

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO – CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA DISMINUIR EL  
CONSUMO DE ENERGÍA DE LAS BOMBAS DE UNA PLANTA MINERA

**IVÁN ANDRÉS SOTO PIZARRO**

INFORME FINAL DEL PROYECTO  
PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE  
LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL  
TÍTULO PROFESIONAL DE **Ingeniero  
Civil Eléctrico**

JULIO DE 2017

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA DISMINUIR EL  
CONSUMO DE ENERGÍA DE LAS BOMBAS DE UNA PLANTA MINERA**

**informe final**

Presentado en cumplimiento de los requisitos  
para optar al título profesional de  
Ingeniero Civil Eléctrico  
otorgado por la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica  
de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

**IVÁN ANDRÉS SOTO PIZARRO**

<b>Profesor Guía:</b>	<b>Sr. Jorge Medina Hanke</b>
<b>Profesor Correferente:</b>	<b>Sr. Edmundo Lopez Estay</b>

**JULIO DE 2017**

## ACTA DE APROBACIÓN

La Comisión Calificadora designada por la Escuela de Ingeniería Eléctrica ha aprobado el texto del Informe Final de Proyecto de Titulación, desarrollado entre el Segundo Semestre de 2011 y el primer Semestre de 2017 y denominado

### **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LAS BOMBAS DE UNA PLANTA MINERA**

Presentado por el Señor  
**Iván Andrés Soto Pizarro**

Sr. Jorge Medina Hanke  
**Profesor Guía**

Sr. Edmundo Lopez Estay  
**Segundo Revisor**

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann  
**Secretario Académico**

Valparaíso, JULIO DE 2017

# ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LAS BOMBAS DE UNA PLANTA MINERA

IVAN ANDRES SOTO PIZARRO

Profesor Guía Sr. Jorge Medina Hanke

## RESUMEN

En este presente informe se estudiara los problemas del que están siendo participe 15 bombas de una planta minera. Se hará un estudio de su comportamiento durante el proceso de cual participan, y se recopilarán datos.

Se plantearán posibles alternativas para solucionar este problema, y de acuerdo a los datos que se tomaron, se determinara la alternativa más conveniente para ser implementada.

Finalmente se hará un listado de todos los elementos necesarios para llevar a cabo este proyecto, recopilando sus respectivas cotizaciones para calcular la inversión que se debe realizar, para implementar este proyecto, y se calculara si es económicamente viable realizar la inversión.

## ÍNDICE

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LAS BOMBAS DE UNA PLANTA MINERA	IV
RESUMEN	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	2
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y DEL PROCESO	2
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DONDE PARTICIPAN LAS BOMBAS	2
CAPÍTULO 2	6
DATOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS	6
2.1 DATOS OBTENIDOS DE LA PLANTA Y DE LAS CURVAS DE LAS BOMBAS	6
2.2 PERFILES DE CARGA DE LAS BOMBAS	7
2.3 CAUDAL QUE PROCESAN LAS BOMBAS	11
CAPÍTULO 3	13
SOLUCIONES PROPUESTAS	13
3.1 INSTALAR VARIADOR DE FRECUENCIA AL SISTEMA MOTOR-BOMBA	13
3.1.1 Ventajas.	13
3.1.2 Desventajas.	14
3.2 INSTALAR PARTIDOR SUAVE AL SISTEMA MOTOR-BOMBA	14
3.2.1 Ventajas.	14
3.2.2 Desventajas.	14
3.3 REEMPLAZAR EL MOTOR ESTÁNDAR POR UN MOTOR DE ALTA EFICIENCIA	15
3.3.1 Ventajas.	15
3.3.2 Desventajas.	16
CAPÍTULO 4	17
SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	17
4.1 SOLUCIÓN SECCIÓN DE MOLIENDA	17
4.2 SOLUCIÓN SECCIÓN DE FLOTACIÓN	17

4.3	CONTROL DEL PROCESO	18
4.4	ELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	19
CAPÍTULO 5		21
INVERSIÓN Y RECUPERACIÓN DEL PROYECTO		21
5.1	INVERSIÓN DEL PROYECTO	21
5.2	AHORRO DE ENERGÍA POR IMPLEMENTACIÓN DE VDF	23
5.3	AHORRO DE ENERGÍA EN SECCIONES DE MOLIENDA Y FLOTACIÓN POR IMPLEMENTACIÓN DE VDF	25
5.4	RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	29
5.4.1	VAN: valor actualizado neto	30
5.4.2	TIR: tasa interna de retorno.	30
5.4.3	PRK: periodo de recuperación de capital.	31
CONCLUSIONES		32
BIBLIOGRAFIA		34
APÉNDICE A		A
PARÁMETROS Y CURVAS CARACTERÍSTICAS MOTORES Y BOMBAS.		A
APÉNDICE B		B
SELECCIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA		B
APÉNDICE C		C
COTIZACIÓN SENSOR DE NIVEL		C
APÉNDICE D		D
DIAGRAMA DE FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO		D

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Planta Chancado Primario	3
Fig. 1.2 Chancado Secundario y Terciario	4
Fig. 1.3 Sección De Molienda	4
Fig. 1.4 Sección de Flotación	5
Fig. 2.1 Bombas 10 y 9 sección flotación	7
Fig. 2.2 Bombas 1 y 2 sección flotación	8
Fig. 2.3 Bomba 4 Sección flotación	8
Fig. 2.4 Bomba 3,7 y 11 Sección flotación	9
Fig. 2.5 Bomba 6 Sección flotación	9
Fig. 2.6 Bombas 5 y 8 Sección flotación, y bomba sección 2 molienda	10
Fig. 2.7 Bomba Sección 4 y 5 molienda	10
Fig. 2.8 Bomba remolienda sección molienda	11
Fig. 5.1 Comportamiento bomba centrífuga.	24
Fig. 5.2 Potencia (%) versus caudal bomba sección 5 y remolienda.	26
Fig. 5.3 Potencia (%) versus caudal bomba sección 2 y 4.	27
Fig. 5.4 Potencia (%) versus caudal bomba de flotación.	28
Fig. 1.5 Diagrama de Flujo del Proyecto.	29

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1 Potencia y medida de las bombas.	6
Tabla 2-2 Caudales sección de molienda.	12
Tabla 2-3 Caudales sección de flotación.	12
Tabla 2-4 Caudales diarios que procesados en sección de molienda	12
Tabla 2-5 Caudales diarios que procesados en sección de flotación.	12
Tabla 4-1 Parametros Tecnicos para compra de VDF.	19
Tabla 5-1 Caudales diarios que procesados en sección de flotación.	21
Tabla 5-2 Cotización cables.	22
Tabla 5-3 Costos de suministro y montaje.	22
Tabla 5-4 Costos cables de fuerza y equipos VDF.	23
Tabla 5-5 Resumen de costo e inversión total.	23
Tabla 5-6 Caudales sección molienda.	25
Tabla 5-7 Caudales sección flotación.	27
Tabla 5-8 Caudales sección flotación.	29

## INTRODUCCIÓN

El tema que se va a estudiar en este proyecto es bastante común en las empresas, sobre todo en las que son de mucha antigüedad como el rubro minero, que son procesos continuos (sin interrupciones).

El proyecto se desarrollara en una Mina ubicada en la comuna de Cabildo, provincia de Petorca región de Valparaíso. Específicamente en las secciones de Flotación y Molienda de la planta.

Se estudiara el comportamiento de 15 bombas que participan en los procesos de Flotación y molienda, por medio de mediciones y datos recopilados en terreno de determinaran cuales son las mejoras que se pueden realizar al sistema para obtener un funcionamiento más eficiente del proceso y además disminuir el consumo de energía de este.

Se propondrán tres posibles alternativas para el proceso, conociendo el funcionamiento y los datos recopilados, se estará en condiciones de proponer la solución más conveniente, para finalmente calcular la inversión que se debe realizar para llevar a cabo este proyecto, y por medio de herramientas de ingeniería económica se determinara si es rentable realizarlo.

## CAPÍTULO 1

### DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y DEL PROCESO

#### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema que se va a estudiar es bastante común en las empresas, sobre todo en las que son de mucha antigüedad como en el rubro minero, que son procesos continuos (sin interrupciones), consiste en poder reducir el consumo de energía eléctrica de las bombas centrífugas de la sección de molienda (4 bombas), y flotación de la planta (11 bombas), sus motores están conectado directamente a la red, son accionados con partida directa, por lo que las pérdidas en la partida son elevadas, si se considera que paran y parten constantemente, la suma de todas las partidas por ejemplo durante un año darán como resultado un gran gasto de energía, reflejado en la cuenta de energía eléctrica de la empresa, se estudiará si el caudal que entregan estas bombas es fijo o variable, y si es posible ahorrar energía durante su operación. Además se estudiará un problema de clasificación que ocurre en la sección de molienda.

#### 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DONDE PARTICIPAN LAS BOMBAS

Los camiones cargados con rocas de 8 pulgadas las depositan en el chancado primario y salen con una medida de  $5 \frac{1}{2}$ " (Fig.1-1), luego son depositadas en el chancado secundario (Fig.1-2) el cual reduce la roca a un tamaño de una 1", la roca así molida, pasa al harnero secundario, el cual deposita las rocas que cumplen con la medida en la correa transportadora y las que no las manda nuevamente al chancado secundario. Las rocas que van por la correa transportadora, llegan al harnero terciario el que filtra rocas de 8mm, si no cumplen con la medida, las rocas pasan al tolva de pulmón y luego a los chancadores terciarios (Fig.1-2), en donde las rocas salen de

8mm, y son enviadas a la correa nuevamente para pasar por el harnero terciario y de ahí mandarlas hacia el stock de finos, luego son enviadas a los silos.

