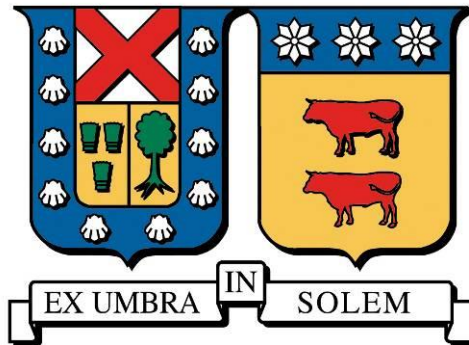


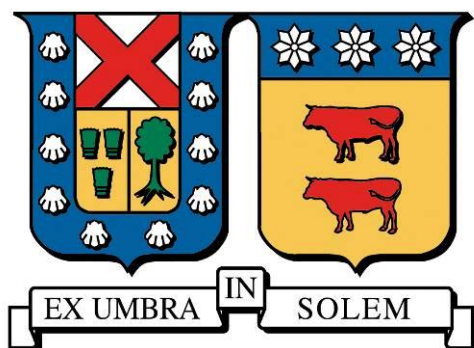


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y PROPUESTA
DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN
PROCESOS DE MINERÍA EN CHILE”**

Patricio Valenzuela Piñeiro
MAGISTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA

2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y PROPUESTA
DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN
PROCESOS DE MINERÍA EN CHILE”**

Tesina de grado presentada por

Patricio Valenzuela Piñeiro

como requisito parcial para optar al grado de

Magister en Economía Energética

Profesor Guía
MSc. Ing. Flavio Comunian

Profesor Co-referente
MBA. Ing. Elio Cuneo Hervieux

Profesor Co-referente Externo
MSc. Ing. Sergio Díaz

Agosto 2018

TÍTULO DE LA TESINA:

ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROCESOS DE MINERÍA EN CHILE.

AUTOR:

Patricio Valenzuela Piñeiro

TRABAJO DE TESINA, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Economía Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

MSc. Ing. Flavio Comunian

MBA, Ing. Elio Cuneo Hervieux

MSc, Ing. Sergio Díaz

Santiago, Chile. Julio de 2018

AGRADECIMIENTOS

Considerando que el desarrollo actual de esta tesina se vio posibilitado debido a toda mi historia anterior, agradezco a las personas, que de una u otra forma compartieron en mi vida y con su fundamental apoyo directa o indirectamente son parte de la persona que actualmente soy.

En especial, a mis abuelos el tata Segundo y la abuela María por acompañarme en todo momento, enseñarme a ver la vida de una manera equilibrada y sencilla y por los consejos, enseñanzas y experiencias de vida que jamás he olvidado, a mis padres Eleuterio y Patricia por su cariño, apoyo y por darme las herramientas para defenderme en la vida, a mi hermano Gonzalo por tantos buenos momentos juntos, a mi abuela materna María y a la tía Pilar.

A todos mis tíos y tías, primos y primas por los momentos compartidos.

A mis compañeros de colegio Mario, Yashin, Haquin y Eduardo por tantas aventuras juntos.

También agradezco a Patricio e Israel, con quien compartí en mi adolescencia.

A mis compañeros de universidad en especial a Mauricio, Francisca, Viviana y Angelina. A algunos jefes que han ayudado en mi formación profesional, como Jorge, José, Gonzalo y Luis.

A mi señora Alejandra, por su amor, apoyo, comprensión y paciencia en quien además reflejo el agradecimiento a toda su familia (Patricio, Gladys, Javier y Daniela).

Además, agradezco a mis compañeros del magister en especial a los que se han convertido en grandes amigos, Lorena, Cecilia, Roberto y Ricardo.

Finalmente, agradezco a mis profesores guía, Flavio y Elio quienes me han apoyado en este importante proceso.

En resumen, agradezco a todas aquellas personas que compartieron un poco de su vida conmigo y que en ese proceso ambas partes guardan recuerdos imborrables o siguen siendo parte activa en el día a día.

DEDICATORIA

A mi esposa Alejandra

Por su apoyo incondicional para realizar este MEE

Patricio Valenzuela Piñeiro

RESUMEN

La energía eléctrica es un insumo relevante para la producción de cobre, en Chile la producción de este mineral representa un porcentaje importante del producto interno bruto, por lo que las medidas que buscan mejorar la eficiencia de los procesos mineros, especialmente los relacionados a la conminución de mineral son muy importantes, sobre todo cuando los precios de venta del cobre se reducen y la industria busca maneras de mejorar su eficiencia y disminuir los costos.

En este contexto, esta tesina realiza un estudio estadístico de las variables más relevantes del proceso de conminución del mineral para las etapas de chancado, molienda SAG y transporte con correas con la finalidad de presentar medidas de eficiencia energética obtenidas del análisis de los datos. Para ello se toman los datos de tres años (2015, 2016 y 2017) del material procesado, la energía consumida y la granulometría de entrada al molino SAG, que serán tratadas diariamente y analizadas estadísticamente con el fin de obtener comportamientos que permitan identificar donde aplicar medidas efectivas para mejorar la eficiencia energética y el procesamiento de mineral. Una medida importante dentro del análisis será la obtención del KPI de eficiencia energética (kWh/TPD) para los procesos estudiados.

Finalmente, y considerando una evaluación del potencial de ahorro en energía eléctrica y mayor procesamiento del molino SAG, se concluye que la implementación de mejoras en la granulometría de entrada al molino SAG, mejoran la eficiencia del proceso y permiten capitalizar beneficios económicos anuales importantes, que justifican la implementación de las medidas propuestas en esta tesina.

Palabras clave: conminución, medidas de eficiencia energética, KPI, molino SAG, granulometría, procesos planta concentradora, energía eléctrica.

ABSTRACT

Electrical energy is a relevant input for copper production, in Chile the production of this mineral represents a significant percentage of the gross domestic product, so the measures that seek to improve the efficiency of the mining processes, especially Those related to mineral comminution are very important, especially when copper sales prices are reduced and the industry is looking for ways to improve their efficiency and lower costs.

In this context, this thesis performs a statistical study of the most relevant variables of the process of mineral comminution for the stages of crushing, grinding SAG and transport with belts in order to present energy efficiency measures Obtained from the analysis of the data. For this, the data of three years (2015.2016 and 2017) of the processed material, the consumed energy and the particle size of the SAG mill are taken, which will be treated daily and statistically analyzed in order to obtain behaviors that allow Identify where to apply effective measures to improve energy efficiency and mineral processing. An important measure within the analysis will be the obtention of the Energy efficiency KPI (KWH/TPD) for the processes studied.

Finally, and considering an evaluation of the potential of energy saving and greater processing of the SAG mill, it is concluded that the implementation of improvements in the particle size of the SAG mill, improve the efficiency of the process and allow to capitalize on important annual economic benefits, which justify the implementation of the measures proposed in this thesis.

Key words: comminution, energy efficiency measures, KPI, SAG mill, particle size, concentrator plant processes, electric energy.

GLOSARIO

Cu	: Cobre
USD cent	: Centavos de dólar
kWh	: Kilo Watt hora
SAG	: Semi-Autógeno
T	: Toneladas
TPD	: Toneladas por día
Tmf	: Toneladas métricas de fino
TM	: Toneladas métricas
USD	: Dólar
KTM	: Kilo toneladas métricas
KTMF	: Kilo toneladas métricas finas
SX/EW	: Extracción por solventes y Electro Obtención
LX	: Lixiviación
KPI	: Indicador clave de rendimiento
mm	: Milímetro
t/h	: Toneladas por hora
AChEE	: Agencia Chilena de Eficiencia energética
LGSE	: Ley General de Servicio Eléctricos
HPGR	: Rodillos de molienda de alta presión
Lb	: Libra

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	5
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. PROCESOS EN MINERÍA DEL COBRE	15
2.1.1. PROCESOS DE CHANCADO TRANSPORTE Y MOLIENDA.....	16
2.1.2. CHANCADO	17
2.1.3. MOLIENDA	18
2.1.4. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LA MOLIENDA.....	21
2.1.5. TRANSPORTE.....	22
2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MINERÍA.....	24
2.2.1. HISTORIA DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA EN MINERÍA A NIVEL INTERNACIONAL	24
2.2.2. HISTORIA DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA EN MINERÍA A NIVEL NACIONAL.....	26
2.2.3. INICIATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MINERÍA.....	28
3. OBJETIVOS	41
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	41
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
4. METODOLOGIA	42
4.1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	42
4.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS	43
4.2.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS	44
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
5.1. MOLIENDA SAG.....	48
5.2. CHANCADO	61
5.3. TRANSPORTE EN CORREAS	64
6. PROPUESTAS DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	67
6.1. PROPUESTAS.....	67
6.1.1. MEDIDAS PARA EL TRANSPORTE Y CHANCADO	67
6.1.2. MEDIDAS PARA LA MOLIENDA SAG	67

6.2.	AHORROS ESTIMADOS	69
7.	DISCUSIÓN.....	78
8.	CONCLUSIONES.....	82
9.	BIBLIOGRAFÍA	84
10.	ANEXOS	89
10.1.	ANEXO 1. DATOS TÉCNICOS MOLINO SAG.....	89

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la producción de cobre refinado para el año 2015 fue de 22.967,7 KTM [1]. En Chile, la actividad minera representa un sector altamente competitivo y de producción internacional, que para el caso de la producción de cobre llegó a un valor de 5.552,6 KTMF [2] en el año 2016. Además, representa una proporción relevante del producto interno bruto del país, de casi 10% para el año 2014. Esto es un primer indicio de la cantidad de cobre producida para el mundo y de la destacable participación que posee Chile en este mercado y la importancia del aporte de esta industria para el estado chileno. Aun considerando los ciclos naturales de altos y bajos precios del cobre se espera que esta condición se mantenga, debido a que Chile posee aproximadamente el 30% de las reservas mundiales [3] y existe una demanda sostenida de este mineral impulsada actualmente por la revolución de la electromovilidad. Para el año 2015, el consumo de energía eléctrica en el sector de minería fue de un 34% respecto al consumo nacional (ver figura 1), lo que corresponde al mayor porcentaje, según separación de sectores relevantes de la economía [4]. Adicionalmente, si consideramos procesos específicos dentro de la minería, se reportó que para el año 2013 las plantas concentradoras representaron el 48,6% del total de energía consumida por la industria minera del cobre [5], lo que en primera instancia indica que es un punto de partida para analizar temas de consumo energético, ya que se focalizan los esfuerzos del estudio en áreas intensivas en consumo.

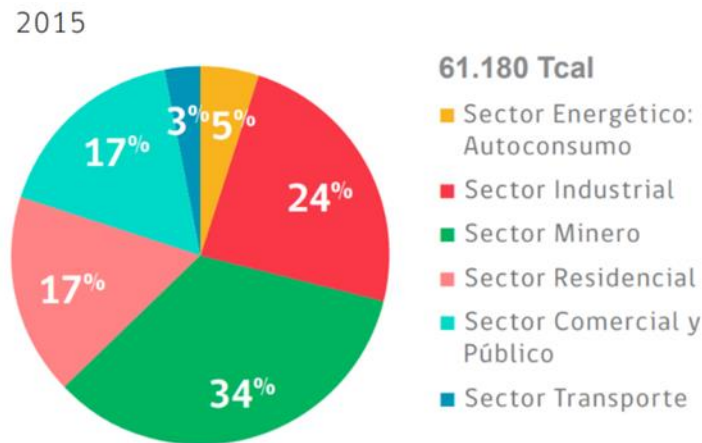


Figura 1. Consumo de energía eléctrica por sector. Fuente:

http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Reportes/Minenergia/Reporte%20BNE%202015.pdf

En este contexto, todo lo relacionado a la energía eléctrica utilizada para los distintos procesos mineros se vuelve relevante y se puede introducir y trabajar en el concepto de eficiencia energética y la gestión de la energía, que se vuelven vitales para el proceso minero [6]. Según documento de la comisión Chilena del Cobre titulado Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería DE /012/2014 define Eficiencia Energética (EE) como “el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos. Consecuentemente, la eficiencia energética se mide a través de indicadores que, a su vez, miden la variación de consumos unitarios de energía en el tiempo”. Así el aplicar medidas de eficiencia energética en procesos de planta concentradora reduciría el consumo de energía eléctrica, con el consecuente ahorro de costos [7].

El consumo de energía eléctrica representa aproximadamente el 11% del costo C1 (Cash Cost, que incluye costo mina más costo planta más gastos generales más gastos de venta, incluyendo cargos de tratamiento y refinación más costos de transporte y comercialización [8]) de una faena minera, por lo que posee un potencial de ahorro económico importante si se realiza gestión de la energía aplicando conceptos de eficiencia energética. Dentro de los mayores consumos

eléctricos destacan las plantas concentradoras de mineral (ver figura 2). Por ejemplo, en una faena de gran minería que llega hasta la obtención de concentrado de cobre, el consumo en energía eléctrica es cercano al 75% en relación con el consumo total de la faena.

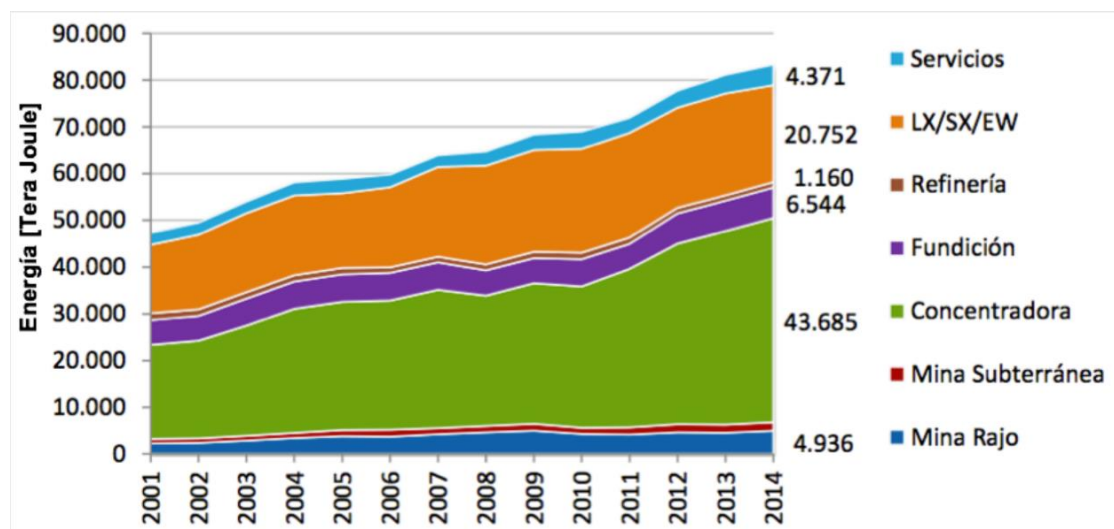


Figura 2. Consumo energético base a electricidad por proceso minero.

Fuente: Comisión Chilena del cobre, «Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2014,» Chile, 2015.

Al considerar la premisa actual de la gran minería en Chile de reducir los costos operativos a través de distintas medidas, el desafío de realizar eficiencia energética sobre el consumo eléctrico posee gran potencial y es bien recibido en estos momentos por la industria minera [9]. Además, es de vital importancia para mantener la competitividad de este tipo de empresas en un entorno global [10]. Por lo tanto, disminuir el consumo de energía eléctrica en procesos de planta al aplicar medidas de eficiencia energética para optimizar el proceso y reducir los costos es un desafío interesante de analizar.

Otro dato relevante de mencionar son los consumos promedios proyectados de las plantas concentradoras de cobre en Chile, representados en la siguiente tabla.

Tabla 1. Proyección de consumos unitarios de electricidad por procesos 2017-2028.

Proceso	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Mina Rajo KWh/ TMF Cu	191	192	193	194	196	197	197	198	199	200	201	202
Mina Subterránea KWh/ TMF Cu	632	639	646	652	659	664	670	675	681	686	690	695
Concentradora KWh/TM min. Proce.	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	23	23
Fundición KWh/TM Conc. Proce.	332	332	332	333	333	333	333	333	333	333	333	333
Refinería KWh/ TMF Cu	364	365	365	366	366	367	367	368	368	368	369	369

Fuente: Cochilco, 2017

Para el caso de estudio de una faena de la gran minería del cobre de la zona central del país, se tiene que los valores del consumo unitario de electricidad en relación con las toneladas procesadas de la planta concentradora tienen un valor promedio cercano a 23 kWh/TM, por lo que se observa un valor superior al promedio nacional, lo que justifica un análisis en mayor profundidad.

Por todo lo anteriormente señalado, se justifica la importancia de realizar el análisis de consumos de energía eléctrica para procesos de la planta concentradora, en relación a las toneladas de cobre fino producidas, en donde se posee data de 3 años de producción de una faena de la gran minería del cobre de la zona central, en las distintas unidades de proceso, para la obtención de KPI's y posterior análisis estadístico que permitirá identificar puntos del proceso relevantes y en conjunto con la investigación proponer medidas de eficiencia energética para ser implementadas, tanto generales, como específicas desprendidas del análisis estadístico realizado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PROCESOS EN MINERÍA DEL COBRE

Los procesos mineros se clasifican en mina rajo, mina subterránea, planta concentradora, LxSxEw, fundición, refinería, servicios [11], ver Figura 3.

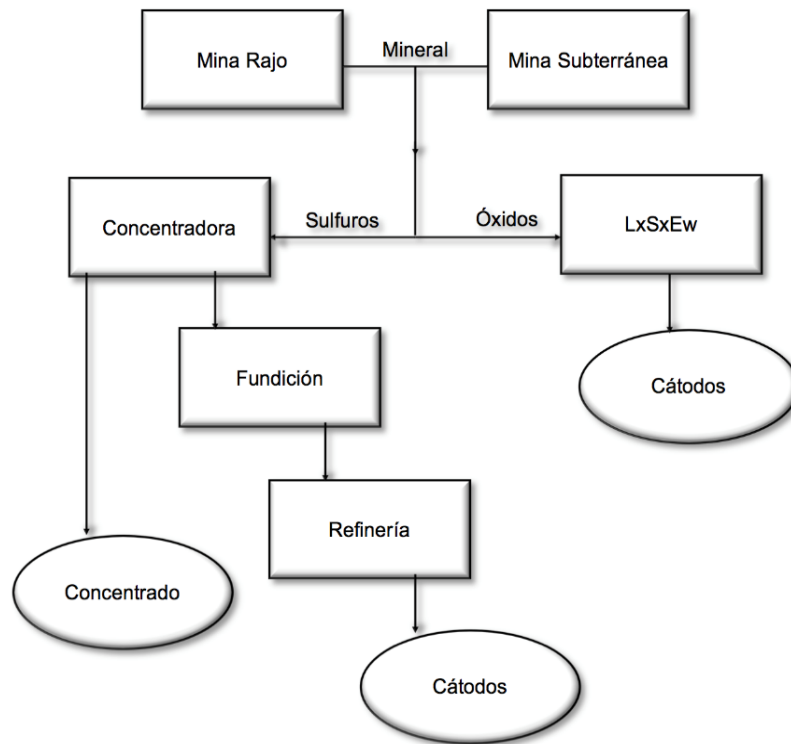


Figura 3. Diagrama de flujo de procesos en una minera de cobre.

Fuente: Cabezas Reynaldo. Manual de eficiencia energética para minería. Tesis (Ing. Civil Mecánica). Santiago, Universidad de Chile, 2016.

Mina rajo: Comprende la sumatoria de procesos necesarios para la extracción del mineral desde una faena minera a cielo abierto, en donde posteriormente se realiza el procesamiento y recuperación del mineral. Los principales procesos de esta etapa son: perforación, tronadura, transporte, carguío y chancado primario.

Mina subterránea: Comprende la sumatoria de procesos necesarios para la extracción de mineral desde una faena minera subterránea (a través de túneles y piques), utilizando cualquier método de explotación subterráneo, en donde posteriormente se realiza el procesamiento y recuperación del mineral. Los principales procesos son: perforación y tronadura, transporte, carguío y chancado primario.

Planta Concentradora: Comprende los procesos involucrados en la producción de concentrado de cobre, que se encuentran después del chancado primario. Los procesos principales son: chancado, molienda convencional, molienda SAG, concentración (a través de procesos de flotación) y filtrado.

LxSxEw: Son los procesos hidrometalúrgicos comprendidos en la producción de cátodos de cobre. Los principales procesos son: aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electro obtención.

Fundición: Son los procesos involucrados en la producción de cobre blíster considerando como insumo el concentrado de cobre. Los principales procesos son: secado, fusión (hornos), conversión y piro-refinación.

Refinería: Es el proceso físico de electrólisis en donde se obtienen cátodos de cobre de alta pureza.

2.1.1. PROCESOS DE CHANCADO TRANSPORTE Y MOLIENDA

En la gran minería del cobre existen procesos mayoritariamente intensivos en el uso de energía eléctrica, entre esos procesos se pueden destacar los relacionados a las plantas de concentración de mineral. De esta etapa se tomarán algunos procesos y se realizará una reseña. Los procesos por revisar son: chancado, transporte y molienda.

2.1.2. CHANCADO

En el esquema general del proceso, el mineral proveniente de la mina rajo y la subterránea debe ser disminuido de tamaño. El chancado es el proceso mediante el cual se disminuye el tamaño de las rocas mineralizadas triturándolas en equipos llamados chancadores y molinos. El material extraído pasa por chancador primario, secundario y terciario, hasta llegar a tamaños de menos de ½ pulgada [12].

El proceso de chancado se realiza en dos grandes etapas, las cuales requieren de equipos específicos para lograr la granulometría adecuada:

- Chancado primario o grueso.
- Chancado fino: proceso que comprende las etapas de chancado secundario, terciario y cuaternario.

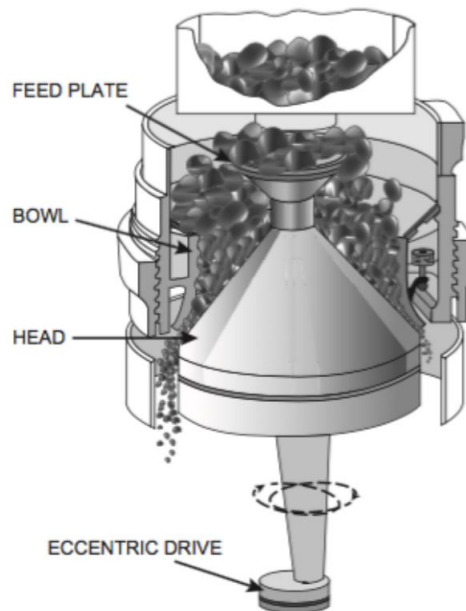


Figura 4. Chancador de Cono.

