



**ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL MOLINO SAG DE LA  
PLANTA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES AURÍFEROS DE LA  
COMPAÑÍA ZIJIN CONTINENTAL GOLD**

**Luis Fernando López Bedoya**

Para obtener el título de:

**Ingeniero de Materiales**

Asesora interna

**Ph. D. María Esperanza López Gómez**

**Docente Ingeniería de Materiales**

Asesora externa

**Ana María Mejía Álvarez**

**Ingeniera de Minas**

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Materiales

Medellín

**2023**

Cita	López Bedoya [1]
<b>Referencia</b>	[1] L. F. López Bedoya, “Estudio del consumo energético del molino SAG de la planta de procesamiento de minerales auríferos de la compañía Zijin Continental Gold”, Trabajo de grado, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, 2023.



**Coordinador de prácticas UdeA:** María Esperanza López Gómez

**Asesora externa:** María Esperanza López Gómez

**Asesora interna:** Ana María Mejía Álvarez

**Zijin Mining Group:** Zijin Continental Gold sucursal Colombia



Centro de documentación CENDOI UdeA

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Sergio Iván Restrepo Ochoa.

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

El primero de los agradecimientos va a mis padres; por ser simplemente la motivación más grande que puede haber en mi vida, por inculcarme el espíritu de superación, darme todo su amor y apoyo en las decisiones que he tomado. Los consejos más sabios que he tenido, han provenido siempre de ellos. Esta memoria y el esfuerzo dedicado a la misma, son fruto del amor hacia mis Padres.

A la profesora María Esperanza López, por dedicarme su tiempo como profesora guía, por su alto grado de compromiso, por su comprensión y por estar siempre y de alguna manera al lado mío, que siempre fue un apoyo fundamental en esta memoria. A la ingeniera Ana María Mejía, quien fue mi asesora externa durante el desarrollo de esta memoria y a su vez compañera de trabajo que dedicó parte de su tiempo en orientarme y transmitirme su conocimiento que fueron clave en este proceso, una mujer que merece todo mi respeto y admiración por su trayectoria y el excelente trabajo que desempeña. A los demás ingenieros Leonardo, Mario, Lorena, Pablo, Esteban, Evelid, Fabián que forman parte de la compañía, quienes aportaron significativamente con su ingenio y gran conocimiento brindándome así la inspiración y el ánimo durante este proceso.

A la empresa Zijin Continentalgold, por confiar en mí para formar parte de esta gran compañía y así desarrollar este trabajo, pero también por permitirme conocer a gente tan especial que ha aportado tantas cosas a mi desarrollo como persona y como futuro profesional. A todas esas personas de la compañía de quienes siempre sentí un interés por ayudarme.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>9</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>II. OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
A. Objetivo general	12
B. Objetivos específicos	12
<b>III. MARCO TEÓRICO</b>	<b>13</b>
A. Compañía Zijin Continental Gold	13
B. La molienda en los procesos de beneficio de minerales	14
C. Generalidades Molino SAG	15
D. Corriente y potencia en molinos	19
E. Concepto de velocidad crítica en molinos	20
F. Que es el sistema remoto SCADA	22
<b>IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>24</b>
A. Revisión de parámetros del molino SAG antes y después de la ampliación	25
B. Consumo energético a partir de la ley de Bond	27
C. Consumo de cuerpos moledores del molino SAG	28
D. Evaluación del tamaño de corte de malla Tyler #10 (2 mm)	30
<b>V. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>32</b>
A. Velocidad crítica del molino SAG	32
B. Datos históricos de consumo energético del molino SAG	33
C. Consumo de potencia en el molino SAG	40
D. Tamaño de corte malla #10 (2 mm) y porcentaje de sólidos	44
E. Consumo de cuerpos moledores	47
F. Revestimientos del molino SAG	51
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>59</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de molino SAG y sus revoluciones por minuto	33
Tabla 2. Corriente, potencia, velocidad y tonelaje promedio para el año 2020	34
Tabla 3. Corriente, potencia, velocidad y tonelaje promedio para el año 2021	37
Tabla 4. Corriente, potencia, velocidad y tonelaje promedio para el año 2022	38
Tabla 5. Consumo y costos para la potencia para el año 2020, 2021 y 2022	42
Tabla 6. Datos de tamaño de corte con malla Tyler #10 (2 mm)	46
Tabla 7. Tabla de cálculo para llenado de molino SAG	50
Tabla 8. Resultados con cambio de revestimientos molino SAG	55

## LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Acción de cascada molino SAG	16
Fig 2. Elementos básicos de un molino SAG industrial	18
Fig 3. Elementos básicos de un molino SAG industrial	19
Fig 4. Flujo lógico de un sistema remoto	23
Fig 5. Diagrama de flujo del circuito de la Compañía	25
Fig 6. Cuarto de control planta de beneficio	26
Fig 7. Pantalla de tendencias sistema SCADA	26
Fig 8. Toma de muestra de pulpa por parte del operador	31
Fig 9. Balanza Marcy área de molienda	31
Fig 10. Gráfica de corriente (A) y velocidad (%) molino SAG durante año 2020	36
Fig 11. Gráfica de corriente (A) y velocidad (%) molino SAG durante año 2021	37
Fig 12. Gráfica de corriente (A) y velocidad (%) molino SAG durante año 2022	39
Fig 13. Relación entre corriente (A) y potencia (KW) molino SAG durante año 2020	41
Fig 14. Relación entre corriente (A) y potencia (KW) molino SAG durante año 2021	41
Fig 15. Relación entre corriente (A) y potencia (KW) molino SAG durante año 2022	42
Fig 16. Tamiz usado para corte malla #10 (2 mm)	45
Fig 17. Nivel de llenado para cuerpos moledores molino SAG	48

Fig 18. Variables para el cálculo de cuerpos moledores	48
Fig 19. Vista superior del área de llenado de los cuerpos moledores	49
Fig 20. Consumo anual de cuerpos moledores respecto a mineral procesado	51
Fig 21. Propuesta de diseño para cambio de revestimientos	52
Fig 22. Propuesta de diseño ángulo de levantadores de los revestimientos	53
Fig 23. Trayectoria antes y después de cambio de revestimientos	54
Fig 24. Comparativo de potencia y velocidad de molino para los meses de octubre, noviembre y diciembre.	56

## **SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

<b>ZCNL</b>	Zijin Continental Gold
<b>t</b>	Toneladas
<b>SAG</b>	Molino semi autógeno
<b>m</b>	metros
<b>KW</b>	Kilo Watts
<b>h</b>	hora
<b>µm</b>	micras
<b>Wi</b>	Índice de trabajo
<b>mm</b>	milímetro

## RESUMEN

En los procesos de beneficio de minerales, la etapa de molienda es sin duda una de las más importantes dentro de todo el circuito ya que la fragmentación hace posible la separación de la ganga del material de interés. Para la compañía Zijin Continental Gold es de gran importancia poner especial atención en la etapa de molienda y manejo de los parámetros que se manejan allí, por lo tanto, el objetivo de este trabajo se centra en realizar un estudio energético específicamente del molino SAG y establecer parámetros de corriente adecuado que garantice el buen desarrollo del proceso. A partir de la recolección de datos se evidenció que trabajar el molino SAG a corrientes bajas puede afectar la integridad física de los revestimientos del molino de modo que se fijaron un rango de trabajo de 340-360 A, fue posible superar la meta de 4300 t/día a poco más de 4500 t/día; aun operando igual o por debajo de la velocidad crítica (12 rpm). La potencia presentó incrementos debido a los aumentos de carga, pero se logra mantener un estándar entre 1500-1700 KW y llevar un consumo adecuado. Se cumple con el P80 requerido para este equipo con un  $81 \pm 2.7$  % pasante de malla #10 (2 mm) para el rango de corriente establecido. El nuevo diseño de revestimientos para el molino fue un cambio significativo con consumos de potencia por debajo de 1500 KW.

## ABSTRACT

In mineral beneficiation processes, the grinding stage is undoubtedly one of the most important within the entire circuit, since fragmentation makes it possible to separate the gangue from the material of interest. For the company Zijin Continental Gold it is of great importance to pay special attention to the grinding stage and management of the parameters that are handled there, therefore the objective of this work is focused on carrying out an energy study specifically of the SAG mill and establishing parameters optimal current that guarantees the proper development of the process. From the data collection, it was evidenced that working the SAG mill at low currents can affect the physical integrity of the mill linings, so a working range of 340-360 A was set, however it was possible to exceed the goal of 4,300 t/day to little more than 4,500 t/day even when working at or below the critical speed (12 rpm). The power presented increases due to load increases but it is possible to maintain a standard between 1500-1700 KW and have an adequate consumption. The P80 required for this equipment is met with a  $81\pm 2.7\%$  mesh #10 (2 mm) throughput for the established current range. The new lining design for the mill was a significant change with power consumption below 1500 KW.

## I. INTRODUCCIÓN

En la naturaleza se encuentran variedades de metales valiosos que son de gran interés en la industria de beneficio de minerales, esto por la rentabilidad económica y por el desarrollo tecnológico a partir de las propiedades únicas de cada metal para un uso específico como lo es el oro. Las plantas de beneficio de minerales dentro de su proceso cuentan con una variedad de equipos sofisticados que facilita la obtención del producto valioso a partir de la fragmentación. Indiscutiblemente una etapa importante en el beneficio de minerales es la molienda, ya que es un paso obligado y necesario para la liberación de las especies de interés, pues aparte de aumentar el área superficial de estas especies lleva consigo un mejor aprovechamiento de los equipos que intervienen dentro del proceso. Los molinos son aquellos equipos que tienen la facilidad de disminuir el material rocoso desde unos cuantos centímetros a micras lo que ocasiona la liberación de las especies de interés, claro está que el tamaño de partícula es una variable que depende del proceso por lo tanto los operadores de estos equipos evalúan el tamaño más adecuado para cada proceso, de esta manera los molinos llevan consigo un continuo desarrollo en sus diseños y modos de operación con el fin de cumplir con los requerimientos de las compañías que hacen uso de estos equipos. Para la conminución (fragmentación del mineral) se requiere de algunos aspectos físicos que se dan en la molienda o más bien dentro de los molinos como lo son, fuerzas de impacto y abrasión, por lo que se necesita un medio para que ocurra este fenómeno ya sea el mismo mineral o lo que comúnmente se conoce como cuerpos moledores, adicionalmente se necesita que este medio gane energía para que se efectúe la fragmentación y esto se logra con el giro del molino dando lugar a fuerzas centrífugas que actúan sobre el medio molidor, por consiguiente el molino realiza un trabajo y es aquí cuando aparecen los términos de corriente y potencia que es el fundamento para los criterios de diseño de estos equipos [del autor].

El desarrollo de este trabajo se centra en el estudio del consumo energético del molino SAG de la compañía Zijin Continental Gold, la idea de los objetivos planteados surge como la iniciativa de conocer en el tiempo como se ha venido operando el molino SAG y así determinar parámetros fijos para su correcta operación, esto con base en los datos históricos que guarda el sistema de operación remota (SCADA), datos con los cuales se analizaron la corriente, potencia y velocidad desde los inicios de operación de la planta de beneficio hasta la actualidad, también se hizo seguimiento de cómo ha sido el consumo de corriente respecto a la cantidad de material molido diariamente y esto

como impacta la eficiencia de la molienda además de aspectos económicos. De igual manera se estableció qué parámetros se deben implementar para llegar a la meta de 4300 toneladas procesadas diariamente con el mínimo consumo de corriente sin afectar físicamente el molino SAG, quedando así un rango de trabajo de 340-360 A, esta corriente quedó como parámetro ideal de operación del molino con la libertad de modificación de la velocidad siempre y cuando se opere dentro del rango de corriente y además teniendo en cuenta los criterios de diseño del molino y otros aspectos como cantidad en masa de cuerpos moledores, requerimientos de tamaño de partícula definidos por muestras de pulpa tomados en campo por los operadores del área de trabajo. Al mismo tiempo fue evaluada la granulometría requerida por los estándares operativos de la planta con la ayuda de un operario en campo se tomaron una cantidad de muestras diarias con una malla #10 Tyler (2 mm) y verificar que el P80 fuera el indicado al trabajar con los parámetros establecidos; los resultados fueron satisfactorios con un promedio de  $81 \pm 2.7$  % pasante 2 mm.

Así pues, trabajando bajo unos valores fijos se tomó la decisión de un aumento de carga ya que se tenían las condiciones idóneas para un aumento de tonelaje superando así la barrera de 4300 toneladas, llegando a procesar poco más de 4500 toneladas diarias. Adicionalmente durante el tiempo que se desarrolló este trabajo surgen modificaciones para el molino SAG, la cual fue una propuesta de un nuevo diseño de los revestimientos del molino que le confiere un mejor desempeño al fenómeno de fractura y por tanto una disminución de la potencia requerida para el P80 deseado, en efecto los resultados fueron inmediatos arrojando consumos de potencia por debajo de 1500 KW que anteriormente se mantenía entre 1500-1700 KW.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Estudiar el consumo energético del molino SAG de acuerdo a las variables operativas del proceso: Tonelaje procesado, consumo de cuerpos molidores, corte de malla #10 (2 mm) y sólidos del molino; teniendo en cuenta el proyecto de ampliación de la planta de procesos de la compañía Zijin Continental Gold.

### *B. Objetivos específicos*

Realizar un estudio comparativo a partir del software SCADA del consumo energético del proceso de molienda antes y después de la incorporación del proyecto de ampliación en la Compañía Zijin Continental Gold.

Realizar una evaluación de la capacidad de flujo del molino SAG teniendo en cuenta velocidad crítica, corriente y potencia del molino; para incrementar el tonelaje de 3000 t/día a 4300 t/día para la puesta en marcha de la nueva área de flotación.

Determinar el consumo de cuerpos molidores teniendo en cuenta criterios de diseño de los molinos con los que cuenta la Empresa, para procesar 4300 t/día de mineral.