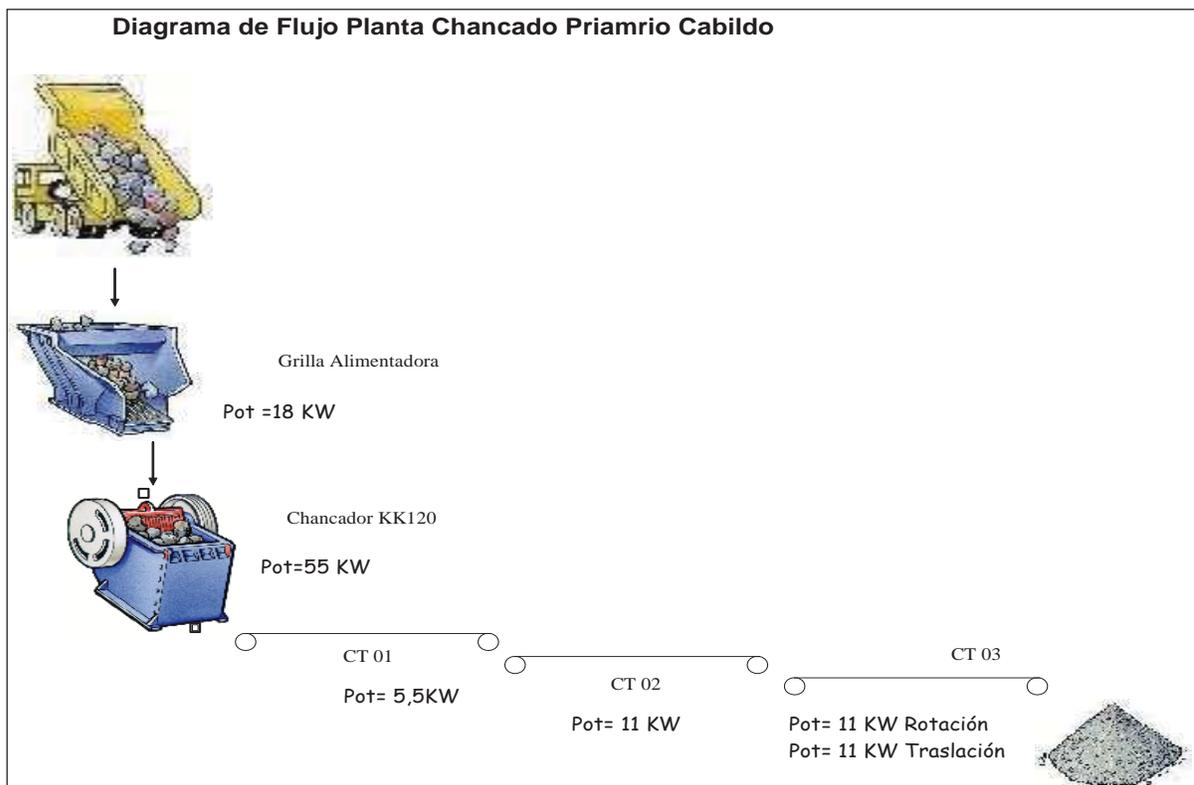


Fig. 1.1 Planta Chancado Primario

Cuando las rocas están en los silos, son enviadas a la sección de molienda, donde pasan por un molino de barras al cual se le introduce agua, para ser más reducidas, luego la pulpa pasa a un depósito en donde es enviada por las bombas hacia el ciclón, donde es clasificada. Si cumple, es enviada a los acondicionadores, si no, es devuelta a un molino de bolas y luego al mismo depósito y la bomba lo vuelve a enviar al ciclón. Este procesó es en la sección N°2 y la sección N°4.

En la sección N°5 la roca pasa directa a un molino de bolas al cual también se le introduce agua (formando una pulpa), y es enviado a un depósito y la bomba lo envía al ciclón que clasifica su tamaño. Si cumple, va al acondicionador si no, se devuelve al mismo molino de bolas.

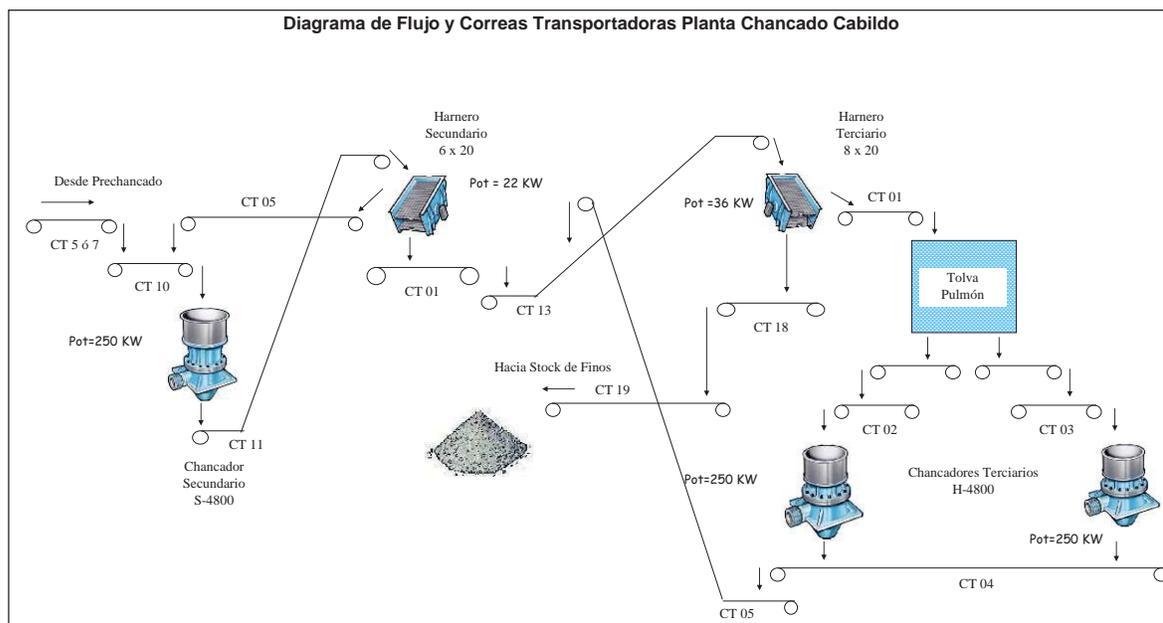


Fig. 1.2 Chancado Secundario y Terciario

La remolienda hace lo mismo con un molino de bolas, pero manda la pulpa por medio de la bomba al ciclón y luego a una sección nueva de la planta, ver figura 1-3.

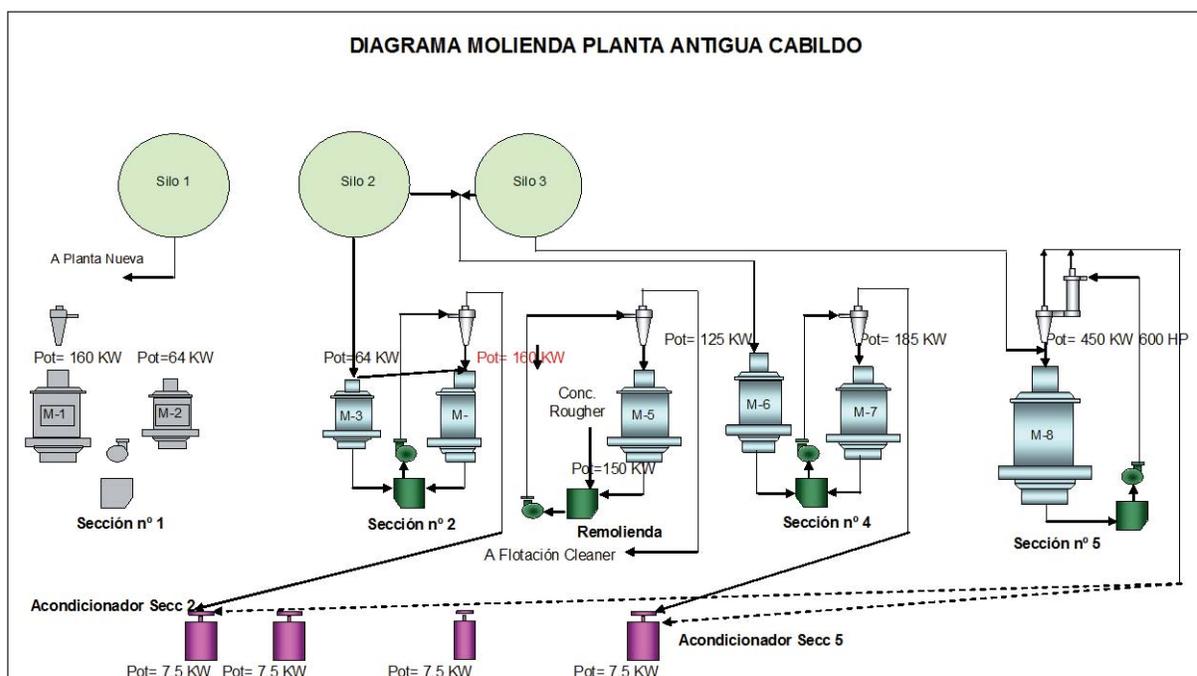


Fig. 1.3 Sección De Molienda

Una vez en los acondicionadores, a la pulpa se le aplican reactivos para separar el cobre del agua, luego la mezcla resultante se traspasa hacia la sección de flotación donde el cobre es separado del agua, aquí la función de las 11 bombas es transportar el concentrado final de cobre, los relaves, y algunas traspasos de un proceso a otro como se ve en la figura 1-4.