Fuente: M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole y W. G. Davenport, *Extractive Metallurgy of Copper*, 5th edición ed., Elsevier, 2011.

2.1.3. MOLIENDA

Proceso mediante el cual se reduce el tamaño del material mineralizado a menos de 0,2 milímetros, de manera que sea adecuado para la flotación. Al material mineralizado que viene de la planta de chancado se le agrega agua y algunos reactivos, y se lleva a los molinos de barra y de bolas. Los molinos giran y las barras o bolas muelen el material [13].

El objetivo del proceso de molienda es la reducción del tamaño de las partículas provenientes desde el proceso de chancado, con la finalidad de producir un tamaño de partícula que permita la liberación de las especies de interés en partículas individuales, las cuales pueden ser recuperadas en el proceso de flotación [14].

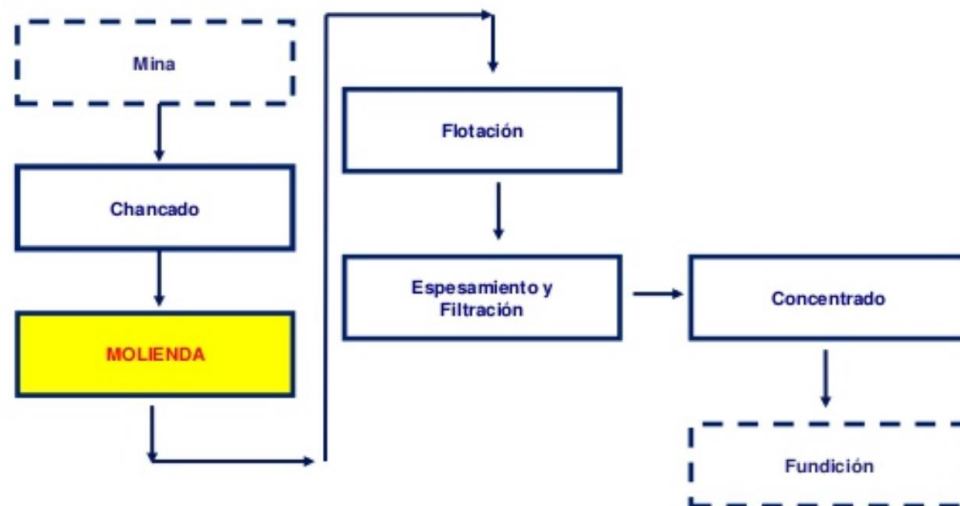


Figura 5. Molienda dentro de esquema minero. Fuente: Arriagada, 2013.

<https://es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633>

La molienda se realiza utilizando grandes equipos giratorios o molinos de forma cilíndrica, en dos formas diferentes: molienda convencional o molienda SAG (molienda semiautógena).

En esta etapa, al material mineralizado se le agrega agua en cantidades suficientes para formar un fluido lechoso y los reactivos necesarios para realizar el proceso siguiente de flotación. Los tipos de moliendas más utilizados son la molienda Convencional y la SAG.

La molienda se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como “medios de molienda”, los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminución de las partículas.

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 - 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación.

Es importante destacar que una buena molienda es vital para el buen desarrollo de la etapa de flotación y que, además, es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral.

Estructuralmente los molinos poseen un casco cilíndrico, con revestimientos y una carga de medios de molienda (bolas o barras). El tambor es soportado en soportes fijos a las paredes laterales de modo que puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena.

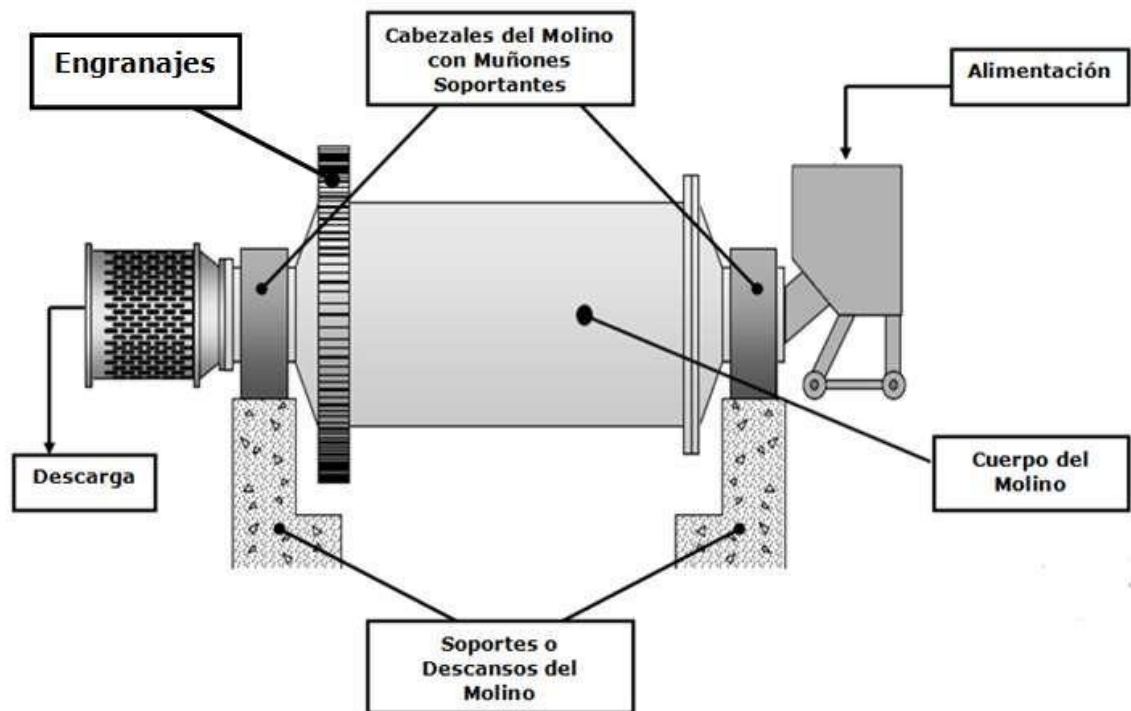


Figura 6. Esquema de las partes de un molino de bolas. Fuente: Arriagada, 2013.

<https://es.slideshare.net/miquelangelarriagada/molienda-24994633>

Los molinos SAG (Semi autógenos) tienen dimensiones mayores que los molinos convencionales, además son más eficientes que los molinos de barras. Considerando su elevada capacidad de procesamiento y eficiencia, disminuyen el proceso de chancado y molienda.

La denominación SAG es un acrónimo para “semiautogenous grinding mill” que significa molino semiautógeno de molienda. El término “autógeno” se refiere a que todo el proceso de molienda se realiza por el contacto entre sí del mineral.

En los molinos autógenos no existen bolas de molienda de acero, la disminución del tamaño del mineral se logra con las mismas partículas existentes. En los molinos semiautógenos una porción de la molienda es autógena y otra es realizada por las bolas de molienda (generalmente de acero); de ahí el término “semiautógeno”.



Figura 7. Imagen molino SAG (semiautógeno). Fuente:

<https://procesaminerales.blogspot.com/2012/09/molinos-autogenos-y-semiautogenos.html>

2.1.4. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LA MOLIENDA

La densidad de la pulpa de alimentación debería ser lo más alta posible, pero garantizando un flujo fácil a través del molino. Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena para minimizar el contacto metal-metal; una pulpa demasiado diluida aumenta este tipo de contacto, aumentando el consumo de acero y disminuyendo la eficiencia. El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65 a 80% de sólidos en peso, dependiendo de la mena. La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor.

La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Luego las bolas deberían ser lo más pequeñas posible y la carga debería ser distribuida de modo tal que las bolas más grandes sean justo lo suficientemente pesadas para moler la partícula más grande y más dura de la alimentación.

Una carga balanceada consistirá en un amplio rango de tamaños de bolas y las bolas nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido. Las bolas muy pequeñas dejan el molino junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros.

Alta relevancia posee el volumen y la manera en que se carga el molino semiautógeno. Este volumen se expresa como una fracción del volumen total del molino y puede variar entre 4% y 14%, siendo el valor más usado un 8%. El uso de las bolas eleva la densidad media de la carga y hace que la potencia demandada por el molino sea mayor.

2.1.5. TRANSPORTE

El transporte consiste en el traslado de material mineralizado y/o estéril desde el yacimiento hacia los posibles destinos, ya sea el chancado, stock de mineral o botaderos de estéril. El transporte se realiza a través de camiones mineros de gran tonelaje, lo que usualmente se observa en las minas a rajo abierto, también es muy utilizado entre procesos adyacentes el transporte (Figura 5) por medio de cintas transportadoras [15].



Figura 8. Cinta transportadora.

Fuente: AChEE, 2015. <https://www.acee.cl/achee-lanza-tres-nuevas-guias-de-medicion-y-verificacion-en-la-gestion-de-proyectos-de-eficiencia-energetica/>.

Las cintas transportadoras constituyen un método continuo y económico de transporte de grandes volúmenes de material, son ampliamente utilizadas y cada vez incorporan nuevos sistemas para hacer más eficiente su funcionamiento.

A continuación, se presentarán las ventajas y desventajas de las cintas transportadoras:

Ventajas:

El costo de mantención y operación es menor comparado con los camiones, y requiere menos mano de obra menor y menos especializada.

La capacidad de transporte de una cinta no depende de la distancia. La cinta transportadora permite reducir las longitudes de transporte, ya que frente a una inclinación media remontable del 33% para las cintas, los camiones no superan el 10%.

Las cintas tienen mayor eficiencia energética, del orden del 75% frente al 45% de los camiones. Esta diferencia se acentúa aún más al aumentar el desnivel en el perfil de transporte.

La capacidad de transporte de una cinta es independiente de la distancia.

La vida operativa de las cintas es mayor que la de los camiones.

El costo de construcción y mantención de las pistas disminuye por su menor ancho, longitud e intensidad de circulación.

Se mejoran las condiciones ambientales debido a la menos emisión de polvo. Debido a que el proceso productivo puede ser racionalizado y automatizado, facilita su supervisión.

El sistema de transporte por cinta es válido considerando pequeñas capacidades (300 t/h) hasta grandes niveles de producción (sobre las 25.000 t/h).

Desventajas:

Exige mayores inversiones iniciales, las que deben considerarse al momento de evaluar el proyecto.

Permite poca versatilidad para aumentar o modificar la producción, por lo que necesita una planificación más detallada.

2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MINERÍA

Para que los procesos anteriormente descritos, chancado, transporte y molienda, cumplan sus respectivas funciones, es necesario un alto consumo de energía, y las principales fuentes de energía son la electricidad y los combustibles fósiles [15].

La eficiencia energética es la optimización de la relación entre los productos o servicios finales obtenidos y la cantidad de energía utilizada en su producción [15]. En la minería, la eficiencia energética se define como la relación entre el trabajo útil realizado y la entrada de energía. El trabajo útil realizado generalmente se identifica por la cantidad de producto obtenido, es decir, por la cantidad de tonelaje de roca y/o gramos del metal [16,17]. Las ganancias de eficiencia energética pueden ser el resultado de la disminución del consumo de energía por unidad de producción o el aumento de la producción por unidad de consumo de energía [18].

2.2.1. HISTORIA DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA EN MINERÍA A NIVEL INTERNACIONAL

Desde principio de los años setenta, han surgido publicaciones, regulaciones, comités y directrices importantes relacionados con la gestión y la conservación de la energía. En 1973 surgió la primera publicación sobre la gestión energética en el sector minero, la cual coincidió con el alza del precio del crudo. En 1975, se formó el Programa de la Industria Canadiense para la Energía y la Conservación (CIPEC) y el Battelle Columbus Laboratory, patrocinado por el United States Bureau of Mines, publicaron los siguientes estudios, "Patrones de uso de energía en el procesamiento de minerales metalúrgicos y no metálicos" (Battelle Columbus Laboratories, 1975) y "Evaluación del potencial teórico para la conservación de la energía en siete industrias básicas". Posteriormente, a medida que los precios del petróleo crudo disminuyeron, el enfoque en la energía

continuó con publicaciones que describieron los esfuerzos para utilizar de manera más eficiente la energía disponible [18].

De 1985 a 1989, el Departamento de Energía, Minas y Recursos de Canadá publicó una serie de manuales de gestión energética para ayudar a las organizaciones a identificar medidas de conservación de energía en áreas que incluyeron: iluminación, hornos de proceso y secadoras, contabilidad de energía y controles automáticos. En 1989, se llevó a cabo un seminario titulado "Tecnologías Eficientes en Energía en la Industria Minera y Mecánica", destacando la industria y los proyectos de investigación y desarrollo que fueron cofinanciados por el Gobierno Provincial de Ontario a través del Ministerio de Energía. Los documentos publicados en el procedimiento incluyeron, entre otros: recuperación de calor del agua residual de minas en LAC Minerals, desarrollo del camión eléctrico Kiruna en Kidd Mine y uso de energía de minas desde la perspectiva del superintendente de minas de Inco Limited.

Durante la década de 1990, aumentó la atención sobre la eficiencia energética con la Ley de Eficiencia Energética en 1992, que se convirtió en el Reglamento de Eficiencia Energética en 1995 (modificado en 2004). El objetivo de esas reglamentaciones fue proporcionar niveles mínimos de rendimiento energético para una gama de productos que consumen energía comprados en Canadá, así como dictar la inclusión de etiquetas que indican el consumo de energía anual estimado de algunos productos en el mercado. En 1993, Natural Resources Canada publicó un estudio titulado "Oportunidades de I + D de Eficiencia Energética en el Sector de Minería y Metalurgia", y se creó el Centro Canadiense de Datos y Análisis de Uso Industrial de Energía. La formación del grupo de trabajo de energía de la Asociación Minera de Ontario (OMA) en 1994 se convirtió en un comité permanente en el año 2000 [19]. La Asociación Minera de Canadá (MAC) lanzó la Iniciativa de Minería de Whitehorse en 1994, que finalmente se convirtió en la iniciativa Towards Sustainable Mining de la asociación en 2004 [20].

Desde el año 2000 aumentaron las iniciativas de sostenibilidad con el desarrollo de directrices de informes por parte de varias organizaciones como el Pacto Mundial de las Naciones Unidas, Global Reporting Initiative (GRI) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), con el objetivo de aumentar la transparencia corporativa con respecto a los impactos económicos, ambientales y sociales.

En 2006, el gobierno australiano lanzó el Programa de Oportunidades de Eficiencia Energética. Las medidas de conservación de energía para la industria minera se compilan en una base de datos a la que se puede acceder a través de Internet. En 2007, el Departamento de Energía de EE. UU. publicó "Estudio de ancho de banda de energía de la industria minera" que estimaba el ahorro potencial de energía para la industria minera de los EE.UU. El Programa de Tasas de Electricidad Industrial del Norte (NIERP), creado en 2010 y administrado por el Gobierno de Ontario, promueve la gestión energética ofreciendo reembolso a las tarifas de electricidad a los grandes usuarios industriales del norte de Ontario que prepararon un plan de gestión energética [18].

2.2.2. HISTORIA DE LA GESTIÓN ENERGÉTICA EN MINERÍA A NIVEL NACIONAL

En el año 1982, con la promulgación de la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE), Chile creó las bases de un sistema eléctrico de carácter competitivo, pionero a nivel internacional. Los cambios a la LGSE, oficializados en marzo de 2004 mediante la Ley 19.940, modificaron un conjunto de aspectos del mercado eléctrico que afectó a todos los medios de generación, introduciendo elementos aplicables a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) [21].

En el año 2005 la Comisión Nacional de Energía (CNE) creó el Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) con el objetivo de consolidar el uso eficiente como una fuente de energía, contribuyendo así al desarrollo energético sustentable de Chile, e instalando a la eficiencia energética como uno de los

pilares de la política energética nacional y como un tema importante en el uso de la energía. Una de las funciones del PPEE fue establecer las bases institucionales y el marco regulatorio para la Eficiencia Energética en Chile [22]. Sin embargo, el principal objetivo del PPEE es aumentar la Eficiencia Energética en los principales sectores de consumo del país, mediante la generación de cambios de hábitos y tecnologías que impliquen ahorro energético. El ámbito de acción del programa es nacional y atiende, por lo tanto, a todas las regiones del país. Su componente en minería es brindar apoyo a través de: 1) la facilitación de intercambio tecnológico y trabajo asociativo en la Gran Minería (36% del consumo de energía eléctrica del país). 2) Catastro, difusión y evaluación de tecnologías nuevas. 3) Diseño de propuestas de regulación de empresas que sean grandes consumidores de energía [23].

En febrero del año 2010 se creó el Ministerio de Energía. La autoridad política dividió las funciones de regulación y ejecución de las actividades en eficiencia energética, a través de la creación de: 1) La División de Eficiencia Energética (Febrero 2010). 2) La Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) (Noviembre 2010). Luego, en el año 2011 se realizó la Primera Expo Eficiencia Energética, lo que marcó el hito de creación de la AChEE, como la institución que reemplazó el Programa País de Eficiencia Energética. El evento fue pionero en Chile y Latinoamérica y se presentaron las principales innovaciones en Eficiencia Energética, con el objeto de crear consciencia sobre la necesidad del buen uso y consumo de energía en el hogar y la producción industrial. Al año siguiente, se realizó la Segunda Expo Eficiencia Energética, donde se centró en crear conciencia y cultivar una cultura de Eficiencia Energética en Chile. En ese mismo año, se publicó la norma ISO 50001, Energy Management Systems, que estableció los requisitos que debe tener un sistema de gestión de la energía en una organización para ayudarla a mejorar su desempeño energético, aumentar su eficiencia energética y reducir los impactos ambientales, así como a incrementar sus ventajas competitivas dentro de los mercados en los que participan, todo esto sin sacrificio de la productividad. Esta norma fue publicada

oficialmente el 15 de junio de 2011 por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y fue elaborada por un comité de expertos de más de cuarenta países, incluyendo Chile. Los esfuerzos y desarrollos en eficiencia energética realizados anteriormente, más las iniciativas y el trabajo del ministerio de energía y otras instituciones relacionadas culminaron con el ingreso del proyecto de ley de eficiencia energética que fue presentado al congreso en diciembre del 2017, la iniciativa ingresó a la Comisión de Minería y Energía del Senado, a partir de moción parlamentaria [24]. Se espera que con esta ley se entregue un marco regulatorio de eficiencia energética enfocado principalmente en los grandes consumidores de energía.

2.2.3. INICIATIVAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MINERÍA

Actualmente, para muchas minas la gestión de la energía es un indicador clave de rendimiento y se informa anualmente en reportes de sustentabilidad. En la literatura se han reportado iniciativas de eficiencia energética que abarcan diferentes aspectos de la minería. La mayoría de estas iniciativas se han centrado en la gestión de la demanda, para reducir el consumo y los costos de electricidad. En la tabla 2 se observan las diferentes iniciativas de eficiencia energética que se han realizado en el sector minero [7].

Tabla 2. Iniciativas de eficiencia energética en minería.

Tipo	Iniciativas de eficiencia energética
Política	Evaluar el impacto de la política gubernamental en el sector minero.
Recursos energéticos	Minas subterráneas cerradas como fuentes geotérmicas de baja temperatura. Generación híbrida / renovable para alimentar minas activas.

Actividades de apoyo	Gestionar la demanda de electricidad optimizando la ventilación y la refrigeración de los sistemas mineros.
Tratamiento	Eficiencia de energía en la etapa de molienda. Eficiencia de energía en la etapa de transporte. Optimización de sistemas integrados (de mina a fábrica).
Minería	Iniciativas centradas en mejores equipos de minería (por ejemplo, sistemas de accionamiento). Automatización y control. Mejor entendimiento del efecto de las condiciones de operación. Mejor entendimiento de la participación del operador. Modelos de consumo de energía y evaluación del cambio climático.

Fuente: Modificado de Awuah-Offei, 2016.

A. POLÍTICAS DE GOBIERNO

Las medidas de eficiencia energética en minería están influenciadas de manera contraindicatoria por las políticas de gobierno de cada país. Es decir, una política gubernamental puede alentar a la minería a invertir en proyectos de eficiencia energética o privar a la minería del financiamiento para aplicar las medidas necesarias [25]. A pesar de esto, generalmente las políticas gubernamentales para lograr eficiencia energética se basan en la combinación de nuevos impuestos e incentivos fiscales. Otro punto clave en las políticas gubernamentales es si la demanda de electricidad en el sector minero es sensible a los precios de la electricidad. Al respecto, [26] reportaron que la demanda de electricidad en el sector minero sudafricano no es elástica. Sin duda, una forma que los gobiernos pueden aportar en la aplicación de medidas de eficiencia energética en minería es con el financiamiento público de investigación y desarrollo en estos temas [25]. En este sentido, el Programa de Tecnologías

Industriales del Departamento de Energía de Estados Unidos. (US DOE) en el año 2009, informó un ahorro de energía acumulada de 12.9 [PJ] de tres tecnologías de ahorro de energía para el sector de la minería financiado por el programa [27].

B. RECURSOS ENERGÉTICOS

Se ha reportado que se puede mejorar los impactos asociados con el uso de energía en la minería, si las minas usan más energía de fuentes renovables [28]. Las dos tendencias generales en la literatura reciente son: (i) el uso de minas subterráneas como recursos geotérmicos de baja temperatura [29,30]; e (ii) incorporar energía renovable generada en el sitio [31,32]. Carvalho et al. (2014) muestran que los sistemas híbridos, que incluyen fuentes de energía renovables, son óptimos en los casos en que la energía de la red y otras infraestructuras de energía (por ejemplo, las rutas de transporte del diesel) no están disponibles o su costo es prohibitivo.

C. ACTIVIDADES DE APOYO

Las diferentes actividades en una mina a lo largo del día conducen a diversos requisitos de flujo de aire para el sistema de ventilación. En vista de esto, se introduce ventilación a demanda (VOD); que implica suministrar la cantidad de aire de ventilación según se requiera en un lugar y tiempo específicos. Para realizar VOD, las velocidades de los ventiladores en la red de ventilación deben ajustarse en consecuencia para ahorrar energía y costos. Al respecto [35] Chatterjee et al., 2015 construyeron un modelo de optimización que conducen a un costo de energía mínimo.

