse los valores de carga, gasto, eficiencia, y potencia. Cuando se presentan diferentes condiciones de operación, deben obtenerse los diferentes puntos de operación de la bomba. Con los datos obtenidos e información técnica del fabricante se obtuvo la curva característica de la bomba, que es la que relaciona las variables que intervienen en el funcionamiento de la misma. A partir de la curva característica, con la caracterización de la red hidráulica y las mediciones obtenidas del Citect, se creó la curva de trabajo de la bomba.

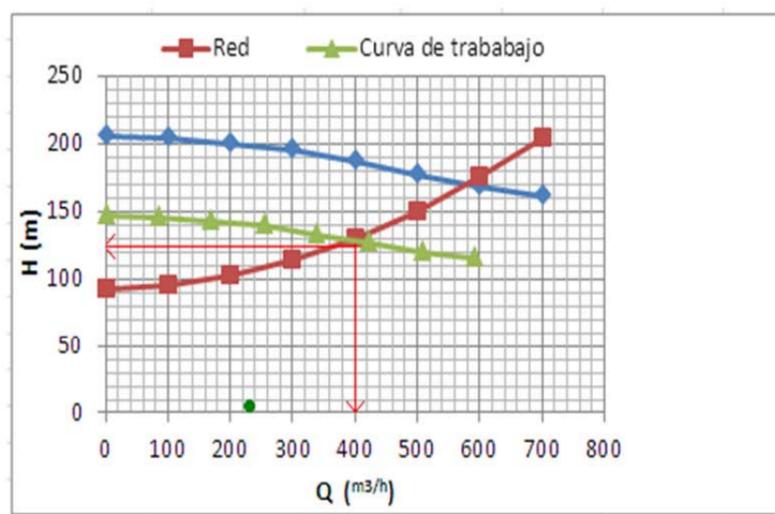


Figura 3.2 Curva del sistema y punto de operación de la bomba.



Con la realización de la curva de trabajo de la bomba, se obtuvo que el equipo para un caudal (Q) de 400m<sup>3</sup>/h, altura (H) de presión de 130m, el rendimiento de la bomba es de un 76%.

Conociendo los datos de caudal, altura y el peso específico del fluido se puede determinar la potencia hidráulica (Ecu 1.9) agregada por la bomba al fluido, si además tenemos la curva de isoeficiencia, podemos determinar el rendimiento de la bomba. Con el rendimiento de la bomba y la potencia hidráulica se podrá obtener la potencia de entrada a la bomba que va a ser igual a la potencia de salida del motor. Teniendo también la potencia que demanda el motor, en este caso medida a la salida del variador de velocidad, se determina el rendimiento del motor y de esta forma al multiplicar el rendimiento de la bomba con el rendimiento del motor obtendremos la eficiencia del sistema.

Tabla 3.2 Rendimiento de la bomba (PU-4)

Rendimiento	Q (m <sup>3</sup> /h)
0	0
40	100
55	200
70	300
78	400
83	500
80	600
75	700

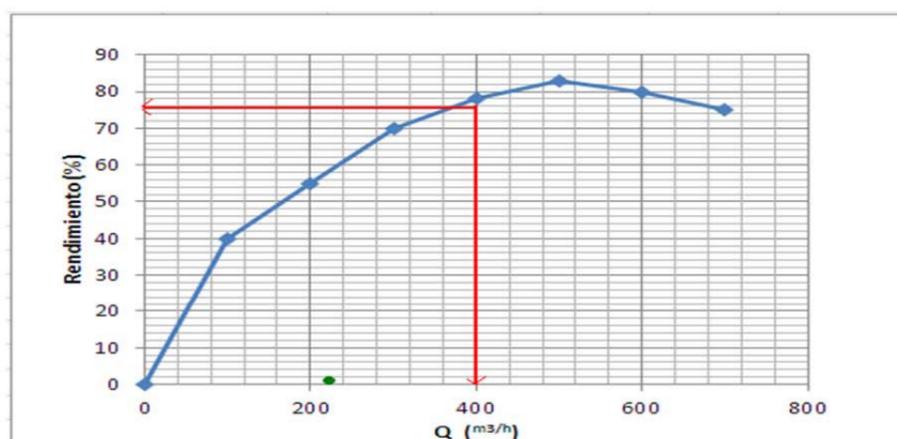


Figura 3.2 Curva de rendimiento de la bomba



Para el punto de trabajo de 400 m<sup>3</sup>/h se muestra que el NPSHd es menor que el NPSHr con el valor de -1.26 m siendo el requerido 7 m por lo se demuestra que el sistema se encuentra operando en cavitación.

Debido a esto el caudal y la presión de descarga caen hasta valores donde se favorece el proceso de flujo, para este caso se comprueba que el de operación es de 228.5 m<sup>3</sup>/h. Se evidencia que existe una pérdida de caudal de un 57%.

Este fenómeno físico tiene lugar pues la presión del líquido en movimiento alcanza valores inferiores a las de la presión de saturación correspondientes a su temperatura.

Esto da lugar a la autoevaporización de parte del líquido, que en forma de burbujas es arrastrado por la corriente.

Posteriormente, estas burbujas llegan a una zona de mayor presión, entran en un estado de desequilibrio con el medio que las rodea, produciéndose el colapso de las mismas debido a la condensación del vapor.

**Tabla 3.3 Resultados de las cargas netas positivas calculadas**

NPSHd	NPSHr
6,13	7
5,64	7
4,22	7
1,92	6,5
-1,26	7
-5,31	8
-10,22	8,5
-15,98	9,6



Para estas condiciones de trabajo ( $Q=400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=130 \text{ m}$ ,  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho=948.15 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta=76\%$ ) de la bomba se obtuvo que la potencia hidráulica de la bomba es de  $Ph=134.2 \text{ kW}$

Tabla 3.4 Potencia hidráulica

Ph (W)	Ph (kW)
0,00	0,00
24408,91	24,41
52576,75	52,58
87958,79	87,96
133899,86	133,90
193681,60	193,68
270541,42	270,54
367682,99	367,68