Alcanzar la granulometría del producto de molienda con un (P80) malla 10 Tyler (2 mm) de tal modo que cumpla a satisfacción con el requerimiento para las áreas de flotación y lixiviación y con la meta de procesamiento de 4300 t/día.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. *Compañía Zijin Continental Gold*

La Mina Buriticá de alto tenor de Zijin-Continental Gold, está ubicada en la faja media del Río Cauca en la región nor-occidental de Colombia. Cuenta con licencia ambiental aprobada, desde diciembre de 2016, por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), cuya producción comercial de oro inició en el segundo semestre de 2020. A la Mina Buriticá se llega fácilmente, luego de poco más de horas y media de viaje en vehículo desde Medellín, la segunda ciudad más grande de Colombia, sobre la vía pavimentada Panamericana. Cabe decir que en Buriticá se encuentra una particular combinación de tamaño, calidad, metalurgia directa, excelente infraestructura y potencial de crecimiento. Cuenta con procesos y maquinaria de alta tecnología, que inicialmente permitieron extraer cerca de 2.500 toneladas de material por día y producir hasta 240 mil onzas de oro por año. Se estima un potencial aproximado para duplicar la producción aurífera en Colombia, y por ello es considerado el desarrollo aurífero subterráneo más importante en el país [1].

Zijin Mining Group es una empresa minera dedicada principalmente a la exploración y extracción de oro, cobre, zinc y otros recursos minerales con presencia en diferentes países del mundo, siendo una empresa especializada en la inclusión de proyectos enfocados en la industria de beneficio de metales preciosos y de consumo a nivel mundial, con manejo de una infraestructura, equipos y desarrollo de sistemas de alta tecnología en cada proceso. Además, cuenta con profesionales y grupos de trabajo capacitados en procesos de beneficio de competencia a nivel nacional. Uno de los objetivos de Zijin es ser reconocida como una de las empresas mineras más importantes a nivel internacional, su incorporación en nuestro país ha abierto las puertas al desarrollo económico y cultural de cientos de personas del territorio nacional que hasta el día de hoy se encuentran vinculadas a la empresa. El compromiso de la Empresa no solamente apunta a un enfoque productivo sino también a un aspecto muy importante dentro del proyecto que es el cuidado del medio ambiente, siguiendo los requerimientos de los entes que vigilan y regulan esta actividad; sin duda se han cumplido a cabalidad cada uno de estos estándares convirtiéndose en ejemplo de desarrollo sostenible en el cuidado de los recursos naturales siendo un referente en Latinoamérica dando alusión a la frase “Somos minería moderna”.

## ***B. La molienda en los procesos de beneficio de minerales***

Debido a que la mayoría de los minerales se encuentran diseminados e íntimamente ligados con la ganga, ellos tienen que ser primeramente liberados antes de ser separados. Esto se consigue con la conminución, en la cual el mineral es paulatinamente reducido hasta que las partículas de mineral limpio puedan ser separadas por los métodos disponibles. La conminución en su etapa inicial se lleva a cabo en la mina con la voladura y de esta manera se facilita el manipuleo del material volado en los rajos con *scrapers*, palas, etc., en las galerías con palas, *scoops*, etc. y manipuleo en carros mineros, correas transportadoras, etc. Y en canteras produciendo material con una granulometría uniforme [2].

La molienda es una operación de reducción de tamaño de rocas y minerales de manera similar a la trituración. Los productos obtenidos por molienda son más pequeños y de forma más regular que los surgidos de trituración. Generalmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1" (1" = 2.54 cm) siendo el grado de desintegración mayor al de trituración. Existen diversos tipos de molinos según sus distintas aplicaciones, los más importantes son [3]:

- De Rulos y Muelas.
- De Discos.
- De Barras.
- De Bolas.
- De Rodillos.

La molienda SAG es una técnica que utiliza cuerpos moledores que facilita la fractura del mineral y que debe cumplir ciertas características. Se denomina medios de molienda a los elementos que se utilizan para efectuar la reducción de tamaño de los minerales, para el procesamiento de minerales se usa las bolas de acero. Los cuerpos trituradores van a ser utilizados en los molinos SAG, cuya acción de rotación transmite a la carga de cuerpos moledores fuerzas de tal naturaleza que estos se desgastan por abrasión, impacto y en ciertas aplicaciones por corrosión. El grupo internacional Moly-Cop Grinding Systems, líder mundial en la fabricación de bolas para la molienda de minerales utiliza como materia prima barras de aceros de alto carbono y baja aleación, que son procesadas en líneas de producción continua en tres etapas sucesivas: calentamiento, laminación o forjado y tratamiento térmico. Las distintas etapas y condiciones del proceso de fabricación, certificado bajo la Norma ISO-

9001:2001, han sido especialmente diseñadas para maximizar la durabilidad del producto en su aplicación final, la que en gran medida es determinada por la microestructura de la aleación resultante. Variables de control importantes, aunque no determinantes por sí solas de la calidad del producto son la dureza superficial y volumétrica de las bolas. Como su nombre bien lo indica, la dureza superficial normalmente medida en la escala Rockwell C, corresponde a mediciones estándar de dureza sobre la superficie misma de la bola. Por su parte, la dureza volumétrica corresponde al promedio ponderado de las durezas de las infinitas capas interiores que constituyen el cuerpo esférico total. Esta se estima a partir de múltiples mediciones de dureza realizadas a lo largo de uno o más radios sobre un corte seccional a través del centro de la esfera. Por lo tanto, demanda un esfuerzo de preparación de muestras, ejecución de mediciones y procesamiento de tales datos considerablemente mayor que una simple determinación de dureza superficial.

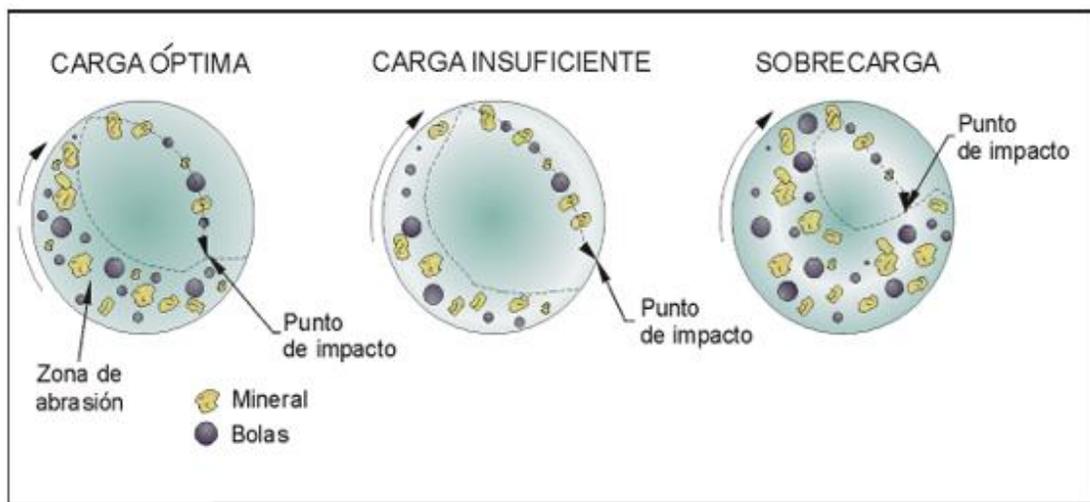
Reiteradamente, a medida que las propiedades del mineral a procesar y las condiciones operacionales de las instalaciones van evolucionando en el tiempo, se plantea la inquietud a los Ingenieros de Proceso para que estudien y recomienden un diámetro ideal u óptimo que debiera ser recargado periódicamente a sus molinos SAG. Para tal efecto, la literatura técnica al respecto contiene al menos tres tipos de metodologías propuestas: enfoques netamente empíricos, enfoques que conllevan el uso intensivo de modelos matemáticos del proceso de molienda y un enfoque intermedio denominado pseudoempírico propuesto [4].

### ***C. Generalidades Molino SAG***

Los molinos SAG corresponden a una variante del molino AG (molienda autógena) en donde se adiciona una carga de bolas de acero como medios de molienda, considerablemente inferior a la utilizada en los molinos de bolas, la que oscila normalmente entre un 5 % y un 19 % en volumen. Los molinos SAG se han utilizado preferentemente en las plantas de procesamiento de oro, cobre y platino con usos también en zinc, plomo y níquel [5]. El molino SAG se puede definir como un equipo creado para conminuir el material mediante impacto y se reduce el tamaño de las rocas. Es utilizado en operaciones con gran flujo másico y con grandes potencias de accionamiento en el orden de hasta 24 MW, en términos generales es la molienda que utiliza como principio de conminución, el impacto. El

molino SAG, es el equipo de mayor dimensión, y a su vez el, más eficiente de los convencionales, este equipo sustituye a los circuitos de chancado secundario y terciario [6].

La carga del molino SAG consiste de mineral nuevo. La carga total del molino ocupa entre un 25-30 % del volumen del molino. Solo las bolas de molienda ocupan cerca del 12 % del volumen del molino. Estos volúmenes de llenado son aproximados y los volúmenes óptimos dependen de los resultados de la experiencia real de la planta. El molino gira, dejando caer violentamente sus contenidos para provocar la acción de rompimiento. La velocidad de motor del molino SAG se puede variar dentro de un rango limitado (120 a 240 rpm de velocidad del motor, lo que produce una velocidad de operación que estará entre un 70 y un 75 por ciento de la velocidad crítica). Esto regula la acción de cascada (caída) en el molino y proporciona un medio para controlar la velocidad de molienda del mineral. La Figura 1 ilustra la acción de cascada [7].

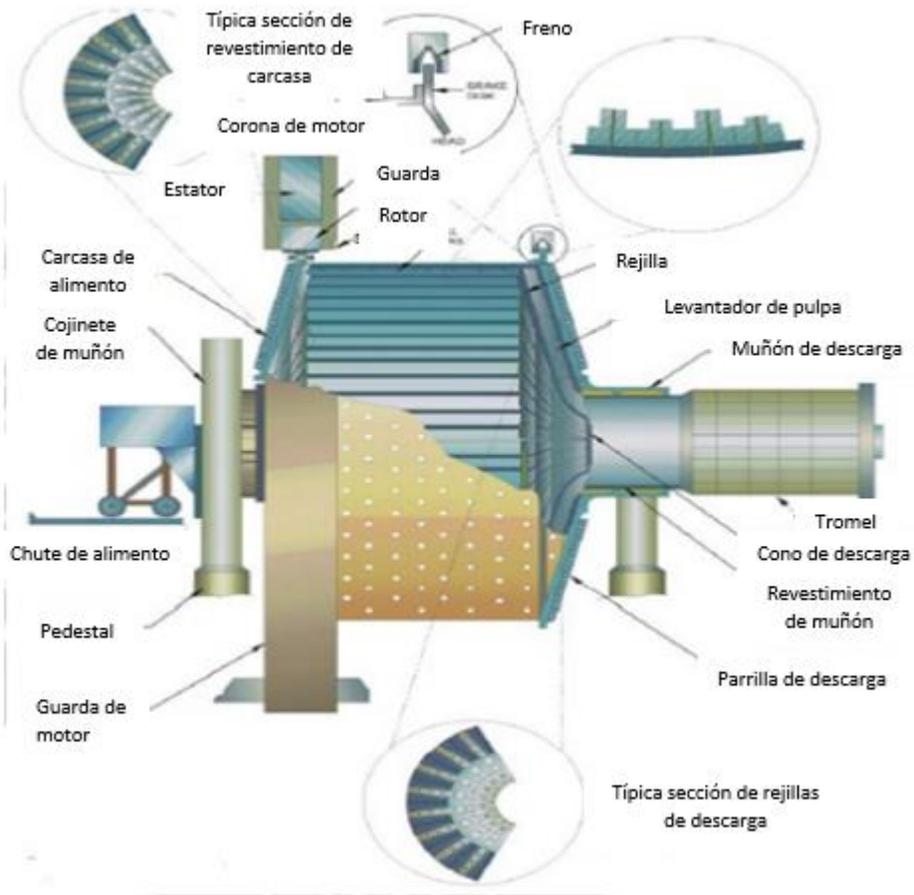


**Fig 1.** Acción de cascada del molino SAG [7].

Es de vital importancia tener un control sobre la velocidad del molino SAG durante la operación de esto depende que el flujo de salida permanezca constante y evitar dos posibles situaciones que se presentan como se ilustra en la Figura 1, la primera es carga insuficiente, esto ocurre cuando hay un exceso de velocidad en el molino o muy poca alimentación de mineral lo que conduce a un descargue más rápido de la pulpa, esto provoca fuertes impactos en los revestimientos del molino afectando la

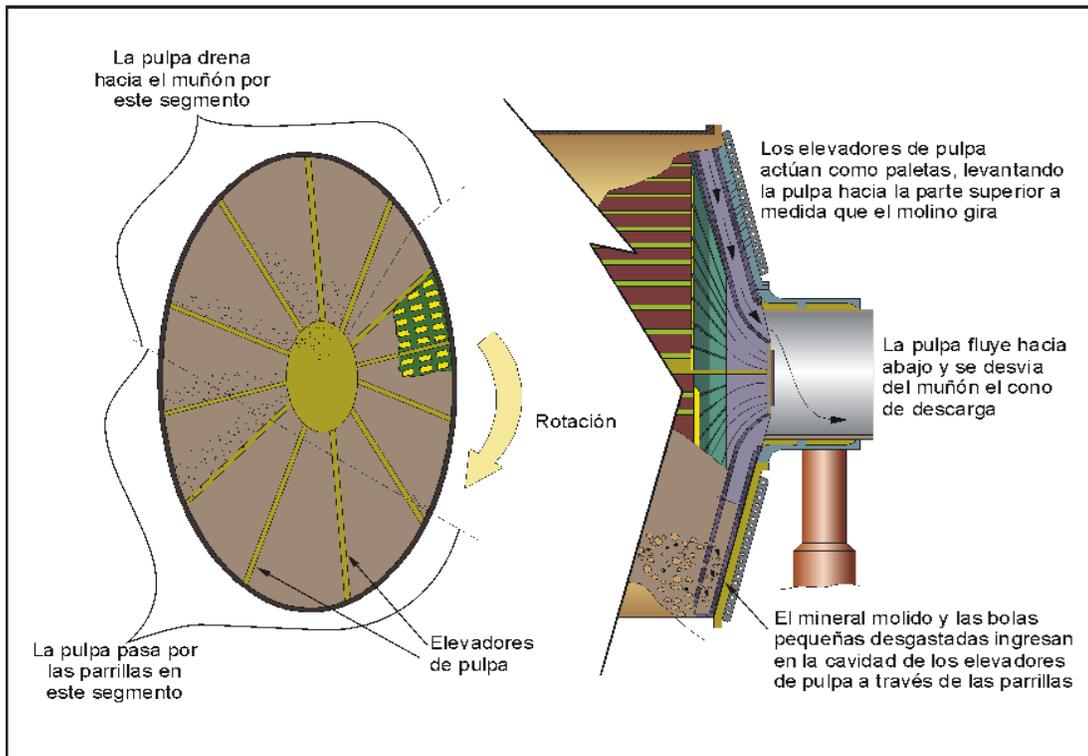
integridad física del mismo, además del factor económico. El segundo caso es un molino sobre cargado, esto ocurre cuando se opera el molino a bajas velocidades o hay un exceso de alimento al molino lo que provoca un rápido aumento de masa de mineral que desfavorece la fractura de la roca por la poca energía potencial adquirida por los cuerpos moledores y el propio mineral. Teniendo en cuenta que por lo general en las plantas de procesamiento la carga alimentada es constante (tonelaje) la variable principal que se debe controlar es la velocidad del molino SAG de esta depende una residencia de carga optima y un flujo constante, además del cuidado de los revestimientos que sin duda es un aspecto muy importante [del autor].