D. TRATAMIENTO. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS PROCESOS DE TRITURACIÓN: MOLIENDA Y CHANCADO.

La trituración (molienda y chancado) es un proceso que reduce el tamaño de la roca y generalmente es el mayor consumidor de energía en una mina. La energía de trituración incluye toda la energía que se consume directamente en la reducción de tamaño de la roca, así como la energía consumida en la fabricación de los insumos de trituración [34]. Estimar el consumo de energía de trituración como una proporción del consumo total de una mina es difícil de lograr con precisión. Esto se debe a la falta de datos publicados y la incoherencia en cómo se calcula o expresa el consumo total de energía en los sitios mineros. Sin embargo, se ha determinado que el proceso de trituración consume un 4% de la energía global y un 50% del total del consumo de energía en minería de cobre y oro [35].

En los procesos de trituración la eficiencia energética es baja [5] y generalmente el diseño de las plantas procesadoras y operación son realizados con una eficiencia energética inferior a la óptima [34]. Los factores clave que contribuyen a la baja eficiencia energética en las operaciones de procesamiento de minerales existentes se encuentran en la tabla 3. Además, la variabilidad entre la dureza y el tamaño del mineral generan ineficiencia en el proceso. El rendimiento del producto refinado se basa en la potencia disponible. El KPI de consumo de energía se describe por [kWh / tonelada de material procesado] y el rendimiento del material se describe como t / h (toneladas / hora) [5]. El promedio de consumo de energía para una mina es aproximadamente de 6.700 [kWh/kton] [5].

Tabla 3. Factores que contribuyen a la baja eficiencia energética en los procesos de trituración.

Factores contribuyentes a la baja eficiencia energética en trituración
Altos costos de infraestructura.
Falta de personal calificado, lo que conduce a una limitada comprensión de la naturaleza del problema de la eficiencia y una reducida capacidad para encontrar soluciones.
Centrarse en maximizar la capacidad de producción y de rendimiento.
Estructuras y métricas de trabajo inconsistentes en una organización.
La negación a adoptar nuevas tecnologías.
Falta de intercambio de información, a menudo relacionado con la protección IP.
Falta de enfoque operacional y de financiación en muchas actividades de I+D.
En la valoración de proyectos se ocupan métricas como el VAN que no necesariamente reflejan el proyecto más competitivo y algunas veces se prioriza el CAPEX sobre OPEX.
Las estrategias de eficiencia energética no cuentan con el apoyo de la administración superior.

Fuente: CEEC, 2012. The CEEC roadmap for eco-efficient comminution. CEEC, August.
<http://www.ceecthefuture.org/publication/2012-ceec-roadmap/>

Los tipos de molienda a utilizar en el proceso de trituración dependen del tamaño de la roca. Si el tamaño de la roca es menor, el tamaño de la molienda también

debe disminuir, pero su velocidad debe aumentar para generar suficiente energía para la rotura de la roca en partículas pequeñas. Por lo tanto, la eficiencia del molino (kW / m³), está definida por el tipo y tamaño de la molienda utilizada [5].

Actualmente, estimar la verdadera eficiencia energética de la trituración es un problema. Una cifra comúnmente citada para la eficiencia en términos de la energía libre de nueva superficie producida es del 1 al 3% ([36] basados principalmente en estudios de cuarzo). Sin embargo, Schoenert (1972) demostró que la forma más eficiente de fracturar una roca en una trituración mecánica es cargarla entre dos placas hasta que se rompa por la tensión generada. En estos términos, una trituradora podría tener un 75% de eficiencia energética [37] y un molino de bolas un 15% de eficiencia [36] para producir la misma distribución de tamaño que la rotura de partículas individuales [35]. Si no se mejora la eficiencia energética en la etapa de trituración, aumentará la exposición al aumento de los costos de la energía resultante del aumento de los costos de producción, a la reducción de la seguridad del suministro de energía y a un impacto negativo en la licencia para operar.

Los beneficios de mejorar la eficiencia energética en las operaciones de procesamiento incluyen:

- Un beneficio inmediato en el OPEX, a través del ahorro de costos de energía, lo que lleva a una mayor rentabilidad.
- Capacidad mejorada para administrar minerales más complejos, de menor grado o difíciles, expandiendo así los recursos minerales.
- Reducción de las emisiones de carbono, huella energética y potencial para reducir el uso de agua.
- Mejores relaciones con la comunidad a partir de la reducción de la huella hídrica y energética, mejorando la licencia para operar.
- Mejora de la seguridad del suministro de energía.
- Reducción de la generación de residuos finos.

- Menor exposición a mayores costos de energía o menor seguridad de suministro.

Una forma de alentar a las corporaciones mineras a apoyar las estrategias de eficiencia energética es basarse en las futuras recompensas, estas son:

- Reducción de los costos de procesamiento.
- Utilización más efectiva del recurso mineral finito.
- Cambio en el liderazgo tecnológico y empresarial.
- Atracción de un mejor personal.

Es conocido que, de todos los procesos en minería, la trituración, es ineficiente desde el punto de vista energético [38,39]. Por lo tanto, también se han realizado modelos para entender la energía específica, la realización de estudios de referencia o la proposición de alternativas más eficientes [40,41,42,38,39]. Se han reportado posibles acciones para reducir la energía utilizada en los procesos de trituración. Las acciones propuestas son a corto y a largo plazo, y se relacionan con el desarrollo de nuevas técnicas, el personal idóneo y la planificación [34,43]. Sin embargo, no todas las acciones pueden ser utilizadas en todas las situaciones, pero brindan algunas opciones para un plan de acción.

Las acciones reportadas para reducir la energía en la trituración a corto plazo son las siguientes:

1. Tecnología:

- Construir un modelo matemático del perfil de energía del sistema de proceso completo y evaluar el rendimiento. Determinar la entrada de

energía de trituración en el contexto de todo el proceso. Usar y mantener este modelo para la optimización del proceso.

- Refinar los modelos de trituración para incluir mejores estimaciones del consumo de energía. Los estudios de simulación y optimización deben incluir la energía total de trituración.
- Conocer el yacimiento y la operación, debe ser basada en el tipo de roca.
- Las estrategias de gestión deben ser conscientes con las consecuencias sobre la eficiencia energética.
- La reducción máxima del tamaño de la roca debe ser en lo posible en la etapa de chancado.
- Identificar las piezas claves del equipo y revisar la eficiencia del rendimiento del proceso unitario.
- Automatizar la operación del circuito tanto como sea posible.
- Revisar el mantenimiento y la disponibilidad del equipo según los estándares de la industria. Asegurar que los controladores de mantenimiento reflejen los objetivos de energía.
- Evaluar tecnologías de trituración alternativas (Figura 9). Algunas tecnologías que pueden mejorar el rendimiento son:
 - Molienda autógena para reemplazar molinos SAG.
 - Rodillos de molienda de alta presión para reemplazar a los molinos SAG.
 - Molinos agitados en aplicaciones de molienda fina [34].



Figura 9. A Molienda autógena. B Rodillos de molienda. C Molino agitado vertical.

Fuente: (Mining technology, 2017) (Roitto I, Lehto H, Paz A, Asthol M. Stirred Milling Technology – A New Concept in Fine Grinding. July 2013, Perth WA.

Además, la combinación del uso de equipos de trituración y molienda fina con ahorro de energía ayudan a reducir su uso mediante la:

- Reducción de las cargas de recirculación primarias y secundarias, lo que lleva a requisitos de menor consumo de energía, a un menor volumen de mineral para manipular y, potencialmente, a un cambio a un molino más pequeño.
- Creación de una distribución más pronunciada del tamaño de las partículas, lo que permite una liberación más fácil de minerales y un procesamiento posterior más eficiente.
- Reducción de la necesidad de usar medios de molienda que tienen una energía incorporada alta, por ejemplo, como lo hacen los circuitos HPGR [43].

2. Personal y planificación:

- Desarrollar e implementar métricas de energía apropiadas. Estos deben ser universales, bien entendidos y auditables.
- Aprender y adoptar las prácticas de operación y diseño de las mejores operaciones. Exigir la mejor práctica de trituración demostrada en la selección o el diseño del proceso.

- Examinar la planificación a largo plazo en términos de iniciativas gubernamentales y de EEO: Precio de carbono, Informes de eficiencia.
- Alinear los KPI con los objetivos de sostenibilidad.
- Crear un plan de sostenibilidad para garantizar que la reducción en el consumo de energía no se vea únicamente como una medida de costos, sino también como un medio para preservar un recurso escaso y garantizar que la actividad minera sea sostenible.
- Al diseñar un nuevo proceso, se debe abordar la filosofía operativa a largo plazo y asegurarse de que la información se comuniqué a los operadores de la planta.
- Crear un banco de información compartido en la etapa de diseño para que los operadores lo utilicen y mantengan un entorno de conocimiento compartido durante la operación.
- Identificar o crear una estrategia operativa documentada. Como parte del proceso, verificar el rendimiento de la planta contra las especificaciones de diseño: la mayoría de las plantas funcionan bien fuera del diseño. Vuelva a los parámetros de diseño o proporcione una justificación técnica para la desviación del diseño.
- Los métodos de valoración basados en el Valor Presente Neto (VPN) pueden alentar un enfoque en la reducción del CAPEX en lugar de minimizar el OPEX. Se puede requerir otra medida económica que refleje mejor el impacto de los costos operacionales y los costos de rehabilitación en el valor del proyecto.
- Usar ingeniería inteligente para compensar CAPEX.
- Capacitar al personal en los beneficios de un monitoreo preciso y enlace a KPI.
- Fomentar la colaboración externa.
- Promover el compromiso de trabajo en equipo. Proporcionar un marco organizativo que permita que los diferentes grupos de negocios se

comuniquen mejor y la colaboración puede proporcionar un mejor entorno para la innovación.

- Revisar la interacción entre grupos clave como la mina y la planta, la producción y el mantenimiento.
- Establecer una revisión interdisciplinaria de los principales problemas del sitio; identificar los cuellos de botella de eficiencia.
- Evaluar los requisitos de soporte técnico. Proporcionar soporte técnico dentro y fuera del sitio.
- La gente de instrumentación debe estar bien entrenada para comprender el propósito de varios instrumentos de control de procesos.
- La transferencia de tecnología efectiva y la implementación de soluciones avanzadas requieren un alto nivel de participación de las organizaciones de investigación y consultoría, además de la aceptación por parte de los operadores de las minas. Se deben alentar y apoyar altos niveles de compromiso entre la industria, la investigación y el desarrollo.

Las acciones reportadas para reducir la energía en la trituración a largo plazo son las siguientes:

- Permitir la lixiviación in situ o en vertederos baratos.
- Desarrollar procesos de separación previos al tratamiento antes de la rotura de roca superficial.
- Pretratar o liberar mediante fragmentación eléctrica del pulso, microondas o ultrasonido.
- Desarrollar dispositivos de separación que permitan la selección primaria a > 250 micras, reduciendo el volumen de material en rotura.
- Desarrollar la rotura selectiva y la capacidad de liberación utilizando SelfFrag o tecnología similar, y basado en requisitos de liberación específicos.
- Desarrollar nuevos sensores / marcadores para la selección y clasificación del mineral.
- Reducir el consumo de agua y ahorro de energía asociado.

- En el futuro, ningún operador ingresará a la mina, ya que todos los equipos estarán completamente automatizados. Todos los datos geológicos se recopilarán mediante técnicas de imagen remota y de perforación. Esto impulsará el diseño de la tronadura y conducirá a la extracción selectiva de mineral para minimizar los desechos provenientes de la fosa y el tamaño adecuado para la rotura aguas abajo. Solo el personal de mantenimiento estará en el sitio en la concentradora con equipos sensoriales completos en el campo alimentando todos los datos a un centro de control en una ciudad importante: la industria minera se convertirá en la industria para los conocedores de la tecnología del día [34].

Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para desarrollar una tecnología más eficiente en términos que la energía sea confiable y rentable. La industria necesita incorporar de manera más agresiva la investigación existente antes de que se vea obligada a hacerlo por presión regulatoria y costos de energía [39].

E. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS PROCESOS DE TRANSPORTE

El transporte puede ser realizado mediante camiones o por cintas transportadoras. La incorporación de cintas transportadoras significó un avance en la eficiencia energética, debido a que presentan más vida útil que un camión y mayor capacidad para transportar material, lo que se traduce en un menor consumo energético por unidad de tonelada transportada. Existen cintas que utilizan energía cinética y la pendiente del terreno para generar electricidad en los polines de la correa, obteniéndose un balance energético positivo en el proceso. El uso de cinta transportadora genera menor emisión de material particulado que los camiones mineros, favoreciendo el cuidado del medio ambiente [15].

Una cinta transportadora es un sistema de conversión de energía eléctrica a energía mecánica. Su eficiencia energética generalmente se puede mejorar en cuatro niveles: rendimiento, operación, equipamiento y tecnología [44]. Sin

embargo, la mayoría de la literatura sobre la eficiencia energética de las cintas transportadoras se centra en el nivel operacional y el nivel del equipo [45]. Existen medidas de eficiencia energética que se pueden aplicar al transporte de material mediante cintas transportadoras, como el uso de polines y elementos de bajo roce, el control y gestión de carga de las correas, disminución de las partidas y paradas mediante análisis de tiempos muertos y la utilización de variadores de frecuencia [15]. Se recomienda utilizar motores de bajo consumo y con variadores de velocidad (VSD) [46]. La operación es un aspecto importante de la eficiencia energética de las cintas de correa [7]. La eficiencia de la operación en términos de costo operacional de las cintas transportadoras se puede mejorar con cambios de carga [47]. También, se recomienda el control de velocidad de la cinta transportadora y mantener una cantidad constantemente alta de material a lo largo de toda la correa [45]. Un ejemplo de automatización son los camiones de volteo autónomos (sin conductor), que tienen el potencial de aumentar la eficiencia energética de manera significativa al eliminar por completo el factor humano. Las primeras investigaciones sobre el tema sugieren que los algoritmos de control que aseguran un cambio de marchas óptimo superarán a los operadores humanos y asegurarán una eficiencia óptima del combustible [48]. Más importante aún, dichos algoritmos de control pueden operar de manera óptima casi todo el tiempo, en comparación con los operadores humanos cuyo rendimiento varía durante un turno de trabajo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los algoritmos de control que conducen a una mayor eficiencia energética aún son útiles, incluso si no conducen a una autonomía completa. La operación asistida por computadora todavía puede proporcionar ahorros de energía significativos [7].

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y presentar medidas de eficiencia energética en el consumo eléctrico de una faena minera para ser consideradas en los respectivos procesos de planta concentradora.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y procesar datos de consumo mensual de energía eléctrica para los procesos de chancado, correa transportadora y molienda SAG, durante los años 2015, 2016 y 2017.
- Relacionar los datos de consumo de energía eléctrica con el procesamiento de mineral (considerando la variable de granulometría del mineral) para obtención de KPI's (KWh/ TMS de material procesado), en los procesos de chancado, correa transportadora y molienda, durante los años 2015, 2016 y 2017.
- Determinar parámetros de comportamiento mensual, anual y seleccionar procesos en donde aplicar medidas de eficiencia energética.
- Determinar los tipos de tecnologías y/o medidas a implementar de eficiencia energética, según los procesos seleccionados eligiendo entre chancado, transporte y molienda SAG.

4. METODOLOGIA

4.1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una revisión bibliográfica del estado del arte buscando en el motor de búsqueda de artículos científicos Science Direct con los tópicos asociados (en inglés): eficiencia energética, procesos en minería, eficiencia energética en minería, trituración, molienda SAG, Chancado, transporte y temas afines, además de realizar búsquedas en motores de búsqueda de internet con los mismos tópicos para así tener un abanico de fuentes de artículos científicos, tesis de postgrado y documentación asociada. Los artículos se seleccionaron por el título y resumen. Luego, los artículos seleccionados fueron leídos. Ver figura 10.

ScienceDirect Journals Books Register Sign in > ?

energy efficiency comminution Author name Journal/book title Volume Issue Pages Q Advanced search

4,248 results sorted by relevance | date

Refine by:

Years

☐ 2018 (123)

☐ 2017 (302)

☐ 2016 (265)

Show more ▾

Article type

☐ Review articles (272)

☐ Research articles (2,425)

The efficiency of copper ore comminution: A thermodynamic exergy analysis

Research article

Minerals Engineering, Volume 109, 1 August 2017, Pages 21-31

Wilhelm Jacob, Daniel R. Cooper, Timothy Gutowski, Jorge Ramos-Grez

Purchase PDF

Increasing efficiency by selective comminution

Research article

Minerals Engineering, Volumes 103-104, April 2017, Pages 112-126

Max Hesse, Oleg Popov, Holger Lieberwirth

Purchase PDF

Is progress in energy-efficient comminution doomed?

Research article

Minerals Engineering, Volume 73, 15 March 2015, Pages 1-6

Tim Napier-Munn

Purchase PDF

Energy Consumption in Mining Comminution

Open access, Research article

Procedia CIRP, Volume 48, 2016, Pages 140-145

Jack Jeswiet, Alex Szekeres

Download PDF (399 KB)

Mineral comminution: Energy efficiency considerations

Research article

Minerals Engineering, Volume 21, Issue 8, July 2008, Pages 613-620

Desmond Tromans

Purchase PDF

The comminution energy-size reduction of the Bond Mill and its relation to Vickers Hardness

Research article

Minerals Engineering, Volume 119, April 2018, Pages 228-235

Figura 10. Base de datos ScienceDirect, ejemplo de búsqueda con los términos “EFICIENCIA ENERGÉTICA y TRITURACIÓN”, se observa enmarcado en rojo artículos seleccionados.

4.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS

Se realizó un estudio de tipo observacional retrospectivo. La data analizada fue el resultado de mediciones acumuladas durante la operación normal del proceso de chancado, transporte y molienda SAG.

Esta data es recopilada a través de medidores de energía de clase de facturación, ubicados en los puntos de medida para tener información adecuada y fiable. Además, se tienen los datos de procesamiento de mineral que junto con los de energía son llevados a un sistema de monitoreo en línea, denominado, PI system,

así se recopila y almacena la información relevante de cada proceso, para posteriormente ser analizada y tomar acciones correctivas según corresponda.

Se utilizaron los datos de consumo de energía eléctrica y procesamiento de mineral para los procesos de chancado, molienda SAG y transporte de una gran faena minera del centro del país, entre los años 2015 hasta 2017.

Se utilizaron los datos de granulometría del mineral para los procesos de chancado y molienda SAG de una gran faena minera del centro del país, entre los años 2015 hasta 2017.

Los datos fueron recopilados diariamente (intervalo de 24 horas) para las variables declaradas.

Las variables son:

1. Energía: variable continua, en kilowatt hora [kWh].
2. Producción: variable continua, en toneladas por día [TPD].
3. Granulometría: Corresponde al tamaño de la partícula del mineral. Se consideró como una variable cualitativa ordinal, determinándose en porcentaje del total de mineral entre los siguientes intervalos: menor a 1 pulgada, entre 1 y 2 pulgadas, entre 2 y 4 pulgadas, entre 4 a 8 pulgadas y mayor a 8 pulgadas (solo para molino SAG).
4. Eficiencia energética: variable continua, correspondiente a la relación entre energía y producción, medida a través del KPI [kWh/TPD].

4.2.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Estos datos anteriormente mencionados se tabularon ordenándose por día, mes y año para los años 2015, 2016 y 2017 siendo presentados en una tabla de Excel. Ver figura 11.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	n	día	mes	ano	tpdchan	kwhchan	tpdsag	kwhsag	2a4pulg	tpdtransp	kwhtransp
20	19	19	1	2015	78698.3043	2169.53354	47470.2667	279025.704	22.1459732	78238.0019	25209.2952
21	20	20	1	2015	61428.5365	1721.22541	44223.8257	277176.86	23.9469378	62318.3892	23491.6213
22	21	21	1	2015	52626.4349	1836.39961	38622.711	238246.735	20.4817757	51345.6517	17424.0377
23	22	22	1	2015	66862.3406	2097.55382	40421.386	273496.556	20.8193874	60710.0506	19925.874
24	23	23	1	2015	63233.5435	1631.50794	33348.026	277487.319	23.9536314	64043.3991	23332.3869
25	24	24	1	2015	36743.3994	1232.92526	17838.2254	152004.12	13.2121425	35521.6661	20216.447
26	25	25	1	2015	62801.7643	2168.69688	41413.7937	280513.591	21.6193786	63873.6644	23139.9744
27	26	26	1	2015	70318.6959	1775.17673	41456.5905	260338.591	22.0040779	71055.3789	23749.7808
28	27	27	1	2015	46443.9824	1888.90742	45283.6496	274294.76	22.7881684	51531.641	18180.4591
29	28	28	1	2015	78036.8123	2295.91926	39506.4338	269081.218	24.6967149	81779.4701	25355.6926
30	29	29	1	2015	53087.7812	1473.8838	38057.6267	263243.408	23.8869592	53463.0656	21957.6553
31	30	30	1	2015	64623.2614	1856.83233	40720.2279	276671.91	25.2420227	65664.9556	23841.327
32	31	31	1	2015	54051.5784	1755.88767	35404.6279	229984.086	20.6483698	54591.0565	19469.144
33	32	1	2	2015	77260.8785	2378.09079	36584.6525	285964.825	26.5694945	77716.3557	25038.9626
34	33	2	2	2015	60927.9667	2142.41508	34720.1967	264102.787	25.8705008	65737.7277	23200.2999
35	34	3	2	2015	44412.7014	1922.04834	38059.2694	286356.065	27.637211	41035.7811	13455.8693
36	35	4	2	2015	74551.8231	2055.08211	39971.4895	282726.418	25.3161727	74185.8238	24354.1053
37	36	5	2	2015	67795.0665	2047.63004	38302.7527	271183.609	24.4096165	60070.7032	23308.697
38	37	6	2	2015	92064.1514	2541.9466	45998.3793	291053.082	25.7092318	84574.4264	25849.5027
39	38	7	2	2015	71868.8217	1775.12879	41290.8268	261382.335	22.3018939	67974.8118	24053.1077

Figura 11. Datos ordenados.