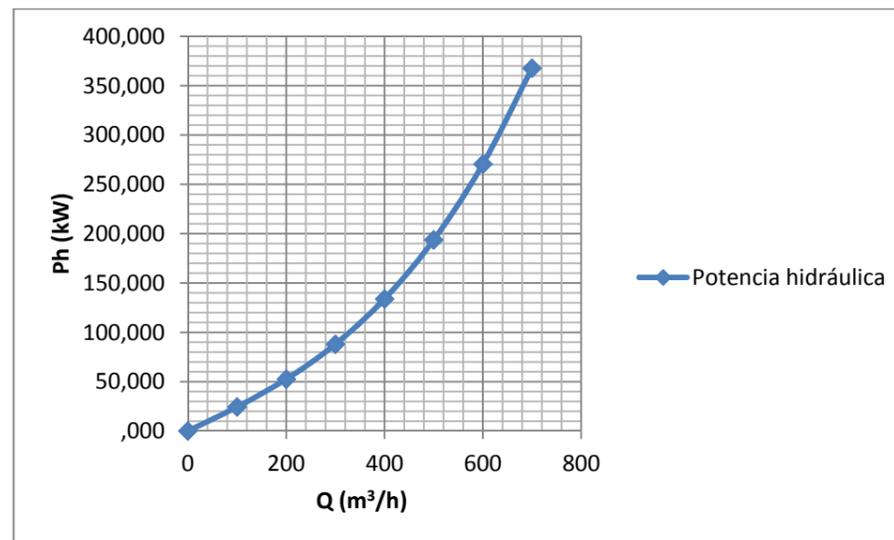


Figura 3.3 Potencia hidráulica de la bomba

La potencia de salida del motor es de  $173.9 \text{ kW}$ , la de entrada es de  $181.2 \text{ kW}$  con una eficiencia de un  $96\%$ . De esto obtenemos que la eficiencia del sistema es de un  $73\%$ , producto del rendimiento de bomba con el rendimiento de motor.



Tabla 3.5 Potencia del motor obtenida

P mot (kW)	Q m <sup>3</sup> /s
0,00	0,00
60,29	84,48
120,58	168,96
180,87	253,44
241,16	337,92
301,45	422,39
	506,87
	591,35

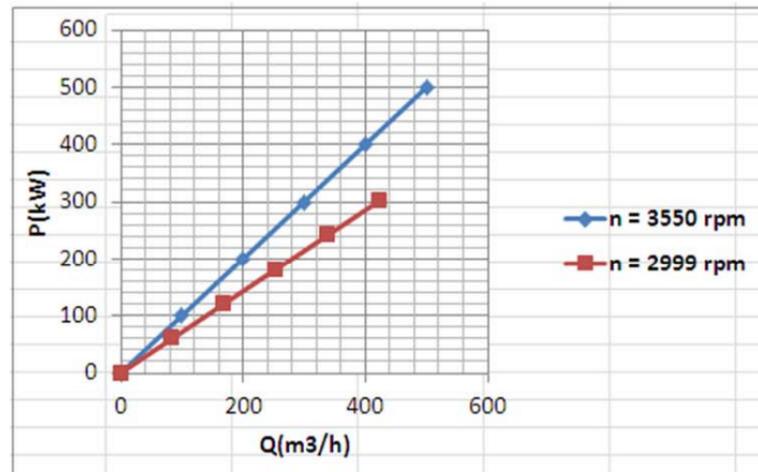


Figura 3.4 Potencia del motor para la velocidad de trabajo.

Debido al fenómeno de la cavitación las condiciones reales de trabajo, no son las obtenidas a través de la curva, sino que la bomba está trabajando a la mitad de su capacidad, pues las burbujas ocupan un volumen que reduce el espacio disponible para el líquido y esto disminuye la capacidad de bombeo.

Con un caudal (Q) de 228.5 m<sup>3</sup>/h (dato obtenido del Citect), presión de descarga (H) de 100 m. La potencia hidráulica de la bomba es de Ph=58.6 kW, un rendimiento de 59%, La potencia de salida del motor es de 99.3 kW, potencia de entrada es de 103.3 kW y una eficiencia de un 96%. De esto obtenemos que la eficiencia del sistema es de un 56.6%.



### 3.2 Valoración técnica del trabajo

En las plantas minero metalúrgicas como las de Moa, se precisan que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas centrífugas, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

Los accionamientos de bombas centrífugas están entre los accionamientos más empleados en el proceso de obtención de níquel ya sea por tecnología Carbonato amoniacal o por Lixiviación Ácida; los cuales se caracterizan por una dependencia entre la carga de presión y el caudal, que corresponde a una potencia y una eficiencia dada en su punto de operación, donde se interceptan con la característica de la red hidráulica y que determina el punto de trabajo del motor de inducción con un deslizamiento dado.

Por la exigencia del proceso tecnológico, frecuentemente se hace necesario variar el caudal, lo que en la mayoría de los casos, se realiza estrangulando la tubería de impulsión y con esto aumenta la resistencia de la red y disminuye el rendimiento de la instalación. El caudal disminuye y la carga de presión aumenta, pero parte de esta energía se pierde en la válvula de impulsión. Si el número de revoluciones de la turbo-máquina se disminuye de tal manera que pase por el punto de funcionamiento necesario, el rendimiento se mantiene aproximadamente constante y la instalación se regula sin pérdidas adicionales; llevar el número de revoluciones al necesario se puede conseguir con un variador de velocidad adecuadamente seleccionado.

#### 3.2.1 Efectos de la cavitación.

Este fenómeno característico en las bombas que trabajan con líquidos calientes afecta el trabajo de la bomba, modificándose sus características de funcionamiento, estos efectos se pueden transmitir a las demás partes del equipo de bombeo reduciendo la eficiencia y pudiendo causar serios daños como la corrosión de partículas de metal (pitting).

Cuando las burbujas de vapor se implotan se produce una especie de martilleo lo que produce un deterioro en las paredes de la carcasa, de las palas del impulsor el cual el daño está en función de la proximidad en que se encuentran estas implosiones.



Los efectos que tiene sobre la maquinaria de bombeo son:

Efecto Mecánico: Con las implosiones se decrecen los diámetros de las burbujas, las partículas en estado líquido se aceleran y se desplazan hacia el centro de estas burbujas chocando entre sí, estos choques provocan sobrepresiones (golpe de ariete) que se propagan en todas las direcciones afectando principalmente a las ranuras de las superficies metálicas por lo que en muy poco tiempo pueden ocasionar daños a la estructura de la máquina (rotor).

Los golpeteos los cuales al ser muy fuertes dan la impresión que la bomba acarrea grava causan un desequilibrio en la máquina dañando las uniones de los tubos con esta, así como aflojan las partes que la sostienen. Además los martilleos en ocasiones son tan fuertes que producen ruidos los cuales pueden ser molestos durante la operación de la bomba.

Y el problema y quizás el más importante es el de la reducción de la eficiencia de la bomba y con esta la del accionamiento eléctrico.

Efecto químico: Con la implotación de las burbujas se liberan iones de oxígeno que atacan las superficies de los metales.