El molino está cubierto de revestimientos resistentes al desgaste (hechos de una aleación de acero cromo molibdeno) para proteger el casco. Los revestimientos generalmente están hechos con elevadores de acero que ayudan a levantar la carga durante la rotación del molino. La carga se levanta cerca de dos tercios del recorrido del arco del casco antes de caer al fondo de la carga. La molienda en el molino es una combinación de rompimiento de mineral mediante la acción de caída, la compresión del mineral entre las bolas y la abrasión de las partículas que rozan entre sí y contra las bolas. En un molino SAG, la molienda por abrasión es mínima. La Figura 2 muestra un esquema general de las partes principales que compone el molino SAG [7].



**Fig 2.** Elementos básicos de un molino SAG industrial [Modificado de 7].

El molino tiene un extremo falso en la tapa de descarga, formado por sectores metálicos recubiertos con caucho muy resistente. La cavidad entre este extremo y la tapa del molino está recubierta con caucho. La pulpa fluye por las parrillas en los sectores y hacia la cavidad en donde los elevadores de pulpa (en realidad son una especie de paletas) levantan la pulpa a medida que el molino gira. Cuando la pulpa llega a la parte superior de su rotación, sale por el muñón Figura 3.



**Fig 3.** Elementos básicos de un molino SAG industrial [7].

#### ***D. Corriente y potencia en molinos***

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. 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. 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 [8]. La minería es un sector intensivo en el consumo energético. La mitad de los costos directos de explotación se corresponden con los procesos de trituración y molienda. De ahí la importancia en mejorar la eficiencia energética en la molienda de mineral. Para el consumo energético el indicador de desempeño energético se denomina Índice de Bond y se expresa en KWh/t que es la energía que se requiere para reducir el mineral a un P80 deseado. Como es natural, este valor dependerá, básicamente, del tipo de roca mineral y de la tecnología de molienda. Por

consiguiente, el consumo energético específico (W) dependerá del tamaño de grano de producto (d80% producto del SAG) y resultante (D80% alimento al molino) y del índice de trabajo  $w_i$  o de Bond del mineral (expresado en KWh/t), según la siguiente expresión:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (1)$$

**Ecuación 1.** Consumo energético específico de Bond [9].

La potencia eléctrica es una magnitud que mide la energía consumida o generada en la unidad de tiempo. Los aparatos de mayor potencia son los que disipan mayor cantidad de energía por unidad de tiempo, es decir, los que más consumen. La unidad de potencia en el SI es el vatio (un vatio es la potencia de un generador o un receptor que suministra o consume un julio en cada segundo). Sabiendo el consumo de la energía eléctrica (indicada en el contador eléctrico) y el precio unitario de KWh, que será fijado por la compañía eléctrica que suministra la energía, es posible calcular el costo de la energía consumida [10]. Para elegir las dimensiones de un molino que pueda realizar una determinada operación de fragmentación, hay que relacionar la potencia necesaria para la molienda obtenida a través de la fórmula de Bond, que considera ya las necesidades del equipo (molino) con las correcciones y aproximaciones necesarias y determinar por otra parte, en base al método de funcionamiento de un molino, (su forma de trabajo) cuáles son las dimensiones y potencias para mantener un equipo de esta características en funcionamiento. Los molinos se especifican por potencia y no por capacidad; los molinos más grandes actualmente en operación son de 5.5 m de diámetro y 7.3 m de longitud y tienen motores de hasta 9000 KW [11].

### ***E. Concepto de velocidad crítica en molinos***

La velocidad de rotación del molino es un parámetro de importancia tanto en el consumo como en la operación de molienda que realiza. Este giro del molino sobre su eje produce el desplazamiento de la carga, hasta que el par resistente por el peso de la carga iguala al par motor transmitido, y produce el movimiento relativo de los elementos que la componen entre sí, produciéndose la fricción, choque,

etc., que produce la molienda del mineral y el desgaste de los elementos molturadores que deben ser repuestos periódicamente. La velocidad de giro de un molino (velocidad de trabajo) se define como un porcentaje de la “velocidad crítica teórica” o “velocidad crítica” del molino, y que es aquella velocidad de rotación del molino para la cual la primera fila de bolas en contacto con la carcasa o las protecciones en su caso, y por el efecto centrífugo, se adhiere a la carcasa y deja de producir efecto de molienda, permanece adherida a la carcasa durante una vuelta completa. Esta velocidad es teórica y por el efecto de deslizamiento o el contrario de arrastre de los forros sufre ligeras modificaciones, pero siempre se considera una velocidad de referencia. La definición de velocidad crítica teórica se refiere a aquella velocidad que centrifugaría una partícula infinitesimal situada en la periferia interna del molino. El concepto de velocidad crítica se aplica porque representa la menor velocidad que produce el efecto mencionado, ya que cualquiera velocidad mayor que ésta, produce dicho efecto de adherencia en la fila de bolas exterior y en las siguientes en función del valor de dicha velocidad. En el momento que se alcanza la velocidad crítica, el molino pierde capacidad de molienda ya que hay un porcentaje de la carga de elementos molturadores que no realiza trabajo alguno [11]. El valor de la “velocidad crítica,  $V_c$ ” es:

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2)$$

**Ecuación 2.** Velocidad crítica [11].

**V<sub>c</sub>:** Velocidad crítica en rpm

**D:** Diámetro interno del molino en (m) y que puede tener la expresión  $D = D_n - 2 \cdot E_f - D_b/2$

**D<sub>n</sub>:** Diámetro nominal del molino, indicado normalmente en catálogo.

**E<sub>f</sub>:** Espesor medio de los forros.

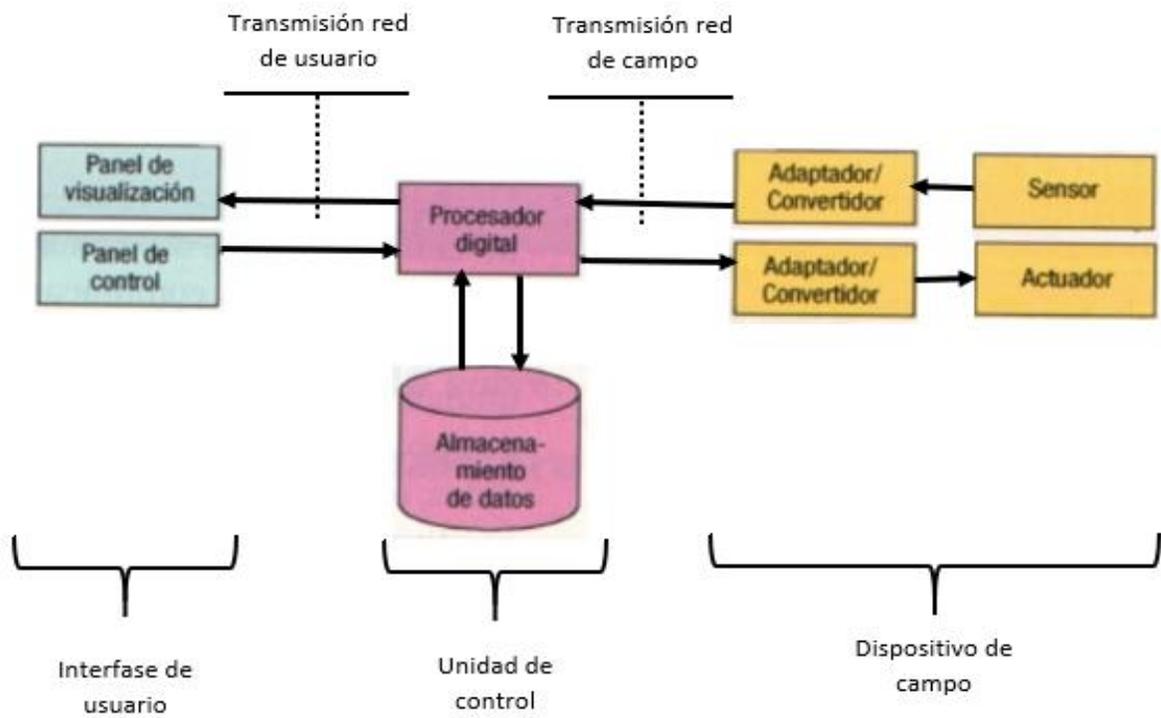
**D<sub>b</sub>:** Diámetro medio de las bolas/barras.

## *F. Que es el sistema remoto SCADA*

El objetivo principal de la automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin intervención continua del operador humano. En procesos de fabricación rígidos, de poca variación en el tiempo o de carácter autónomo, sin interdependencias con otros tratamientos anteriores o posteriores de los productos, este objetivo se cumple programando sobre los controles locales de planta las secuencias de control deseadas y cerrando los lazos de regulación necesarios para mantener los valores de variables en los rangos fijados por las consignas [12].

SCADA proviene de las siglas Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) Los sistemas SCADA son aplicaciones de software diseñadas con la finalidad de controlar y supervisar procesos a distancia. Se basan en la adquisición de datos de procesos remotos. Este tipo de sistema es diseñado para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y controlando el proceso de forma automática desde una computadora. Además, envía la información generada en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como hacia otros supervisores dentro de la empresa, es decir, que permite la participación de otras áreas, como, por ejemplo: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc. Las tareas de supervisión y control generalmente están más relacionadas con el software SCADA, en él, el operador puede visualizar en la pantalla del computador cada una de las estaciones remotas que conforman el sistema, los estados de éstas, las situaciones de alarma y tomar acciones físicas sobre algún equipo lejano. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos [13].

Los sistemas de interfaz entre usuario y planta basados en paneles de control repletos de indicadores luminosos, instrumentos de medida y pulsadores, están siendo sustituidos por sistemas digitales que implementan el panel sobre la pantalla de un ordenador. El control directo lo realizan los controladores autónomos digitales y/o autómatas programables y están conectados a un ordenador que realiza las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de la información y control de la producción, utilizando el SCADA. La Figura 4 es un esquema básico de un sistema de adquisición, supervisión y control [14].



**Figura 4.** Flujo lógico de un sistema remoto [Modificada de 14].

#### **IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Parte de este trabajo se trata de conocer y entender la influencia de los cambios que se han hecho en la Compañía a nivel estructural en materia del flujo del proceso, lo que conlleva a una modificación de parámetros que garantice el cumplimiento de metas establecidas por la empresa. La Figura 5 muestra el diagrama de flujo establecido inicialmente (color verde) y las nuevas áreas (color naranja) incluidas al proceso, estas nuevas áreas permitieron así dar paso a un incremento de la capacidad de flujo circulante por lo que es posible un aumento de mineral molido por hora.

Las áreas de flotación dieron paso a la posibilidad de incrementar la cantidad de mineral molido diariamente ya que una gran parte de mineral sale por flotación de concentrado de cobre de tal manera que la cantidad de mineral lixiviable disminuye. Es necesario evaluar bajo este contexto la capacidad máxima del molino SAG para moler el material proveniente de trituración sin afectar el correcto funcionamiento de los demás equipos de la planta de procesamiento. A partir de esto se busca relacionar, comparar y analizar los parámetros de operación antes y después de la ampliación tales como velocidad del molino, corriente, potencia y demás aspectos que influyen de manera directa en la etapa de fractura del mineral que ingresa al circuito.

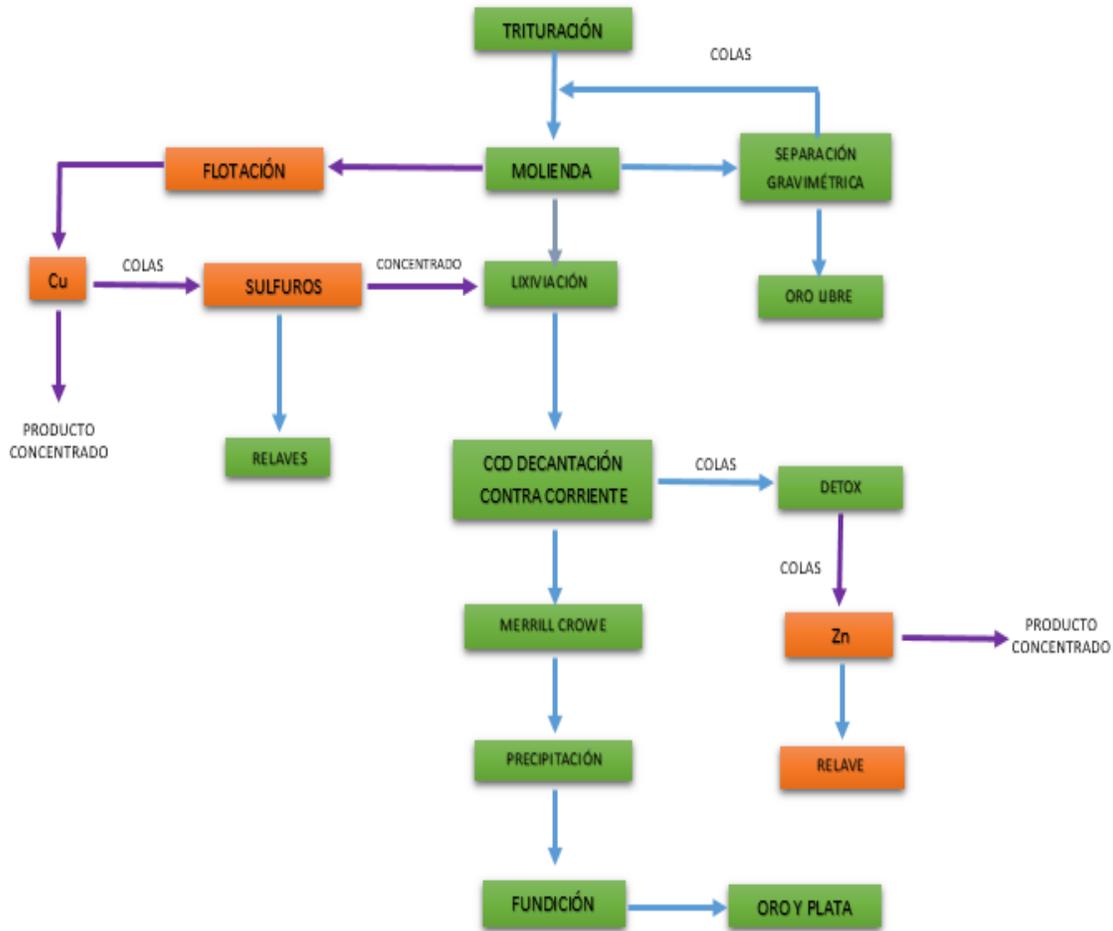


Fig. 5. Diagrama de flujo del circuito en la empresa [Diseño propio].