Se utilizaron los datos considerando el 25% de los días de mejor producción, debido a que se requiere optimizar la energía consumida para altos niveles de procesamiento.

Para la descripción de las variables continuas se determinó la normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk (se usa para determinar la normalidad de un conjunto de datos), en caso de distribución normal se representó en base a la media y desviación estándar y en caso de distribución no normal, mediante mediana y rango intercuartílico (percentil 25 – percentil 75). La variable cualitativa se representó mediante frecuencia relativa.

A continuación, se generaron KPI's de eficiencia energética (KWh/ TMS de material procesado), en los procesos de chancado, correa transportadora y molienda SAG, durante los años 2015, 2016 y 2017. Estos KPI's generados se agruparon, ordenaron por día para los años 2015, 2016 y 2017 siendo presentados en una tabla Excel y se procesaron estadísticamente.

En los diversos análisis se agruparon los datos diarios por un período de 1 año resultando 3 grupos. Entre estos distintos grupos se analizaron consumo

energético, tonelaje de material procesado, eficiencia energética representada a través del KPI y la granulometría. Estas comparaciones múltiples se realizaron mediante el test de Anova (evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores) o el test de Kruskal-Wallis (es un método no paramétrico para probar si un grupo de datos proviene de la misma población. Intuitivamente, es idéntico al ANOVA con los datos reemplazados por categorías) con el test post-hoc de Bonferroni (una vez que se ha determinado que existen diferencias entre las medias, las pruebas de rango post hoc permiten determinar qué medias difieren, la prueba de rango post hoc identifica subconjuntos homogéneos de medias que no se diferencian entre sí) test de Dunn's, según distribución paramétrica o no paramétrica respectivamente.

Posteriormente, se evaluó la relación entre la variable procesamiento de mineral y consumo energético mediante diagramas de dispersión.

A continuación, se presenta una imagen como ejemplo de la aplicación de la metodología.

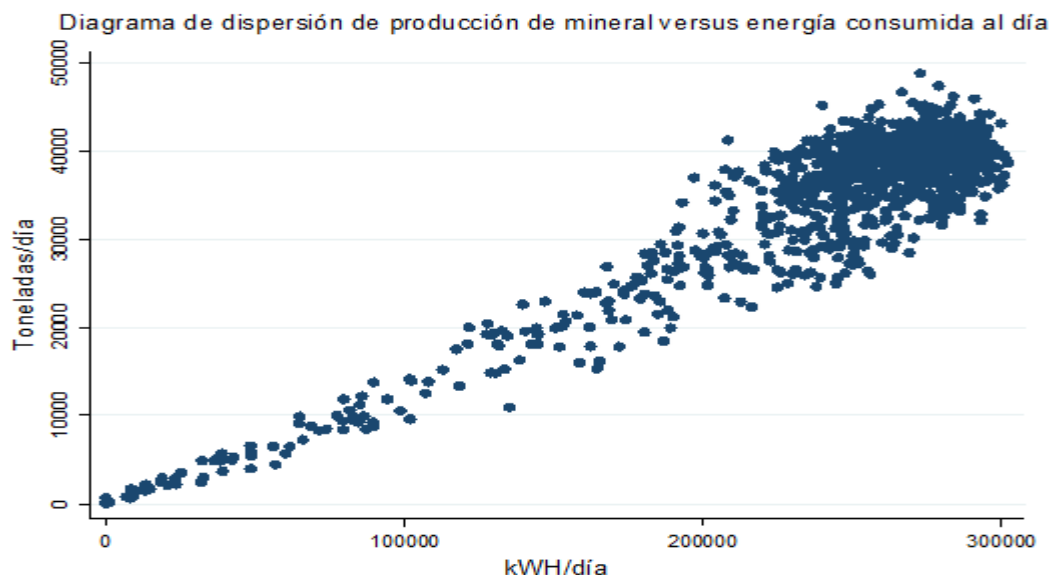


Figura 12. Diagrama de dispersión.

Se considera, el 60% de energía promedio que utiliza la planta concentradora en relación con todo el consumo de la faena minera en estudio, como un valor de referencia a mejorar (según los datos analizados), dada la situación mundial en donde el promedio de uso de energía en una planta concentradora de cobre es del 50%. Así dado que se desea mejorar la eficiencia de procesamiento disminuyendo el consumo de energía eléctrica se definió como alta eficiencia energética los KPI's con valores menores a la mediana en los procesos de chancado y molienda SAG. Se realizó regresión logística (permite evaluar si una variable categórica está asociada con otra variable independiente y conocer su magnitud) para evaluar la asociación entre la granulometría (variable independiente) y eficiencia energética (variable dependiente), se realizó regresión logística bivariada y multivariada con cálculo de Odds ratio (OR) con un intervalo de confianza del 95%, utilizándose un nivel de significancia de 0,05. A continuación, se presenta un gráfico para ejemplificar lo anterior.

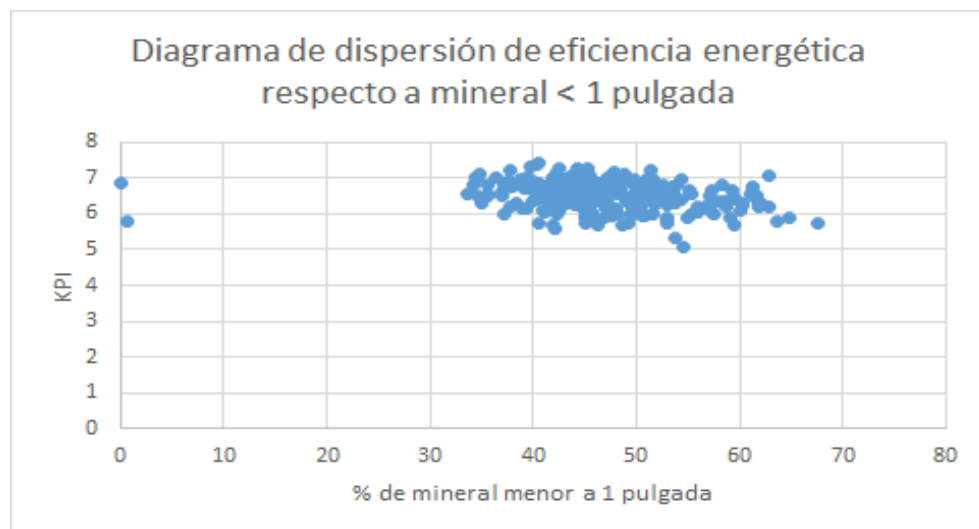


Figura 13. Diagrama de dispersión de eficiencia energética respecto a mineral < 1 pulgada.

El análisis estadístico fue realizado con el programa STATA 12 ® (StataCorpLP, Texas, USA).

Finalmente, con la información obtenida se procederá a recomendar medidas de eficiencia energética según la investigación realizada.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. MOLIENDA SAG

Se registraron un total de 1.078 días con un procesamiento de mineral promedio de 35.940 ± 6.706 tpd, con una mediana de 38.123 tpd con un rango intercuartílico de 6.572 tpd.

El consumo energético en promedio fue de 251.418 ± 40.234 kWh, con una mediana de 262.059 con un rango intercuartílico de 38.807 kWh.

El KPI promedio de los 3 años analizados es de $7,085 \pm 0,823$, con una mediana de 6,969 con un rango intercuartílico de 0,922.

Al comparar el procesamiento de mineral en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 4. Resultados análisis de procesamiento de mineral molino SAG.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	36.718,88	6.723,91	38.808,38	8.077,83
2016	34.332,30	7.312,14	37.030,41	7.221,75
2017	36.609,14	5.835,33	38.509,63	4.965,77
Total	35.940,15	6.706,63	38.123,80	6.571,97

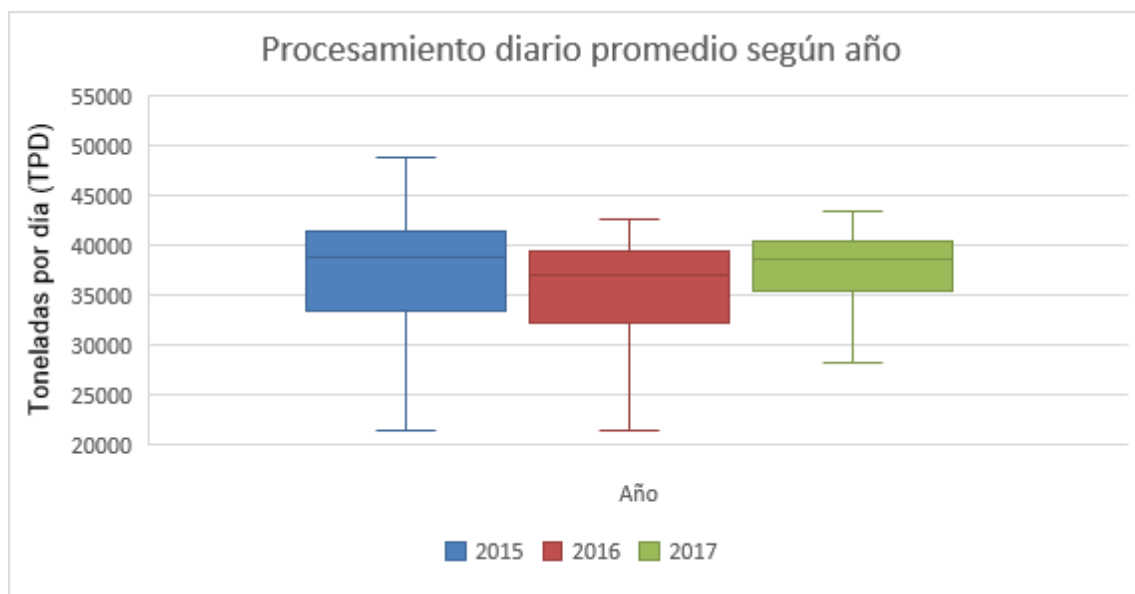


Figura 14. Resultados análisis de procesamiento de mineral molino SAG.

Al analizar los datos se obtiene que el procesamiento del año 2016 es inferior al de los otros años, sin diferencias significativas¹ entre el año 2017 y 2015.

Al comparar el consumo de energía eléctrica en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 5. Resultados análisis de consumo de energía eléctrica molino SAG.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	255.321,70	38.508,45	267.108,40	39.362,40
2016	240.186,00	42.669,26	252.168,60	34.903,10
2017	257.611,30	37.621,86	267.764,70	38.448,70
Total	251.418,60	40.234,93	262.059,00	38.807,30

¹ Se refiere a que no existen diferencias estadísticamente significativas según el nivel de significancia definido de 5%.

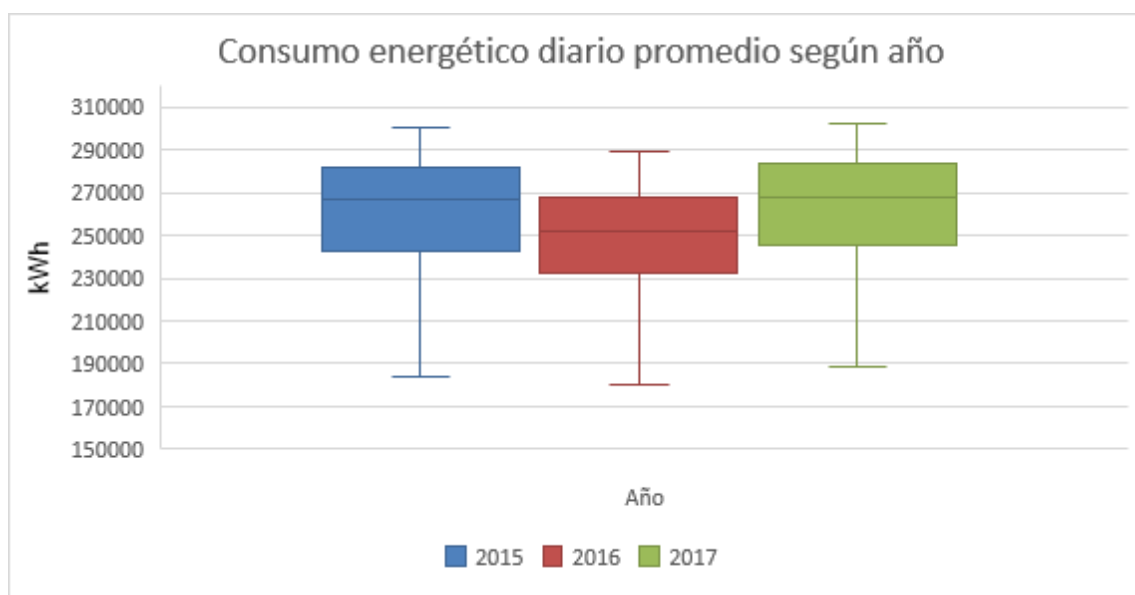


Figura 15. Resultados análisis consumo de energía eléctrica molino SAG.

Al analizar los datos se obtiene que el consumo de energía eléctrica del año 2016 es inferior al de los otros años, sin diferencias significativas entre el año 2017 y 2015.

Al comparar el KPI en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 6. Resultados análisis KPI de eficiencia energética molino SAG.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Inter cuartílico
2015	7,042	0,810	6,93	0,98
2016	7,115	0,883	6,92	0,88
2017	7,103	0,777	7,07	0,97
Total	7,085	0,823	6,97	0,92

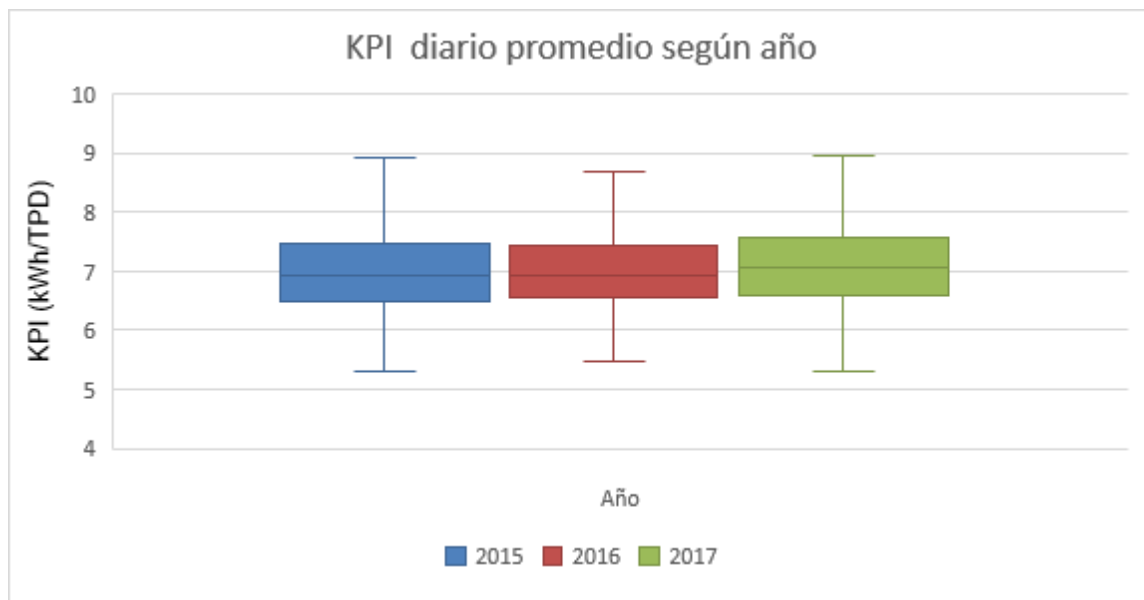


Figura 16. Resultados análisis KPI de eficiencia energética molino SAG.

Al revisar los KPI de los tres años, no se observa diferencia significativa. Esto es relevante de considerar, ya que aun cuando cambiaron los niveles de procesamiento y consumo de energía eléctrica, al comparar el 2016 versus 2015 y 2017 se tiene que en promedio, el KPI de eficiencia energética se mantiene en valores similares para los tres años.

A continuación, se representa el consumo de energía eléctrica versus el material procesado por el molino SAG, en kWh/tpd. (ver gráfico siguiente).

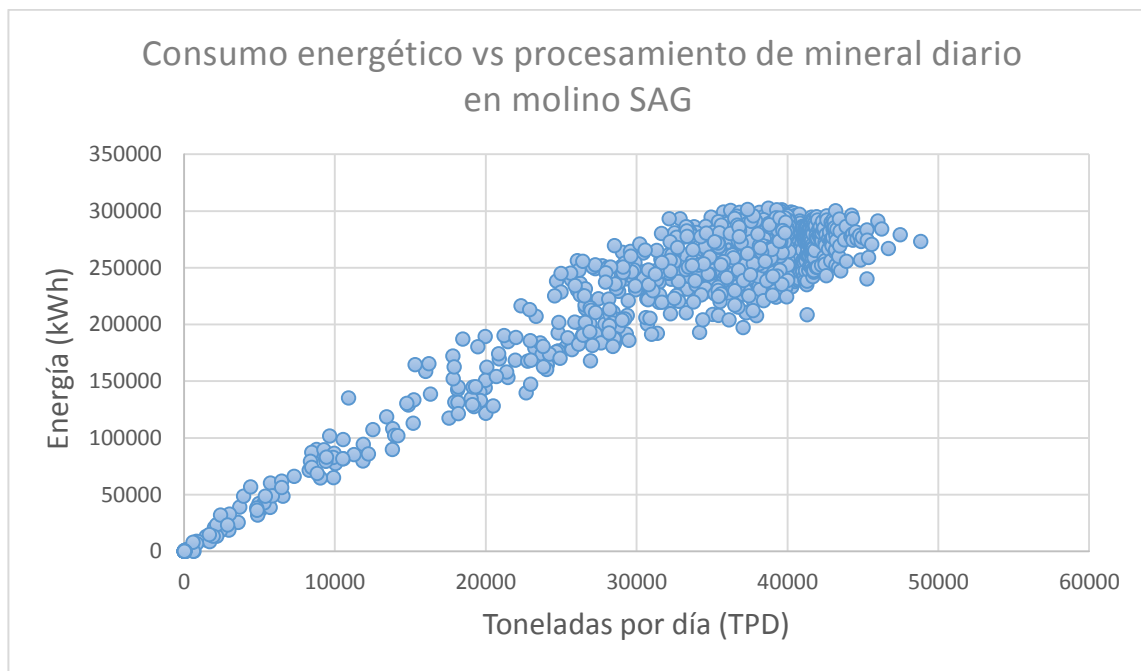


Figura 17. Consumo de energía eléctrica vs producción de mineral diaria en molino SAG.

En la figura 17, se observa que a mayor procesamiento existe mayor dispersión en el consumo de energía eléctrica, por ejemplo, para procesar 42.000 tpd el consumo energético varía entre 250.000 y 291.900 kWh.

Debido a que el objetivo central es optimizar el consumo de energía eléctrica a niveles altos de procesamiento, se analizarán el 25% de los datos asociados a los días de mayor procesamiento, lo que corresponde a más de 40.154 tpd con un tamaño muestral (n= 270 días) dentro de los tres años analizados.

A continuación, se presenta el consumo de energía eléctrica versus procesamiento de mineral en los días de alto procesamiento. (ver gráfico siguiente).

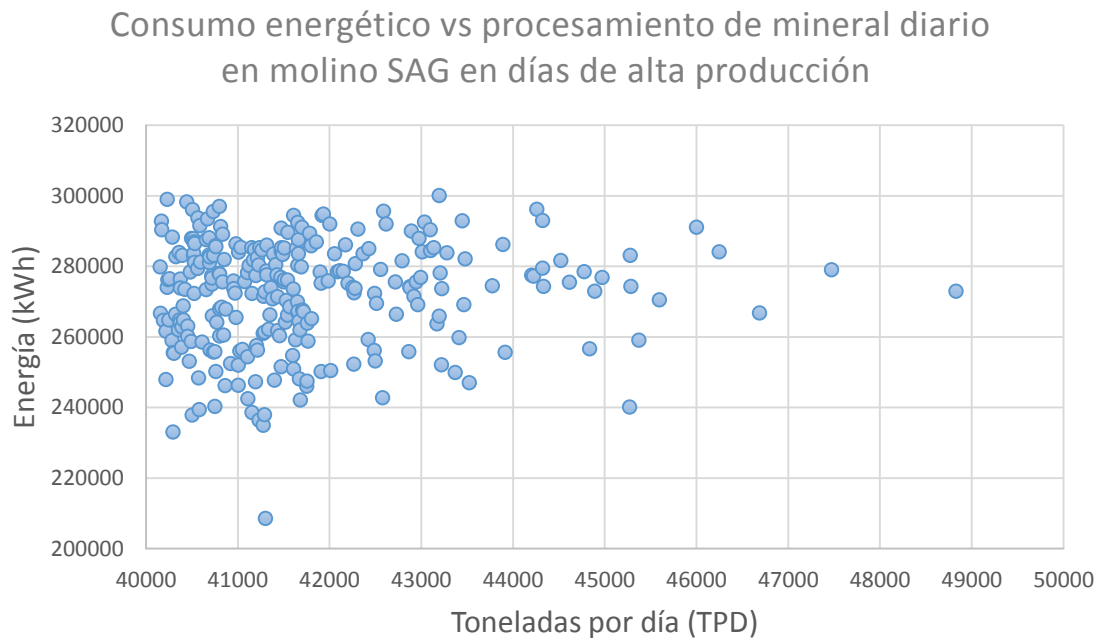


Figura 18. Consumo de energía eléctrica versus producción de mineral diaria en molino SAG, para alta producción.

En los días de alto procesamiento, el valor fluctuó entre 40.154 tpd a 48.829 tpd y el consumo energético varía entre 208.585 kWh a 300.036 kWh. Esto muestra que existe una gran dispersión en los valores obtenidos.

Ahora con relación a la granulometría menor de 1 pulgada, la cual se mide en porcentaje presente con relación al total de material procesado, en promedio se tiene un $46,78 \pm 7,47$ % de participación. Para la granulometría entre 1 y 2 pulgadas, se tiene un promedio de $22,25 \pm 2,84$ %. Para la granulometría entre 2 y 4 pulgadas, se tiene un promedio de $21,28 \pm 4,17$ %. Para la granulometría entre 4 y 8 pulgadas, se tiene un promedio de $7,71 \pm 4,69$ %.