Reducción de la capacidad de bombeo: Las burbujas ocupan un volumen que reduce el espacio disponible para el líquido y esto disminuye la capacidad de bombeo. Por ejemplo, cuando el agua pasa del estado líquido al de vapor su volumen aumenta en aproximadamente 1700 veces. Si la generación de burbujas en el ojo del impulsor es suficientemente grande, la bomba se puede 'ahogar' y quedar sin nada de succión con una reducción total del flujo. La formación y colapso de las burbujas es desigual y disparejo, esto genera fluctuaciones en el flujo y el bombeo se produce en chorros intermitentes. Este síntoma es común a todos los tipos de cavitación.

Disminución en la generación de cabeza: A diferencia de los líquidos, las burbujas son compresibles. La cabeza desarrollada por la bomba disminuye drásticamente debido a que se gasta energía en aumentar la velocidad del líquido empleado en llenar las cavidades que dejan las burbujas colapsadas. Lo mismo que la reducción en capacidad, este síntoma es común a todos los tipos de cavitación.



Por lo tanto, el efecto hidráulico de la cavitación en una bomba es que su funcionamiento cae fuera de la curva de desempeño esperada, produciendo una cabeza y flujo más bajo que el correspondiente a su condición normal de operación

Vibración y Ruido anormal: El desplazamiento de las burbujas a muy alta velocidad desde el área de baja presión hacia una zona de alta presión y el subsiguiente colapso crea ondas de choque que producen ruidos y vibraciones anormales. Se estima que durante el colapso de las burbujas se desarrollan ondas de choque con presiones del orden de  $10^4$  atmósferas. El sonido de la cavitación puede describirse como algo similar a pequeñas partículas duras chocando o rebotando rápidamente en el interior de una bomba o válvula. Se usan varios términos para describirlo; traqueteo, golpeteo, crepitación, etc.

El ruido de una bomba cavitando va desde el golpeteo grave y uniforme (como sobre una puerta) hasta una crepitación aguda y errática (similar a un impacto metálico). El ruido de cavitación puede confundirse fácilmente con el de un rodamiento en mal estado. Para distinguir si el ruido es debido a un rodamiento o a cavitación basta con operar la bomba sin flujo, si el ruido desaparece quiere decir que existe cavitación. La vibración se debe al efecto de cargas dispares actuando sobre el impulsor y que son generadas por una mezcla no uniforme de líquido y vapor, así como por las ondas de choque por el colapso de las burbujas. En los manuales existe muy poco acuerdo sobre las características de la vibración primaria asociada con la cavitación en las bombas centrifugas. La formación y colapso de las burbujas se alternará periódicamente con la frecuencia resultante de la velocidad y número de alabes. Algunos sugieren que la vibración asociada con la cavitación produce un pico de banda ancha a frecuencias sobre 2000 Hertz.

Otros sugieren que la cavitación sigue la frecuencia de paso del alabe (número de alabes por la frecuencia de la velocidad de rotación). Otros indican que afecta a la amplitud de la vibración pico. Todas estas indicaciones pueden ser correctas, ya que la cavitación en la bomba puede producir varias frecuencias de vibración dependiendo del tipo de cavitación, diseño de la bomba, instalación y aplicación. La vibración excesiva por cavitación comúnmente produce fallas en los sellos y/o rodamientos. Este es el modo de falla más probable en una bomba cavitando.



### **3.2.2 Métodos para eliminar o reducir la cavitación.**

Reduciendo la presión de vapor o aumentando la presión exterior sobre el líquido. La Presión de Vapor se reduce disminuyendo la temperatura del líquido.

En el punto de menor presión dentro de la bomba las burbujas se producen cuando el NPSHd es igual o inferior al NPSHr. ( $NPSH_d = NPSH_r$ ).

El NPSHd se puede aumentar actuando sobre la longitud de la tubería en la succión que podría ser mucho menor.

El NPSHr lo entrega el fabricante y es característico de cada bomba. Generalmente disminuye con el caudal por lo que la cavitación se podría combatir reduciendo el caudal de bombeo.

La reducción de caudal generalmente aumenta el NPSHd y reduce el NPSHr. Si no se puede reducir el caudal ni mejorar el NPSHd, se tendría que sustituir la bomba por otra (apta para la aplicación) de mejor NPSHr.

El nivel de succión es crítico para obtener una relación NPSHd/NPSHr adecuada. Un rango de 0.5 m o menos puede hacer la diferencia entre cavitación o no.

### **3.3 Determinación del consumo de energía y los costos de operación del sistema de bombeo .**

La producción de níquel por el proceso de lixiviación ácida constituye uno de los métodos de mayor consumo energético en la industria nacional.

En las plantas minero metalúrgicas como la de Moa, se precisa que los mayores consumidores de energía eléctrica lo representan los accionamientos eléctricos de: producción de aire comprimido, las bombas de transporte laterítico, las instalaciones de molienda y secado y los ventiladores.

Es por esto que todo lo que se haga para mejorar eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba.

También podemos decir que con el aumento de las pérdidas no sólo disminuye el rendimiento sino también empeora el factor de potencia del motor eléctrico.

La energía consumida para las condiciones en que debería trabajar el accionamiento se puede estimar con la siguiente expresión (3.1)



- Consumo de energía. El consumo de energía se determina con la potencia que demanda el conjunto motor - bomba (kW) y el tiempo de operación del mismo (horas al año).

Consumo (kWh)= (Potencia medida)\*(horas de operación); para un caudal de 400 m<sup>3</sup>/h. (Ecu 3.1)

Potencia requerida (kW)=181.2.kW, horas de operación=8040

Consumo (kWh)= (181.2 kW)\*(8040 h)=1 456 848 kWh

- El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación (3.2) (Laurencio 2012):

$$C_{\text{bom}} = \frac{t_{el} \times t_t}{\eta_m \times \eta_b \times L} \times P_H \times 10^{-3} \quad (\text{Ecu 3.2})$$

Dónde:

$C_{\text{bom}}$ : Costo de bombeo de la instalación; (CUC/año).

$P_H$ : Potencia hidráulica, (W).

$t_{el}$ : Tarifa eléctrica, (CUC/ kWh).

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

$\eta_b$ : Rendimiento de la bomba, (adim).

$\eta_m$ : Rendimiento del motor eléctrico, (adim).

L: Longitud total de la tubería (m)

$C_{\text{bom}}=12\ 241.72$  CUC/año

- La energía consumida para las condiciones de trabajo actual del accionamiento se puede estimar con la expresión (3.1)



Consumo (kWh)= (Potencia medida)\*(horas de operación); para un caudal de 228.5 m<sup>3</sup>/h.