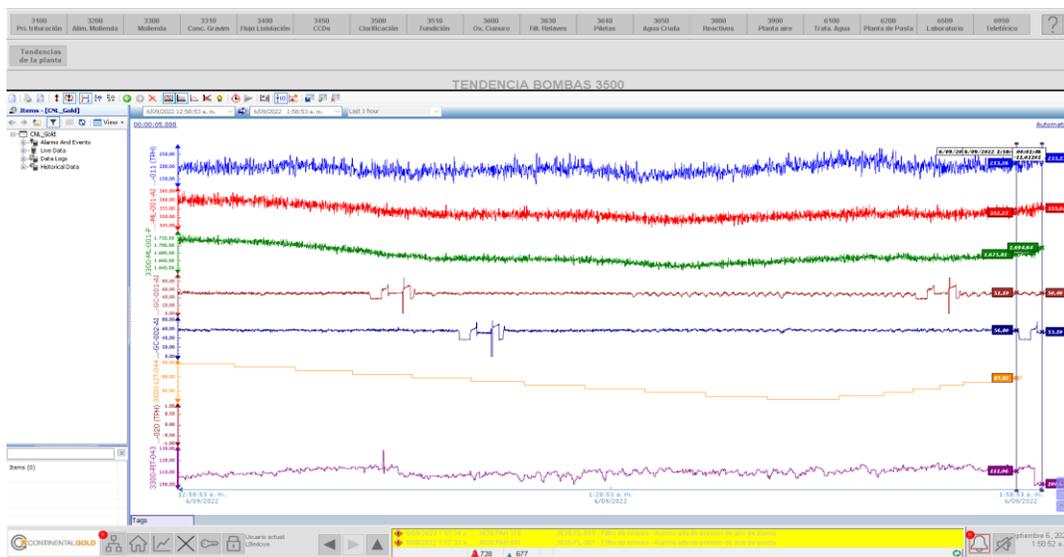
### A. Revisión de parámetros del molino SAG antes y después de la ampliación

La compañía Zijin Continental Gold en su proceso de beneficio dispone para la operación de un software que no solo permite el monitoreo y control de manera remota de los equipos, sino que también realiza un seguimiento continuo y en tiempo real de las condiciones en las que trabaja cada uno de los equipos y también de los parámetros de operación, adicionalmente el sistema SCADA guarda los datos obtenidos durante los turnos de trabajo de tal manera que estos ya pasan a ser históricos y puedan ser revisados y analizados en caso de alguna novedad que afecte el proceso, revisar la causa de una falla o error operativo por parte del personal o simplemente para buscar una oportunidad de mejora en el proceso. Este software se convierte en una poderosa herramienta que

permite de manera oportuna verificar y ajustar las condiciones del proceso; la Figura 6 muestra la base de monitoreo (cuarto de control) que cuenta con 10 pantallas a disposición del Ingeniero de cuarto de control quién es el responsable de que las condiciones de operación se mantengan durante el proceso. La Figura 7 muestra las tendencias de tantos equipos como se quiera monitorear, esto permite ver el comportamiento de la corriente, potencia, presión, flujos, velocidad, tonelaje, niveles, temperaturas; todas ellas respecto al tiempo. Así se dispone de los datos históricos del molino SAG que proporciona el programa para analizar sus parámetros desde el momento que inició la planta hasta la actualidad.



**Fig. 6.** Cuarto de control planta de beneficio.



**Fig. 7.** Pantalla de tendencias sistema remoto SCADA.

## ***B. Consumo energético a partir de la Ley de Bond***

Es bien sabido que las plantas de procesamiento de minerales demandan grandes consumos de energía ya que las grandes industrias que se dedican a esta actividad requieren de tiempo continuo de operación (24 horas). La etapa de conminución requiere de equipos grandes que demandan un gran consumo energético como son los equipos de trituración y molienda que puede llegar a representar hasta el 50% del consumo total de la planta. Teniendo en cuenta el aumento en el costo de la energía actualmente es necesario encontrar un balance entre el gasto energético y el tamaño de producto en la fragmentación en el molino SAG, un tamaño ideal para las etapas posteriores siendo la remolienda y la concentración gravimétrica los más inmediatos. La Ley de Bond es la expresión que más se utiliza en procesos de minería para determinar la cantidad de energía (KWh/t) que se requiere para reducir el tamaño del mineral a un P80 deseado para molienda de bolas, para realizar el cálculo de tal energía se requieren ciertos pasos llamado test de Bond, procedimiento utilizado por más de 50 años utilizando un molino estándar de laboratorio, la expresión para el índice de trabajo se muestra en la Ecuación 3 a continuación.

$$Wi = \frac{44.5}{(P)^{0,23} (Gbp)^{0,82} \left( \frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)} \left( \frac{KWh}{t-c} \right) \quad (3)$$

**Ecuación 3.** Índice de trabajo de Bond [15].

En la que:

**Wi:** Índice de trabajo del material, en **KWh/t**

**P:** Abertura de la malla de corte en micrones.

**Gbp:** Gramos producidos por revolución del molino (índice de moliendabilidad).

**P80:** Tamaño en micrones del producto menor a la malla de corte correspondiente al último ciclo, que pasa en un 80%.

**F<sub>80</sub>**: Tamaño en micrones de la alimentación, que pasa en un 80 %.

El laboratorio de la Compañía no cuenta con el prototipo con el que se pueda replicar en laboratorio un ensayo de fragmentación de mineral para determinar el índice de Bond, en primer lugar, porque el tamaño de alimento es grande (150 mm) y segundo la inclusión de molienda semi-autógena en minería es relativamente nueva en comparación con la molienda de bolas estudiada por Bond. Sin embargo, es posible determinar el índice de trabajo tomando los valores promedio de potencia de trabajo que se registran diariamente para el molino SAG, de esta manera despejando  $W_i$  de la Ecuación 1 se puede obtener un valor que da una idea de la energía que se requiere para fragmentar el material a un P80 de 2mm en el molino SAG respecto al molino de bolas, que en efecto debería ser mucho mayor teniendo en cuenta el tamaño del mineral que proviene de trituración. La ecuación 4 utilizada es la siguiente:

$$W_i = \frac{E}{10 * \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (4)$$

**Ecuación 4.** Índice de trabajo para molino SAG.

**E:** Potencia promedio de trabajo en KW

Las demás variables son el 80% pasante para el alimento y la descarga del molino según los requerimientos de la operación.

### ***C. Consumo de cuerpos moledores del molino SAG***

El molino en cuestión al ser semiautógeno (SAG) requiere de un medio que logre acelerar el proceso de fragmentación del mineral, esto se consigue con los cuerpos moledores. El consumo de estos es monitoreado diariamente de tal manera que se mantenga un volumen constante para garantizar de igual manera un flujo de descarga que pueda mantener un volumen adecuado de pulpa residente en el molino. Inicialmente se calcula la carga de cuerpos moledores (5" de diámetro) que se requiere por

criterio de diseño del molino SAG siguiendo la Ecuación 5, ya en operación es difícil saber la cantidad de cuerpos molidores desgastados y que salen del molino por lo que la cantidad de bolas que se adicionan al molino durante cada turno se puede calcular de la siguiente manera:

- Sobre la base de las tasas históricas de desgaste, la tasa histórica de desgaste de bolas (por lo general expresada en kilogramos de bolas usadas por tonelada de mineral procesado); se multiplica por la tasa de producción de las últimas 24 horas para obtener la cantidad total de bolas que se debe adicionar al día. Inicialmente se espera un consumo de entre 0.39-0.45 Kg de bolas/t molido (dato calculado en laboratorio de la Empresa teniendo en cuenta las características del mineral) de bolas/t molido.

$$P_{carga} = V_{mol} \cdot 0.12 \cdot (0.6 \cdot \delta_b + 0.4 \cdot \delta_m) \quad (5)$$

**Ecuación 5.** Carga cuerpos molidores molino SAG [10].

**$\delta_b$ :** Densidad de las bolas, material molturador, para el acero 7.85 kg/dm<sup>3</sup>

**$\delta_m$ :** Densidad del mineral

**$P_{carga}$ :** Peso de los elementos molturadores

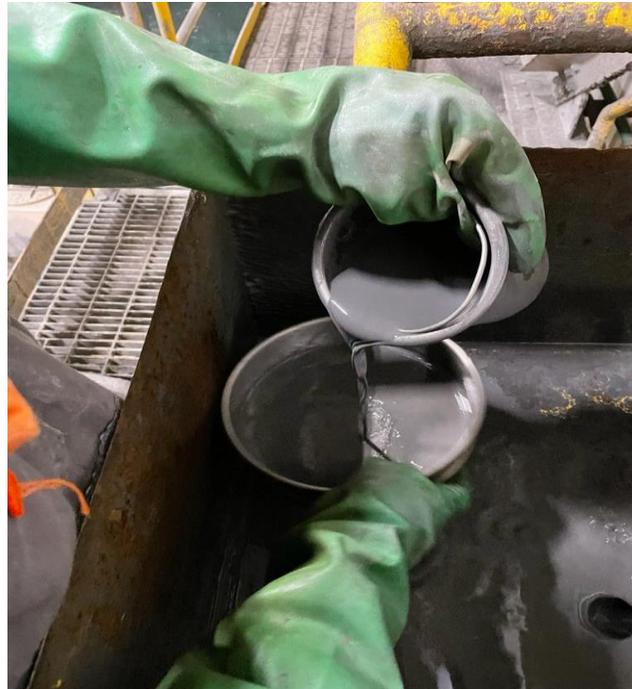
Siguiendo la ecuación se debe tener en cuenta las dimensiones del molino SAG y la densidad del mineral, de acuerdo a los criterios de diseño se tiene lo siguiente:

Tamaño del molino SAG [16]

- Diámetro = 6.1 m
- Longitud brida a brida = 3.7 m
- Densidad mineral bulk = 1.6 g/L

#### ***D. Evaluación del tamaño de corte de malla Tyler #10 (2 mm)***

Es importante un chequeo del P80 en el molino SAG, este dato es en efecto un indicador fundamental del comportamiento de la fragmentación del material, de acuerdo a esto se puede dentro de la operación analizar que parámetros o condiciones en la molienda se pueden modificar para cumplir con el objetivo de tamaño de partícula requerido. Esta evaluación de tamaño de corte se realiza por medio de un tamizaje vía húmeda en la descarga del molino para determinar el P80 de salida hacia el área de flotación. Dato tomado en campo por parte de un operador mediante malla #10 (2 mm), durante días laborales 2 veces en el turno de trabajo, siendo este método de medición *in situ* la más rápida para tener un resultado inmediato con el fin de tomar acciones correctivas de manera oportuna. Para dar claridad a esta evaluación de corte de malla, en la Empresa se toma este dato como se describe anteriormente porque de ante mano ya se sabe que el 80% del producto del molino SAG debe pasar la malla #10 y a esto se refiere el P80, a modo de verificación de que, si se cumpla esta condición, por lo tanto, este término se usará en todo el documento y no se relacionará con un análisis granulométrico. Adicionalmente se toman porcentaje de sólidos el cual debe estar por criterios de operación entre 70% y 75% en sólidos mediante balanza Marcy en la descarga del molino SAG para un mineral de gravedad específica de 2.8 y se toman cada hora durante el turno. La Figura 8 muestra al operador en campo tomando una muestra de pulpa que se vierte en el tamiz y su posterior lectura de porcentaje de sólidos pasante y la Figura 9 es una balanza Marcy, equipo utilizado diariamente para la toma de pulpa extrayendo información importante como es el porcentaje de sólidos en diferentes áreas de la planta.



**Fig 8.** Toma de muestra de pulpa por parte del operador.



**Fig 9.** Balanza Marcy área de molienda: a) Balanza calibrada, b) Resultado porcentaje de sólidos de pulpa.

## V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### A. *Velocidad crítica del molino SAG*

La velocidad crítica es un dato muy importante a la hora de diseñar un molino, es uno de los requerimientos de diseño para la molienda SAG. A partir de la Ecuación 2 y usando el diámetro interno del molino (6.1 m) se realizó el cálculo de las revoluciones por minuto crítica o velocidad crítica para el molino y de esta manera se determinó la velocidad recomendada de trabajo según criterios de diseño que para este equipo debe estar entre un 70-75% de la velocidad crítica calculada. A continuación, se presenta en la Tabla 1 las revoluciones por minuto (rpm) que corresponde a diferentes velocidades del molino SAG, estos valores se obtuvieron de manera práctica de trabajo en campo con ayuda de un cronómetro, los resultados de esta tabla se tendrán en cuenta para posteriores análisis de corriente y potencia que se indican en este trabajo.