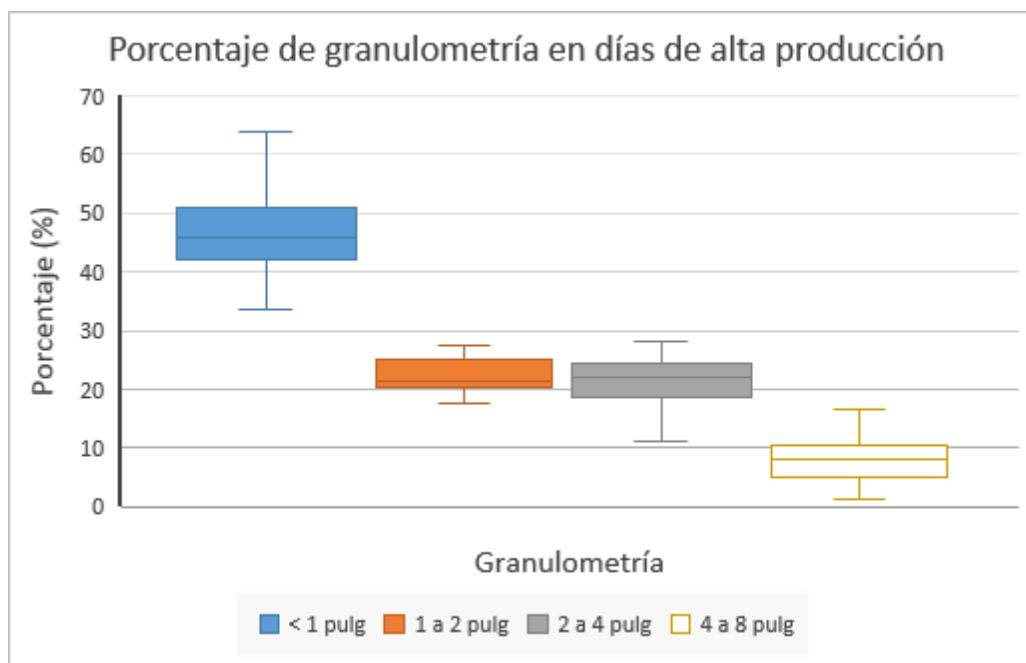


Figura 19. Porcentaje de granulometría en días de alta producción.

El KPI de eficiencia energética (kWh/TPD), que corresponde a la relación entre energía consumida y material procesado presenta un promedio de $6,52 \pm 0,40$, con un rango entre 5,05 a 7,43 y la mediana corresponde a 6,56 con un rango intercuartílico de 0,579. **Se definió como alta eficiencia energética a los valores de KPI menores a 6,56.**

La justificación de esta decisión está tomada en base al análisis de los KPI's promedios de eficiencia energética y su comportamiento de características similares para los tres años analizados (2015, 2016 y 2017), en donde el valor promedio anual y la desviación estándar se mantienen con valores similares, por lo que mejorar la eficiencia energética en base a un KPI más estricto que el valor promedio anual es un buen comienzo para definir el número. Por otra parte, se tiene que la faena minera de la cual se obtuvieron los datos tiene un plan de reducción de costos y mejora de los indicadores de eficiencia energética, entre otros, así para considerar las situaciones descritas anteriormente se elige el valor

de la mediana de los datos de los tres años que están en el universo de alto procesamiento de mineral.

A continuación, se presentan los resultados del KPI de eficiencia energética, comparado con los diferentes niveles de granulometría presentados.

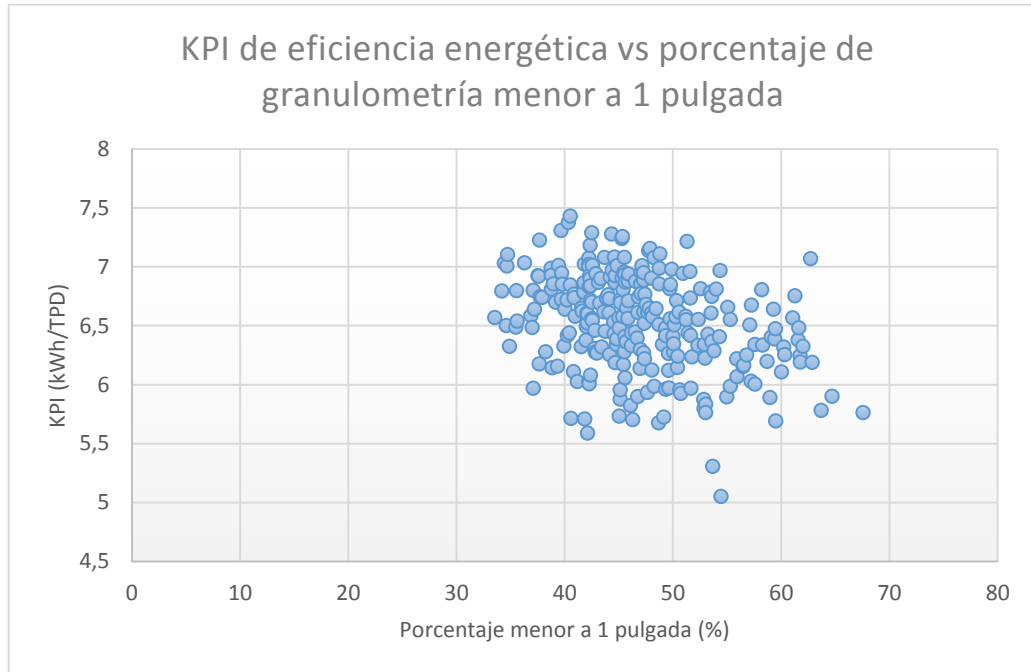


Figura 20. KPI de eficiencia energética vs porcentaje de granulometría menor a 1 pulgada.

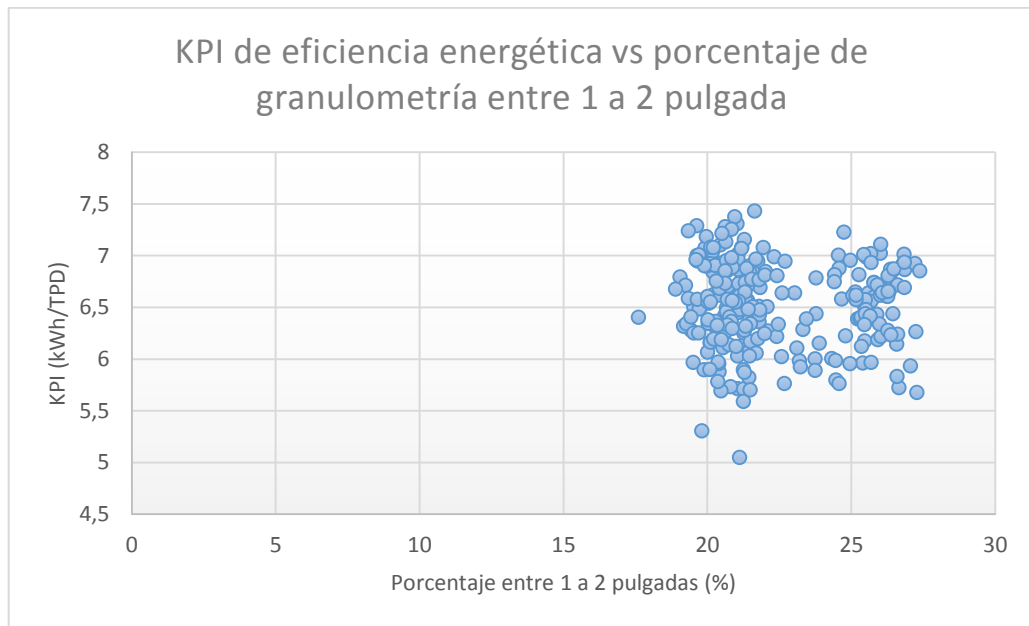


Figura 21. KPI de eficiencia energética vs porcentaje de granulometría entre 1 a 2 pulgada.

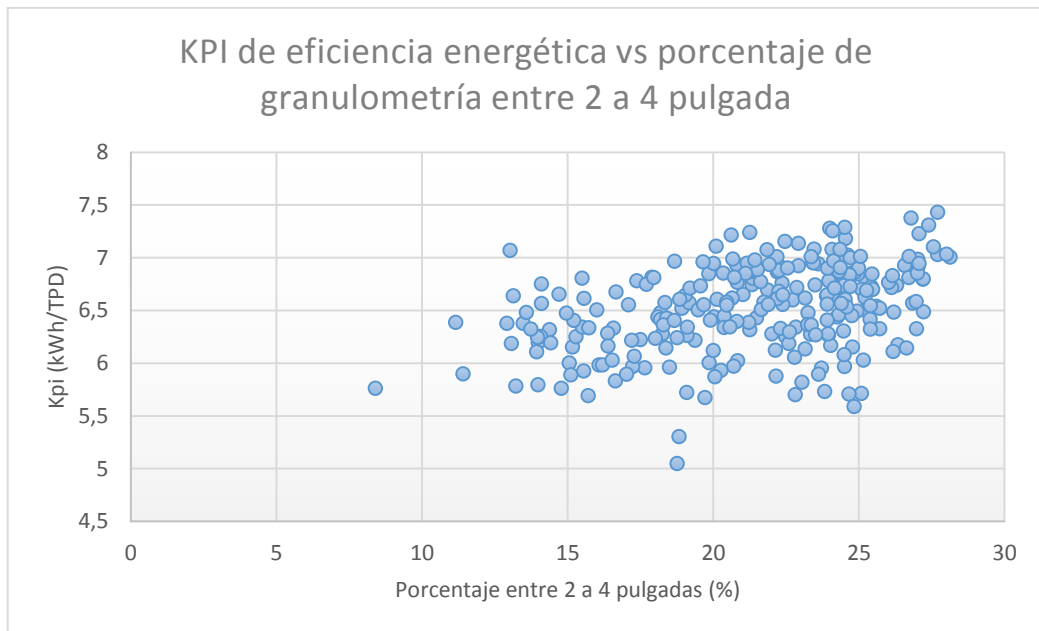


Figura 22. KPI de eficiencia energética vs porcentaje de granulometría entre 2 a 4 pulgada.

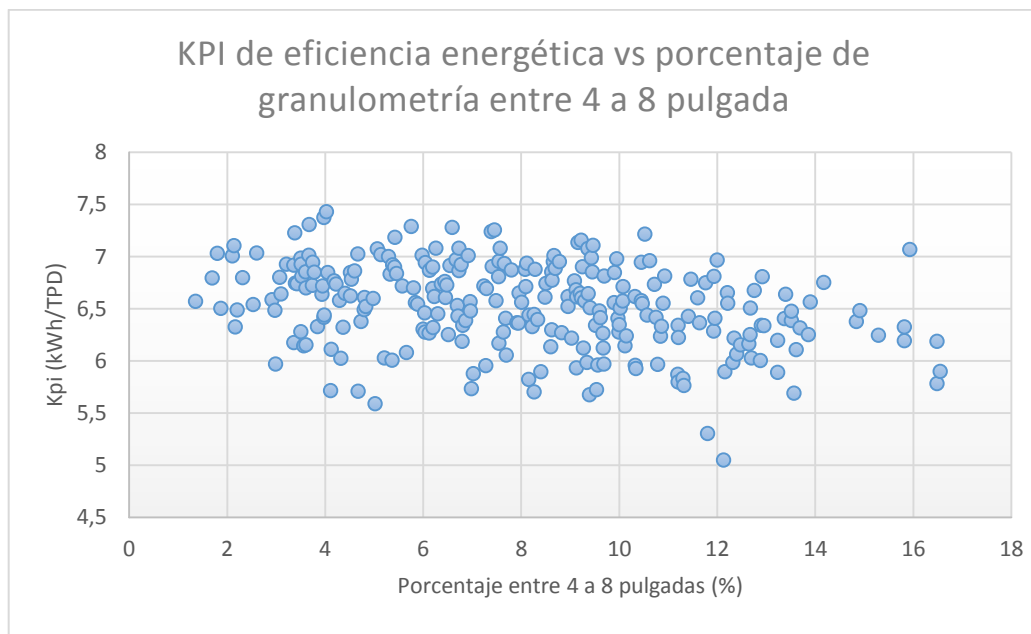


Figura 23. KPI de eficiencia energética vs porcentaje de granulometría entre 4 a 8 pulgada.

Al observar estos gráficos de dispersión y tomar el valor de 6,56 de referencia para separar valores de buena eficiencia y valores de mala eficiencia, según lo definido, se tiene que para valores de granulometría entre 2 y 4 pulgadas y menores que 1 pulgada, existe una diferencia en la distribución de estas granulometrías presente en el material procesado versus el valor del KPI de eficiencia energética. Por otra parte, para los casos de granulometrías presentes en el material procesado entre 1 y 2 pulgadas no presenta mayor impacto al cambiar sus porcentajes de aparición versus el KPI de eficiencia energética y entre 4 a 8 pulgadas se observa diferencia en la distribución, pero se debe considerar que el porcentaje de aparición en relación con el material procesado diariamente es menor que en los otros rangos.

Para mayor claridad de lo expuesto anteriormente, se agruparán estos mismos datos, pero en diagramas caja y bigote.

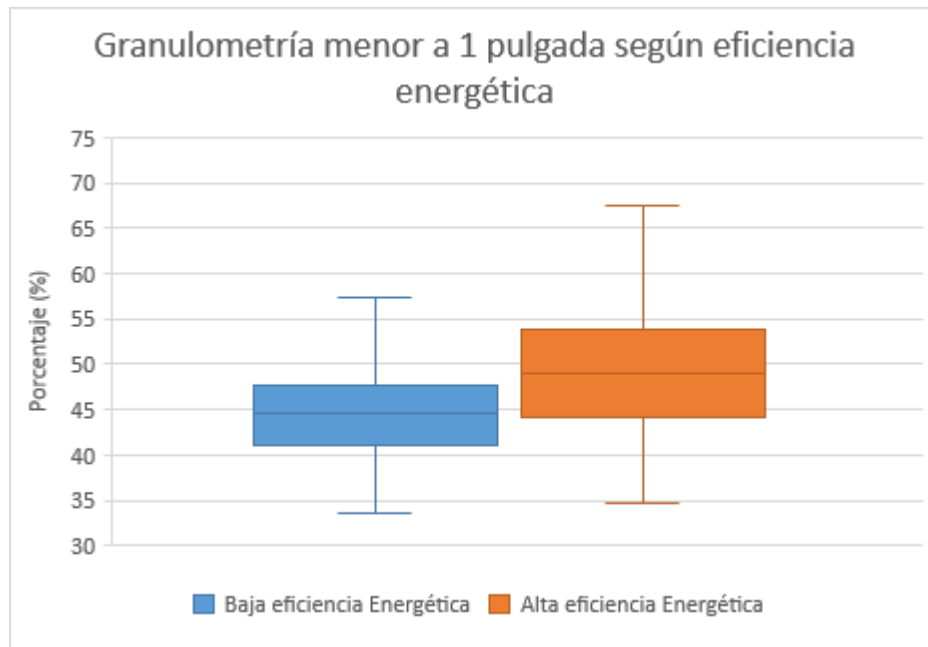


Figura 24. Granulometría menor a 1 pulgada según eficiencia energética.

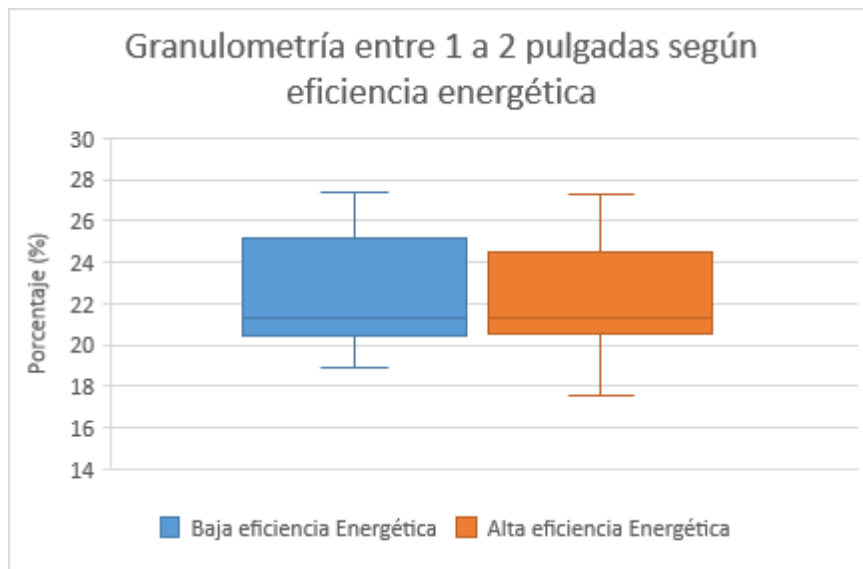


Figura 25. Granulometría entre 1 a 2 pulgadas según eficiencia energética.

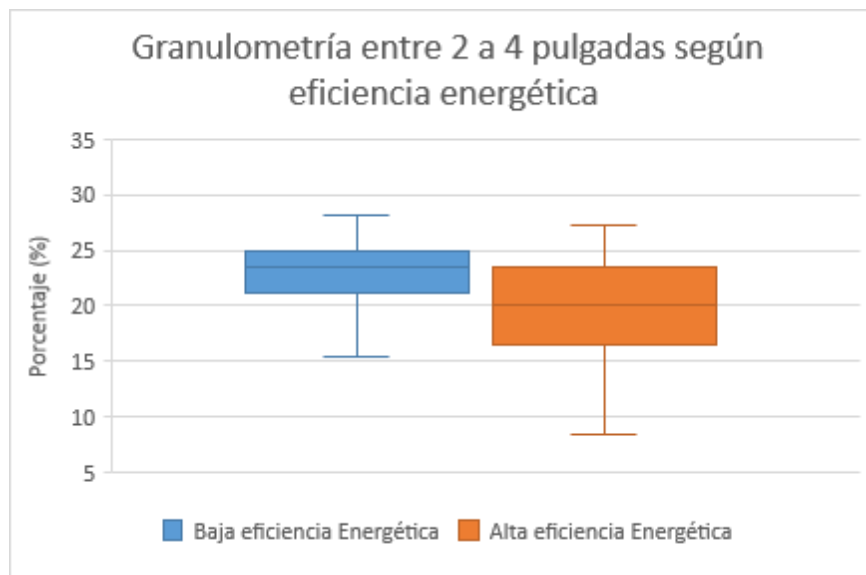


Figura 26. Granulometría entre 2 a 4 pulgadas según eficiencia energética.

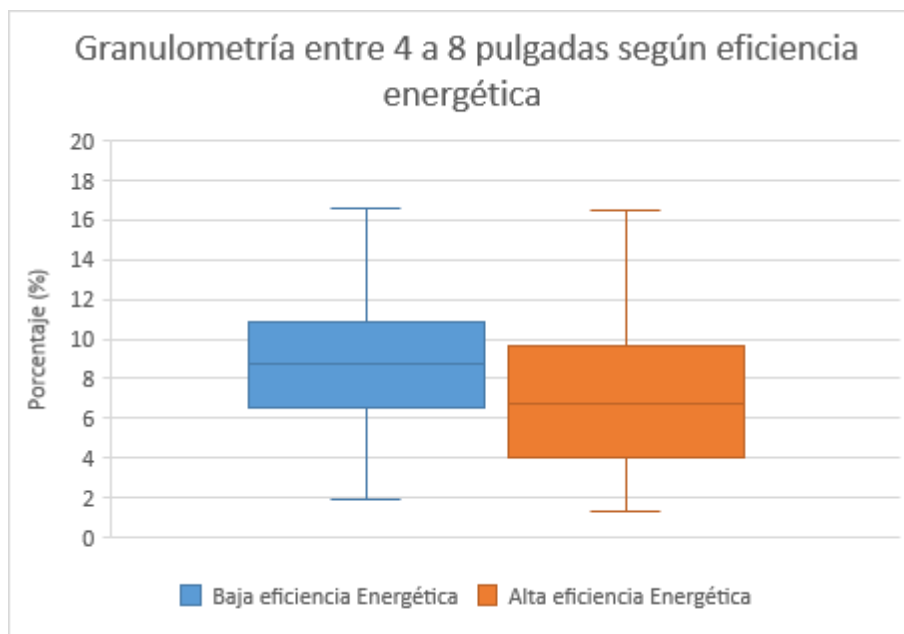


Figura 27. Granulometría entre 4 a 8 pulgadas según eficiencia energética.

En el grupo de alta eficiencia energética se procesaron 42.220 ± 1.672 tpd de material. Se consumió un total de 261.390 ± 13.099 kWh al día. Se tiene un KPI promedio de 6,194.

En el grupo de baja eficiencia energética se procesaron en promedio 41.281 ± 873 tpd de material. Se consumió en promedio un total de 282.742 ± 7.825 kWh al día. Se tiene un KPI promedio de 6,85.

Al comparar las granulometrías se tiene:

La granulometría de menos de 1 pulgada presenta un promedio de $49,22 \pm 7,19$ % en alta eficiencia, mientras que en baja eficiencia presentó un $44,9 \pm 5,68$ % ($p < 0,001$).

En la granulometría de 1 a 2 pulgadas en el grupo de alta eficiencia energética presenta un promedio de $22,27 \pm 2,33$ % respecto a un $22,48 \pm 2,54$ en el de baja eficiencia. ($p = 0,483$).

En la granulometría de 2 a 4 pulgadas en el grupo de alta eficiencia energética presenta un promedio de $19,91 \pm 4,14$ % respecto a un $22,84 \pm 3,26$ en el de baja eficiencia. ($p < 0,001$).

En la granulometría de 4 a 8 pulgadas en el grupo de alta eficiencia energética presenta un promedio de $7,20 \pm 3,50$ % respecto a un $8,94 \pm 3,13$ en el de baja eficiencia. ($p < 0,001$).

En el grupo eficiente la producción fue de 2,27% superior al grupo no eficiente. Y el consumo energético fue un 7,55% menor que el grupo de baja eficiencia.

Si esto lo llevamos a un año de procesamiento de mineral, en el grupo de alta eficiencia se procesarían 300.480 toneladas con un ahorro de 6.832.640 kWh.

5.2. CHANCADO

Se registraron un total de 1.078 días con un procesamiento de mineral promedio de 60.760 ± 15.641 tpd, con una mediana de 62.108 tpd con un rango intercuartílico de 21.941 tpd.

El consumo energético en promedio fue de 2.055 ± 562 kWh, con una mediana de 1.970 con un rango intercuartílico de 700 kWh.