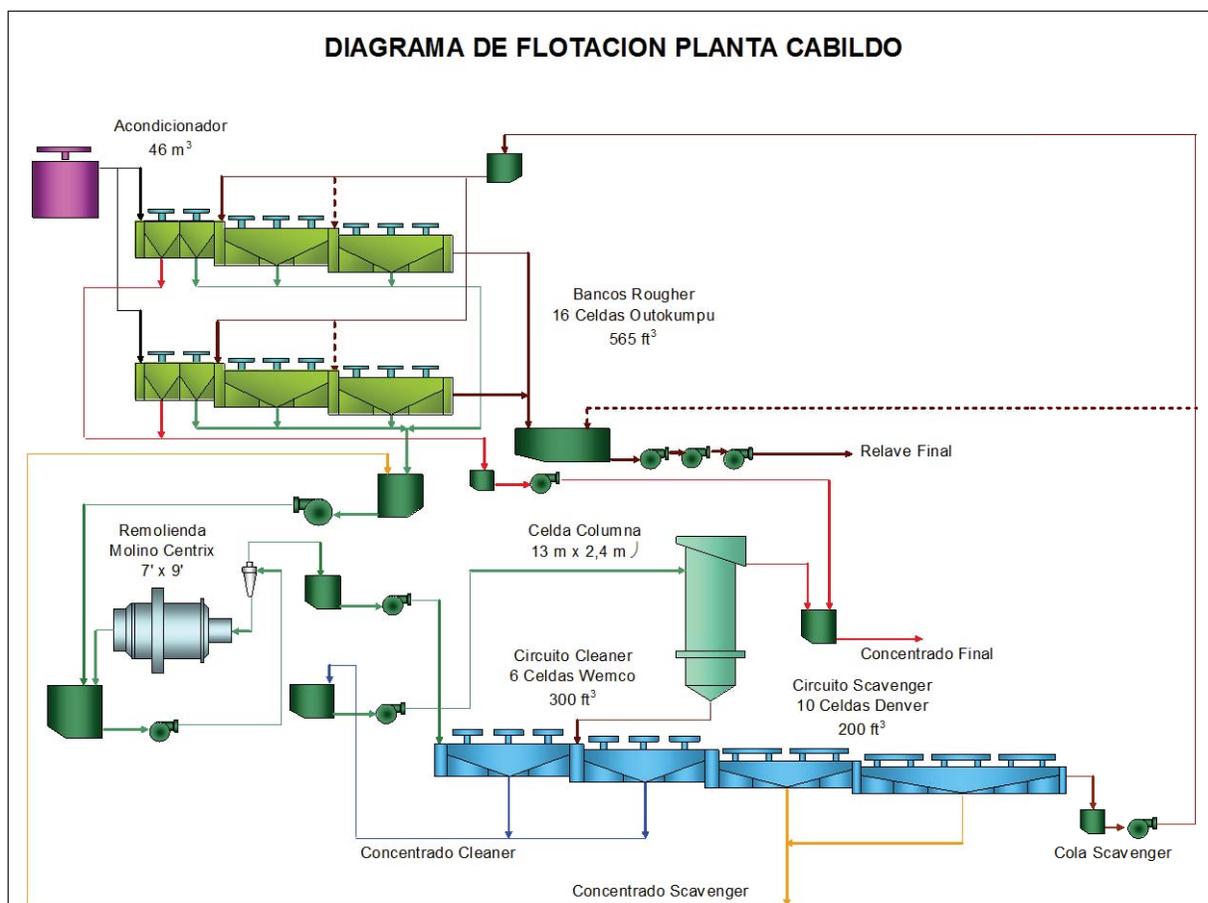


Fig. 1.4 Sección de Flotación

## CAPÍTULO 2

### DATOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS

En la tabla 2-1., se observa la potencia de cada bomba y su medida, donde el primer número indica succión y el segundo impulsión.

Tabla 2-1 Potencia y medida de las bombas.

Bombas	Potencia	Medida
Sección Flotación		
Bba10, Bba9	7.5 KW=10 HP	4x3
Bba1, Bba2	11 KW=15 HP	4x3
Bba4	15 KW= 20 HP	4x3
Bba3, Bba7 , Bba11	18 KW = 25 HP	4x3
Bba6	22KW= 30 HP	4x3
Bba5 , Bba8	30 KW=40 HP	4x3
Sección Molienda		
Bba secc2	30KW=40 HP	5x4
Bba secc4	37KW=50 HP	6x6
Bba secc5	37KW=50 HP	6x6
remolienda	56KW=75Hp	6x6

Las potencias de estas bombas representan un 3,7 % del consumo total de la planta.

#### 2.1 DATOS OBTENIDOS DE LA PLANTA Y DE LAS CURVAS DE LAS BOMBAS

Las bombas giran a 1200 RPM generalmente, los motores que accionan a las bombas tienen una velocidad nominal de 1470 RPM son de marca Weg (característica de los motores y bombas se encuentran en Apéndice A), pero la transmisión hacia la bomba se hace por medio de una polea que reduce la velocidad a 1200 Rpm.

Las bombas de la sección de flotación trabajan con caudal fijo, la información que se recopiló es que el caudal de las bombas está entre 25 y 35 M<sup>3</sup>/hr, estas bombas levantan una columna de agua de 10 m aproximadamente.

En la sección de molienda las bombas de 5x4 (sección 2) y 6x6 (sección 4), levantan una columna de agua entre 20 y 25 metros y entregan un caudal 40 M<sup>3</sup>/hr, y la bombas de 6x6 (sección 5 y remolienda) levanta una columna de agua de aproximadamente 30 metros, y entregan un caudal 100 M<sup>3</sup>/hr aproximadamente.

Las bombas trabajan 27 días al mes las 24 horas del día, los otros días están planificados para mantenimiento preventiva y también para ver si hay alguna falla o contingencia operacional.

Las bombas trabajan en operación continua, no se detienen en el día, pero si algunas veces paran, ya que opera una protección térmica, y debe colocarse en servicio nuevamente. Por dato estadístico de la planta se sabe que se detienen tres veces al día, en instantes de no más de 5 minutos.