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{6.1}} = 17.12 \text{ rpm} \approx 17 \text{ rpm}$$

Este valor (17 rpm) representa el límite de velocidad de operación para el molino SAG, aproximadamente a 17 rpm el molino no alcanza una molienda efectiva, el efecto de cascada no se presenta, sabiendo esto y según los criterios de operación el molino se trabajó en un 70% de la velocidad crítica la cual se mantuvo antes y después de la ampliación de la planta (área de flotación). Este dato es un indicador importante porque a partir de este se pudo analizar la posibilidad de incrementos de tonelaje a un flujo de masa superior a 4300 t/día establecido en los objetivos. A este valor de velocidad crítica se le saca el 70% dando como resultado aproximadamente 12 rpm.

**Tabla 1.** Velocidades del molino SAG y sus revoluciones por minuto.

<b>Velocidad molino SAG (%)</b>	<b>rpm</b>
80	10
81	10,2
82	10,5
83	10,7
84	11,18
85	11,35
86	11,5
87	11,6
88	11,7
89	11,55
94	12

El 70% de la velocidad crítica corresponde entonces a aproximadamente 12 rpm lo que representa el 94% de velocidad de operación en planta para el molino SAG, las revoluciones por minuto del molino se pueden variar según el porcentaje de velocidad aplicado dependiendo de qué tan cargado se encuentre el molino. En adelante se hará un análisis de este porcentaje de velocidad en comparación con los datos históricos de corriente durante los dos últimos años de operación en planta. Es importante resaltar las condiciones óptimas o el parámetro ideal de corriente para el molino SAG, estos valores de corriente se fueron evaluando durante operación a partir de la experiencia de modificación de variables tales como velocidad del molino, tamaño de alimentación al molino y los incrementos progresivos de alimentación (tonelaje) que se han venido trabajando durante los últimos meses de este año 2022. Por lo cual los valores de corriente deben estar entre 340-360 A con lo que se garantiza un buen cuidado de los revestimientos del molino sin afectar el P80.

### ***B. Datos históricos de consumo energético del molino SAG***

Los consumos de corriente históricos fueron tomados de la base de datos del software SCADA en el cuarto de control. Durante aproximadamente un mes se reúne la información necesaria para agrupar los datos de tal manera que se pudiera hacer un análisis más general de las variables del molino. Con el software SCADA es posible reunir datos de una sola variable en diferentes rangos de tiempo ya sea cada año, cada mes, cada hora, etc., de esta forma dependiendo del rango escogido el programa arroja

un valor promedio del dato en particular, así se pueden tener tantos datos como sea posible ya que el software los captura en tiempo real, explicando de otra manera cada milésima de segundo es guardado en la base de datos el valor de cada variable de cada equipo que interviene en el proceso. Si se quiere ser riguroso y específico en el análisis de la corriente del molino SAG se podrían generar millones de datos solamente para la corriente, pero por efectos de tiempo solo se tomaron los promedios de la corriente, potencia, velocidad del molino SAG y toneladas procesadas por mes para cada año de operación, iniciando en marzo de 2020 hasta octubre de 2022, con su respectiva desviación estándar. La Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 muestran los datos que se obtuvieron para cada mes durante los años 2020, 2021 y 2022 respectivamente.

**Tabla 2.** Corriente, potencia, velocidad y tonelaje promedio para el año 2020.

AÑO 2020	PROMEDIO				DESVIACIÓN ESTANDAR		
Mes	Corriente (A)	Potencia (KWh)	Velocidad (%)	Ton/d	Corriente (A)	Potencia (KWh)	Velocidad (%)
MARZO	242	156	12	314	4.57	54.69	5.19
ABRIL	276	455	34	776	19.51	128.15	7.10
MAYO	289	614	39	1216	36.52	36.52	22.31
JUNIO	310	899	56	1790	30.09	380.59	17.54
JULIO	269	665	42	1233	57.42	382.26	20.76
AGOSTO	302	847	54	1723	28.52	344.69	19.67
SEPTIEMBRE	345	1325	64	2838	18.08	274.71	7.01
OCTUBRE	394	1976	69	2993	18.58	179.98	11.51
NOVIEMBRE	343	1326	66	2540	20.69	319.17	13.20
DICIEMBRE	336	1253	71	2874	12.47	201.02	10.48

En el año 2020 fue el periodo donde inicia la planta de beneficio, se pone en marcha el circuito directo sin la etapa de concentración de flotación, según diagrama de flujo de la Figura 5 donde los cuadros en verde describen el circuito inicial. Como se observa en la Tabla 2 están los valores promedio de corriente, potencia, velocidad del molino SAG registrados por el sistema SCADA para cada mes del año, adicionalmente se obtuvieron los valores de tonelaje diario procesado para cada mes. Teniendo en cuenta las dificultades presentadas en el arranque de operaciones pues es de esperarse que los primeros meses sean de ensayos y continuas paradas del proceso, para este año se hizo más énfasis en el análisis desde el mes de septiembre donde el objetivo fue moler alrededor de 2800 t/d con una alimentación aproximada de 120 t/h. Para una alimentación de 3000 t/día se pueden trabajar velocidades bajas, pero teniendo cuidado en no exceder los valores de corriente como se evidencia en el mes de octubre con un valor de 394 A, dicha corriente de carga podría ser perjudicial para la operación ya que un molino tan cargado no soporta estos volúmenes de carga y podría generar altas

presiones de salida de pulpa en la descarga del molino. Las velocidades trabajadas para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre fue inferior a la cual se espera trabajar el molino como se menciona anteriormente (12 rpm), por lo tanto para estas velocidades que en promedio fue de  $68 \pm 2.99$  rpm se presentó una molienda más abrasiva que de impacto (efecto cascada), esto es efectivo para un mineral blando o de baja dureza pero teniendo en cuenta las características del mineral que se trabaja en la compañía donde se encuentra el 10 % de Pebbles (sobre tamaño) el tiempo de residencia en el molino es mucho más largo y por ende se carga más rápido el molino elevando así la corriente y directamente el consumo de potencia como se puede apreciar para el mes de octubre con una corriente de 394 A y un potencia de 1976 KW que es bastante elevado, por lo que la efectividad en la molienda también se ve afectada. Las desviaciones estándar que se presentan para los datos de corriente, potencia y velocidad son altos ya que por motivos de la operación no es posible en ocasiones tener un manejo de parámetros fijos para el molino, siempre se presentarán variables en el proceso que cambien en el tiempo que no se pueden controlar, tales como inconvenientes en la operación, paros de planta, cortes de energía, etc., que pueden afectar la continuidad y esto se ve reflejado en los datos obtenidos y a esto sumarle que el personal responsable del manejo del molino puede trabajar con diferentes parámetros.

La Figura 10 muestra la tendencia para los meses de operación del año 2020, aquí se observa claramente la tendencia en aumento de corriente como en velocidad del molino SAG, sin embargo hay grandes variaciones en el manejo de estos dos parámetros donde lo ideal es sostener valores relativamente constantes, las desviaciones estándar de cada mes tanto para la corriente como para la velocidad indica una dispersión importante de los datos ya que no se trabajó de forma ajustada, es a partir de septiembre donde se aprecian valores de trabajo relativamente próximos entre sí.



**Fig 10.** Gráfica de corriente (A) y velocidad (%) molino SAG durante año 2020.

Para el año 2021 se presentó un incremento en el tonelaje, aproximadamente 3500 t/día que por criterios de diseño esta sería la capacidad máxima del molino. Esta modificación en la alimentación implica manejar velocidades de molino más elevadas y otros parámetros de operación como el porcentaje de sólidos, lo que en efecto aumenta la masa retenida en el molino y por ende el aumento de velocidad fue necesario, en comparación con el año 2020 el aumento de velocidad es notorio, teniendo valores máximos 77%, sin embargo, los valores de corriente se mantienen por debajo de 340 A. Estas corrientes bajas del molino fueron un indicador positivo y de referente para la posibilidad de incrementos de tonelaje superiores a los de diseño. Un dato relevante que se observa en la Tabla 3 es la desviación estándar tanto para la corriente como para la velocidad del molino SAG, se presentan valores mucho más cercanos entre sí, lo que da una idea de un manejo de parámetros relativamente constante respecto a cada mes.

**Tabla 3.** Corriente, potencia, velocidad y tonelaje promedio para el año 2021.

AÑO 2021	PROMEDIO				DESVIACIÓN ESTANDAR		
	Mes	corriente (A)	Potencia (KWh)	Velocidad (%)	Ton/d	corriente (A)	Potencia (KWh)
ENERO	318	1202	72	2835	17.91	114.65	13.99
FEBRERO	314	1187	75	3258	8.68	97.38	7.91
MARZO	316	1152	71	3352	11.02	99.80	4.56
ABRIL	325	1246	72	3250	9.16	79.62	10.76
MAYO	323	1211	72	3401	11.37	121.60	14.47
JUNIO	331	1369	77	3512	10.62	117.84	4.66
JULIO	320	1361	75	3635	25.69	152.49	6.77
AGOSTO	327	1246	72	3698	22.07	203.85	7.59
SEPTIEMBRE	331	1355	72	3372	38.45	144.77	9.18
OCTUBRE	331	1308	72	3733	6.58	110.77	3.46
NOVIEMBRE	323	1288	74	3623	13.74	148.50	5.30
DICIEMBRE	327	1311	73	3428	12.07	106.38	3.06

Por efectos de escala en la Figura 11 puede que se noten grandes variaciones, pero los parámetros de trabajo se mantienen relativamente constantes. Trabajar corrientes bajas en el molino SAG como se menciona anteriormente puede provocar un deterioro prematuro de los revestimientos, por debajo de 340 A el efecto cascada de los cuerpos moledores se hace más prominente ya que adquieren mayor energía debido a los levantadores del molino. La Figura 11 mostró claramente corrientes de trabajo muy bajas para el mes de febrero, marzo y julio y teniendo en cuenta que es todo un mes de trabajo el desgaste es mucho más significativo para los revestimientos.



**Fig 11.** Gráfica de corriente (A) y velocidad (%) molino SAG durante año 2021.

Con el inicio del área de flotación surgió la posibilidad de aumentar la cantidad de material que ingresa al molino SAG, la concentración de mineral de cobre y sulfuros dio paso a un incremento en los flujos y por tal motivo variables como la velocidad y consumo de cuerpos molidores también se vio afectada. En este sentido es de vital importancia darle un buen manejo al molino, siendo muy estrictos en la corriente de trabajo ya que se requieren aumentos considerables de velocidad y el margen de respuesta en el tiempo disminuye para un molino lleno que es lo mismo a decir tener un corriente por encima de 380 A. En la Tabla 4 se observa que a partir del mes de febrero se implementa un aumento de tonelaje en aproximadamente 4000 t/día con un tonelaje real procesado de 4130 t/día sobrepasando así el criterio de diseño de 3500 t/día y con ello también se puede apreciar incrementos progresivos en la alimentación y la velocidad del molino SAG en lo que va corrido del año.

**Tabla 4.** Corriente, potencia, velocidad y tonelaje promedio para el año 2022.

AÑO 2022	PROMEDIO				DESVIACIÓN ESTANDAR		
	Mes	Corriente (A)	Potencia (KWh)	Velocidad (%)	Ton/d	Corriente (A)	Potencia (KWh)
ENERO	313	1253	69	3262	22.20	193.27	13.57
FEBRERO	322	1341	79	4130	23.85	296.74	9.36
MARZO	329	1417	84	4300	21.94	268.79	7.32
ABRIL	321	1460	84	4200	13.76	130.34	6.29
MAYO	329	1421	86	3938	25.45	230.39	6.51
JUNIO	339	1454	89	4447	11.68	84.95	2.07
JULIO	338	1514	88	4283	12.44	137.96	4.10
AGOSTO	338	1497	89	3594	15.41	216.25	3.37
SEPTIEMBRE	331	1502	90	4429	16.95	147.90	1.34
OCTUBRE	345	1580	88	4534	17.64	75.01	2.27
NOVIEMBRE	357	1682	90	4379	18.77	97.28	2.12

Uno de los objetivos que se plantearon fue el incremento tonelaje a 4300 t/día, ya que debido al aumento de velocidad del molino SAG se presentan corrientes de trabajo bajas siendo los primeros meses del año 2022 (enero y febrero) un indicador fiable para este posible aumento. En cuanto a las velocidades de trabajo hasta el mes mayo se opera el molino a menos de 12 rpm que corresponde al 70 % de la velocidad crítica y teniendo corrientes bajas de 313 A y 322 A, para enero y febrero se propone superar la meta entre 4400- 4500 t/día. A partir de junio se puso en marcha la meta de ingresar al molino SAG entre 190- 195 t/h en cada turno que corresponde un poco más de 4400 t/día. Se fijó entonces una velocidad de molino en 90 % (cerca de 12 rpm ver Tabla 1) que en lo posible que se mantuviera constante a partir del mes de junio, como se observa en la Figura 12 en la línea de

velocidad desde junio a noviembre percibe un comportamiento constante de aproximadamente  $89 \pm 1$  %.

En principio mantener el 90 % de velocidad fue un cambio positivo porque se logró trabajar a corrientes bajas sin sobre cargar el molino que era uno de los inconvenientes que se presentaban frecuentemente años anteriores, sin embargo, uno de los aspectos negativos es que a corrientes por debajo de 340 A los revestimientos del molino SAG se ven afectados por los impactos directos de los cuerpos moledores debido a un molino descargado, este aspecto se analizará más adelante. Por tal motivo fue imperativo ajustar variables y se tomó la decisión de mantener la corriente entre 340-360 A de tal modo que se retenga la carga adecuada para el cuidado de los revestimientos, parámetro que se aplica durante todo el mes de octubre y noviembre. La Tabla 4 muestra una corriente de  $345 \pm 17.64$  A y  $357 \pm 18.77$  A respectivamente, la idea fue mantener este rango de corriente sin importar que velocidad se le aplique al molino SAG.