Potencia requerida (kW)=103.3 kW, horas de operación=8040

Consumo (kWh)= (103.3 kW)\*(8040 h)=830 532 kWh

Como la bomba está operando en régimen cavitacional el consumo real sería:

Consumo real (kWh)= Consumo (kWh)\* tiempo que demora en llegar al caudal deseado (h).

Consumo real (kWh)=1 661 064 kWh

- Costo de bombeo en que se incurre

$$C_{\text{bom}} = 1\,002.03 \text{ CUC/año}$$

$$C_{\text{bom real}} = C_{\text{bom}} * 2$$

$$C_{\text{bom real}} = 2\,004.06 \text{ CUC/año}$$

- Costo de operación del sistema para 400 m<sup>3</sup>/h

$$\text{Costo por consumo} = (\text{kW en consumo}) * (\text{CUC/kW}) * (12 \text{ meses/año})$$

$$\text{Costo por consumo} = 181.2 \text{ kW} * 0.25 \text{ CUC/kWh} * 8\,040 \text{ h}$$

$$\text{Costo por consumo} = 364\,212 \text{ CUC.}$$

Considerando que en la planta existen tres accionamientos de este tipo, para las condiciones en que podría estar trabajando, el gasto por este concepto es de 1 092 636 CUC.

- Costo de operación del sistema para 228.5 m<sup>3</sup>/h

$$\text{Costo por consumo} = (\text{kW en consumo}) * (\text{CUC/kW}) * (12 \text{ meses/año})$$

$$\text{Costo por consumo} = 103.3 \text{ kW} * 0.25 \text{ CUC/kWh} * 8040 \text{ h}$$



Costo por consumo = 207 633 CUC.

Costo por consumo real = Costo por consumo \* 2

Costo por consumo real = 415 266 CUC

Si este valor le sumamos el costo por mantenimiento de las bombas ya que estas al estar trabajando en cavitación sufren un gran desgaste serían 465 427 CUC. (Anexo 2)

Considerando que en la planta existen tres accionamientos más de este tipo el gasto por este concepto es de 1 396 281 CUC.

La energía que se está perdiendo por causa del régimen cavitacional es de aproximadamente

204 216 kWh por cada accionamiento, al año. Además las pérdidas por costo de operación del sistema son de 753 162 CUC.

### 3.4 Conclusiones del capítulo .

- En este capítulo se aplicó el método explicado, para determinar la eficiencia del sistema de bombeo estudiado y se analizaron los resultados obtenidos.
- Se realizó una valoración técnica a partir de los efectos sobre el accionamiento de la cavitación.
- Además se determinó la pérdida de energía por esta condición, que es de 204 216 kWh; así como los gastos operacionales que esto trae consigo que son de 753 162 CUC. De eliminarse la cavitación estas cifras constituirían un ahorro para la empresa.



### CONCLUSIONES GENERALES

La realización del análisis de la eficiencia energética en los accionamientos de las bombas de licor de Sulfuros deviene en resultados que pueden concluirse de la siguiente forma:

1. Para un rendimiento del sistema de un 73% obtenido a través de la curva de trabajo de la bomba con un caudal de 400 m<sup>3</sup>/h, que es la circunstancia en que debe estar operando este, se determinó que el consumo de energía de cada accionamiento es de 1 456 848 kWh al año, el costo de bombeo de 12 241.71 CUC/año.
2. En estas condiciones de trabajo se obtuvo que el costo de operación del sistema por cada accionamiento es de 364 212 CUC, considerando que en la planta existen 3 accionamientos más de este tipo, el gasto de operación por este concepto sería de 1 092 636 CUC.
3. Para un rendimiento del sistema de un 56,6%, condiciones reales de operación por el régimen cavitacional, con un caudal de 220.5 m<sup>3</sup>/h se determinó que el consumo de energía real es de 1 661 064 kWh al año de cada accionamiento.
4. En estas condiciones de trabajo se obtuvo que el costo de operación del sistema por cada accionamiento es de 465 427 CUC, considerando que en la planta existen 3 accionamientos más de este tipo, el gasto de operación por este concepto sería de 1 396 281 CUC.
5. Si se eliminara el fenómeno de la cavitación, tan perjudicial para el accionamiento, se ahorraría por cada accionamiento 204 216 kWh y por concepto de costo de operación 303 645 CUC anual.



### RECOMENDACIONES

- Profundizar en el estudio de la eficiencia energética del motor eléctrico donde se involucre la eficiencia de los dispositivos asociados a su desempeño, y se analice el conjunto como un sistema, y no como elementos independientes.
- Mejorar el método aplicado para lograr más exactitud en los resultados obtenidos.
- Valorar la posibilidad de incorporar al sistema SCADA Citect variables que indiquen el comportamiento de la eficiencia del accionamiento eléctrico.



### BIBLIOGRAFÍA

1. Abrahamsen, Flemming, Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, 216 p. Aalborg. Institute for Energiteknik, Aalborg University, 2000.
2. Agamloh, E. B. (2009). The repeatability of IEEE standard 112B induction motor efficiency tests. Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. (págs. 1119 - 1126). Miami, USA: IEEE International.
3. AIE. (2010). Perspectivas sobre tecnología energética 2010\_IEA, escenarios y estrategias hasta el año 2050. Resumen ejecutivo. París, Francia: OCDE/AIE.
4. Alexander Kusko, Donald Galler Journal: IEEE Transactions on Industry Applications - IEEE TRANS IND APPL , vol. IA-19, no. 4, pp. 561-570, 1983.
5. Atkinson, S. Petreanu, C. J. Tennant, and P. Famouri, "Modeling and development of a linear engine," in Proc. 1998 Spring Tech. Conf. ASME.
6. Brunner, C. U. (2009). Global Motor Systems Network: The International Energy Agency 4E EMSA Project. En P. B. ATANASIU (Ed.), Proceedings of the 6° International Conference Emods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems. Nantes, FRANCE: European Commission.
7. Brunner, C. U. (2012). Efficient Electric Motor Systems. Stockholm, Swedish: EMSA.
8. CE. (22 de julio de 2009). Reglamento (CE) 640/2009. Requisito de diseño ecológico de motores eléctricos. Por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico para los motores eléctricos. CE, Comunidad Europea, 23.7.2009: Diario Oficial de la Unión Europea.
9. Clement Johnson, Propuesta de Sistema de Suministro Para La Instalación de Bombeo de Pulpa Laterita a escala Semi-industria en el ISMM. Tesis en Opción al Título de Ingeniero Eléctrico. Junio 2007.
10. Domenech, L. D. (2009). Eficiencia energética en accionamientos. Normativa, claves y herramientas de cálculo. Galicia: Siemens.
11. ENTE, S.C. (2010). 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.