## 2.2 PERFILES DE CARGA DE LAS BOMBAS

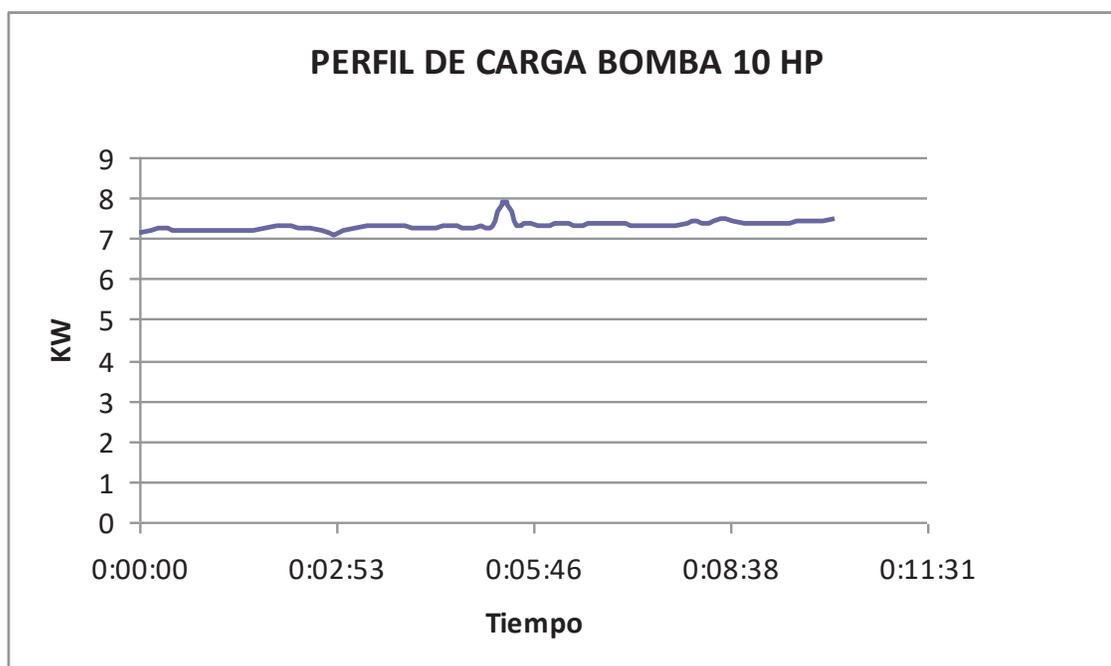


Fig. 2.1 Bombas 10 y 9 sección flotación

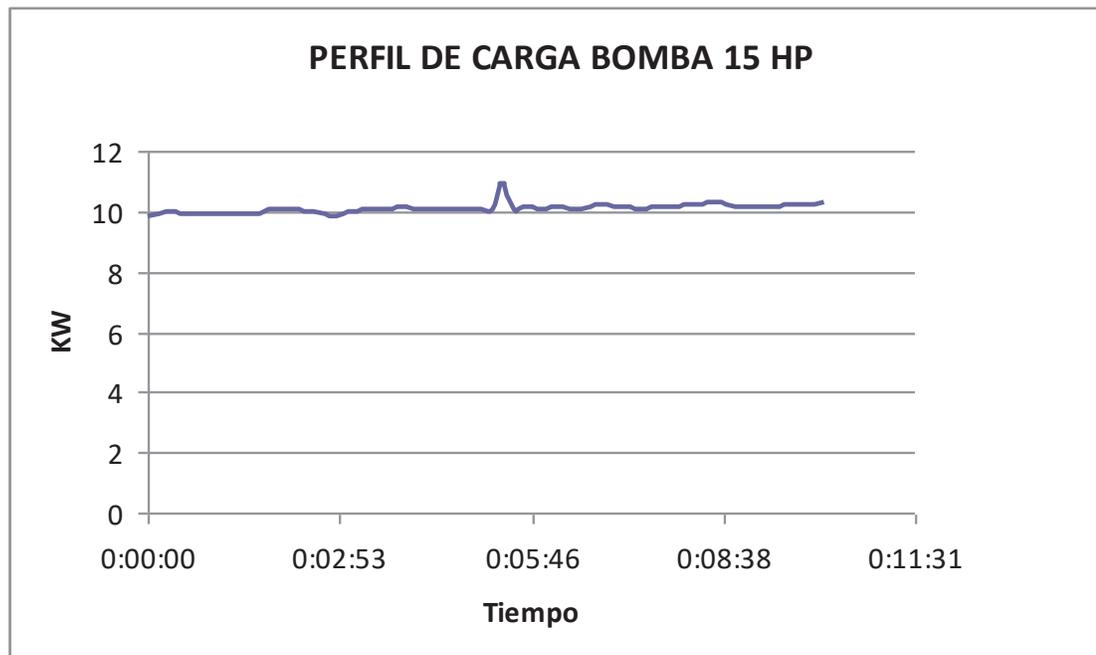


Fig. 2.2 Bombas 1 y 2 sección flotación

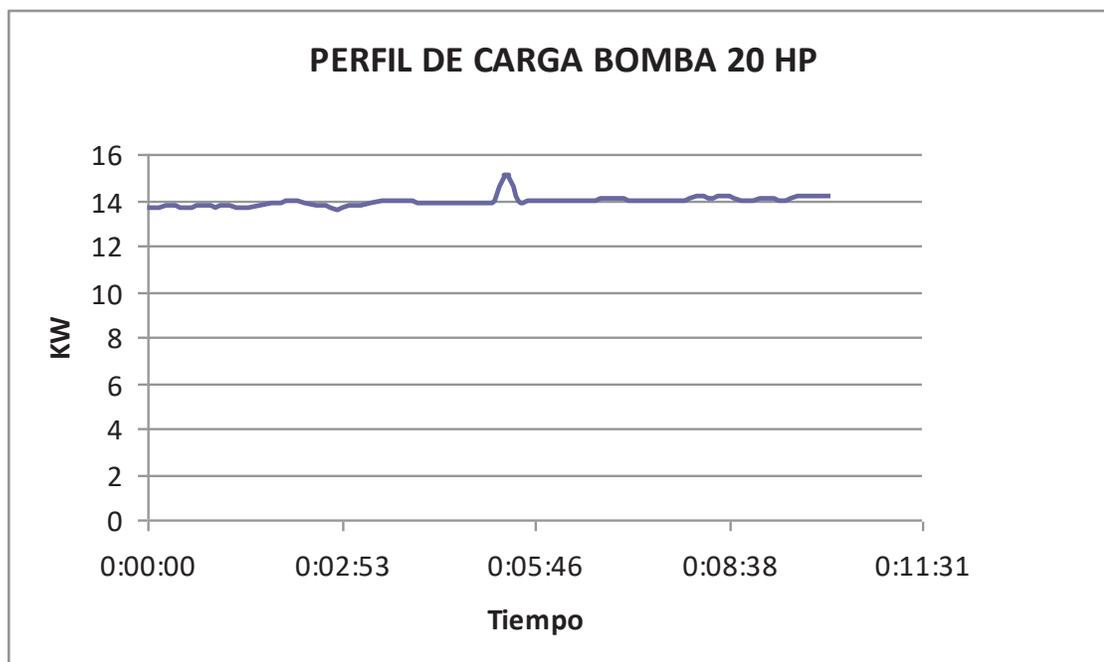


Fig. 2.3 Bomba 4 Sección flotación

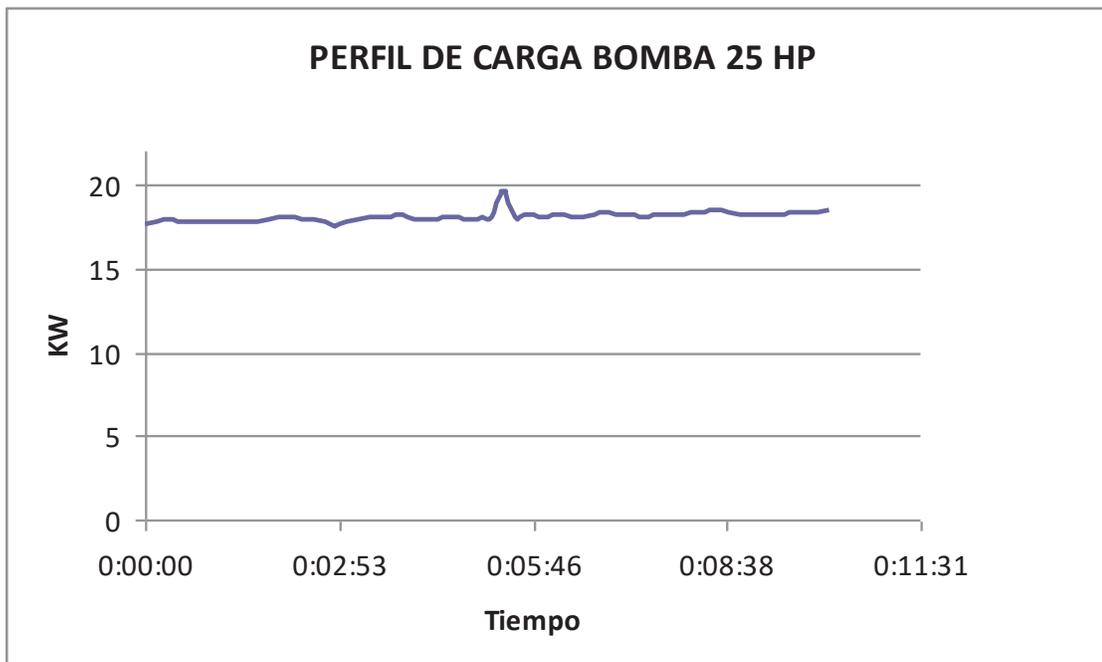


Fig. 2.4 Bomba 3,7 y 11 Sección flotación

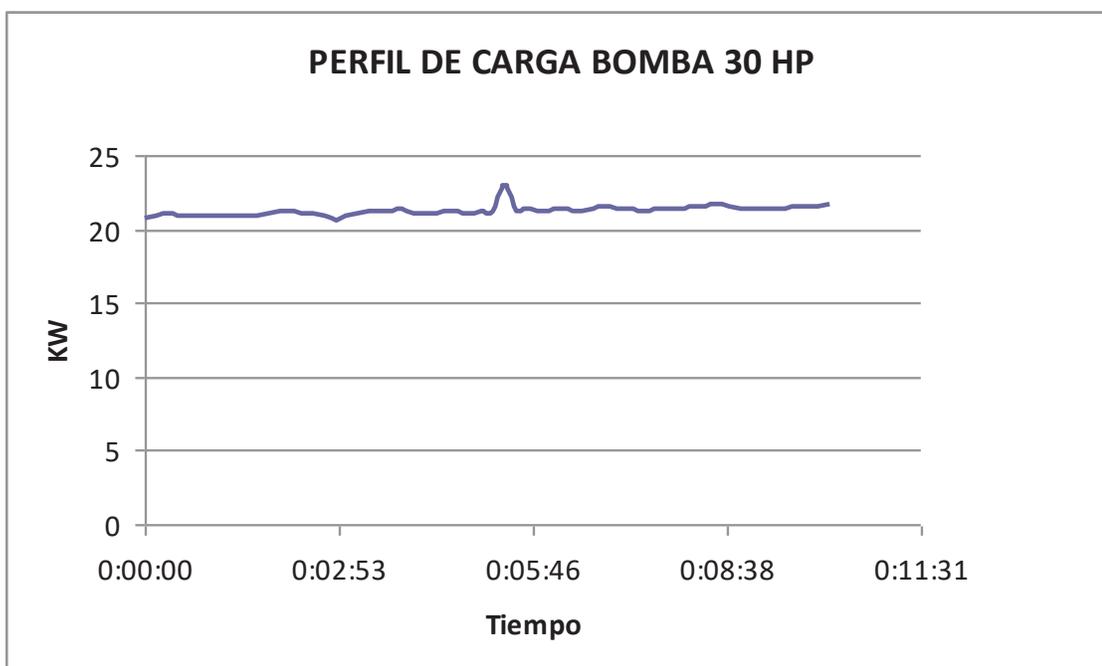


Fig. 2.5 Bomba 6 Sección flotación

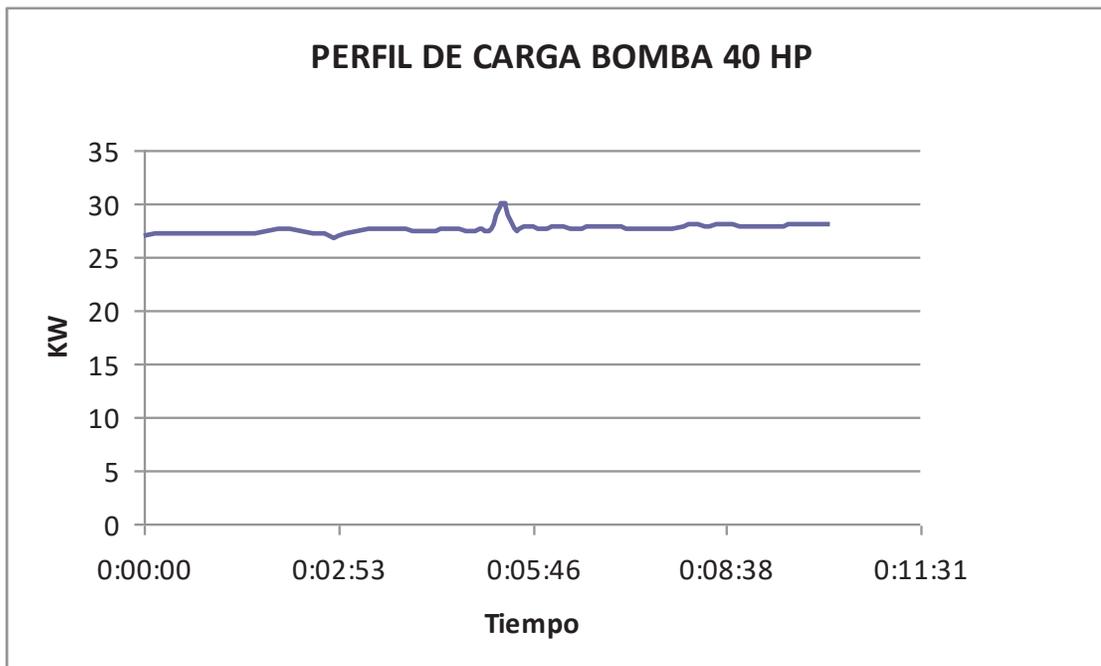


Fig. 2.6 Bombas 5 y 8 Sección flotación, y bomba sección 2 molienda

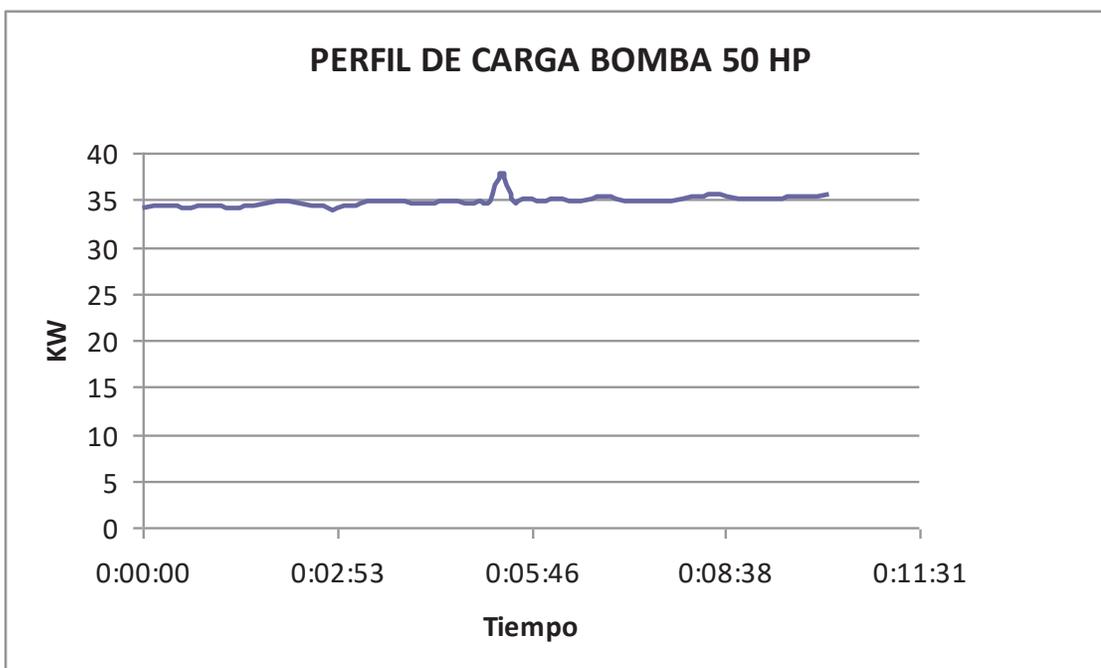


Fig. 2.7 Bomba Sección 4 y 5 molienda

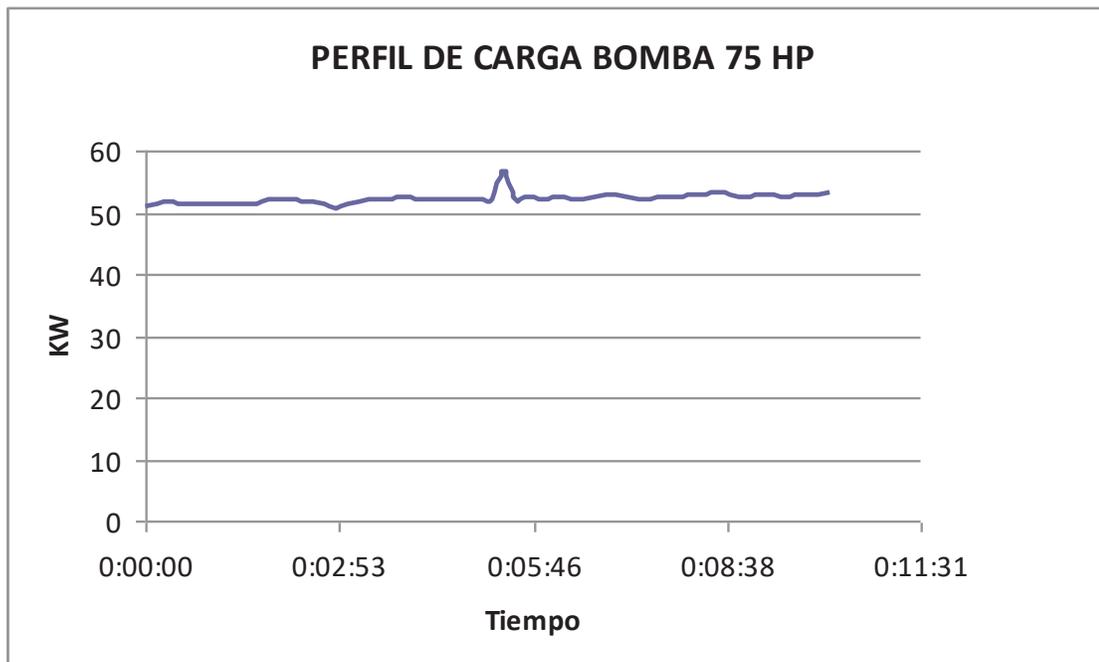


Fig. 2.8 Bomba remolienda sección molienda

Del perfil de carga se puede concluir que, a pesar de que la muestra es de 10 minutos, pero anteriormente se dijo que la bomba opera las 24 horas del día, por lo que estos 10 minutos de muestra es una buena aproximación de lo que ocurre durante el día.

De las figuras 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8 se aprecia que el un consumo de las bombas es prácticamente constante.

### 2.3 CAUDAL QUE PROCESAN LAS BOMBAS

Los caudales diarios que procesan cada una de las secciones de molienda y flotación, están en la tabla 2-2., en donde el caudal total movido por las bombas es la pulpa, que está compuesta de agua y el mineral que es la roca molida.

Los caudales diarios que procesan las bombas en la sección de flotación y molienda se observan en las siguientes tablas 2-3 y 2-4.

Tabla 2-2 Caudales sección de molienda.

Molienda	Metros cúbicos		
Sección	Mineral	Agua	Pulpa
2	112	784	896
3	112	784	896
4	216	1944	2160

Tabla 2-3 Caudales sección de flotación.

Flotación	Metros cúbicos		
Sección	Mineral	Agua	Pulpa
2	106,4	1010,8	1117,2
3	106,4	1010,8	1117,2
4	205,2	1949,4	2154,6

Tabla 2-4 Caudales diarios que procesados en sección de molienda

Molienda	Bomba	M3/h
Sección		
2	30 (KW)	37,33
3	37 (KW)	37,33
4	37 (KW)	90

Tabla 2-5 Caudales diarios que procesados en sección de flotación.

	Flotación	Potencia	M3/h
Sección 2	Bba1,Bba2	11(KW)	46,55
	Bba3	18(KW)	
	Bba4	15(KW)	
Sección 4 y 5	Bba5,Bba8	30(KW)	134,33
	Bba6	22(KW)	
	Bba7,Bba1	18(KW)	
	Bba3,Bba1	7,5(KW)	

## CAPÍTULO 3

### SOLUCIONES PROPUESTAS

Las alternativas que se propondrán en este capítulo serán tres. Primero colocar variador de frecuencia al sistema motor-bomba, segundo colocar partidador suave al sistema motor-bomba y por ultimo reemplazar motor actual de la bomba por uno de alta eficiencia.

#### 3.1 INSTALAR VARIADOR DE FRECUENCIA AL SISTEMA MOTOR-BOMBA

Es una muy buena solución ya que los variadores permiten un Arranque y detención progresiva (controlada), se evitan golpes de ariete. Se puede variar la frecuencia, lo que permite adaptar la velocidad del motor para diferentes necesidades de procesos como control de la presión, control de caudal, lo que a su vez permite un gran ahorro de energía. Siempre que no se exceda la frecuencia nominal, pues en este caso se sobrecargara el motor.

##### 3.1.1 Ventajas.

El uso de variadores de frecuencia en aplicaciones de bombeo, presenta las siguientes ventajas:

Disminución del costo de vida de la bomba: Los principales costos (ordenados de mayor a menor) asociados a un sistema de bombeo son la energía consumida, inversión inicial y su correspondiente mantención. La disminución de la energía consumida por las bombas se reflejará directamente en la cuenta eléctrica de la industria.

Menor costo de mantención y reparación: Al usar variadores de frecuencia se pueden reducir costos de mantención y reparación de las bombas.

### 3.1.2 Desventajas.

Su elevado costo, además de introducir armónicas en la red de energía y el operador debe ser más profesional.

## 3.2 INSTALAR PARTIDOR SUAVE AL SISTEMA MOTOR-BOMBA

Es una solución adecuada para terminar con los problemas en la partida de las bombas ya que los partidores suaves usan un control de tensión para limitar la corriente de partida y el torque en el motor haciendo que la tensión aplicada al motor en la partida y la detención siga una rampa continua, ya sea ascendente o descendente.