El KPI promedio de los 3 años analizados es de $0,035 \pm 0,011$, con una mediana de 0,032 con un rango intercuartílico de 0,0138.

Al comparar el procesamiento de mineral en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 7. Resultados análisis de procesamiento de mineral chancador.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	61.547,60	15.400,41	62.541,97	20.398,53
2016	57.532,91	16.129,48	58.279,61	24.393,10
2017	62.897,97	14.997,12	65.287,56	20.991,74
Total	60.760,50	15.641,84	62.108,00	21.941,00

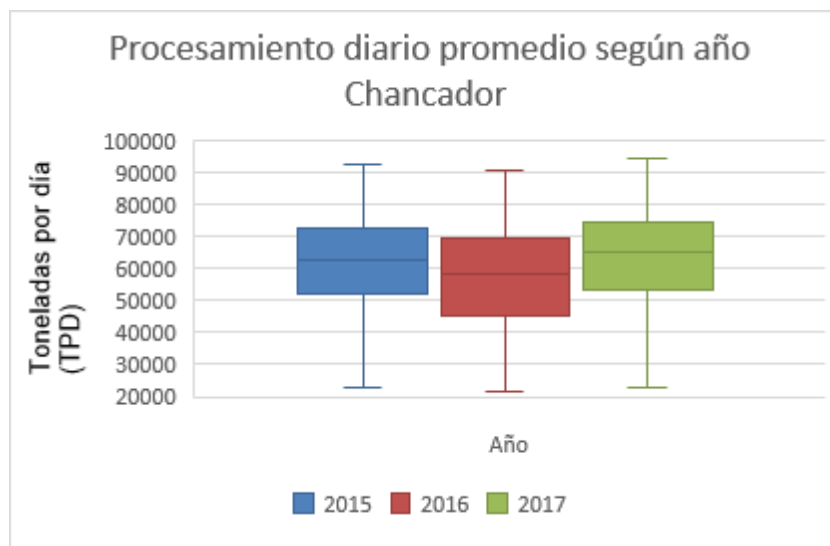


Figura 28. Resultados análisis de procesamiento de mineral chancador.

Al analizar los datos se obtiene que el procesamiento del año 2016 es inferior al de los otros años ($p < 0,01$), sin diferencias significativas entre el año 2017 y 2015.

Al comparar el consumo de energía eléctrica en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 8. Resultados análisis de consumo de energía eléctrica chancador.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	2.030,13	577,80	1.952,21	645,35
2016	2.018,56	515,38	1.965,48	695,66
2017	2.114,06	582,96	2.024,43	745,88
Total	2.055,00	562,00	1.970,36	700,00

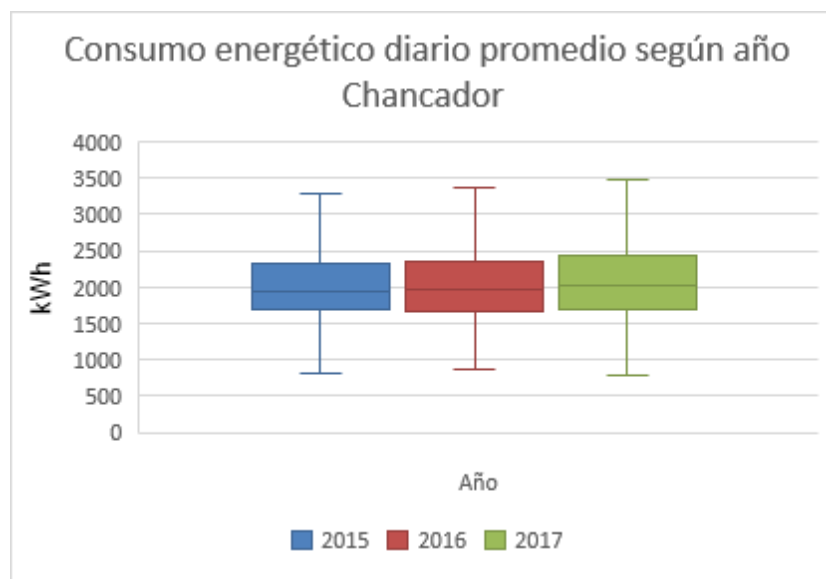


Figura 29. Resultados análisis de consumo de energía eléctrica chancador.

Al analizar los datos se obtiene que el consumo de energía eléctrica no presenta diferencias entre los años 2015, 2016 y 2017 ($p=0.056$).

Al revisar los KPI de los tres años, se obtiene que el año 2016 presenta mayores valores respecto al año 2015 y 2017 ($p < 0,001$), sin existir diferencias entre últimos años ($p=0,258$).

Tabla 9. Resultados análisis KPI de eficiencia energética chancador.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	0,034	0,010	0,031	0,012
2016	0,037	0,011	0,035	0,015
2017	0,035	0,012	0,032	0,014
Total	0,035	0,011	0,032	0,014

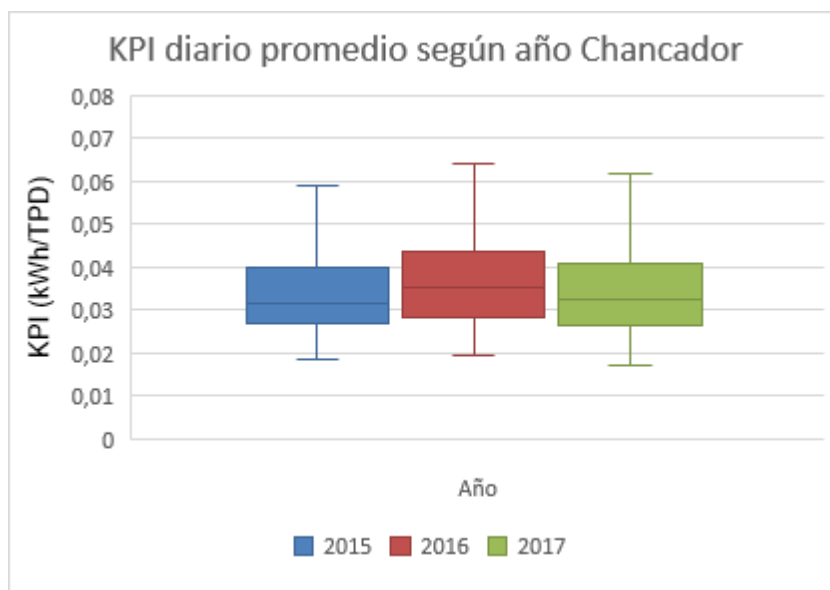


Figura 30. Resultados análisis KPI de eficiencia energética chancador.

5.3. TRANSPORTE EN CORREAS

Se registraron un total de 1.078 días con un movimiento promedio de material procesado de 58.598 ± 14.726 tpd, con una mediana de 60.331 tpd con un rango intercuartílico de 21.525 tpd.

El consumo energético en promedio fue de 21.193 ± 3.535 kWh, con una mediana de 22.133 con un rango intercuartílico de 4.080 kWh.

El KPI promedio de los 3 años analizados es de $0,374 \pm 0,071$, con una mediana de 0,357 con un rango intercuartílico de 0,066.

Al comparar el movimiento de material procesado en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 10. Resultados análisis de movimiento de mineral correa transportadora.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	58.862,62	14.167,42	60.077,28	19.478,38
2016	55.284,26	15.060,64	56.167,46	21.318,53
2017	61.342,62	14.414,29	63.256,09	19.058,57
Total	58.598,65	14.726,76	60.331,49	21.525,85

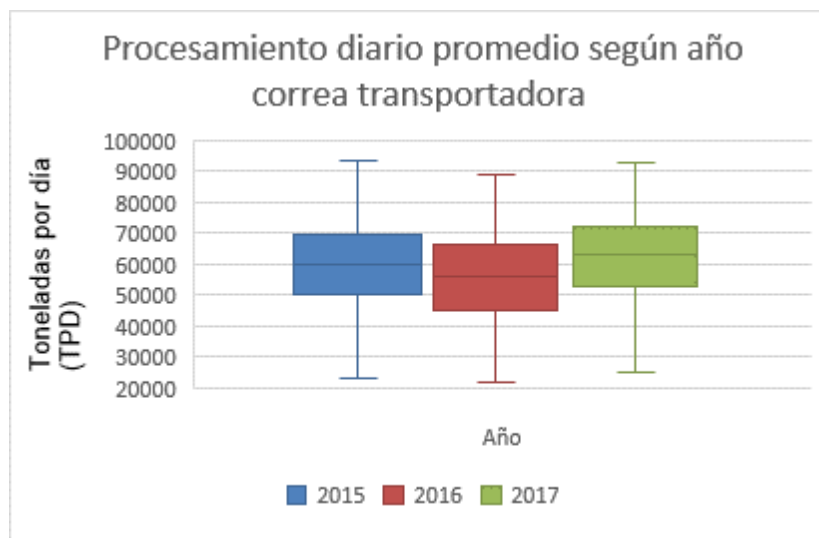


Figura 31. Resultados análisis de movimiento de mineral correo transportadora.

Al analizar los datos se obtiene que el movimiento de material procesado del año 2016 es inferior al de los otros años ($p < 0,01$), sin diferencias significativas entre el año 2017 y 2015 ($p=0,08$).

Al comparar el consumo de energía eléctrica en los años 2015, 2016 y 2017, se obtienen los siguientes resultados. Ver tabla siguiente.

Tabla 11. Resultados análisis de consumo de energía eléctrica correa transportadora.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	21.935,82	3.616,82	22.938,83	4.345,51
2016	20.881,41	3.543,80	21.530,64	4.192,30
2017	20.730,55	3.328,12	21.818,66	3.619,50
Total	21.193,64	3.535,51	22.133,57	4.080,28

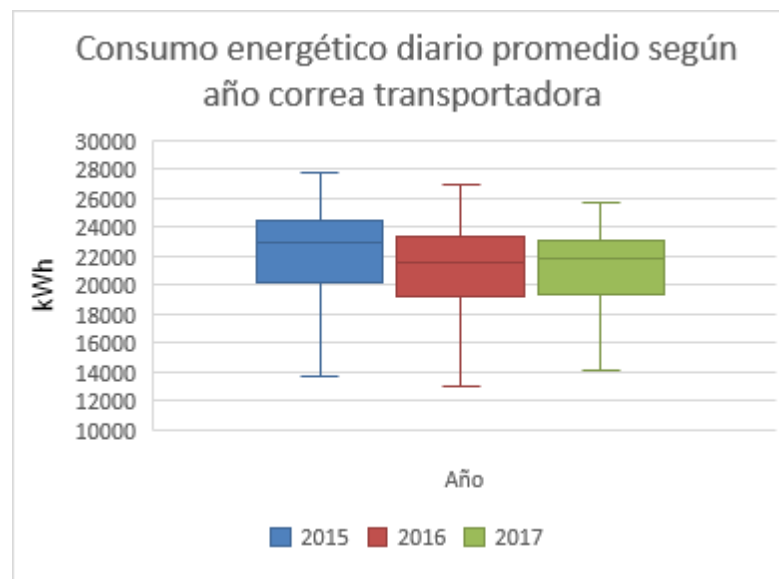


Figura 32. Resultados análisis de consumo de energía eléctrica correa transportadora.

Al analizar los datos se obtiene que el consumo de energía eléctrica fue mayor durante al año 2015 respecto al 2016 y 2017 ($p < 0,01$), sin diferencias significativas entre los años 2016 y 2017 ($p=0.171$).

Al revisar los KPI de los tres años, se obtiene que el año 2017 presenta menores valores respecto al año 2015 y 2016 ($p < 0,001$), sin existir diferencias entre últimos años ($p = 0,379$).

Tabla 12. Resultados análisis KPI de eficiencia energética correa transportadora.

Año	Promedio	Desviación estándar	Mediana	Rango Intercuartílico
2015	0,384	0,069	0,368	0,057
2016	0,393	0,078	0,369	0,074
2017	0,347	0,058	0,331	0,050
Total	0,374	0,071	0,357	0,066

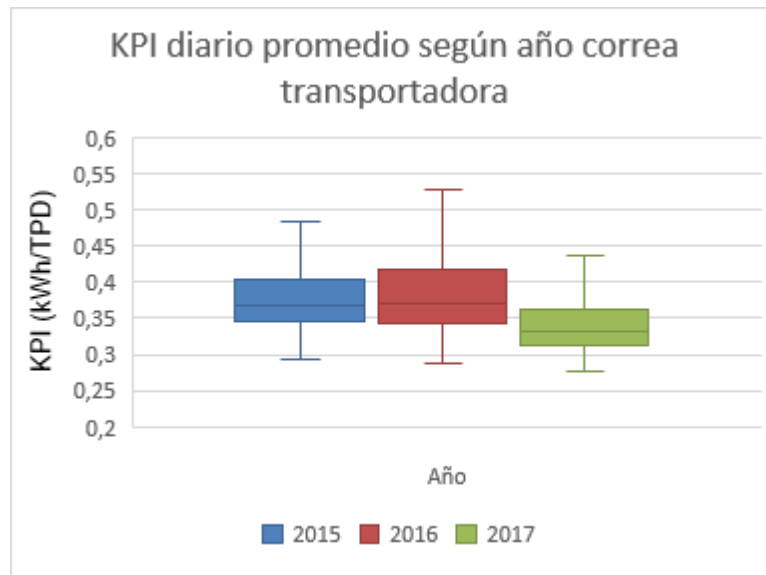


Figura 33. Resultados análisis KPI de eficiencia energética correa transportadora.

6. PROPUESTAS DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

6.1. PROPUESTAS

Considerando el análisis anterior de los datos, los resultados presentados y también los porcentajes respectivos de consumo energético, se plantean medidas de eficiencia energética para los procesos estudiados.

6.1.1. MEDIDAS PARA EL TRANSPORTE Y CHANCADO

Dados los resultados anteriores se plantea:

- Utilización de polines de bajo roce
- Utilización de variadores de frecuencia
- Utilización de motores de alta eficiencia

Estas medidas mencionadas anteriormente, ya se encuentran aplicadas en la faena en estudio y son de uso en las faenas nacionales, con probados beneficios en los sistemas de transporte de mineral a través de correas. Esto responde también al comportamiento estable en consumo de energía y funcionamiento de las mismas.

6.1.2. MEDIDAS PARA LA MOLIENDA SAG

Según los resultados presentados y las relaciones descritas entre la eficiencia del procesamiento de mineral y la granulometría de entrada se plantea lo siguiente:

- Mejorar la granulometría de entrada mejorando la utilización del prechancado.
- Considerar la utilización de stock de mineral de granulometría menor a una pulgada para mejorar la mezcla.
- Control de frecuencia automático para el molino SAG.
- Mejorar la línea de proceso asociada al prechancado realizando una actualización y mantenimiento mayor.
- Considerar e incorporar un KPI de eficiencia que se mida para el proceso de pre chancado.
- Control en la operación de todo el proceso asociado a la planta concentradora para minimizar la variabilidad del proceso.

Dado el gran impacto, que presenta el molino SAG dentro del proceso se describe en mayor profundidad la medida de mejorar el prechancado.

El proceso de prechancado, mejora la granulometría a ingresar al SAG (evitando las partículas entre 2 a 4 pulgadas), por lo que si se mejora este proceso impactará directamente en la eficiencia del molino SAG. En la faena en estudio, muchas veces se privilegia el funcionamiento del molino que absorbe las ineficiencias de las fallas del prechancado. Por esto se recomienda mejorar las condiciones de operación y la utilización del pre chancado, además se plantea la incorporación de un KPI para el pre chancado, que relacione el material procesado con la granulometría de salida, ya que actualmente esto no se realiza y como se mencionó anteriormente el impacto de la mala utilización del pre chancado es absorbido por el molino SAG. También se sugiere generar un stock de mineral con granulometría menor de 2 pulgadas, para mejorar la composición según la granulometría de carga del molino SAG.

6.2. AHORROS ESTIMADOS

Para considerar un valor de ahorro de energía consumida y su posterior evaluación monetaria, producto de medidas de eficiencia energética, primero se debe revisar el contexto global de los consumos que se manejan en la planta concentradora de la cual se obtuvieron los datos. En el siguiente gráfico se observa la participación promedio diaria de cada proceso estudiado en el consumo de energía eléctrica.

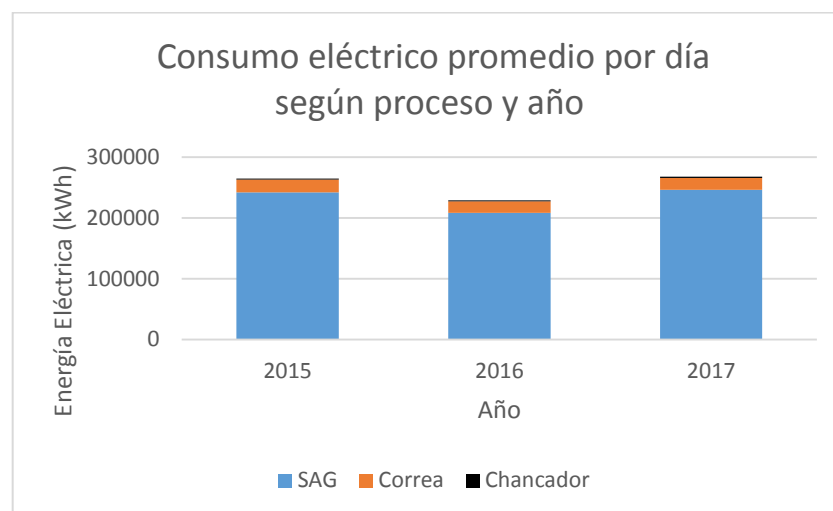


Figura 34. Consumo eléctrico promedio por día según proceso y año.

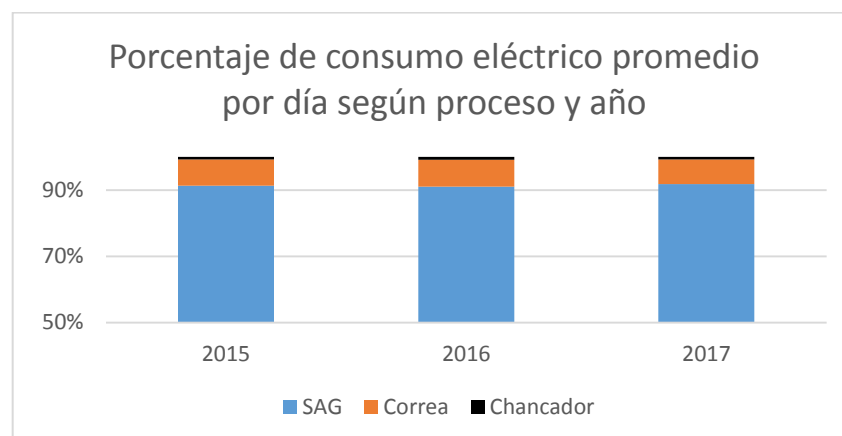


Figura 35. Porcentaje de consumo eléctrico promedio por día según proceso y año.

A continuación, se presenta una tabla con los datos utilizados para los gráficos anteriores.

Tabla 13. Valores de consumo de energía eléctrica promedio diario, por año para cada proceso.

Año	2015	2016	2017
SAG (kWh)	241.774	208.411	246.007
Correa (kWh)	21.009	18.603	19.733
Chancador (kWh)	1.975	1.836	2.035

Considerando que el mayor consumo diario promedio de energía eléctrica se tiene para el caso del proceso asociado a la molienda SAG, se realiza un cálculo de la energía ahorrada considerando medidas de eficiencia energética que permitan llevar el procesamiento de material a niveles de alta producción y alta eficiencia energética. Así se considera el valor de procesamiento y de consumo de energía promedio diario y se toma para calcularlo considerando los días que no fueron de alta eficiencia y que deberían llegar a estos valores después de aplicar medidas de eficiencia energética, por lo que se calcula un valor teórico del potencial de ahorro de energía eléctrica. Para el cálculo de los días no eficientes se considera el promedio de los días eficientes y se restan los 365 días de un año completo. A continuación, se muestra una tabla con los datos utilizados para el cálculo anterior.

Tabla 14. Días con alta y baja eficiencia para alta producción por año.

Eficiencia energética	año 1	año 2	año 3	
	2015	2016	2017	Total
Baja	61	21	54	136
Alta	65	24	45	134
Total	126	45	99	270

Tabla 15. Ahorro potencial de energía eléctrica anual para molino SAG.

Alta producción y eficiencia	Baja producción y eficiencia	Delta	Días no eficientes	Valor de ahorro potencial	Unidad
261390	282742	21352	320	6.832.640	kWh

Así este valor de 6.832.640 kWh representa cerca del 8% del consumo anual del molino SAG.

Ahora, para valorizar en USD esta energía ahorrada, producto de las medidas de eficiencia energética que permitan llegar a una producción anual con días promedio de alta eficiencia y alta producción, se considerarán tres escenarios de precios de energía, previo a esto se revisará el contexto de los precios de energía eléctrica en el país.

En la actualidad para los consumidores regulados existen valores de energía en torno a los 80 USD/MWh, lo que se irá reduciendo paulatinamente con la entrada de los nuevos valores según los bloques de energía licitados en los últimos procesos, los que se muestran a la baja y dentro de algunos años comenzarán a verse reflejados en la cuenta de los clientes regulados (con potencia instalada menor a 0,5 MW). A continuación, se observan los precios adjudicados de las ultimas licitaciones de energía para clientes regulados.

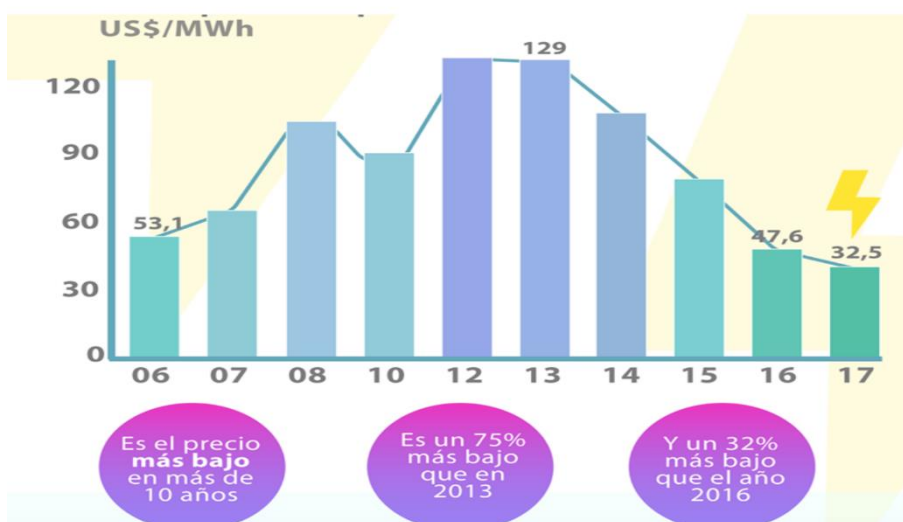


Figura 36. Evolución de precios medios adjudicados en licitaciones para clientes regulados.