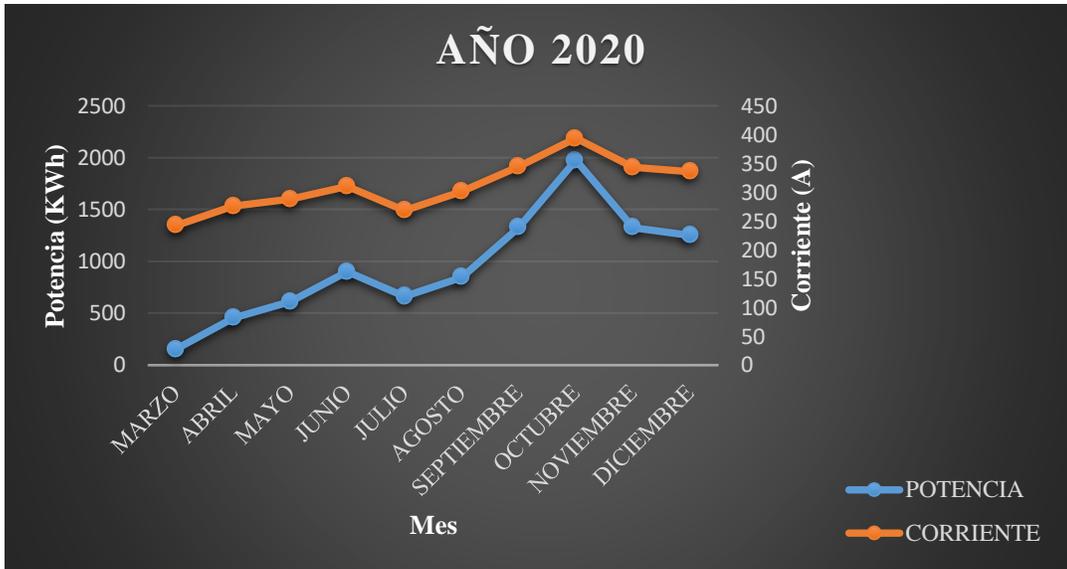


**Fig 12.** Gráfica de corriente (A) y velocidad (%) molino SAG durante año 2022.

### *C. Consumo de potencia en el molino SAG*

La potencia es una magnitud que está directamente relacionada con la corriente que llevan consigo una proporcionalidad directa que igual a la corriente se convierte en un parámetro importante de monitoreo continuo en la operación del molino SAG. El área de molienda es la etapa del proceso de beneficio que más demanda tiene de consumo de energía, se podría decir que puede alcanzar hasta el 50 % de la energía que se consume en toda la planta, es por esto que la potencia más que un indicador de operación del molino también lleva consigo un aspecto económico, si bien en esta etapa se esperan parámetros ideales que garanticen un buen producto pues también se busca optimizar el consumo de potencia a valores mínimos sin dejar a un lado la eficiencia del equipo. El análisis de la potencia se realizó en dos segmentos, primero a partir de los datos históricos arrojados por el SCADA y segundo con el índice de trabajo para la potencia requerida para obtener un P80 malla # 10 deseado.

Así como la corriente tiene un valor máximo permitido de operación para criterios de diseño la potencia también tiene un máximo permitido de trabajo de 2600 KW y esto corresponde a una corriente de aproximadamente 430 A en donde a este punto de la operación del molino SAG no se debería llegar porque el estaría excesivamente cargado siendo un riesgo para la integridad del molino como para los operadores en campo. La Figura 13,14 y 15 muestran la relación que tiene la potencia con la corriente, tienen el mismo comportamiento en la mayoría de los meses, igualmente este es un parámetro determinante el cual se debe mantener constante como se observa en el año 2022. El objetivo con la potencia es lograr el menor consumo manteniendo la meta de alimentación de mineral y los posibles incrementos a futuro. Como se replanteó anteriormente a partir de pruebas de variación de corriente se establece un manejo de corriente entre 340-360 A lo que es equivalente a potencia entre 1500-1700 KW que es el manejo que se dio a partir de octubre del presente año. En cuanto a aspectos económicos se calculó a groso modo según el valor comercial a nivel industrial el costo por consumo de potencia en KWh para el molino SAG para cada año y el resultado se muestra en la Tabla 5.



**Fig 13.** Relación entre corriente (A) y potencia (KW) molino SAG durante año 2020.



**Fig 14.** Relación entre corriente (A) y potencia (KW) molino SAG durante año 2021.



**Fig. 15** Relación entre corriente (A) y potencia (KW) molino SAG durante año 2022.

Los incrementos en el tonelaje llevan consigo aumento en la potencia de trabajo y esto se ve reflejado en los consumos como se observa en la Tabla 5, la finalidad de estos gastos anuales en potencia para el molino SAG es comparar el costo y beneficio que se tiene según la modificación de variables que se establecen en la operación y en este sentido fue fundamental el estudio de la corriente.

**Tabla 5.** Consumos y costos de la potencia para el año 2020, 2021 y 2022.

Año	Consumo anual KW	Costo anual	Costo KWh industrial
2020	5,291,760	\$ 1,337,598,175	\$ 252.77 COP
2021	10,226,064	\$ 2,584,842,092	
2022 hasta Noviembre	11,193,154	\$ 2,829,293,489	

Dicho antes, a corrientes bajas se tiene un molino muy descargado por lo tanto afecta la vida útil de los revestimientos y a corrientes altas se encuentra un molino muy cargado, con consumos de potencia excesivos lo que nos es bueno tanto por seguridad de la operación como por aspectos económicos. Siendo muy enfáticos con los revestimientos del molino ya que es un accesorio fundamental dentro de la molienda y además de costoso se busca tener el mayor cuidado posible de no desgastar el

revestimiento antes de que se cumpla el periodo recomendable para el cambio. Sabiendo esto pues es preferible trabajar corrientes altas que corrientes bajas para evitar golpes directos y de manera repetida contra los revestimientos; sin embargo, también se busca disminuir costos en potencia y encontrar un equilibrio sin verse afectado estas dos condiciones, donde se planteó y ejecutó una corriente de trabajo entre 340-360 A mencionado anteriormente. Ahora haciendo una comparación entre costos de revestimientos y consumo de potencia se encontró que en gastos de operación es más costoso hacer un cambio completo de revestimientos que lo que cuesta el consumo de potencia anual. Para el molino SAG que actualmente opera en la Compañía el juego completo de revestimientos tiene un costo alrededor de \$ 800.000 USD dólares que en pesos colombianos equivale a \$ 4.000.000.000 COP donde el fabricante recomienda el cambio cada 8 meses, de tal manera que el cuidado de este es de gran responsabilidad por parte de quien opera el molino.

Además del costo de la potencia del molino por año se evaluó también la potencia que se requiere para reducir el mineral con un F80 de 150 mm a un P80 de 2 mm utilizando la fórmula empírica de la ley Bond (Ecuación 4). Hacer este análisis en el laboratorio no fue posible debido a que se requiere de un molino especial el cual no tiene la Compañía y también porque tener un equipo con el que se pueda analizar un tamaño de alimento como el de molino SAG se hace difícil en comparación a un molino de bolas donde la granulometría es menor para la cual la ley de Bond fue diseñada. A pesar de esto y siendo una fórmula empírica se puede tomar algunos datos que arroja el molino SAG en operación y reemplazar en la Ecuación 4 y así obtener el índice de trabajo  $W_i$  para el molino SAG y comparar con el molino de Bolas.

$$W_i = \frac{E}{10 \left( \frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right)} \rightarrow W_i = \frac{1657.45 \text{ KWh}}{10 \left( \frac{1}{\sqrt{2000 \mu m}} - \frac{1}{\sqrt{150000 \mu m}} \right)}$$

$$W_i = 43.81 \frac{\text{KWh}}{t}$$

Este valor es el resultado de dividir entre las toneladas que ingresan al molino SAG por hora (195 tph), esto indica que se requiere una energía promedio de 43.81 KWh/t para llevar el mineral de alimento a un 80 % de producto deseado, según las características del mineral que llega de mina. Debido a que la potencia del molino SAG varía constantemente en el tiempo a causa de la dureza del mineral pues el índice de trabajo también lo hace a diferencia del molino de bolas que trabaja a una velocidad fija y por ende una potencia que esté alrededor de  $1911 \pm 5$  KW para un índice trabajo de 24 KWh/t, este valor es el resultado de análisis en el laboratorio del área de metalurgia que se encuentra en la Compañía.

#### ***D. Tamaño de corte malla #10 (2 mm) y porcentaje de sólidos***

El molino SAG es un equipo que trabaja en húmedo y debe cumplir 2 parámetros que son fijos en el proceso, la densidad de pulpa es una variable que se trabaja en un rango específico el cual no es modificable manteniéndose entre 70-75 % en sólidos según estándares operativos que han dado buenos resultados de caudal o flujo de salida para el molino SAG. Como la alimentación de mineral al molino puede ser variable según condiciones operativas también lo es el caudal de agua que ingresa al molino para formar la pulpa, donde se emplea una válvula automática se puede modificar la apertura y así el control de flujo según el tonelaje a trabajar.

Por otro lado, se realizó un tamaño de corte en campo que es la segunda variable que debe permanecer constante todo el tiempo, la Tabla 6 muestra los resultados para 34 muestras tomadas y pesadas por el operador en campo utilizando una malla Tyler #10 (2 mm) durante 17 días dos veces en el turno de trabajo. No fue posible aumentar el número de muestras por disponibilidad de tiempo y personal, sin embargo, al hacer seguimiento del corte en la malla #10 se puede observar que el tamaño de partícula (P80) satisface las necesidades para el proceso.

La imagen de la derecha de la (Fig 16) es el material de rechazo de la descarga del molino SAG, es un material estéril difícil de fracturar, podría presentar cierto contenido de metal valioso, pero puede considerarse como despreciable como para devolverlo al circuito de molienda porque no se justifica el gasto energético para devolver este material al proceso. Los valores de material retenido mostrado en la Tabla 6 corresponden al peso de este sobre tamaño, siendo aproximadamente 10 % a 15 % del mineral que ingresa al circuito.



**Fig 16.** Tamiz usado para corte de malla #10 (2 mm).

La finalidad de hacer este corte de malla fue llevar un registro del P80 del molino SAG trabajando diferentes velocidades donde se tuviera un molino descargado o corrientes bajas y el molino cargado o corrientes altas con el fin de identificar el punto donde la fractura del mineral no era efectiva manteniendo una alimentación de mineral a 195 tph, por motivos de logística las mallas no llegaron a tiempo, solo a partir del mes de noviembre se empieza a realizar dicho ensayo. Durante este periodo ya se venía trabajando desde el mes de octubre los parámetros que se fijaron que son manejar la corriente entre 340-360 A con un porcentaje de sólidos entre 70-75 %, estos 34 ensayos mostraron que manejar esta corriente cumple con el P80 deseado con un promedio de malla pasante de  $81 \pm 2.7$  %, así que este análisis evidenció que este parámetro es el adecuado siempre y cuando se mantengan en el tiempo y ajustando los cuerpos molidores acorde al material que ingresa al molino SAG.

**Tabla 6.** Datos de tamaño de corte con malla Tyler #10 (2mm).

EVALUACIÓN CORTE DE MALLA TYLER #10				
# Ensayo	Muestra alimento (Kg)	Retenido malla 10 (Kg)	Pasante malla 10 (Kg)	% Pasante 2 mm
1	1.903	0.249	1.708	90
2	2.076	0.552	1.535	74
3	2.060	0.597	1.613	78
4	2.004	0.438	1.510	75
5	2.010	0.374	1.628	81
6	1.895	0.218	1.604	85
7	1.889	0.251	1.510	80
8	1.925	0.326	1.523	79
9	2.104	0.38	1.698	81
10	2.006	0.3	1.613	80
11	2.065	0.298	1.700	82
12	2.098	0.387	1.688	80
13	2.068	0.4	1.650	80
14	2.003	0.399	1.601	80
15	1.962	0.312	1.560	80
16	1.904	0.267	1.523	80
17	1.912	0.312	1.521	80
18	1.945	0.301	1.548	80
19	2.116	0.388	1.710	81
20	2.098	0.306	1.701	81
21	2.024	0.321	1.699	84
22	2.007	0.334	1.671	83
23	2.002	0.265	1.693	85
24	2.016	0.32	1.636	81
25	2.098	0.336	1.704	81
26	2.065	0.385	1.651	80
27	1.998	0.397	1.588	79
28	1.976	0.367	1.573	80
29	2.091	0.327	1.683	80
30	2.018	0.295	1.637	81
31	2.009	0.312	1.689	84
32	2.014	0.333	1.632	81
33	2.022	0.325	1.629	81
34	1.994	0.318	1.600	80

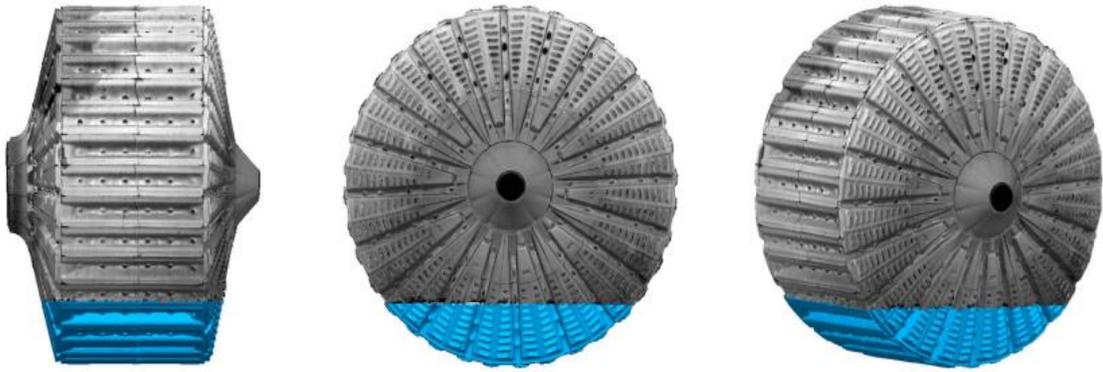
### *E. Consumo de cuerpos moledores*

El molino SAG como lo indican sus siglas es un equipo semiautógeno lo que quiere decir que requiere de un medio que ayude a que se efectúe la fractura del mineral que ingresa, los cuerpos moledores son el medio que le confiere al proceso de fractura una mayor velocidad de flujo de salida y por consiguiente una mayor capacidad. Los molinos según sus dimensiones y la función que desempeñan requieren de un porcentaje de llenado de cuerpos moledores el cual se debe mantener constante con la adición periódica de medios moledores. Inicialmente se calcula para el molino SAG la carga en peso (t) de cuerpos moledores que se requiere para su adecuada operación, para molinos SAG este porcentaje de carga debe estar en 12 % del volumen total del molino; utilizando la Ecuación 5 se calculó la carga inicial de cuerpos moledores.

$$Pcarga = (108.84m^3)(0.12) \left[ (0.6) \left( 7.87 \frac{ton}{m^3} \right) + (0.4) \left( 1.6 \frac{ton}{m^3} \right) \right]$$

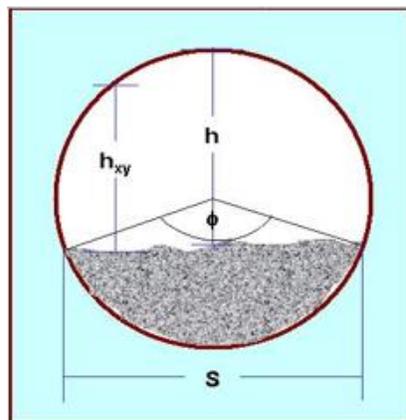
$$Pcarga = 69.22 ton$$

Se requieren 69.22 ton de cuerpos moledores de 5 pulg de diámetro para ocupar el 12 % del volumen del molino SAG, donde los espacios intersticiales de los cuerpos moledores son llenados por la pulpa que se forma al ingresar al molino. Una representación más gráfica de este porcentaje de llenado se puede observar en la Figura 17.