La tensión del motor es reducida controlando el ángulo de disparo y creando una rampa desde un valor inicial ajustable hasta llegar a la tensión total de la línea en un período de tiempo ajustable. Las partidas y paradas suaves reducen el stress eléctrico y mecánico, asegurando una producción armoniosa.

### 3.2.1 Ventajas.

Tensión reducida y corriente limitada en el arranque.

Permite evitar la eventual caída de las protecciones durante la partida.

Disminución del peak de demanda de carga.

Alivio del golpe de ariete en aplicaciones de bombas.

Optimización automática del consumo de energía para aplicaciones con carga reducida o a vacío.

### 3.2.2 Desventajas.

La desventaja de este tipo de partidores es que el torque de aceleración producido por el motor no es constante. (El torque de aceleración es la diferencia entre el torque producido por el motor y el torque requerido por la carga para mantenerse en

movimiento a velocidad constante, también llamado torque de carga) y además su elevado costo.

### 3.3 REEMPLAZAR EL MOTOR ESTÁNDAR POR UN MOTOR DE ALTA EFICIENCIA

En gran parte de los centros mineros se puede observar que la gran mayoría de los motores son muy antiguos y muchos de ellos han sido rebobinados más de una vez, disminuyendo con ello la eficiencia de diseño del motor.

Esta es una buena solución ya que los motores eléctricos de alta eficiencia, son motores de diseño y construcción especial que presentan menos pérdidas que los motores eléctricos estándares. Una menor pérdida de potencia hace que el motor tenga una mayor eficiencia es decir que consuma menos energía para realizar el mismo trabajo que un motor normal y su expectativa de vida es considerablemente mayor.

La corriente transitoria en el arranque se incrementa debido a un mayor valor de la relación  $X/R$ . Esta corriente puede afectar el disparo instantáneo del interruptor del motor, por lo que hay que ajustar la protección del interruptor para inhibir los disparos en el arranque.

#### 3.3.1 Ventajas.

Debido a su mayor eficiencia se disminuyen los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera cerca a la potencia nominal.

Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.

Los motores de alta eficiencia son más robustos y mejor contruidos que los motores estándar, lo que se traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.

Mayor Capacidad de Sobrecarga.

Mejor operación que un motor Standard en condiciones ambientales críticas (altas temperaturas, zonas de altitud)

Mejor respuesta ante las variaciones de tensión (menor sobrecalentamiento).

### 3.3.2 Desventajas.

El hecho de que los motores de alta eficiencia operan a una velocidad mayor, puede ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, estos incrementos están entre un 1% y un 3%.

El factor de potencia del motor puede ser menor que un motor estándar.

La corriente de arranque suele ser mayor. Esto puede provocar que se sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red. También puede influir en la capacidad de los equipos de maniobra, habitualmente se pueden operar con los mismos que se usan con los motores estándar.

Además, se recomienda su aplicación en instalaciones nuevas, cuando el motor opera a una carga constante y muy cerca del punto de operación nominal, cuando reemplaza a motores sobredimensionados. Si se aplican conjuntamente con Variadores electrónicos de frecuencia para accionar bombas y ventiladores, pueden lograr ahorros de hasta más del 50% de la energía.

## CAPÍTULO 4

### SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

#### 4.1 SOLUCIÓN SECCIÓN DE MOLIENDA

En la sección de molienda existe un problema de clasificación de pulpa. Esto es debido a que en el ciclón se debe generar un corte metalúrgico, que depende de la presión con la que ingrese la pulpa a este. Los motores de las bombas que envían la pulpa hacia el ciclón, funcionan conectados directo a la red, por lo que envían la pulpa a una presión que no es la más óptima para generar este corte metalúrgico, el cual es necesario para tener una buena clasificación del material en el ciclón.