12. Guzmán, O. (2009). Eficiencia energética. Un panorama regional. Buenos Aires, Argentina: Nueva Sociedad.
13. Heung G. Kim, Seung K. Sul, Min H. Park Journal: IEEE Transactions on Industry Applications - IEEE TRANS IND APPL , vol. IA-20, no. 6, pp. 1453-1459, 1984.
14. Horta, L. (2010). Indicadores de políticas públicas en materia de eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile: CEPAL/GTZ.
15. Horta, L. (2011). Elementos-Clave de una política eficaz en eficiencia energética. II Dialogo Político sobre Eficiencia Energética. Santo Domingo.
16. Lutz, W. F. (2011). Programas de Normas y Etiquetado de Eficiencia Energética de Artefactos y Equipos en Latinoamérica y el Caribe. ¿Armonización, Convergencia o Alineación? III Seminario Latinoamericano y del Caribe de Eficiencia Energética, Ciudad de Panamá.
17. R Ortega, CC Wit, SI Seleme Jr, Nonlinear Control of Induction Motors: The Torque Tracking with Unknown Load Disturbance, p206-210, American Control Conference, 2000.
18. Shankar Sastry and Marc Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness, 256p. Prentice-Hall Advanced Reference Series, Prentice-Hall, 1989-1994 (ISBN 0-13-004326-5).



### Sitios de Internet.

1. [http// Edición 19\\* Revista Energía](#)
2. <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/>
3. <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/>
4. [http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_\(hidráulica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_(hidráulica))
5. <http://support.automationdirect.com/technotes.html>
6. <http://www.automatas.org>
7. <http://www.easydeltav.com/>
8. <http://www.icdindustrial.com/>
9. <http://www.infolinks.com/>
10. <http://www.plcs.net>
11. <http://www.siemens.com>
12. <http://www.yaskawa.com>



Anexo 1: Mediciones realizadas en la salida del VFD.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1				Mediciones tomadas con la PQM					
2									
3	Voltaje: Van	Voltaje: Vbn	Voltaje: Vcn	Power: P3	Frequency	Corriente: Ia	Corriente: Ib	Corriente: Ic	Total
4	(V)	(V)	(V)	(kW)	(Hz)	(A)	(A)	(A)	(A)
5	315	318	317	103.33	48.79	209	206	202	205,6667
6	315	313	321	103.84	49.06	209	206	202	205,6667
7	318	319	316	103.93	49.23	208	204	201	204,3333
8	315	316	318	103.76	48.81	211	206	201	206
9	315	320	317	104.29	49.20	209	206	203	206
10	319	319	315	102.65	49.14	209	206	203	206
11	320	315	319	106.26	49.15	208	206	202	205,3333
12	321	318	318	104.73	49.05	209	206	203	206
13	315	318	316	104.98	49.33	209	204	201	204,6667
14	323	317	317	106.64	49.16	212	206	205	207,6667
15	320	316	320	104.75	49.23	210	207	205	207,3333
16	313	318	316	104.46	49.24	208	207	202	205,6667
17	318	319	318	103.51	49.34	211	208	204	207,6667
18	317	314	314	103.20	49.31	208	206	201	205
19	318	317	317	102.30	49.02	209	206	203	206
20	315	318	319	102.87	49.25	210	206	204	206,6667
21	319	315	316	103.09	49.08	209	205	201	205
22	321	316	317	103.43	49.32	211	206	203	206,6667
23	316	318	317	104.45	49.32	211	208	205	208
24	314	317	318	105.95	49.19	213	207	205	208,3333
25	316	318	315	105.68	49.25	210	207	203	206,6667



**Mediciones tomadas en el Citect**

Presión Auto4 (PSI)	Caudal en gpm	Caudal en m <sup>3</sup> /s	Caudal en l/min	Caudal en m <sup>3</sup> /h
134,99374	1005,26563	0,075394922	3805,332516	271,4217201
134,99374	1004,99219	0,075374414	3804,297436	271,3478913
134,97501	1004,99219	0,075374414	3804,297436	271,3478913
134,97501	1004,99219	0,075374414	3804,297436	271,3478913
134,97501	1003,95313	0,075296485	3800,364178	271,0673451
134,97501	1003,95313	0,075296485	3800,364178	271,0673451
134,94376	1003,95313	0,075296485	3800,364178	271,0673451
134,94376	1003,95313	0,075296485	3800,364178	271,0673451
134,94376	1005,04688	0,075378516	3804,50446	271,3626576
134,94376	1005,04688	0,075378516	3804,50446	271,3626576
134,94376	1005,04688	0,075378516	3804,50446	271,3626576
134,94376	1005,04688	0,075378516	3804,50446	271,3626576
134,94376	1005,8125	0,075435938	3807,402638	271,569375
135,02499	1005,8125	0,075435938	3807,402638	271,569375
135,02499	1005,8125	0,075435938	3807,402638	271,569375
135,02499	1005,15625	0,075386719	3804,918469	271,3921875
135,02499	1005,15625	0,075386719	3804,918469	271,3921875
135,1375	1005,15625	0,075386719	3804,918469	271,3921875
135,1375	1005,15625	0,075386719	3804,918469	271,3921875
135,1375	1004,77344	0,075358008	3803,46938	271,2888288
135,1375	1004,77344	0,075358008	3803,46938	271,2888288
135,2375	1004,77344	0,075358008	3803,46938	271,2888288
135,2375	1004,77344	0,075358008	3803,46938	271,2888288
135,2375	1003,46094	0,075259571	3798,501042	270,9344538



## Mediciones de corriente tomadas de Citect

DATE	TIME	I (A) aut4
20/05/2014	11:18:28 AM	24,48047
20/05/2014	11:18:30 AM	24,48047
20/05/2014	11:18:33 AM	24,42891
20/05/2014	11:18:36 AM	24,42891
20/05/2014	11:18:38 AM	24,42891
20/05/2014	11:18:41 AM	24,42891
20/05/2014	11:18:44 AM	24,64688
20/05/2014	11:18:47 AM	24,64688
20/05/2014	11:18:49 AM	24,64688
20/05/2014	11:18:52 AM	24,58828
20/05/2014	11:18:55 AM	24,58828
20/05/2014	11:18:58 AM	24,58828
20/05/2014	11:19:00 AM	24,58828
20/05/2014	11:19:03 AM	24,52969
20/05/2014	11:19:06 AM	24,52969
20/05/2014	11:19:09 AM	24,52969
20/05/2014	11:19:11 AM	24,52969
20/05/2014	11:19:14 AM	24,6375
20/05/2014	11:19:17 AM	24,6375
20/05/2014	11:19:19 AM	24,6375
20/05/2014	11:19:22 AM	24,59766
20/05/2014	11:19:25 AM	24,59766
20/05/2014	11:19:28 AM	24,59766