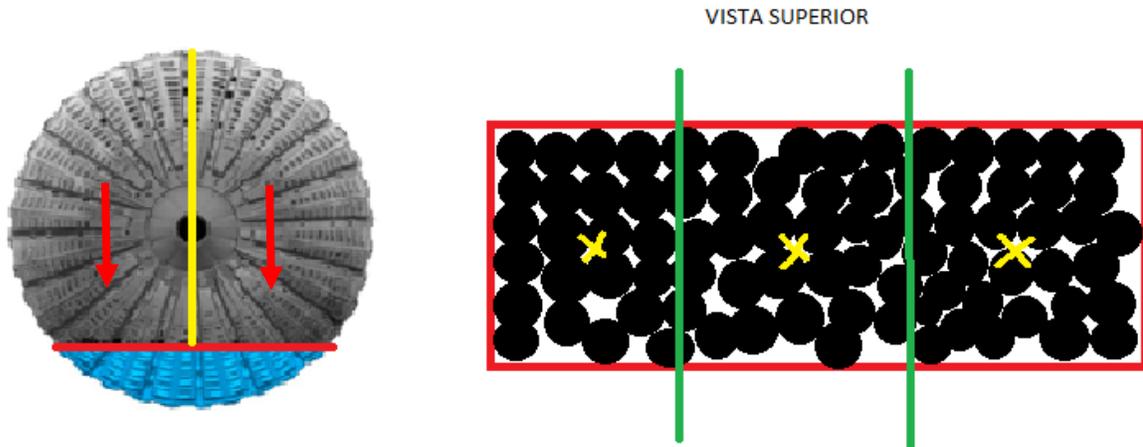
**Fig. 17.** Nivel de llenado para cuerpos moledores molino SAG [imagen proporcionada por la Compañía].

El chequeo de nivel de llenado del molino se debe hacer periódicamente por lo menos una vez al mes y así garantizar el 12% constante. El cálculo para la reposición de cuerpos moledores se hace de dos maneras, en primer lugar, se debe tomar la altura libre ( $h$ ) que hay desde la parte superior del molino hasta la superficie donde se encuentra la carga y también el ángulo que se forma desde el centro del molino hasta los extremos de la carga, la geometría para el cálculo de estas variables se muestra en la Figura 18. Para la altura libre del molino se hacen varias mediciones en zonas diferentes, tantas como se desee, del área superficial de la carga para sacar un promedio de nivel de carga en el molino, lo expuesto anteriormente se explica gráficamente en la figura 19. La formulación de estas variables es reserva de la Compañía.



**Fig. 18.** Variables para el cálculo de cuerpos moledores [imagen proporcionada por la Compañía].

La Figura 19 muestra un esquema del método de medición para la altura libre que se tomó en el molino SAG. La línea roja en la imagen de la izquierda es la zona o el área que se observa si se mira dentro del molino, las flechas rojas indican la vista que corresponde a la imagen de la derecha. La línea amarilla (izquierda) es el segmento de altura libre para el cálculo de llenado. Se divide en tres áreas iguales (separado por las líneas verdes) y en el centro de estas áreas (marcado con X en amarillo, imagen derecha) se toma la altura desde la parte más alta del cilindro hasta la superficie de llenado, esto con el fin de tener un promedio de alturas ya que se puede presentar irregularidad en la superficie, se pueden realizar tantas mediciones como se crea conveniente.



**Fig. 19.** Vista superior (derecha) del área de llenado de los cuerpos molidores [Diseño propio].

La Tabla 7 muestra las últimas mediciones registradas en el presente año donde se puede observar para el mes de mayo que a mayor altura libre (5.55 m) es menor el nivel de porcentaje de llenado (9.06 %) por lo que se deben reponer aproximadamente 13 t de cuerpos molidores de 5 pulgadas para mantener el nivel constante. Esta tabla es el formato original usado en la base de datos y en ella aparece la traducción desde idioma chino de cada parámetro, esto para el uso del personal extranjero.

**Tabla 7.** Tabla de cálculo para llenado de molino SAG.

检测日期 (Datos)	测量数值 (Medidas promedio)		角度 (Angulo $\theta$ , grados)	半自磨充 填率 (Nivel de carga, %)	总球数 (Carga de bolas, ton)	需补充球 (Adición de bolas, ton)
	高度, 米 (Altura libre, m)	高度, 英尺 (Altura libre, ft)				
28/4/2022	5.34	17.53	99.77	12.03%	56.55	-0.14
25/5/2022	5.55	18.21	89.91	9.06%	42.58	13.83
26/7/2022	5.28	17.33	102.62	12.98%	61.00	-4.59

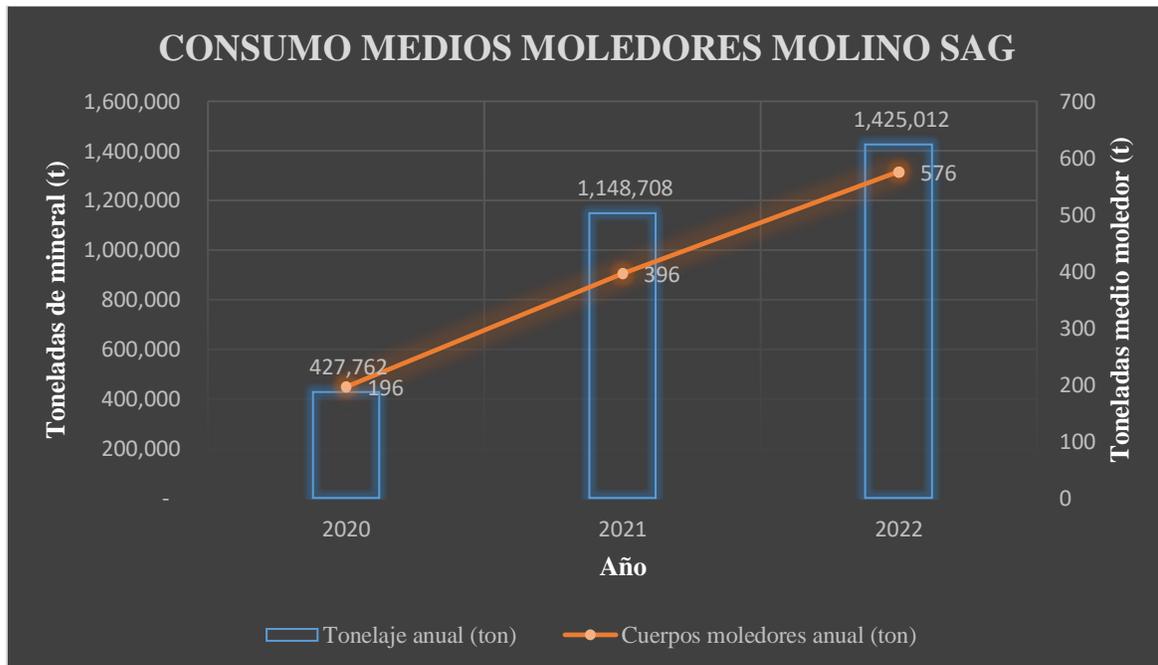
Mencionado anteriormente esta medición de altura libre se debe realizar por lo menos cada mes o dependiendo de la calidad de cuerpos moledores que se tengan en operación. La Compañía actualmente dispone de varios proveedores nacionales e internacionales que por temas de disponibilidad en inventario estos pueden cambiar cierto periodo de tiempo. Sabiendo esto a cada lote de cierto proveedor se le ha venido haciendo seguimiento del desgaste de los cuerpos moledores según las toneladas procesadas. Como la medición de la altura puede ser o no mensual igualmente se debe llevar una estimación de desgaste de los cuerpos moledores y hacer reposición diariamente si es necesario, para ello se tiene una fórmula con la cual se puede saber cuántas toneladas de cuerpos moledores se reponen por día, la Ecuación 6 es la expresión que se utiliza diariamente para el seguimiento de consumo de cuerpos moledores.

$$Cb = \sum \text{histórico ton mineral molido ton} \left( \frac{0.39 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg}} \right) - \sum \text{histórico de ton bolas adicionadas} \quad (6)$$

**Cb:** carga de bolas por turno

Se hizo difícil establecer una cantidad de cuerpos moledores estandarizada para el molino porque la cantidad de bolas a adicionar diariamente presenta constantemente variaciones, esto se debe principalmente a que las características del mineral cambian y la calidad de los cuerpos moledores también lo hacen según el proveedor, por lo tanto se establece un rango sobre la base de cálculo de desgaste entre 0.39-0.45 Kg/t de mineral molido, este factor se modifica teniendo en cuenta las mediciones de altura libre realizadas periódicamente o la cantidad de mineral que se alimenta y se mantiene hasta una nueva medición. Es cierto también que la adición de cuerpos moledores debe

aumentar proporcionalmente con el aumento del tonelaje lo que también influye sobre el consumo de potencia, pero mientras se mantenga el requerimiento del P80 no es pertinente disminuir el consumo de cuerpos moledores. Sin embargo, en términos económicos una buena calidad de la aleación del medio molidor conlleva a un consumo menor. La Figura 20 muestra los incrementos en consumo de cuerpos moledores durante los años 2020, 2021 y 2022, que está relacionado con la cantidad de mineral procesado anualmente.



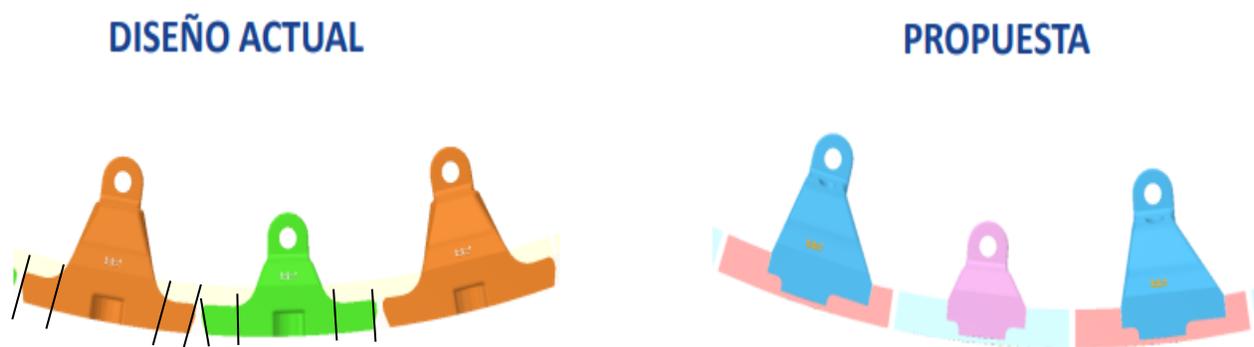
**Fig. 20.** Consumo anual de cuerpos moledores respecto a mineral procesado.

#### ***F. Revestimientos del molino SAG***

Los revestimientos del molino SAG son un accesorio fundamental para proteger la carcasa que comprende el cilindro y las tapas de alimento y descarga y además estos ayudan a imprimirle la energía necesaria a los cuerpos moledores y al mismo mineral para que se efectúe de manera violenta la fractura, anteriormente se explicó lo importante que es el cuidado de estos durante la operación

teniendo en cuenta requerimientos del proceso y también aspectos económicos. Si bien este trabajo tiene como objetivo fundamental el seguimiento de las corrientes trabajadas y los consumos de potencia y demás consumibles (cuerpos molidores), también se dio a la tarea de plantear parámetros de trabajo para el molino SAG de tal manera que se diera un manejo adecuado donde se mantenga la potencia en un rango controlado sin afectar la granulometría y los aumentos de tonelaje y así hacer lo posible en consumir la menor potencia posible.

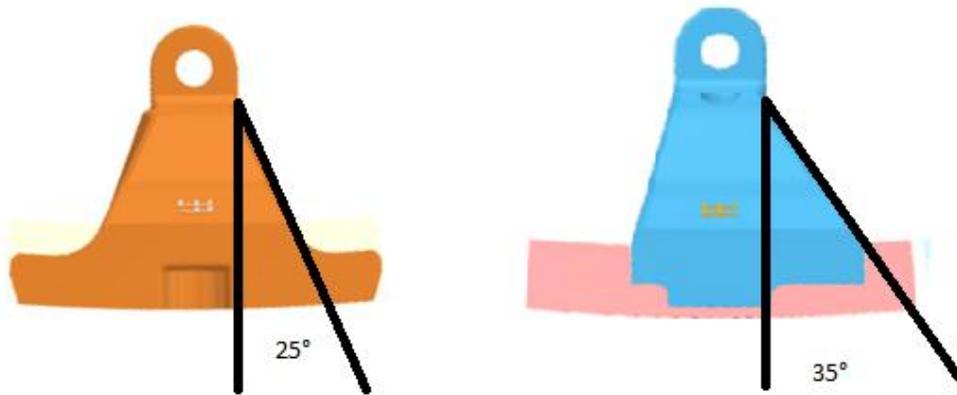
Durante el mes de noviembre de 2022 se hizo la propuesta de un nuevo diseño para los revestimientos del molino SAG con el objetivo de otorgar mayor flexibilidad para trabajar minerales más competentes y que permita maximizar la energía en los medios molidores, la Figura 21 ilustra la propuesta de diseño para los levantadores del molino SAG. La imagen de la izquierda muestra los cortes (líneas negras) para el nuevo diseño; estas secciones serán reemplazadas por otro material (caucho) con el fin de disminuir peso al molino.



**Fig. 21.** Propuesta de diseño para cambio de revestimientos [imagen proporcionada por la Compañía].

La idea de este diseño es la de mejorar la trayectoria de los cuerpos molidores a una menor velocidad del molino SAG, ya que debido a resultados anteriores se encontró que a altas velocidades del molino alrededor de 90-92 % la trayectoria de los cuerpos molidores afectaba directamente los revestimientos golpeando con gran fuerza. Así que se pensó en la modificación de los levantadores más altos como

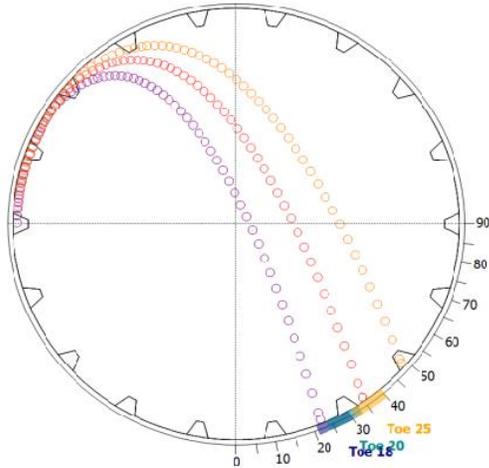
se muestra en la Figura 22 pasando de un ángulo de  $25^\circ$  a  $35^\circ$  y de esta manera la trayectoria de los cuerpos moledores iría más hacia el centro del área que ocupa el nivel de los cuerpos moledores.



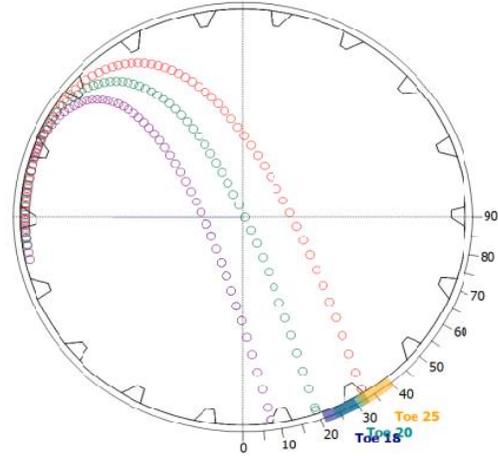
**Fig. 22.** Propuesta de diseño ángulo de levantadores de los revestimientos [imagen proporcionada por la Compañía].

Adicionalmente el juego de revestimientos del molino SAG se propone híbrido, es decir, una combinación entre acero y caucho, donde se espera que le confiera un beneficio de disminución en peso de 22 toneladas. La Figura 23 muestra el cambio en la trayectoria de los cuerpos moledores, pasando de un desplazamiento máximo de  $50^\circ$  (imagen izquierda) a una trayectoria máxima de  $30^\circ$  (imagen derecha). Con una trayectoria de caída más hacia el centro del molino se tendrá una molienda más efectiva y eficiente y una descarga más rápida del mineral que ingresa el molino.

## TRAYECTORIA ACTUAL



## TRAYECTORIA PROPUESTA



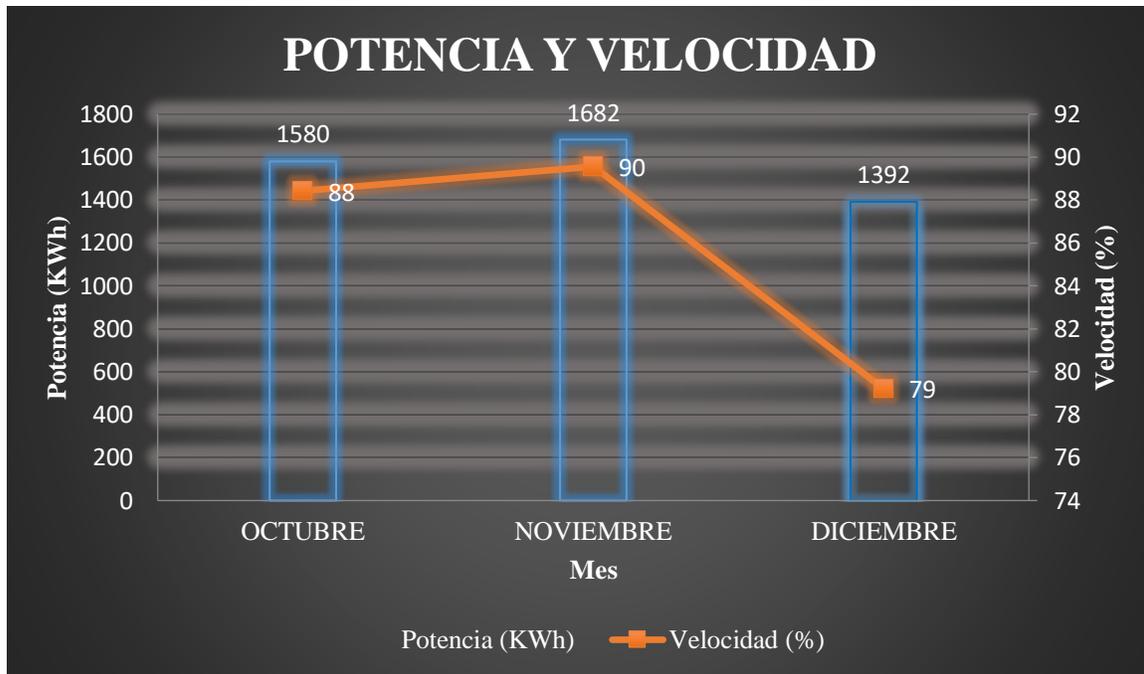
**Fig. 23.** Trayectoria antes y después de cambio de revestimientos [imagen proporcionada por la Compañía].

La propuesta de cambio de revestimientos se hizo en el mes de julio del año 2022. Por motivos logísticos los revestimientos con el nuevo diseño no fueron adquiridos, así que se hizo cambio de un juego de revestimientos nuevos con el diseño actual y este cambio se programó a partir del 1 de diciembre de 2022, finalizando la actividad de cambio el 6 de diciembre de 2022 con molino operativo. Haciendo provecho de este cambio se complementó para este trabajo hacer el seguimiento del molino SAG respecto a la corriente, potencia y velocidad del molino en comparación con el resultado de los meses de octubre y noviembre. La Tabla 8 muestra los resultados trabajados desde el 7 de diciembre de 2022 hasta el 26 de diciembre de 2022. El cambio para la potencia fue significativo y satisfactorio en comparación con los meses de octubre (1580 KW) y noviembre (1682 KW), se trabajaron velocidades muy por debajo de 90% y lo más importante es que se logró mantener el tonelaje a una potencia también por debajo de 1500 KW que fue el parámetro que se fijó.

**Tabla 8.** Resultados con cambio de revestimientos molino SAG.

<b>Diciembre</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Potencia (KW)</b>	<b>Velocidad (%)</b>	<b>Ton/día</b>
7	334	1460	84	3353
8	347	1592	88	4580
9	339	1486	77	4249
10	341	1507	84	4679
11	334	1471	79	3998
12	332	1405	81	4719
13	329	1385	81	4381
14	343	1444	81	4638
15	346	1467	81	4605
16	342	1437	80	4652
17	338	1393	79	4690
18	333	1364	79	4742
19	338	1409	80	4700
20	333	1365	78	4757
21	332	1363	79	4828
22	335	1395	80	4756
23	333	1368	79	4795
24	334	1391	79	4494
25	322	1240	72	4268
26	336	1297	78	4662

La Figura 24 muestra un comparativo de los meses de octubre y noviembre donde se trabajaron parámetros fijos de 340-360 A con el fin de cuidar los revestimientos y con el cambio de los levantadores durante el periodo descrito en la Tabla 8. La tendencia es de un cambio significativo en la potencia con un promedio de  $1392 \pm 103,51$  KW y la corriente donde fue permitido trabajar parámetros más bajos por la nueva trayectoria de los cuerpos molidores hacia el centro de la carga y que además permite mantener el 12 % de carga estimada en volumen de cuerpos molidores.



**Fig. 24.** Comparativo de potencia y velocidad de molino para los meses de octubre, noviembre y diciembre.

A partir de estos resultados que para conceptos operativos demuestra una mejoría en los consumos, queda a la espera de una nueva inspección para el molino SAG que permita comprobar con total confianza que los parámetros trabajados en el mes de diciembre si cumpla con las expectativas del cuidado requerido para los revestimientos.

## VI. CONCLUSIONES

- Con la recolección de datos a partir del software SCADA se logró hacer un seguimiento del manejo que se ha venido dando al molino SAG respecto a los parámetros de estudio como la corriente, potencia y velocidad y con ello se pudo establecer unos parámetros entre rangos con los cuales se pudo tener un mejor control del proceso de conminución.
- Se logra superar la brecha de material procesado por diseño del molino SAG que inicialmente estaba en 3000 t/día, superando así las 4300 t/día establecido en los objetivos con la implementación del nuevo proceso de concentración en la Compañía.
- Fue necesario fijar una corriente de 340-360 A con el fin de cuidar los revestimientos del molino, mantener una velocidad del 90% no fue viable por la trayectoria que presentaban los cuerpos moledores con efecto cascada más prominente.
- Es importante estar atentos a dos factores fundamentales a la hora de operar el molino SAG, el factor visual y auditivo que pueden ayudar a detectar de manera oportuna si se tiene un molino cargado o descargado y así actuar de manera rápida y hacer las correcciones pertinentes para mantener el manejo de corriente ya establecido.
- Es fundamental mantener en lo posible una potencia fija de trabajo 1500-1700 KW, continuamente se busca que la operación se mantenga en condiciones adecuadas con el menor consumo posible.
- El análisis granulométrico con malla #10 (2 mm) indicó que el P80 requerido para el molino se mantiene en 81% aproximadamente con los parámetros de corriente establecidos, aunque se requiere una mayor cantidad de energía según el índice de trabajo en comparación con el molino de bolas.
- Los cuerpos moledores es un insumo de consumo diario y la cantidad necesaria para mantener el 12% de llenado del molino depende tanto de la cantidad de material procesado como de la calidad de los cuerpos moledores según el proveedor, por lo que pensar en una propuesta en disminuir cuerpos moledores no fue pertinente, siendo más importante mantener la operación.
- El cambio de los levantadores de los revestimientos impactó notoriamente en la corriente, potencia y velocidad del molino SAG, esta disminución en estos tres parámetros permitió

trabajar corrientes más bajas sin temor de afectar los revestimientos de manera directa por el cambio de trayectoria en los cuerpos molidores.

## REFERENCIAS

- [1] Zijin Continentalgold, «Minería moderna de Colombia para el mundo». [En línea]. Available: <https://www.continentalgold.com>
- [2] E. B. Alcalá Cruz, A. Flores Corrales, A. A. Beltrán «MANUAL DE ENTRENAMIENTO EN CONCENTRACIÓN DE MINERALES». [En línea]. Available: [https://www.emagister.com/uploads\\_courses/Comunidad\\_Emagister\\_56661\\_MINERALES\\_-\\_II\\_.pdf](https://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_56661_MINERALES_-_II_.pdf)
- [3] Industrias I (2015). «Molienda». [En línea]. Available: [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06\\_Apunte%20Molienda.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf)
- [4] M. A. Silva Balocchi. (2013). «VARIABLES OPERACIONALES Y SU INFLUENCIA EN LA OPERACIÓN, PRO OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA MOLIENDA SAG». [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116302>
- [5] E. Aguilar Titi. (2017). «Optimización de molinos semi autógenos». [En línea]. Available: <http://www.energiaenmineria.cl/wp-content/uploads/2021/02/Optimizacion-de-molinos-semi-autogenos.pdf>
- [6] J. P. Zapata. (2017). «MODELO MULTIVARIABLE PARA ESTIMACIÓN DE CONSUMO DE POTENCIA DE MOLINOS DE TRITURACIÓN». [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148552/Modelo-multivariable-para-estimacion-de-consumo-de-potencia-de-molinos-de-trituracion.pdf?sequence=1>
- [7]; Zijin Continentalgold. (2020). «INDICE MANUAL DE OPERACION DE MOLIENDA PROYECTO BURITICA». (pag 40).
- [8] P. Valenzuela Piñeiro. (2018). «ANÁLISIS DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA». [En línea]. Available: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46138/3560900259712UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] L. F. De, L. A. Luz. «LA ELECTRICIDAD: CONCEPTOS, FENÓMENOS Y MAGNITUDES ELÉCTRICAS». [En línea]. Available: <https://www.edu.xunta.gal/centros/cpiantonioorzacouto/system/files/TEMA%202%20LA%20ELECTRICIDAD%20I.pdf>
- [10] E. A. Blanco. «BLOQUE II-CAPÍTULO 8. MOLIENDA». [En línea]. Available: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8.\\_molienda.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8._molienda.pdf).
- [11] A. Gorka, M. Izquierdo. (2000). «SISTEMA SCADA». [En línea]. Available: [https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/view/866/952](https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/866/952)
- [12] D. A. Ledesma, M. I. Hernández. (2010). «DESARROLLO DE UN SISTEMA SCADA PARA LA MEDICIÓN DE VOLTAJES CON SISTEMAS EMBEBIDOS PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA» [En línea]. Available: <http://dspace.espoeh.edu.ec/bitstream/123456789/1137/1/25T00140.pdf>
- [13] C. Lozano Cristóbal. «Introducción a SCADA». [En línea]. Available: <http://www.uco.es/grupos/eatco/automatica/ihtm/descargar/scada.pdf>

- [14] Continental Gold. (2014). «Criterial Design». (pag 16).
- [15] Auditorías energéticas, medidas de ahorro energético. (2018). «EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PROCESOS DE TRITURACIÓN Y MOLIENDA». [En línea]. Available: <https://app.maeswell.com/2018/11/eficiencia-energetica-en-procesos-de-trituracion-y-molienda/>
- [16] J. Alvarez, «Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda», 1961. [En línea]. Available: [www.edemet.cl](http://www.edemet.cl)