Lo que se propone es mantener los depósitos que reciben la pulpa que envían los molinos a un nivel medio, y así mandar la pulpa hacia los ciclones dentro de un rango de presión constante, para generar el corte metalúrgico deseado en el ciclón y mejorar la clasificación.

Para lograr lo anterior es necesario colocar un variador de frecuencia a cada sistema motor-bomba, además esto permitirá tener un control sobre el caudal de la bomba y así mantener a un nivel medio los depósitos y lograr enviar la pulpa a una presión constante. También se necesitara la instalación de un sensor de nivel que envíe la información al variador de frecuencia para mantener el nivel del depósito constante y la presión deseada en el ciclón.

La mejora en la clasificación del ciclón, provocaría un aumento de envío de pulpa a los acondicionadores, y así se podría extraer más concentrado de cobre en la celdas de flotación.

#### 4.2 SOLUCIÓN SECCIÓN DE FLOTACIÓN

En la sección de flotación se propondrá la misma solución que en las bombas de la sección de molienda, ya que aunque no se necesita una presión constante, es una

buena alternativa ya que como se dio a conocer en el capítulo anterior, los caudales que se procesan por sección (tabla 2-4), sí se dividen entre todas las bombas de la sección correspondiente, se percibe que los caudales que pueden mover las bombas están muy por encima de los requeridos ( capítulo 2 sección 2.2), por lo que al colocar el variador de frecuencia se podría obtener ahorros de energía importantes en este proceso.

La pulpa que llega a las celdas de flotación proviene de los acondicionadores en donde se les aplicó reactivos. Si se mejorara la clasificación de los ciclones de la sección de molienda, aumentaría la extracción de concentrado de cobre en las celdas de flotación, ya que estaría llegando más pulpa a lo acondicionadores, proveniente de los ciclones.

#### 4.3 CONTROL DEL PROCESO

La variable a controlar será el nivel de los depósitos tanto de la sección de molienda como en la de flotación además de la presión que va a los ciclones, y la variable de control del proceso será la velocidad de los motores.

El control que se utilizara será un PID (incorporado en el VDF), es un mecanismo de control por realimentación.

Para realizar este control se deberá colocar un sensor ultrasónico (marca Vega Modelo 61, apéndice C), en los depósitos, el cual enviara una señal que varía entre 4 a 20 (ma) hacia el VDF Además se deberá ajustar la referencia en el VDF que corresponde al nivel deseado que se quiere en el depósito.

La variación de caudal depende de la velocidad que el motor transmite a la bomba, como se mencionó anteriormente la velocidad del motor será la variable de control de proceso.

#### 4.4 ELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

En el mercado existen diversas marcas que comercializan variadores de frecuencia, en este proyecto se seleccionaron tres marcas ABB, SCHNEIDER y WEG a los cuales se les solicito una cotización. Además se les envió los parámetros técnicos con las características de funcionamiento de los sistemas Motor-Bomba que se encuentran en la planta, como corriente nominal, potencia, corriente de arranque, torque de arranque y velocidad de operación, estos parámetros se obtienen al interceptar las curvas de los motores y bombas que se encuentran en el apéndice A. En la siguiente tabla se detallan los requisitos técnicos mínimos que deben cumplir los variadores de frecuencia para accionar los sistemas Motor-Bomba.

Tabla 4-1 Parametros Tecnicos para compra de VDF.

Potencia (HP)	Toque Nominal (Nmt)	I Nominal (A)	Velocidad de operación RPM	I arranque Veces In	I arranque (A)	Torque arranque Veces Tn	Torque arranque (Nmt)
10	48.8	13.6	1200	4.7	64	2.6	127
15	71.5	19.9	1200	4.4	88	2.4	172
20	98.2	27.4	1200	3.8	104	2.4	236
25	120	32.3	1200	5.3	171	2.6	312
30	143	39.8	1200	5.2	207	2.7	386
40	194	52.1	1200	5.5	286	2.2	427
50	241	64.0	1200	4.9	314	1.9	458
75	356	89.7	1200	5	448	1.8	640.8

Para la elección del variador de frecuencia más adecuado se utilizó el software Expert Choise (diseñado para ayudar en la toma de decisiones), Las variables consideradas fueron, Costo, Plazos de Entrega, disponibilidad de repuesto, compra directa a marca (sin intermediario), no se consideró dentro de las variables de selección los aspectos técnicos, ya que entre un equipo y otro resultaba irrelevante

comparar ya que al momento de cotizar una entrega al proveedor todos los datos del proceso en el cual será utilizado el equipo, cumpliendo todos técnicamente, ver apéndice B.

El VDF que se utilizará es de marca WEG modelo CFW-11, que trae incorporado un Regulador PID. Este viene incorporado al software del variador. Este regulador se destina a las aplicaciones donde hay necesidad de control de una variable del proceso (Ej.: flujo, presión, nivel, etc.), indirectamente por la variación de la velocidad del motor. Para esto el variador deberá poseer un set-point (programable por el usuario) y recibir una señal de realimentación del sensor de medición de la variable del proceso, formando de esta forma un lazo cerrado.

## CAPÍTULO 5

### INVERSIÓN Y RECUPERACIÓN DEL PROYECTO

#### 5.1 INVERSIÓN DEL PROYECTO

La inversión del proyecto está compuesta por el costo de adquirir los equipos VDF, sensores ultrasónicos, todos los cables de fuerza y control, y el costo de instalación.

Todos los valores que se presentaran en este proyecto están en valores netos se les debe agregar el IVA.

Cotización de los variadores de frecuencia tabla 5-1., como se mencionó anteriormente en el capítulo 4 (punto 4.4) el variador seleccionado es marca WEG.

Tabla 5-1 Caudales diarios que procesados en sección de flotación.

Potencia (HP)	Modelo	Precio USD
10	CFW110017	1500
15	CFW110024	1900
20	CFW110031	2300
25	CFW110038	2600
30	CFW110045	3400
40	CFW110058	4000
50	CFW110070	4300
75	CFW110105	5900

Cotización (fuente Chilecables SA) de cables de fuerza y control tabla 5-2.

Costo mano de obra (Fuente contratistas minera las cenizas), costo conduit de acero galvanizado de ½ “para canalización y precio sensor de nivel marca Vega (ver apéndice C) Tabla 5-3.

En la tabla 5-4 se ve el tipo de cable de fuerza para cada motor-bomba, ordenados por potencia, los metros que requieren cada una, se saca su respectivo costo y finalmente el costo total en cable de fuerza, además del costo de cada VDF para los motores, ordenado por potencia y se determinó el costo total de los VDF.

Se necesitaran 1000 (mt) de cable de control el cual será canalizado conduit galvanizada de ½ “del cual se necesitan 1000 (mt).

La instalación de los VDF en sala eléctrica con la canalización de control y fuerza, considera cableado de 15 metros:

En la tabla 5-5 se encuentra el resumen de todos los costos asociados al proyecto, equipos y montaje y la inversión total del proyecto.

Finalmente la inversión es de \$US 77.787, el dólar en moneda nacional equivale a \$ 668 por lo que la inversión en moneda nacional es de \$ 51.961.716

Tabla 5-2 Cotización cables.

Tipo de cable	Precio/metro US\$
18 AWG	1,2
12 AWG	2,3
10 AWG	3,13
8 AWG	4,44
6 AWG	8,14
4 AWG	9,53
2 AWG	15,5

Tabla 5-3 Costos de suministro y montaje.

COSTO \$US		
Sensor Vega 61.	1.300	\$US/unid.
Conduit galvanizado 1/2 metro	2,1	\$US/mt
montaje en sala eléctrica	6,5	\$US/mt
montaje cables	4,7	\$US/mt

Tabla 5-4 Costos cables de fuerza y equipos VDF.

Bombas	Pot. (HP)	Tipo de cable	metros	Costo \$ US	Costo VDF \$ US
Bba 10	10	12 AWG	25	58	1.500
Bba 9	10	12 AWG	25	58	1.500
Bba 1	15	10 AWG	40	125	1.900
Bba 2	15	10 AWG	40	125	1.900
Bba 4	20	10 AWG	30	94	2.300
Bba 3	25	8 AWG	35	155	2.600
Bba 7	25	8 AWG	50	222	2.600
Bba 11	25	8 AWG	25	111	2.600
Bba 6	30	6 AWG	33	268	3.400
Bba 5	40	4 AWG	37	353	4.000
Bba 8	40	4 AWG	37	353	4.000
Bba secc2	40	4 AWG	60	572	4.000
Bba secc4	50	4 AWG	80	762	4.300
Bba secc5	50	4 AWG	110	1.048	4.300
Bba molienda	75	2 AWG	75	1.163	5.900
Costo Total				5.466	46.800

Tabla 5-5 Resumen de costo e inversión total.

Costo \$US	
Cable Fuerza	5.466
Variadores de frecuencia	46.800
Cable Control 1000 mt.	10.00
Conduit 1/2 1000 mt.	2.149
Montaje Sala Eléctrica	1.170
Montaje Cables	1.702
Sensores	19.500
<b>Inversión Total</b>	<b>77.787</b>

## 5.2 AHORRO DE ENERGÍA POR IMPLEMENTACIÓN DE VDF

$$Flujo = \frac{Q1}{Q2} = \frac{N1}{N2} \quad Potencia = \frac{P1}{P2} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^3$$

Q: Flujo

P: Potencia

N: Velocidad motor

Entonces,

$$Potencia = \frac{P1}{P2} = \left(\frac{Q1}{Q2}\right)^3$$

Como se puede ver de las formulas, si desea disminuir el caudal basta con reducir la velocidad del motor, bajando la frecuencia del variador, pero la potencia del motor varia con el cubo de la velocidad por lo que el consumo de potencia será considerablemente menor, por ejemplo si el caudal se quiere disminuir en 20% la potencia del motor disminuirá en un 48.8%.