## Propiedades físicas del agua

Temperatura T (°C)	Densidad ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo elasticidad K·10 <sup>-9</sup> (N/m <sup>2</sup> )	Viscosidad dinámica μ·10 <sup>3</sup> (N·s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática ν·10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial σ (N/m)	Presión de vapor P <sub>s</sub> kPa
0	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0756	0,61
5	1000,0	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	999,7	2,10	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	999,1	2,15	1,139	1,140	0,0735	1,70
20	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	997,0	2,22	0,890	0,893	0,0720	3,17
30	995,7	2,25	0,798	0,800	0,0712	4,24
40	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	988,0	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33
60	983,2	2,28	0,466	0,474	0,0662	19,92
70	977,8	2,25	0,404	0,413	0,0644	31,16
80	971,8	2,20	0,354	0,364	0,0626	47,34
90	965,3	2,14	0,315	0,326	0,0608	70,10
100	958,4	2,07	0,282	0,294	0,0589	101,33



## Anexo 2: Análisis económico hecho por la subdirección

Item No.	Qty	U/M	Description	Price	Total	Delivery
1	3	ea	Impeller, Titanium G2, Position 7	\$15,998.00	\$47,994.00	9 weeks
2	4	ea	Impeller Nut, Position 8	\$353.20	\$1,412.80	3 weeks
3	4	ea	Bearing housing, cast iron/epoxy coated, Position 2	\$2,850.00	\$11,400.00	9 weeks
4	4	ea	Shaft c/w lock nut and washer, Position 5	\$5,670.00	\$22,680.00	4 weeks
5	4	ea	Cooling jacket, Position 12	\$3,200.00	\$12,800.00	8 weeks
6	4	ea	Shaft sleeve, Hastelloy C, Position 22	\$8,800.00	\$35,200.00	9 weeks
7	4	ea	Mechanical seal, Position 25	\$12,290.00	\$49,160.00	8 weeks
Total					\$83,486.80	

## Lista de piezas establecido en el inventario

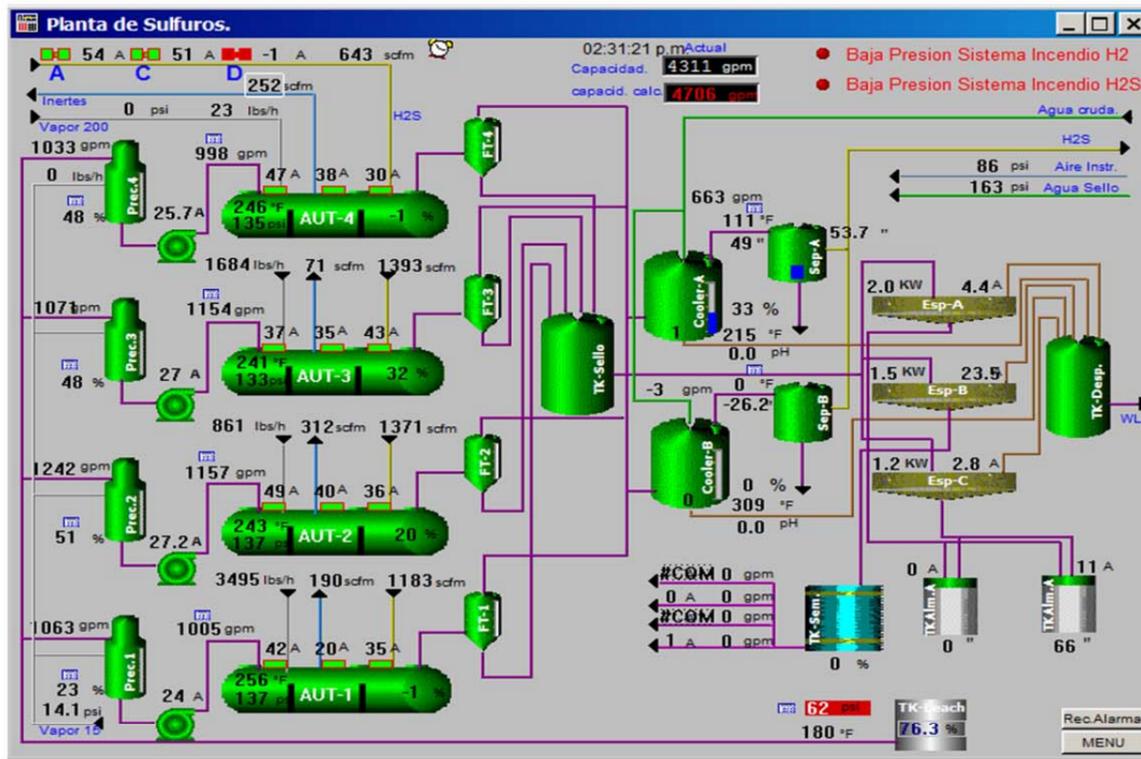
Renglón No.	Ctdad	U/M	Descripción	Precio	Total	Entrega
1	3	c/u	Impelente, Titanio G2, Posición 7	\$15,998.00	\$47,994.00	9 semanas
2	4	c/u	Tuerca del impelente, Posición 8	\$353.20	\$1,412.80	3 semanas
3	4	c/u	Carcaza del cojinete, de hierro fundido, protección epoxídica, Posición 2	\$2,850.00	\$11,400.00	9 semanas
4	4	c/u	Arandela y tuerca de bloqueo del eje, Posición 5	\$5,670.00	\$22,680.00	4 semanas
5	4	c/u	Camisa de enfriamiento, Posición 12	\$3,200.00	\$12,800.00	8 semanas
6	4	c/u	Camisa del eje, Hastelloy C, Posición 22	\$8,800.00	\$35,200.00	9 semanas
7	4	c/u	Sello mecánico, Posición 25	\$12,290.00	\$49,160.00	8 semanas
Total					\$83,486.80	

## Gasto Capital

Component description / Descripción del componente	Existing component (Yes/No) / Componente existente (Si/No)	Cost estimate of component / Costo estimado del componente	CCA Class (in Canada only) / Clasificación CCA (solo en Canadá)	Estimated useful life (years) <sup>(1)</sup> / Vida útil estimada (años) <sup>(1)</sup>
Bomba de alimentación autoclave SP	Yes	\$233,333.33		20 years
Bomba de alimentación autoclave SP	Yes	\$233,333.33		20 years
Bomba de alimentación autoclave SP	Yes	\$233,333.34		20 years
TOTAL <sup>(2)</sup>		\$ 700,000.00		



Anexo 3: Vista General de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Soto Alba.



Anexo 3: Fotos del accionamiento

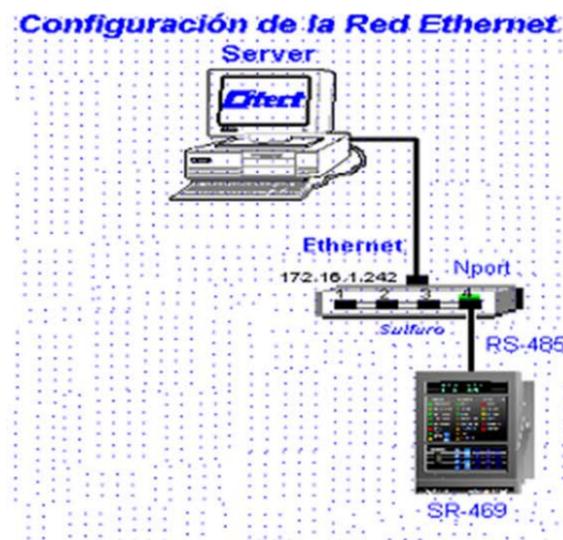
Interruptor Siemens de 2000 A



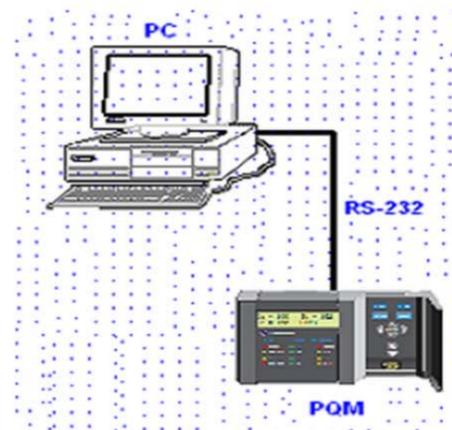




Anexo 4 : Esquema del MULTILIN SR-469



Comunicación del Multilin SR-469 mediante la Red Ethernet



PQM portátil usada en el monitoreo



### **Anexo 5: Descripción del proceso tecnológico de la Empresa “Cmte. Pedro Soto Alba”.**

En el proceso general 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 que en un orden cronológico de producción son:

➤ **PLANTA DE PREPARACIÓN DE PULPA:**

Su función es separar el material serpentínico del Limonítico, el mineral minado es beneficiado mediante un proceso de preparación mecánica, hasta obtener la máxima recuperación de las partículas de limonita de un tamaño menor a 0.84 mm, con un 25-30 % de sólido que constituye la pulpa producto la cual es enviada a la planta de Espesadores para su posterior procesamiento.

➤ **PLANTA DE ESPESADORES DE PULPA:**

Esta planta tiene como objetivo preparar una pulpa espesada de 45 a 48 % de sólido a partir de una pulpa con 25 % de sólido procedente de la planta de preparación de pulpa y a la vez asegurar una alimentación estable a la planta de lixiviación.

➤ **PLANTA DE LIXIVIACIÓN:**

En esta planta comienza el proceso metalúrgico del mineral laterítico después de haber recibido el tratamiento físico en las plantas de Pulpa y Espesadores. La planta de lixiviación como su propio nombre lo indica es la encargada de lixiviar la pulpa por medio de un agente químico, que en este caso es el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), donde se efectúa la disolución de los óxidos de níquel y cobalto fundamentalmente, es decir donde se separan de los demás elementos que componen el mineral con vista a la extracción del níquel y cobalto en forma de sulfatos. 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.

➤ **PLANTA DE LAVADERO:**

Su función es lavar la pulpa lixiviada y obtener un licor rico en níquel y cobalto separando las colas de hierro. La pulpa lixiviada se somete a un lavado con agua cruda a contracorriente por decantación en el que participan siete sedimentadores, en los cuales se lleva a cabo la operación ayudados por bombas centrífugas que extraen el producto espesado de un tanque y lo depositan en el reboso del otro del tanque 1 al tanque 7 sucesivamente. Otras extraen el líquido de un



sedimentador y lo bombean al reboso del otro, así ocurre desde el tanque 7 al tanque 1 hasta obtener un licor crudo el cual es bombeado hacia la planta de neutralización.

➤ **PLANTA DE NEUTRALIZACION:**

Esta planta tiene como objetivo principal el acondicionamiento del licor rico en níquel y cobalto para la realización óptima del proceso de precipitación de los sulfuros, lo cual se logra mediante la reducción del hierro y el cromo, la reacción de neutralización del ácido libre y la precipitación del cobre. La reacción de neutralización consiste en bajar este grado de acidez, para ello se le añade al licor una sustancia básica: el carbonato de calcio, que al reaccionar en un sistema de cuatro reactores, el pH queda en 2.4 - 2.6 que es el ideal para que precipiten los sulfatos de níquel y cobalto en los autoclaves de sulfuros.

➤ **PLANTA DE PRECIPITACION DE SULFURO:**

Su principal operación tecnológica consiste en la precipitación de los metales en forma de sulfuros con el objetivo de extraer selectivamente el níquel y el cobalto de la solución y separarlo de las impurezas. Este proceso se lleva a cabo utilizando ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) como agente precipitador, la precipitación ocurre en condiciones apropiadas de temperatura, presión y concentración de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) en los autoclaves de los sulfatos de níquel y cobalto contenidos en el licor producto proveniente de la planta de neutralización.

➤ **PLANTA DE SECADO Y DERRETIMIENTO DE AZUFRE:**

Es la encargada de recibir los sulfuros de níquel y cobalto, secarlos y embazarlos para su exportación. La segunda planta tiene como objetivo, derretir el azufre y bombearlo hacia la planta de ácido y  $H_2S$  para la producción de ácido sulfúrico y sulfhídrico respectivamente.

➤ **PLANTA AUXILIARES DE PROCESO:**

❖ **Planta termoeléctrica:**

Su función es suministrar de forma segura, estable y con calidad ciertos servicios auxiliares a la producción de la empresa, como son: Energía eléctrica para todas las necesidades de la fábrica, vapor de agua a diferentes presiones (650 PSI, 15 PSI, 85 PSI y de 15 PSI), aire comprimido y secado a 120 PSI de presión, para los instrumentos de todas las plantas, así como aire de servicio a 120 PSI de presión para los trabajos de mantenimientos en las distintas áreas, garantizar el



suministro y tratamiento del agua utilizada por la empresa (Doméstica, Desmineralizada, de Enfriamiento y de Proceso).