Fuente: ww.energíachenile.cl ,2017).

Considerando estos valores, se tiene una clara señal de baja de los precios de energía para procesos de licitación, esto ha hecho que los clientes libres renegocien contratos con valores antiguos y también que los clientes que tienen la opción de elegir entre regulados o libres (potencia entre 0,5 y 5 MW) comiencen a mirar el mercado libre como una opción de bajar sus costos en energía eléctrica.

Dado este contexto, se sabe que en minería existen muchos contratos a largo plazo aún vigentes (a 20 o 25 años plazo), que tienen precios de energía en torno a los 110 USD/MWh (considerando el total de costos asociados), lo que contrasta con la realidad actual dado que la vertiginosa arremetida de la energía solar y eólica en conjunto con la paralización de muchos proyectos térmicos, entre otros, ha hecho que los contratos hoy en día se celebren a 5 años en promedio y posean precios mucho más atractivos.

Considerando lo anterior se realizará el cálculo del ahorro de energía eléctrica valorizado en tres escenarios hipotéticos de precios de energía.

A continuación, se presentan la tabla y gráfico asociado a este cálculo.

Tabla 16. Ahorro de energía en USD para 3 escenarios de precios de electricidad al año.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Precio Electricidad (USD/MWh)	110	90	70
Energía anual (MWh)	6.833	6.833	6.833
Ahorro (USD)	751.590	614.938	478.285

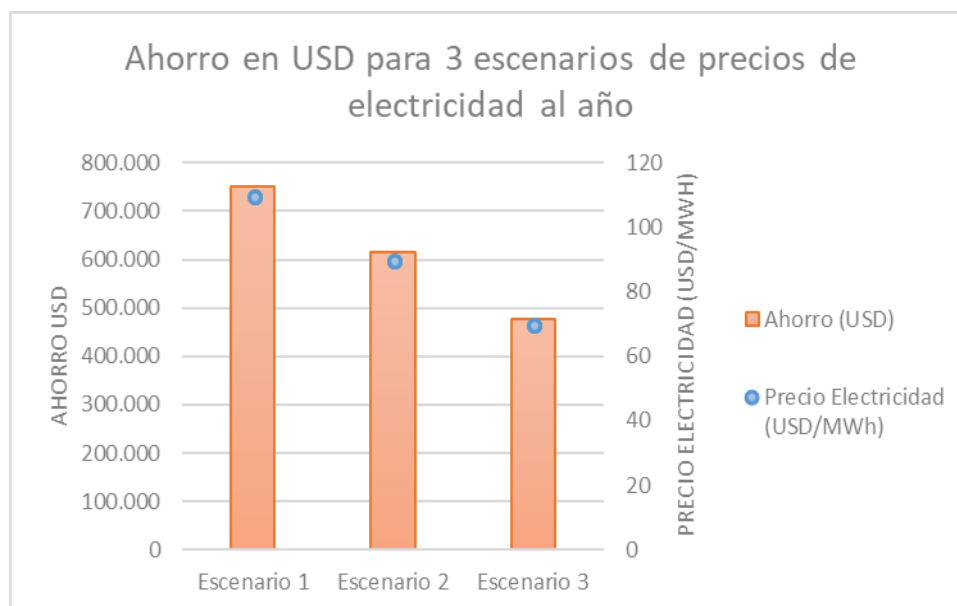


Figura 37. Ahorro de energía en USD para 3 escenarios de precios de electricidad al año.

Por otra parte, además del impacto positivo en la reducción del consumo eléctrico al aumentar la eficiencia, se tiene, en relación con el aumento de procesamiento de mineral, que al valorizarlo podemos obtener al final de la cadena de producción un aumento en la venta de cobre fino.

Así se realiza un cálculo del aumento de procesamiento de mineral considerando medidas de eficiencia energética que permitan llevar el procesamiento de material a niveles de alta producción y alta eficiencia energética. A continuación, se presenta el mayor procesamiento de mineral en la siguiente tabla.

Tabla 17. Mayor procesamiento de mineral teórico para el Molino SAG.

Alta producción y eficiencia	Baja producción y eficiencia	Delta	Días no eficientes	Valor de ahorro potencial	Unidad
42220	41281	939	320	300.480	TM

Así este valor de 300.480 TM de mayor procesamiento anual representa cerca del 2,2% del procesamiento anual del molino SAG.

Para cuantificar el valor de las toneladas de cobre procesadas, se debe revisar el proceso y aplicar los factores de pérdida necesarios. A continuación, se presenta un esquema resumen del proceso.

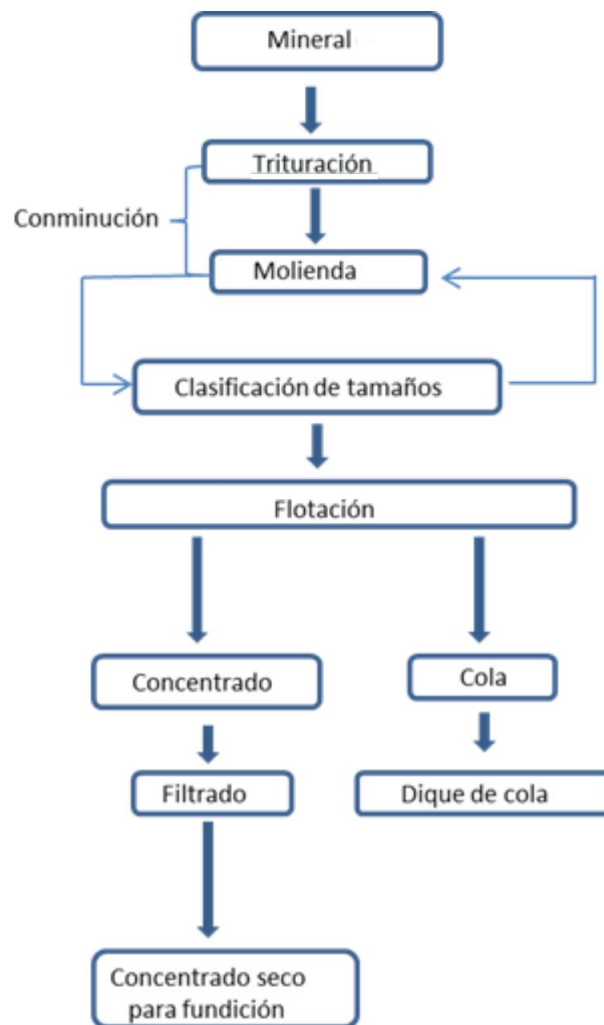


Figura 38. Esquema resumen procesamiento de mineral.

Así, el cobre fino equivalente se define como:

$$Cu_{fino} = Ton_{mp} * ley_{Cu} * Rf * Rref$$

Donde:

Cu_fino: Toneladas de cobre fino equivalentes

Ton_mp: Toneladas de material procesado

Ley_Cu: Ley del cobre

Rf: Reducción durante proceso de flotación

Rref: Reducción durante proceso de refinación

A continuación, se indican los valores de referencia de las variables, para realizar el cálculo.

Tabla 18. Valores para cálculo de cobre fino equivalente

Ton_mp	Ley_Cu	Rf	Rref
300.480	0,007	0,88	0,95

Utilizando estos datos se tiene, que las 300.480 toneladas de material procesado son equivalentes a 1.758 toneladas de cobre fino.

Ahora al convertir toneladas a libras se tiene que, 1.758 toneladas equivalen a 3.876.588 libras.

Entonces, para valorizar en USD el equivalente de producción de cobre fino, producto de las medidas de eficiencia energética que permitan llegar a una producción anual con días promedio de alta eficiencia y alta producción, se considerarán tres escenarios de precios del cobre, previo a esto se revisará el contexto de los precios del cobre.

El precio del cobre ha disminuido significativamente durante los últimos años. A fines del 2011 y comienzos del 2012 se aproximó a 4 USD la libra, un momento excelente para la industria minera, pero posterior a eso comenzó a descender nuevamente. En el 2016, dicho comportamiento se acentuó, llegando a valores cercanos a 2 USD la libra. Posterior a esto el cobre comenzó a tener un repunte, llegando a valores cercanos a 3 USD la libra para comienzos del 2018. Detrás del último ciclo de precios bajos hay tanto factores relacionados con la oferta como con la demanda. Son importantes de mencionar, el menor crecimiento de la demanda china y la entrada en producción de una serie de faenas asociadas al ciclo dorado de inversión en minería. Además, a lo anterior se tiene un dólar más apreciado a nivel global, que ha impactado los precios de las materias

primas en general y ha participado en el proceso de disminución de costos en la industria minera.

A continuación, se presenta una tabla con la evolución de precios promedio del cobre desde el 2008 hasta la actualidad.

Tabla 19. Evolución de los precios de cobre promedio por año

Año	Precio (USD cents/lb)
2008	315,316
2009	234,217
2010	341,978
2011	399,656
2012	360,593
2013	332,120
2014	311,255
2015	249,226
2016	220,563
2017	279,684
ENE-MAR / 2018	315,725

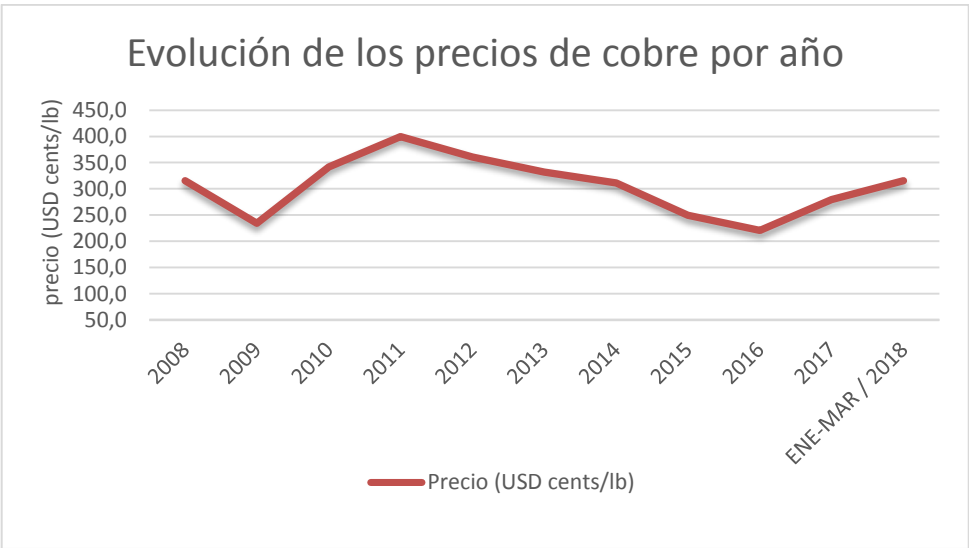


Figura 39. Evolución de los precios promedio de cobre por año.

Por lo tanto, se tiene una ganancia teórica anual al aumentar el procesamiento de mineral, que se muestra en la siguiente tabla, con tres escenarios de precios del cobre.

Tabla 20. Aumento de venta de cobre valorizado con 3 escenarios de precio del cobre al año.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Precio Cobre (USD/libra)	3,5	3	2
Cobre (libra)	3.876.588	3.876.588	3.876.588
Venta cobre (USD)	13.568.059	11.629.765	7.753.177

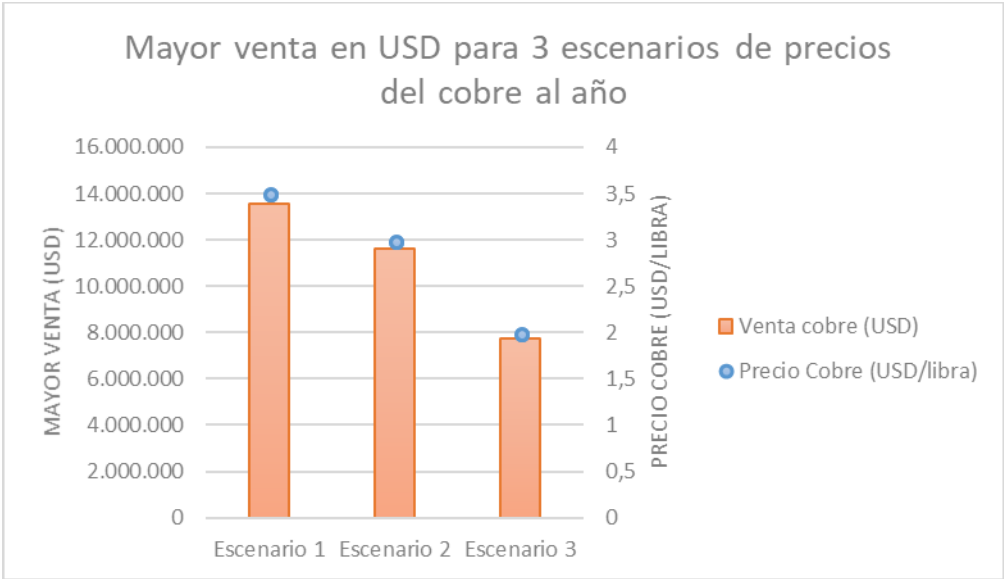


Figura 40. Mayor venta de cobre para 3 escenarios de precios del cobre al año.

Así, dados los valores presentados tenemos ahorros de energía (menor gasto) y mayor venta de cobre (mayor ingreso), que son resultados potenciales de implementar medidas de eficiencia energética.

7. DISCUSIÓN

En el presente estudio se encontró que no existieron diferencias estadísticamente significativas en los valores promedio del KPI de eficiencia energética (kWh/tpd) durante los años 2015, 2016 y 2017 (tabla 6: Resultados de análisis KPI de eficiencia energética molino SAG). Esto se puede explicar por la continuidad de procesos y similitud de planes de mantención de planta concentradora entre los años analizados.

Al analizar el consumo de energía eléctrica versus procesamiento de mineral diaria en molino SAG en alta producción (figura 19), se observó una gran dispersión en los valores obtenidos, que variaron entre 40.154 tpd a 48.829 tpd para el procesamiento de mineral y 208.585 kWh a 300.036 kWh para el consumo de energía eléctrica. Esto se podría atribuir a la falta de control de las variables de granulometría y dureza del material al entrar al SAG.

En relación con el KPI de eficiencia energética versus el porcentaje de granulometría menor a 1 pulgada de entrada al SAG (figura 21 y 25), se encontró diferencias significativas al comparar entre alta y baja eficiencia (con valor de referencia del KPI de 6,56, sobre este valor es baja eficiencia). En otras palabras, al existir mayor cantidad de partículas con granulometría menor a 1 pulgada de material procesado el KPI mejora, por lo tanto, el proceso es más eficiente. Esto se explica debido al comportamiento de la molienda semiautógena. En la figura 23 y 27, se observa que para granulometrías de entrada al SAG entre 2 a 4 pulgadas, existen diferencias significativas al comparar el KPI entre alta y baja eficiencia (con valor de referencia del KPI de 6,56, bajo este valor es alta eficiencia). Al existir mayor cantidad de partículas entre 2 a 4 pulgadas de material procesado el KPI aumenta, es decir, el proceso es menos eficiente. Esto se explica debido al comportamiento de la molienda semiautógena (el mismo material procesado y el porcentaje de bolas de acero participan en el proceso de

conminución) en donde esta granulometría en particular empeora el comportamiento del molino produciendo que las partículas de material no alcancen la granulometría deseada de ½ pulgada o menor.

Para el caso del transporte de mineral procesado en correas, se observa que los valores del KPI de eficiencia energética, comparado para los tres años, son similares. Esto se explica debido a que este tipo de sistemas ya poseen en la actualidad medidas de eficiencia energética como variadores de frecuencia, para los motores que impulsan las correas, motores de alta eficiencia y polines de bajo roce, maximizando la efectividad y eficiencia de este sistema de transporte.

En el caso del chancador, se observa que los valores de consumo energético en relación con los otros dos procesos estudiados (transporte a través de correas y molienda SAG), representa un porcentaje de menos del 1% por lo que aplicar medidas de eficiencia en esta etapa no muestra una ventaja significativa o un aporte que merezca mayor profundidad en el estudio.

Dado que el proceso asociado al molino SAG representa el mayor porcentaje de consumo energético y que la granulometría de entrada a este proceso, tiene alta incidencia, se proponen las siguientes medidas de eficiencia energética (según los resultados obtenidos):

- Mejorar la línea de proceso asociada al prechancado realizando una actualización y mantenimiento mayor.
- Aumentar la utilización del prechancado y procesar la totalidad del material entre 2 a 4 pulgadas.
- Aplicar control de velocidad automático del molino SAG.
- Tener una tolva de material menor a 1 pulgada para mejorar la mezcla en caso de falla del prechancado.

- Control en la operación de todo el proceso asociado a la planta concentradora para minimizar la variabilidad del proceso.

Al implementar medidas de eficiencia energética asociadas al molino SAG se tienen los siguientes beneficios:

- Valor teórico de ahorro en consumo de energía eléctrica, presentado en la tabla 15, con un valor de 6.832.640 kWh, representa en promedio un 8% del consumo anual del molino SAG y muestra el beneficio de aplicar medidas de eficiencia energética en este proceso.
- Valor potencial de mayor procesamiento correspondiente a 300.480 toneladas al año que representa cerca del 2,2% de procesamiento anual del molino SAG (presentado en tabla 17), muestra la capacidad de procesamiento alcanzable, que en la actualidad la planta concentradora está dejando de realizar.

El valor de ahorro en energía eléctrica valorizado en 751.590 USD y el mayor procesamiento convertido a mayor producción valorizado en 13.568.588 USD, corresponden a un valor teórico, que para ser alcanzado requiere entre otros de la aplicación de las medidas de eficiencia energética mencionadas anteriormente, tal que permita llevar a valores de alta eficiencia y alta producción todos los días del año.

En relación con la limitación de este estudio se plantea que:

- Los datos de dureza del material procesado no se encuentran disponibles como valores medidos, sino que, como proyecciones de dureza consideradas en el plan minero según muestras de medidas a través de sondeos realizados en el proceso de perforación, por esto se decide no

utilizarlos, ya que toda la data utilizada corresponde a valores efectivamente medidos (consumo de energía eléctrica, procesamiento de mineral y granulometría de entrada al molino SAG).

Se sugiere para estudios posteriores:

- Utilizar esta metodología, replicándola en otras faenas mineras del país para obtener resultados y poder compararlos con los actuales determinando comportamientos característicos de la industria nacional, en los procesos de planta concentradora.
- Evaluar la implementación de control de la granulometría (eliminar la entrada de material de 2 a 4 pulgadas) de entrada al SAG y medir los valores obtenidos de procesamiento y consumo de energía.
- Implementar un prechancado eficiente (eliminar los tamaños de 2 a 4 pulgadas) y medir los valores de consumo de energía y procesamiento de mineral en el SAG, evaluando su impacto económico.

8. CONCLUSIONES

Al analizar los datos anuales de consumo de energía eléctrica, procesamiento de mineral y granulometría de entrada al SAG, se observó que preliminarmente existe una gran dispersión en los datos, y dado esto se decidió realizar los análisis posteriores considerando una condición de alto procesamiento de mineral que fue definida como el 25% de datos de mayor procesamiento, obteniéndose un universo de 270 datos.

Para el caso del SAG se observó que el KPI [kWh/TPD] presenta directa relación con la granulometría y responde a lo presentado en la literatura científica. Para la faena minera estudiada, en particular en el molino SAG, se observó que existe una proporción de material con granulometría entre 2 a 4 pulgadas, que representa en promedio el $21,28 \% \pm 4,17 \%$ del material, afectando la eficiencia de la molienda SAG. Esto muestra que el proceso estudiado tiene potencial de mejora dada esta condición.

Para el caso de los datos de granulometría, consumo de electricidad y procesamiento de mineral, representados los dos últimos a través del KPI de eficiencia energética medido en [kWh/TPD], se tiene que el molino SAG se comporta de manera estable en relación a los promedios de los tres años (2015, 2016 y 2017), con valores en torno a 7 [kWh/TPD]. Por otra parte, se observó la necesidad de definir un KPI de referencia, que permitió realizar análisis comparando alta y baja eficiencia. Este KPI se definió con un valor de 6,56 que corresponde a la mediana obtenida de los datos considerando alto procesamiento, esto responde a la necesidad de mejorar la eficiencia y reducir los costos.

Para el caso de la correa transportadora dado su comportamiento estable en relación con el consumo de energía y los KPI obtenidos, además de los sistemas

que ya posee implementados, como son motores de alta eficiencia, variadores de frecuencia y polines de bajo roce, se concluye que ya tiene medidas descritas en la literatura y posee un comportamiento estable.

En relación con el chancador se tiene que su consumo de energía eléctrica comparado a los otros dos procesos estudiados (molienda y transporte) representa alrededor del 1% por lo que se concluye no analizar en profundidad este proceso.

Para las medidas de eficiencia energética se concluye actuar directamente sobre el molino SAG y sobre el proceso que debiera eliminar el material con granulometría de 2 a 4 pulgadas, que está aguas arriba, el pre chancado. Se determinó que mejorar la granulometría de entrada y la operación del SAG representa un beneficio directo al procesamiento de material y a la eficiencia con el que se realiza.

Se determinaron los valores máximos a alcanzar anualmente como ahorro de energía eléctrica en el consumo del SAG y mayor procesamiento llevado a toneladas métricas de fino. Se concluye que el beneficio potencial máximo de llevar a mayor procesamiento y mayor eficiencia se valoriza en 751.590 USD para el ahorro de energía anual y en 13.568.588 USD para la mayor venta de cobre fino.