Es necesario ajustar el variador indicando los valores mínimos y máximos de frecuencia, que es casi siempre entre 30 HZ y 50HZ (en este rango se debe tratar de tener la relación tensión/frecuencia constante), para frecuencias mayores se debe consultar al fabricante de lo contrario se pueden suscitar problemas, como por ejemplo:

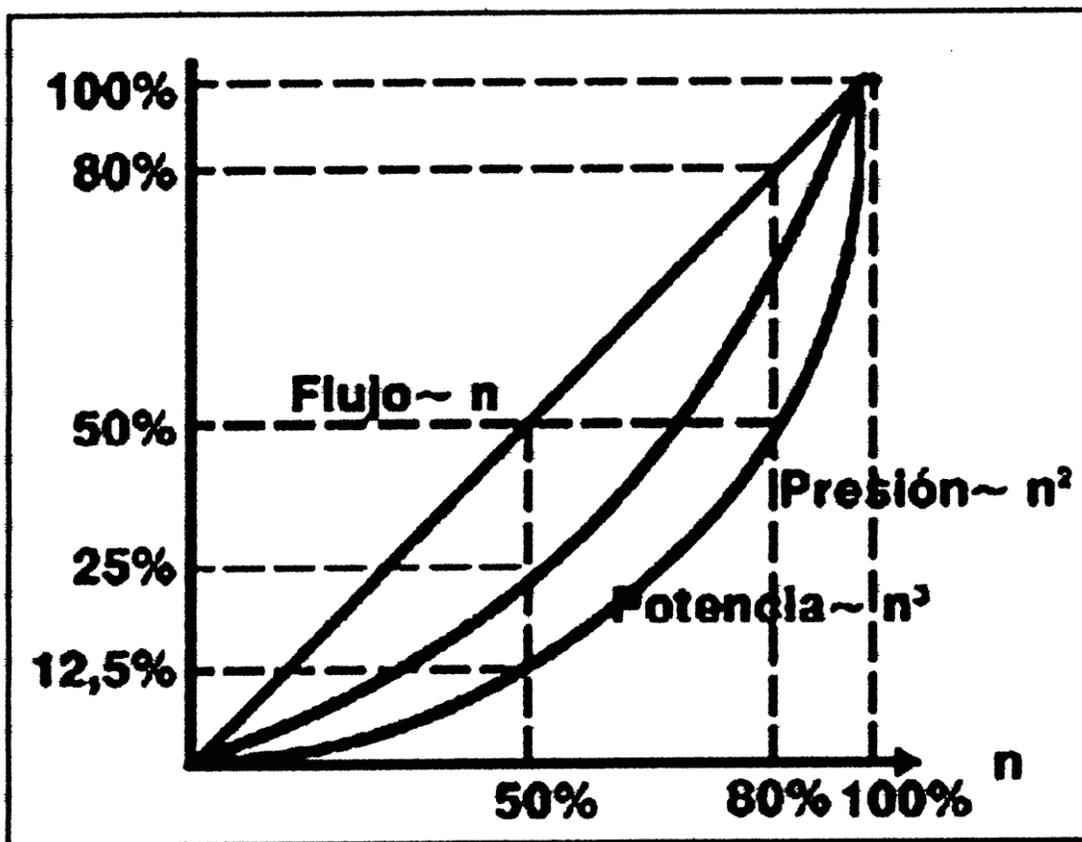


Fig. 5.1 Comportamiento bomba centrífuga.

Es necesario ajustar el variador indicando los valores mínimos y máximos de frecuencia, que es casi siempre entre 30 HZ y 50HZ (en este rango se debe tratar de tener la relación tensión/frecuencia constante), para frecuencias mayores se debe consultar al fabricante de lo contrario se pueden suscitar problemas, como por ejemplo:

Un aumento en un 20% de caudal, implicara un aumento en un 20% de la velocidad del motor, lo que producirá un aumento de un 72.8% en la potencia requerida para mover la carga y por ende un aumento en las perdidas en el cobre. El caudal de ventilación aumentara en solo un 20% por lo que el motor se sobrecalentara.

Con las relaciones nombradas anteriormente, el grafico de potencia v/s velocidad, además de la condición de trabajo entre las frecuencia de 30 y 50 HZ se está en condiciones de calcular, el ahorro de energía que puede entregar la implementación VDF en las secciones de flotación y molienda.

### 5.3 AHORRO DE ENERGÍA EN SECCIONES DE MOLIENDA Y FLOTACIÓN POR IMPLEMENTACIÓN DE VDF

Los caudales diarios que procesan las bombas en la sección de molienda que se vieron en el capítulo 2, sección2.3 se detallan en la tabla 5-6.

Tabla 5-6 Caudales sección molienda.

Molienda sección	Potencia	M3/h
2	30 (KW)	37.33
3	37 (KW)	37.33
4	37 (KW)	90

El caudal que podrán procesar las bombas de la sección 5 de molienda y remolienda con VDF variara entre 100 y 60 M<sup>3</sup>/h en la figura 5-2 se ve el comportamiento de la bomba con la variación de caudal, donde la potencia esta en porcentaje.

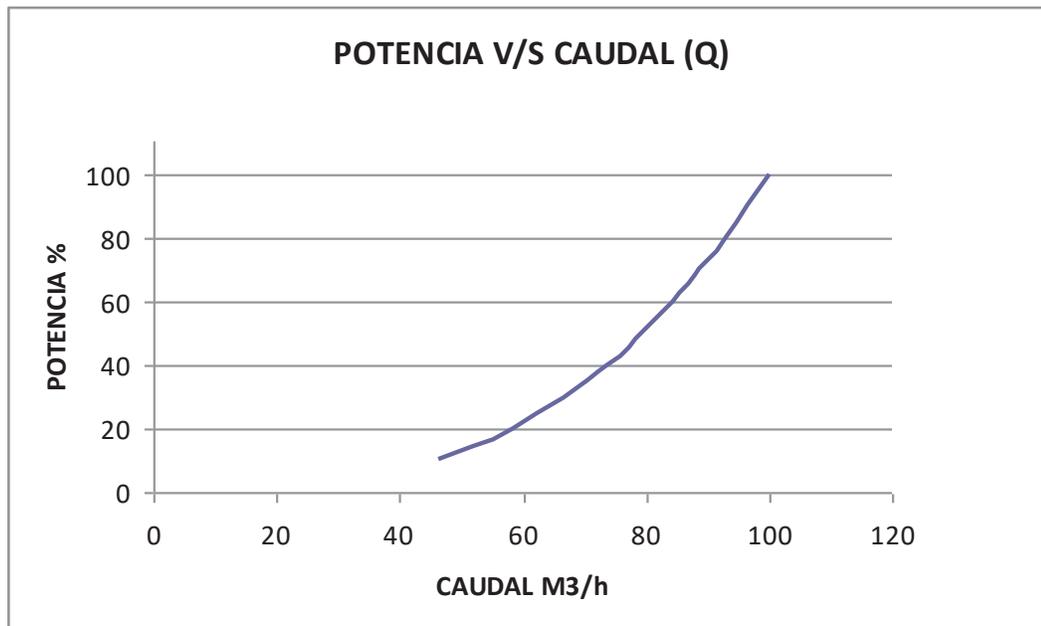


Fig. 5.2 Potencia (%) versus caudal bomba sección 5 y remolienda.

Como las bombas requieren mover 90 M<sup>3</sup>/h el ahorro que se obtendría sería de un 27% de energía. Con una reducción de caudal del 10 %

El caudal podrá procesar la bomba de la sección 2 y 4 de molienda deberá variar entre 40 y 24 M<sup>3</sup>/h con VDF, en la figura 5-3 se ve el comportamiento de las bombas con la variación de caudal, donde la potencia está en porcentaje.

Como la bomba requiere mover 37,7 M<sup>3</sup>/h el ahorro que se obtendría sería de un 17,1 % de energía con una reducción de caudal del 5,75%.

En promedio las bombas de la sección de molienda entregarían un ahorro de un 20 % de energía.

Los Caudales diarios que procesan las bombas en la sección de flotación se vieron en el capítulo 2, sección 2.3 detallan en la tabla 5-7.

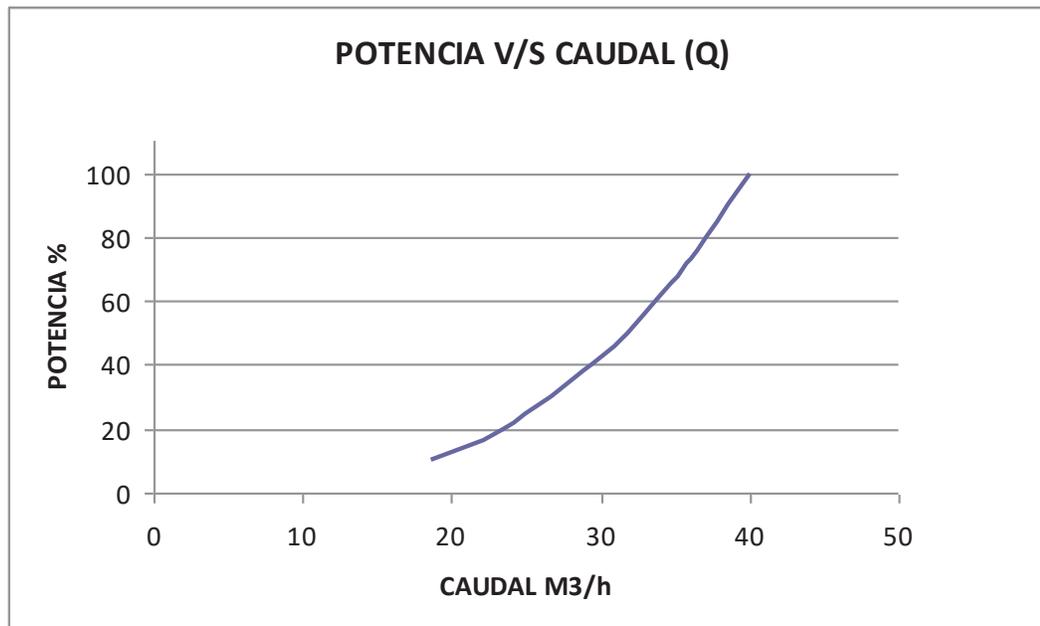


Fig. 5.3 Potencia (%) versus caudal bomba sección 2 y 4.

Se sabe que las bombas mueven un caudal que está entre 25 y 35 M<sup>3</sup>/h en la sección de flotación, pero con el VDF el caudal podrá variar entre 21 y 35 M<sup>3</sup>/h. Los ahorros de energía que se pueden obtener, están explicados en el gráfico.5-4

Tabla 5-7 Caudales sección flotación.

	Flotación	Potencia	M3/h
Sección 2	Bba1,Bba2	11(KW)	46,55
	Bba3	18(KW)	
	Bba4	15(KW)	
Sección 4 y 5	Bba5,Bba8	30(KW)	134,33
	Bba6	22(KW)	
	Bba7,Bba1	18(KW)	
	Bba3,Bba1	7,5(KW)	

En donde se encuentra la potencia expresada en porcentajes y el caudal que mueven las bombas con VDF.