### ❖ **Planta Ácido:**

Su objetivo es producir ácido sulfúrico de 98% de pureza a partir del azufre, este ácido es consumido en el proceso de lixiviación. el azufre es previamente quemado en un horno a una temperatura de 820°C a 920°C, para la formación del SO<sub>2</sub> en presencia de oxígeno, luego el SO<sub>2</sub> es convertido en SO<sub>3</sub> en presencia de masas catalizadoras de pentóxido de vanadio la cual aceleran la velocidad de reacción química, el SO<sub>3</sub> es enviado a las torres de absorción cuya función es absorber el mismo y convertirlo mediante su reacción con el agua en ácido sulfúrico de 98% de pureza , el que luego es enfriado y almacenado en tanques para su posterior consumo.

### ❖ **Planta de Hidrogeno:**

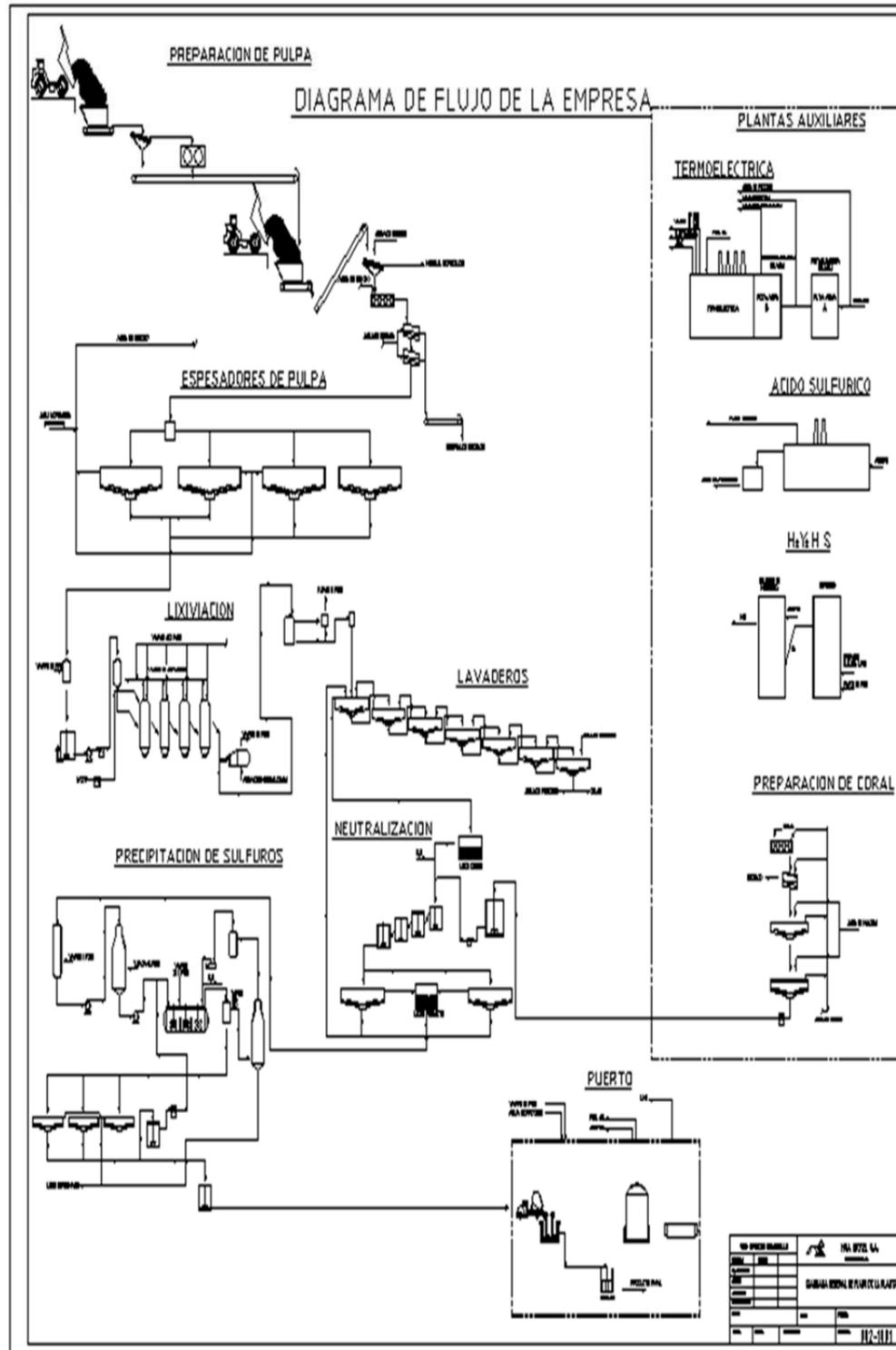
Tiene la función de producir el hidrógeno de 98% de pureza a partir de la mezcla L.P.G (propano - butano), para la obtención del ácido sulfhídrico H<sub>2</sub>S. La formación del hidrógeno comienza en los hornos reformadores en el que se hace pasar L.P.G mezclado con el vapor de agua de 85 lb/pulg<sup>2</sup> de presión sobrecalentado, esta mezcla al hacer contacto con una temperatura de aproximadamente 920°C produce la formación del gas CO el que luego es enfriado hasta 400°C y más tarde convertido en CO<sub>2</sub> e hidrógeno gaseoso el que posteriormente sería enfriado hasta 40°C y separado el agua que pueda haberse condensado producto del enfriamiento. El CO<sub>2</sub> es absorbido y el hidrógeno libre (98%) es extraído mediante compresores.

### ❖ **Planta de H<sub>2</sub>S:**

Tiene la función de combinar el azufre líquido con el hidrógeno gaseoso y formar un nuevo gas: el ácido sulfhídrico, el que será utilizado en la planta de precipitación de sulfuros y neutralización. El azufre líquido se filtra en forma de lluvia por la parte superior del reactor a una temperatura de aproximadamente 150°C y el hidrogeno se inyecta a temperatura ambiente por la parte inferior del reactor. Al hacer contacto el azufre con el hidrógeno se forma el gas H<sub>2</sub>S, el que luego es enfriado. El azufre que no reaccionó fluye por el fondo del reactor hacia las bombas de recirculación.



Anexo 6: Diagrama del flujo tecnológico de la Empresa





Aenexo7: Diagrama del flujo tecnológico de Sulfuros