Se determinó aplicar medidas de eficiencia energética en el molino SAG, destacando las siguientes:

- Aplicar control de velocidad automático del molino SAG.
- Mejorar la línea de proceso asociada al pre chancado realizando una actualización y mantenimiento mayor.
- Aumentar la utilización del pre chancado y procesar la totalidad del material entre 2 a 4 pulgadas.
- Incorporar un KPI de eficiencia que mida el comportamiento del pre chancado.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://www.cochilco.cl/> “Producción de cobre mundial y Chile”
- [2] <https://www.cochilco.cl/> “Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016”
- [3] U.S. geological Survey “Mineral Commodity Summaries 2017”
- [4] www.sernageomin.cl “Anuario de la minería 2015”
- [5] Jeswiet J and Szekeres A. Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP*. 2016;48:140-145.
- [6] “Autorregulación de la Gran Minería Nacional en materia de Eficiencia Energética, sus motivaciones e implementación”. Desarrollado en el marco del proyecto FONDECYT de iniciación: “Instrumentos para la elaboración de una política energética sustentable”, No. 11100288, 2010-2012. Pilar Moraga Sariego. Alumnos: Daniela Jara y Claudio Rojas.
- [7] Awuah-Offei K. Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. *Journal of Cleaner Production*. 2016;117:89-97.
- [8] “Competitividad de la minería chilena del cobre” DE/07/15. Comisión Chilena del Cobre.
- [9] https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110803/asocfile/20110803121111/codelco_informa_10.pdf.
- [10] Política de eficiencia energética Corporativa de Codelco.
- [11] Cabezas Reynaldo. Manual de eficiencia energética para minería. Tesis (Ing. Civil Mecánica). Santiago, Universidad de Chile, 2016.
- [12] MinMinería, chancado. <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-c/chancado/>
- [13] MinMinería, molienda. <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-m/molienda/>
- [14] Arriagada, 2013. <https://es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633>)

- [15] AChEE, 2015. <https://www.acee.cl/achee-lanza-tres-nuevas-guias-de-medicion-y-verificacion-en-la-gestion-de-proyectos-de-eficiencia-energetica/>.
- [16] Odhams AMC, Roebuck RL, Lee YJ, Hunt SW, Cebon D. Factors influencing the energy consumption of road freight transport. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng Sci. 2010; 224(9),1995-2010.
- [17] Oskouei MA, Henriksson -Offei, K. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines. Min Technol. 2014;123 (4),175-182.
- [18] Levesque M, Millar D, Paraszczak J. Energy and MiningThe Home Truths. J Clean Prod, 2014: 84, 233e255.
- [19] Brownlee, C., 2012. OMA Energy Committee. [email] (Personal communication, 7 June, 2012).
- [20] Fitzpatrick, P., Fonseca, A., McAllister, M.L., 2011. From the whitehorse mining initiative towards sustainable mining: lessons learned. J. Clean. Prod. 19 (4), 376e384
- [21] ENNR en el Mercado Eléctrico, 2009. http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/ernc_mercado_electrico_chileno_baja_resolucion.pdf
- [22] AChEE, historia. <http://old.acee.cl/acerca-de-achee/historia>
- [23] PPEE, 2008. Informe final de la evaluación Programa País de Eficiencia Energética Comisión Nacional de Energía. http://www.dipres.gob.cl/597/articles-141121_informe_final.pdf
- [24] ACEE. www.acee.cl/proyecto-de-ley-de-eficiencia-energetica-inicio-su-tramitacion-en-el-congreso/
- [25] Henriksson E, Söderholm P, Wårell, L. Industrial electricity demand and energy efficiency policy: the case of the Swedish mining industry. Energy Effic. 2014;7(3): 477-491.
- [26] Kohler M. Differential electricity pricing and energy efficiency in South Africa. Energy. 2014;64:524-532.

- [27] DOE, 2009. Department of Energy (DOE), Industrial Technologies Program: Summary of Program Results for CY 2009. US Department of Energy. http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/about/pdfs/impacts2009_full_report.pdf
- [28] McLellan BC, Corder GD, Giurco DP, Ishihara KN. Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential. *J Clean Prod.* 2012;32:32-44.
- [29] Verhoeven R, Willems E, Harcouët-Menou V, DeBoever E, Hiddes L, Op't Veld P, Demollin E. Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling. *Energy Procedia.* 2014;46:58-67.
- [30] Watzlaf, G.R., Ackman, T.E., 2006. Underground mine water for heating and cooling using geothermal heat pump systems. *Miner. Water Environ.* 25 (1), 1e14.
- [31] Carvalho M, Romero A, Shields G, Millar DL. Optimal synthesis of energy supply systems for remote open pit mines. *Appl Therm Eng.* 2014;64(1):315-330.
- [32] Paredes-Sánchez JP, Villicaña-Ortíz E, Xiberta-Bernat J. Solar water pumping system for water mining environmental control in a slate mine of Spain. *J Clean Prod.* 2015;87:501-504.
- [33] Chatterjee A, Zhang L, Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Appl. Energy.* 2015;146:65-73.
- [34] CEEC, 2012. The CEEC roadmap for eco-efficient comminution. CEEC, August. <http://www.ceecthefuture.org/publication/2012-ceec-roadmap/>
- [35] Napier-Munn T. "Comminution Energy and How to Reduce it". (<http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2013/01/Napier-Munn-CEEC-3-12.pdf>).
- [36] Fuerstenau DW, Abouzeid A-ZM. The energy efficiency of ball milling in comminution. *Int J Miner Proc.* 2002;67:161–185.
- [37] Morrell S, Napier-Munn TJ, Andersen JS. The prediction of power draw in comminution machines. In: Kawatra, K. (Ed.), *Comminution – Theory and Practice*. 1992; pp. 405–426 (chapter 17) (SME).

- [38] DOE, 2007. Mineral industry energy bandwidth study. US Department of Energy.
<http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/mining/pdfs/miningbandwidth.pdf>
- [39] Napier-Munn T. Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Miner Eng.* 2015;73:1-6.
- [40] Nadolski S, Klein B, Kumar A, Davaanyam Z. An energy benchmarking model for mineral comminution. *Miner Eng.* 2014;65:178-186.
- [41] Palaniandy S, Powell M, Hilden M, Allen J, Kermanshahi K, Oats B, Lollback M. VertiMill®ePreparing the feed within floatable regime at lower specific energy. *Miner Eng.* 2015;73: 44-52.
- [42] Pothina R, Kecojevic V, Klima MS, Komljenovic D Gyratory crusher model and impact parameters related to energy consumption. *Miner. Metall. Process.* 2007;23(3):170-180.
- [43] ENERGY MANAGEMENT IN MINING. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry, 2016.
<https://industry.gov.au/resource/Programs/LPSD/Documents/Energy-Management-in-Mining.pdf>
- [44] Xia X, Zhang J. Control systems and energy efficiency from the POET perspective. In: IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency; Vilamoura, Portugal; 29–31 March, 2010.
- [45] Zhang S, Xia X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Appl Energy.* 2011;88 (9): 3061-3071.
- [46] De Almeida AT, Fonseca P, Bertoldi P. Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies. *Energy* 2003;28:673–90.
- [47] Middelberg A, Zhang J, Xia X. An optimal control model for load shifting – with application in the energy management of a colliery. *Appl Energy.* 2009;86:1266–73.

[48] Parreira J, Meech J. Autonomous haulage systemsejustification and opportunity. In: Autonomous and Intelligent Systems. Springer Berlin Heidelberg. 2011:63-72.

10. ANEXOS

10.1. ANEXO 1. DATOS TÉCNICOS MOLINO SAG.

DATA SHEET A		
DUTY AND SERVICE REQUIREMENTS OF SEMIAUTOGENOUS MILL		
1.0	NUMER AND SIZE OF UNITS PER THIS DATA SHEET	One (1) mill; 36 ft. diameter inside shell by 15 ft EGL
2.0	EQUIPMENT NUMBER	
3.0	DUTY CYCLE	
	Hours per day	24
	Days per week	7
	Days per year	365
	Availability	90% minimum
4.0	AMBIENT CONDITIONS	
	Plant Location	
	Indoors or outdoors	Indoors/Underground
	Environment (clean or dusty)	Dusty
	Enviroment (wet or dry)	Wet
	Elevation	3000 m above sea level
	maximum temperature at unit	40°C
	Minimum temperature at unit	+ 5°C

5.0 OPERATING AND DESIGN CONDITIONS

The mill must draw 16.000 HP under the volumetric ball charge conditions to be specified by the Vendor.

However, the structural design will be for the maximum operating conditions as stated below including 6" new liners.

	<u>Maximum</u>
Mill speed (% of critical)	74 or manufacturer's recomendation
Total charge (% vol)	35
Ball charge (% vol)	15

6.0 FEED ORE CHARACTERISTICS

Material	Primary Crusher Product
Specific gravity of ore	2.8
Bulk density (mt/m ³)	1.6 - 1.7
Moisture content (%)	3.0
Typical Size distribution (accumulated passing %)	88% minus 6 inches
Feed flow:	
Fresh feed	nom. 1463, max. 1825 MTPH
Recycled crushed pebbles	nom. 67, max. 568 MTPH
Total	nom. 1530, max. 2345 MTPH

MILL DISCHARGE

The mill will be grate discharge with rock ports of tapered design. The mill discharge grate will be designed to sustain the following slurry flow:

Normal	1202	m ³ /hr
Maximum	1842	m ³ /hr
Rock ports	Shape, size and number according vendor's recommendation for -3 + 1/2 in. Classification size	

Vendor will define the number of rock ports per grate casting section.

The mill discharges to a screen of 3/4" x 1 1/2" opening. The quantity of -3 + 1/2 pebbles expected is 396 t/h under normal conditions and 658 t/h maximum. These pebbles will be crushed and conducted to two (2) ball mills or returned to the SAG Mill.

8.0 UTILITIES AVAILABLE

8.1 ELECTRIC POWER

Main supply	<u>13200 volts, 3 phases,</u> <u>50 Hz</u>
Motor up to 250 HP	<u>380 volts, 3 phases,</u> <u>50 Hz</u>
Control Power	<u>110 volts, 1 phases,</u> <u>50 Hz</u>
Other (oil heaters, etc)	<u>380 volts - 3ø - 50 Hz</u> <u>220 volts - 1ø - 50 Hz</u>

8.2 COMPRESSED AIR

85 psig

8.3 WATER

Fresh water as required

DATA SHEET B

SAG MILL

1.1 MILL GRINDING PERFORMANCE

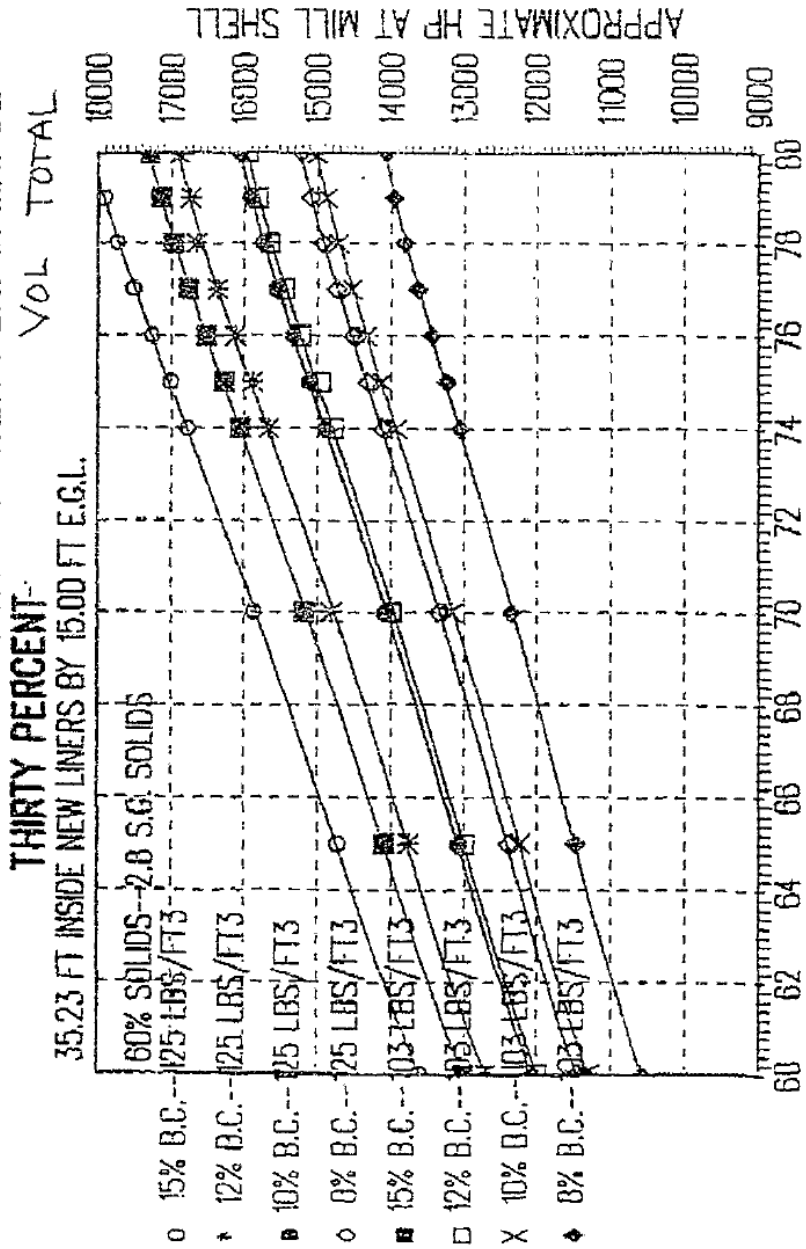
1.1.1 Mill speed 9.52 RPM Nominal

1.1.2 Mill % critical speed at 1.1.1 74%

The approximate power performance of the SAG mill is shown in the following pages for different speed and ball charges.

1.1.3 Recommended initial mill ball charge is shown on pages 44 and 45. The distribution of ball sizes will be chosen during commissioning activities.

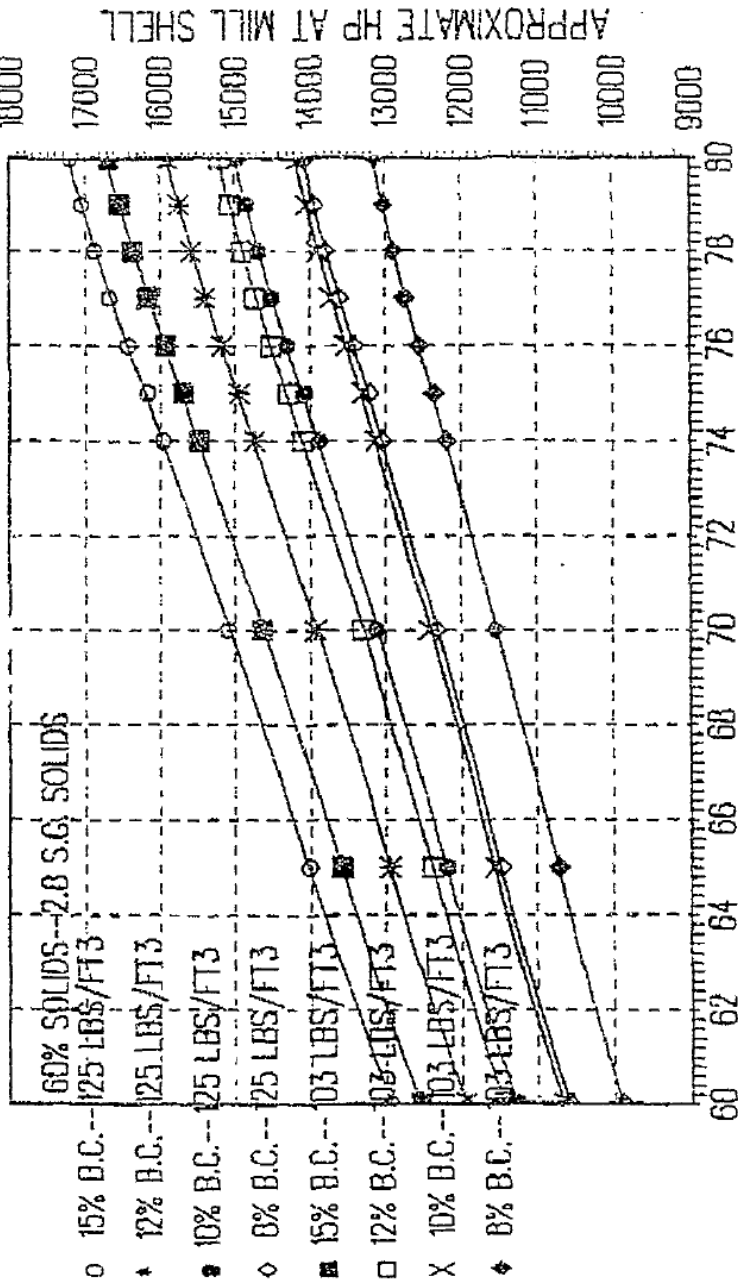
ANDINA SAC MILL---APPROXIMATE POWER PERFORMANCE



ANDINA SAG MILL--APPROXIMATE POWER PERFORMANCE

(34.0%) TWENTY FOUR PERCENT VOL TOTAL

35.23 FT INSIDE NEW LINERS BY 15.00 FT E.C.L.



GEARLESS MOTOR--NEW LINERS--VARIABLE SPEED DRIVE

ALLIS MINERALS		DATA	
CHARGE VOLUME CALCULATIONS			
NEW LINERS			
NOMINAL MILL DIAMETER			35.00
NOMINAL MILL LENGTH			16.75
MILL DIAMETER INSIDE NEW LNRS			35.04
MILL RADIUS INS. NEW LINERS	R		17.52
MILL E.G.L INS. NEW LINERS	L		15.00
MILL SHELL PLATE THICKNESS			3.00
MILL LIFTER BAR WIDTH			8.00
MILL LIFTER BAR HEIGHT ABOVE PLATE-HIGH			8.00
MILL LIFTER BAR HEIGHT ABOVE PLATE-LOW			4.88
MILL NUMBER OF SHELL ROWS			72.00
DISTANCE BEHIND GRATE			15.00
VOLUME OF CHG AT TRUNNION			
DISTANCE CL TO D.O.C			2.72
PERCENT CHARGE VOLUME	%CHGVOL		35.16
VOLUME OF CHG CYLINDER	VCYL		5293.56
VOLUME OF CHG FEED CONE	VFCDONE		435.05
VOLUME OF CHG DISCH CONE	VDISCON		435.05
TOTAL CHARGE VOLUME	VTOT		6163.67
TOTAL MILL VOLUME			
VOLUME OF CHG CYLINDER			14468.53
VOLUME OF CHG FEED CONE			1531.97
VOLUME OF CHG DISCH CONE			1531.97
TOTAL MILL VOLUME	TOTVCL		17532.48

DISTANCE CENTERLINE TO TOP OF CHARGE	VOLUME OF CHG IN FEED CONE	VOLUME OF CHG IN DISCH CONE	VOLUME OF CHG IN CYL	TOTAL CHARGE VOLUME	PERCENT MILL VOLUME
FEET	FT3	FT3	FT3	FT3	
0.25	730.51	730.51	7102.85	9563.86	48.85
0.50	706.61	706.61	6971.46	8384.69	47.82
0.75	683.12	683.12	6640.13	8206.37	46.81
1.00	660.03	660.03	6708.88	8028.93	45.79
1.25	637.33	637.33	6577.73	7852.40	44.79
1.50	615.04	615.04	6446.72	7676.81	43.79
1.75	593.16	593.16	6315.87	7502.19	42.79
2.00	571.68	571.68	6185.21	7328.57	41.80
2.25	550.61	550.61	6054.77	7155.98	40.82
2.50	529.95	529.95	5924.56	6984.46	39.84
2.75	509.70	509.70	5794.63	6814.03	38.87
3.00	489.86	489.86	5664.99	6644.72	37.90
3.25	470.44	470.44	5535.68	6476.57	36.94
3.50	451.43	451.43	5406.73	6309.60	35.99
3.75	432.84	432.84	5278.16	6143.84	35.04
4.00	414.67	414.67	5149.99	5979.32	34.10
4.25	396.91	396.91	5022.27	5816.08	33.17
4.50	379.56	379.56	4895.02	5654.14	32.25
4.75	362.64	362.64	4768.26	5493.53	31.33

MILL1.XLW

ALLIS MINERALS				DATA	
CHARGE VOLUME CALCULATIONS					
ANDINA SAG MILL					
NEW LINERS					
NOMINAL MILL DIAMETER				36.00	
NOMINAL MILL LENGTH				16.75	
DISTANCE CENTERLINE TO TOP OF CHARGE	VOLUME OF CHG IN FEED CONE FT3	VOLUME OF CHG IN DISCH CONE FT3	VOLUME OF CHG IN CYL FT3	TOTAL CHARGE VOLUME FT3	PERCENT MILL VOLUME
5.00	346.13	346.13	4642.03	5334.28	30.43
5.25	330.03	330.03	4515.36	5176.43	29.52
5.50	314.35	314.35	4391.28	5019.99	28.63
5.75	299.09	299.09	4266.82	4865.01	27.75
6.00	284.25	284.25	4143.01	4711.51	26.87
6.25	269.82	269.82	4019.89	4559.52	26.01
6.50	255.80	255.80	3897.48	4409.07	25.16
6.75	242.19	242.19	3775.82	4260.20	24.30
7.00	229.00	229.00	3654.94	4112.94	23.46
7.25	216.21	216.21	3534.88	3967.31	22.63
7.50	203.84	203.84	3415.67	3823.35	21.81
7.75	191.87	191.87	3297.35	3681.09	21.00
8.00	180.30	180.30	3179.95	3540.56	20.19
8.25	169.14	169.14	3063.52	3401.80	19.40
8.50	158.38	158.38	2948.09	3264.85	18.62
8.75	148.02	148.02	2833.69	3129.73	17.85
9.00	138.05	138.05	2720.38	2996.48	17.09
9.25	128.47	128.47	2608.19	2865.14	16.34
9.50	119.29	119.29	2497.17	2735.74	15.60
9.75	110.49	110.49	2387.36	2608.33	14.88
10.00	102.07	102.07	2278.80	2482.94	14.16
10.25	94.03	94.03	2171.54	2359.61	13.45
10.50	86.37	86.37	2065.64	2238.39	12.77
10.75	79.08	79.08	1961.14	2119.31	12.09
11.00	72.18	72.18	1858.10	2002.43	11.42

[illegible]