Como se ve en el grafico una reducción del 7% del caudal provocara una disminución del 20 % en el consumo de energía.

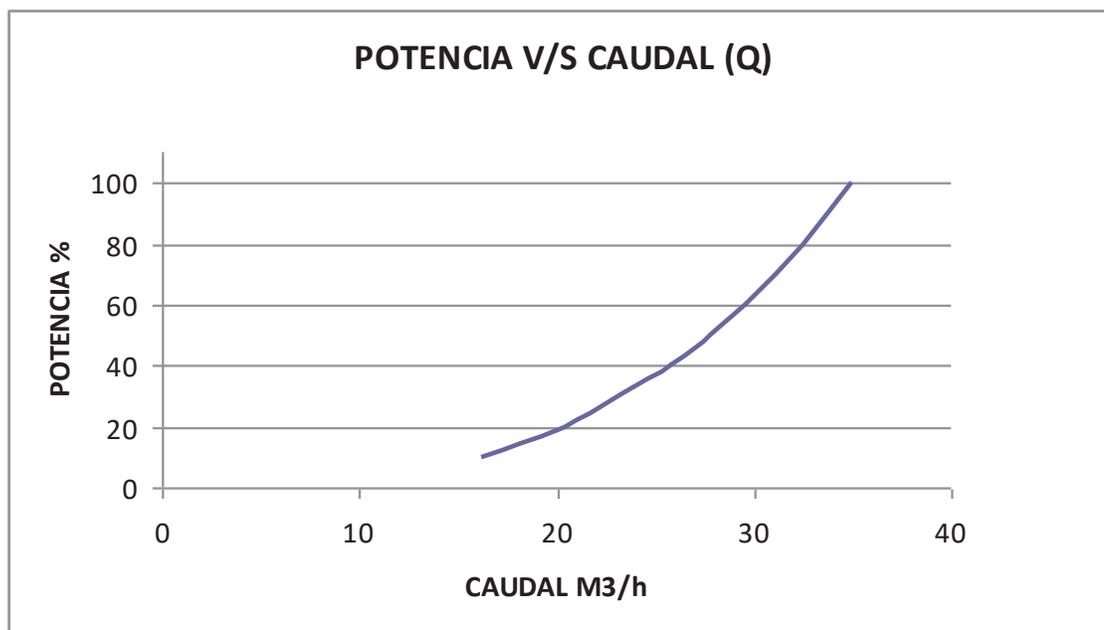


Fig. 5.4 Potencia (%) versus caudal bomba de flotación.

Finalmente el ahorro de energía que se obtendrá al colocar VDF, será de un 20% en la sección de molienda y flotación.

Como tenemos ya el porcentaje de energía que se ahorrara con la implementación de los variadores, podemos calcular a cuanto equivale este ahorro en dinero.

El Kwh. tiene un costo de \$ 60 para la empresa, en la tabla 5-8 se ve la energía que consume cada motor-bomba en un año, el costo de ella y el ahorro del 20% al implementar VDF.

Tabla 5-8 Caudales sección flotación.

Bombas	Pot. (HP)	POT (KW)	Kwh. año	consumo año(\$)	ahorro (Kwh.)	ahorro (\$)
Bba 10	10	7,5	63.000	3.780.000	12.600	756.000
Bba 9	10	7,5	63.000	3.780.000	12.600	756.000
Bba 1	15	11	92.400	5.544.000	18.480	1.108.800
Bba 2	15	11	92.400	5.544.000	18.480	1.108.800
Bba 4	20	15	126.000	7.560.000	25.200	1.512.000
Bba 3	25	18	151.200	9.072.000	30.240	1.814.400
Bba 7	25	18	151.200	9.072.000	30.240	1.814.400
Bba 11	25	18	151.200	9.072.000	30.240	1.814.400
Bba 6	30	22	184.800	11.088.000	36.960	2.217.600
Bba 5	40	30	252.000	15.120.000	50.400	3.024.000
Bba 8	40	30	252.000	15.120.000	50.400	3.024.000
Bba secc2	40	30	252.000	15.120.000	50.400	3.024.000
Bba secc4	50	37	310.800	18.648.000	62.160	3.729.600
Bba secc5	50	37	310.800	18.648.000	62.160	3.729.600
Bba molienda	75	56	470.400	28.224.000	94.080	5.644.800
TOTAL				175.392.000	584.640	35.078.400

El ahorro anual de energía que se obtiene es de 584.640 (Kwh.), que en dinero es \$ 35.078.400.

#### 5.4 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Usando herramientas de ingeniería económica, se determinara si el proyecto es conveniente realizarlo.

Se calcularan los indicadores VAN, TIR, PRK, del proyecto.

Se tiene una inversión de la instalación de los variadores de frecuencia para cada motor es de \$ 51.961.716, logrando con esto un ahorro de energía reflejado en la cuenta de la empresa de \$ 35.078.400 anuales, el proyecto tiene una duración de 2 años, y se considerara una TRMA=10%.

Esta la inversión inicial y el ahorro de energía que fueron calculados. También habría que considerar los ahorros por mantenimiento y reparaciones de las bombas y el aumento de producción, que provocaría la implementación VDF, esto no fue posible determinarlos por lo que la recuperación de inversión se hará solo con la inversión

inicial y los ahorros de energía, en el apéndice D se muestra el diagrama de flujo del proyecto.

#### 5.4.1 VAN: valor actualizado neto

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=0}^{j=N} \frac{F_j}{(1+i)^j}$$

El criterio de selección dice que si  $VAN > 0$  el proyecto es aceptable.

El desarrollo de este indicador consiste en llevar los flujos de ahorro de energía a valor presente.

$$\begin{aligned} VAN &= -\$51.961.716 + \$35.078.400 \left( \frac{P}{A}, 10\%, 2 \right) \\ VAN &= -\$51.961.716 + \frac{\$35.078.400}{(1+0.1)^1} + \frac{\$35.078.400}{(1+0.1)^2} \\ VAN &= -\$51.961.716 + \$31.889.455 + \$28.990.413 \\ VAN &= \$8.918.151 \end{aligned}$$

$VAN = \$ 8.918.151 > 0$  el proyecto es aceptable

#### 5.4.2 TIR: tasa interna de retorno.

$$TIR = \sum_{j=0}^{j=N} \frac{F_j}{(1+TIR)^j}$$

$$\begin{aligned} TIR &= -\$51.961.716 + \$35.078.400 \left( \frac{P}{A}, TIR, 2 \right) \\ TIR &= -\$51.961.716 + \frac{\$35.078.400}{(1+TIR)^1} + \frac{\$35.078.400}{(1+TIR)^2} = 0 \\ &=> TIR = 23\% > TRM \end{aligned}$$

Cuando la TIR es mayor que la TRMA, el retorno que obtendría el inversionista realizando la inversión es mayor que el pretendido inicialmente que es de un 10%.

### 5.4.3 PRK: periodo de recuperación de capital.

Es el número de periodos en que el VAN  $\rightarrow 0$

$$PRK = \sum_{j=0}^{j=T^*} \frac{F_j}{(1 + TRMA)^j}$$

Criterio de selección.

Si  $T^* < N$ , aceptado

Si  $T^* > N$ , rechazado

Si  $T^* = N$ , indiferente

$$PRK = -\$51.961.716 + \frac{\$35.078.400}{(1 + 0,1)^{T^*}} + \frac{\$35.078.400}{(1 + 0,1)^{T^*}} = 0$$

$$\Rightarrow PRK = 1,69$$

1 año corresponden a 12 meses y 0,69 años correspondes a (0,69x12=8,3 $\approx$  9 meses aproximadamente) por lo tanto la inversión se recuperaría en 21 meses.

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que con todos los antecedentes recopilados de los procesos de flotación y molienda de la mina, se pudo determinar cuáles eran las falencias del proceso, las cuales son:

Clasificación defectuosa en los ciclones de la sección de molienda.

Ineficiencia en proceso de traslado de material (caudal) por las bombas en la sección de flotación.

Se estudiaron tres posibles soluciones, la primera instalar un variador de frecuencia a los sistemas motor-bomba, la segunda instalar un partidador suave a los sistemas motor-bomba, y la tercera reemplazar los motores estándar por motores de alta eficiencia.

Se analizaron ventajas y desventajas de las tres soluciones estudiadas, aplicadas a los procesos de la sección de molienda y sección de flotación de la planta, siendo la solución instalar variador de frecuencia en los motores que accionan las bombas de la sección de flotación y molienda la que soluciona las problemáticas descritas anteriormente.

La implementación del variador de frecuencia va acompañada de un instrumento de medición, el sensor ultrasónico que será instalado en los acondicionadores (estanques), además de todos los suministros y montajes que se detallaron en el capítulo 5.

El primer aporte de la inclusión del variador de frecuencia es que podrá mejorar la clasificación en los ciclones de la sección de molienda, entregando la presión deseada para este proceso, esto implica un proceso más eficiente y un aumento en la producción de concentrado de cobre.

El segundo aporte es el ordenamiento que producirá la inclusión del variador de frecuencia sobre los caudales que se trasladan en la sección de flotación, pudiendo tener un control más acabado de los flujos que se están procesando con cifras más exactas y al mismo tiempo haciendo este proceso más eficiente.

Como consecuencia de lo anterior, al hacer un análisis de los caudales que procesan actualmente las bombas en su condición actual de funcionamiento, se determinó que la inclusión del variador de frecuencia permite manejar los mismos caudales pero con un consumo menor de energía respecto del actual, lo que se traduce en ahorros anuales de \$ 35.078.400 valor importante para la planta que se reflejara en la cuanta de consumo eléctrico.

La inversión requerida para realizar el proyecto es de \$51.961.716, la inversión se recupera al segundo año de su puesta en servicio.

**BIBLIOGRAFIA**

- [01] Jorge L. Medina Hanke, Accionamiento Eléctrico, Valparaiso, Ediciones Universitarios de Valparaiso, Pontificia Universidad Católica de Valparaiso.
- [02] Diagramas de procesos Planta Minera Las Cenizas, Rodrigo Labbe V.

**APÉNDICE A**  
**PARÁMETROS Y CURVAS CARACTERÍSTICAS MOTORES Y BOMBAS.**

**APÉNDICE B**  
**SELECCIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA**

**APÉNDICE C**  
**COTIZACIÓN SENSOR DE NIVEL**

**APÉNDICE D**  
**DIAGRAMA DE FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO**