

Retos en el diseño de operaciones metalúrgicas

L. E. Mino Garnica, J.J. Huezo Casillas*

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Escolar 04360 C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX

* jhuezo@unam.mx

RESUMEN

El sector minero se encuentra en una posición desafiante en la búsqueda de gestionar su desarrollo sostenible que tiene como indicadores reducir las pérdidas de valores en los jales, reducción del consumo energético, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, menores residuos depositados por la actividad minera, generar un alto valor de productos y subproductos.

La industria del procesamiento de minerales se ha adaptado ante el aumento en la capacidad de las plantas de beneficio durante los últimos 25 años dando como resultado un aumento en la potencia instalada. De acuerdo a la visión que se tiene para el año 2030 la evolución del procesamiento de minerales se inclina a un menor consumo de energía, una mayor eficiencia, mejores condiciones de seguridad, automatización y control de procesos para minimizar una variedad de problemas de sostenibilidad que incluyen impactos ambientales locales negativos, emisiones de gases de efecto invernadero y tensiones socio económicas.

PALABRAS CLAVE: Operaciones metalúrgicas; trituración; beneficio de minerales, hidrometalurgia

ANTECEDENTES

La minería inteligente se trata de una transformación organizacional más amplia, no solo la creación de una minería digital. Esta evolución impactará en cómo se toman decisiones, qué habilidades se requieren, cómo interactúa la fuerza laboral y las comunidades, y cómo utilizar mejor los recursos como el agua y la energía eléctrica. Las soluciones digitales y los indicadores clave para una gestión sostenible llevarán a una automatización de la industria minera [30].

La visión del sector minero para el año 2030 es la gestión sostenible de la industria minera utilizando equipos y procesos eficientes. El eficiente aprovechamiento de los recursos minerales dentro del procesamiento debe mejorar con una reducción de energía y emisiones de CO_2 relacionado (en un 30%), reducir las pérdidas de metales en los jales (en un 30%), menores residuos depositados por la actividad minera (en un 30%) y generar un alto valor de productos y subproductos. El diseño de procesos innovadores y la optimización del control de los procesos de trituración, molienda y concentración permitirán sistemas de producción inteligentes [32].

El tema de la gestión de sostenibilidad del sector minero se encuentra en la cima, un ejemplo fue el evento “2030 vision for a responsible and sustainable minerals and metals sector” presentado en Estocolmo en junio del 2022. Siendo el principal tema elevar el nivel de estándares y principios para el sector minero para lograr resultados sostenibles con el fin de mitigar impactos ambientales y sociales.

El objetivo de este trabajo es presentar los retos que enfrenta el diseño de las operaciones metalúrgicas y las acciones que se han realizado para cumplir con una minería inteligente.

OPERACIONES METALÚRGICAS

El procesamiento de minerales requiere de diferentes operaciones unitarias como la trituración, molienda, clasificación, concentración y procesos de metalurgia extractiva. En general el procesamiento de minerales es un campo que emplea procesos y tecnologías para separar minerales valiosos de la ganga. Los procesos y tecnologías disponibles han tenido un desarrollo en las últimas décadas en busca de plantas de beneficio eficientes.

La industria de extracción de metales se enfrenta posiblemente al mayor desafío de su historia con la necesidad de demostrar su sostenibilidad frente a la disminución de reservas y leyes, mayores legislaciones ambientales y aumento en los costos de operación. Para dimensionar los retos que enfrenta el diseño de operaciones metalúrgicas es importante comprender los procesos involucrados y los avances tecnológicos que permiten mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos minerales, es decir mejorar la recuperación de minerales valiosos con un consumo de energía y una demanda de agua reducido. Cada

año nuevos desafíos surgen al descubrir yacimientos minerales con leyes más bajas, minerales de grano fino y con una mineralogía compleja.

Equipos de trituración

Las trituradoras actuales ofrecen una mayor capacidad y rendimiento, por ejemplo una trituradora giratoria Nordberg® de 72 x 112 pulgadas en su catálogo del año 1993 alcanza una capacidad de 7,080 toneladas métricas por hora y en la actualidad una trituradora Metso:Outotec® de 60 x 110 alcanza hasta una capacidad de 17,000 toneladas métricas por hora, ambos casos con un material con un índice de trabajo de 11.6 kWh/t. Comparando la capacidad y potencia se comprueba que los nuevos equipos tiene un alto rendimiento procesando un mayor tonelaje por caballo de fuerza (ver, Figura 1 y Figura 2) que obedece a las necesidades actuales.

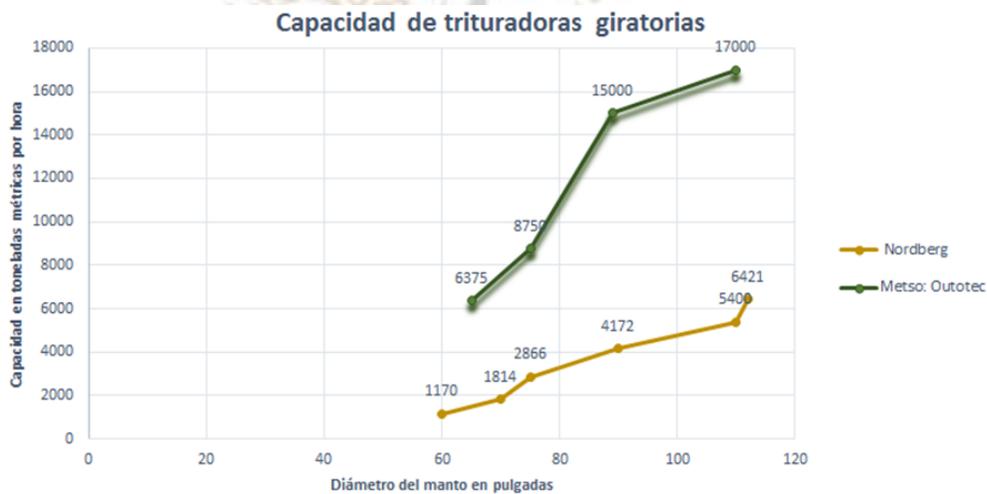


Figura 1.- Comparación de la capacidad de trituradoras giratorias para realizar una evaluación de los avances tecnológicos en su diseño. (Los datos se obtuvieron de Nordberg®, 1993 [19]; Metso: Outotec®, 2021 [16].)

Este aumento en su rendimiento se debe a su desarrollo técnico utilizando nuevas tecnologías como materiales de alta resistencia, sistemas de control y sistemas hidráulicos avanzados. El rendimiento de las trituradoras está en función de cuatro aspectos: relación de trituración, capacidad, consumo de energía y desgaste de los elementos de la cámara de trituración. Actualmente se cuentan con trituradoras de quijada, giratorias, cono, rodillos e impacto. En la Figura 3 se muestra el rendimiento actual de estos equipos donde se puede observar la relación de trituración que alcanza cada equipo y su capacidad donde las trituradoras

giratorias son los equipos con mayor capacidad y se destacan nuevos equipos como las trituradoras de rodillo excéntrico y las unidades HPGR.

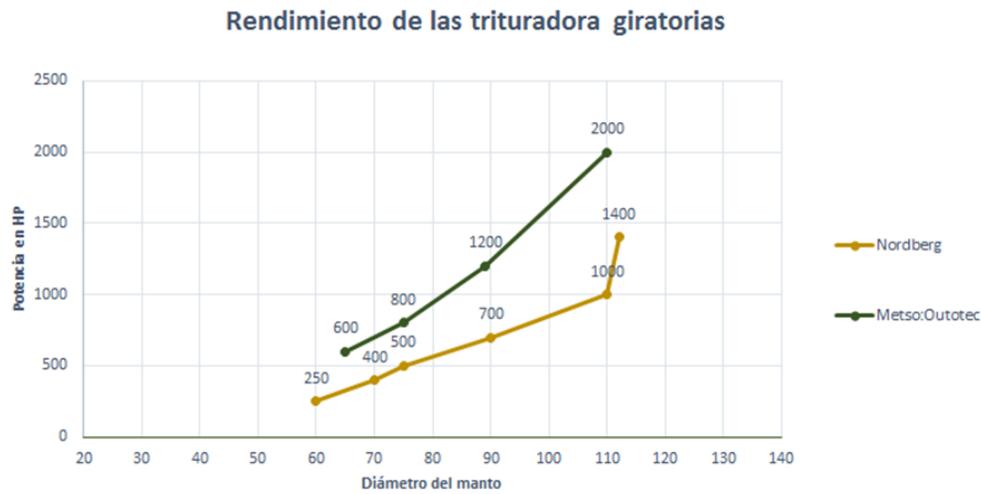


Figura 2.- Comparación del rendimiento de las trituradoras giratorias para realizar una evaluación de los avances tecnológicos en su diseño. (Los datos se obtuvieron de Nordberg®, 1993 [19]; Metso: Outotec®, 2021 [16].)

Actualmente se tienen tres trituradoras primarias; trituradoras de quijada, trituradoras giratorias y trituradoras de rodillo excéntrico (ERC). Las trituradoras ERC son un modelo reciente que busca competir con las trituradoras de alto rendimiento con tres características centrales: un diseño compacto, fácil mantenimiento y una capacidad para triturar minerales competentes con un tamaño de alimentación hasta 2,000 mm permitiendo relaciones de trituración hasta de 10:1 [33].

Una trituradora de quijada de 22 x 48 pulgadas cuenta con un motor de 150 HP con una descarga de 8 pulgadas otorgando una capacidad de 384 toneladas cortas por hora y una trituradora ERC 22 x 20 cuenta con un motor de 400 HP con una descarga de 8 pulgadas otorgando una capacidad entre 1,450 – 2,900 toneladas cortas por hora de esta manera se triplica la capacidad de las trituradoras de quijada en ambos casos con material con un índice de trabajo de 11.6 kWh/t. En la Figura 4 se muestra el rendimiento de las tres trituradoras primarias con las que se cuentan actualmente y se muestra el rango de aplicabilidad de las ERC.

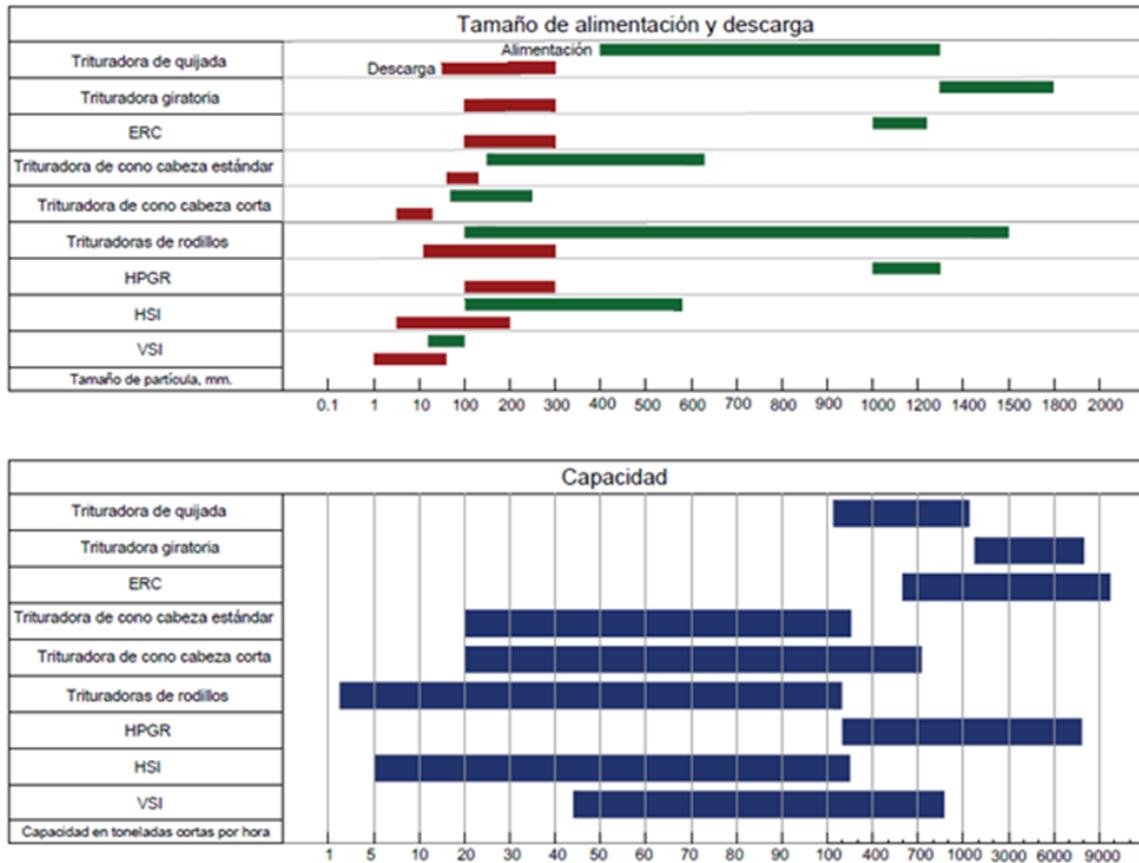


Figura 3.- Rendimiento de los diferentes equipos de trituración en el mercado realizada para observar la relación de trituración y su capacidad de cada equipo. (Los datos se obtuvieron de Nordberg®, 1993 [19]; Metso: Outotec®, 2021 [16], Thyssenkrupp®, 2020 [33].

Un caso especial son las unidades HPGR donde su implementación como trituradoras terciarias está en aumento porque proporciona una alta capacidad con una baja potencia. La razón de su éxito en la industria son la reducción de costos generales y relaciones de trituración altas debido a las altas fuerzas de compresión aplicadas.

Para una aplicación óptima de las unidades HPGR se requiere una alimentación con un tamaño menor a 50 mm y otorga una descarga de 100 mm hasta 25 μm . El producto se puede alimentar a un molino de bolas operando en circuito cerrado con un HPGR. Los rodillos a alta presión crean microfracturas al someter a los minerales a fuerzas de compresión. Además, la cantidad de finos creados conducen a ahorros en el consumo de energía, mayor rendimiento y una menor carga circulante. Por estas razones estos equipos se utilizan en etapas de premolienda donde se asume la función de preparar una alimentación adecuada para la operación de molienda.



Figura 4.- Comparación del rendimiento de las trituradoras primarias para realizar una evaluación de los alcances de las unidades ERC. (Los datos se obtuvieron de Thyssenkrupp®, 2020 [34]; Metso: Outotec®, 2021 [16]; Sepro Minerals®, 2019[27].)

Las investigaciones de los circuitos de trituración en busca de una minería inteligente son abordadas por dos vías: (1) Modificación de los circuitos a través del cambio en los flujos másicos de mineral con la adición o eliminación de flujos circulantes y la aplicación de operaciones de clasificación eficientes y (2) Modernización de circuitos mediante la sustitución de equipos existentes por nuevas tecnologías, más eficientes desde el punto de vista tecnológico y económico [25].

Saramak y Gawenda (2012) [25] señalan que la implementación de nuevas tecnologías lleva a la aplicación de circuitos de trituración híbridos que tiene la opción de un monitoreo automático para desactivar o activar los equipos de trituración y controlar los flujos másicos de mineral. Este avance da respuesta a la necesidad de disminuir costos de operación, altos índices de consumo de energía y la necesidad de mantener un alto rendimiento como un control en el tamaño de partículas en la descarga, una eficiente clasificación, bajo mantenimiento y una mayor seguridad en la operación.

Equipos de molienda

A pesar de que los molinos de tambor se han desarrollado con alto grado de eficiencia mecánica, su eficiencia energética (energía entregada por tonelada molida) es un tema de debate que persiste. La introducción de nuevos equipos, por ejemplo las unidades HPGR y molinos de agitación se han dado los primeros pasos para su adaptación en circuitos de molienda. Actualmente el enfoque para el diseño de circuitos de trituración y molienda debe ampliarse para tener en cuenta las variaciones en la mineralogía y textura en los yacimientos minerales.

La molienda, en especial los molinos de tambor, tiene un consumo de aproximadamente el 30% de la energía total de una planta concentradora. El consumo de medios de molienda en conjunto con la energía eléctrica hace que esta operación sea una de las más costosas. En consecuencia, resulta importante prestar atención a la comprensión de las condiciones operativas de la molienda y los requisitos de potencia [20].

Wills y Finch (2016) [39] indican que la operación de molienda tiene costos relativos que son aproximadamente la mitad de los costos del procesamiento de minerales tomando como referencia una planta concentradora de cobre como se muestra en la Figura 5.

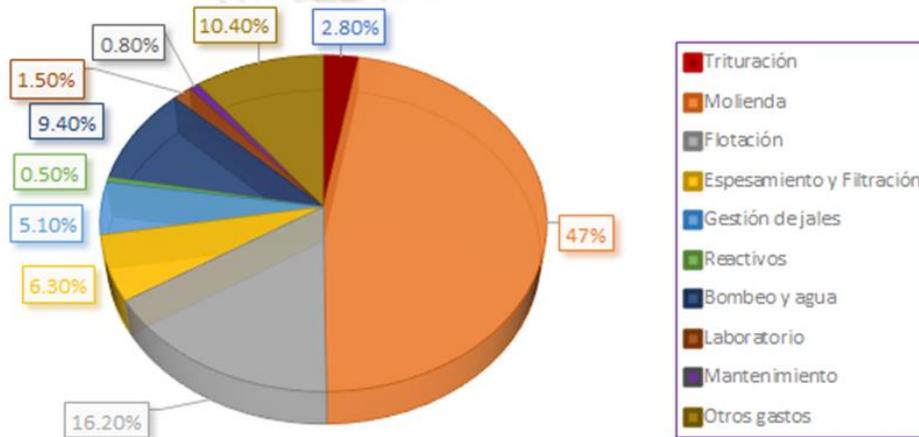


Figura 5.- Costos relativos de cada operación unitaria en una planta concentradora para mostrar que la operación de molienda demanda los mayores costos. (Los datos se obtuvieron de Wills y Finch, 2016 [38].)

Los diversos equipos de molienda en la industria se distinguen por el rango de tamaño en la alimentación y descarga. El rango de tamaño de partícula bajo la cual operan los equipos de molienda es un factor importante al seleccionar un molino para etapas de molienda primaria, secundaria o terciaria.

El desarrollo de molinos de agitación ha permitido un nuevo enfoque de los circuitos de molienda otorgando nuevas alternativas en el procesamiento de minerales. Los molinos de agitación son equipos donde la fuerza de impacto aumenta llevando a cabo una molienda fina otorgando productos hasta de $2 \mu m$. Dentro de esta familia encontramos a los TowerMill®, SMD®, IsaMill®, HIGmill® y VXPmill®.

Se ha demostrado que la molienda fina se ha convertido en una parte fundamental para el procesamiento de minerales de grano fino. Anteriormente en las etapas de remolienda se utilizaban molinos de bolas, pero la demanda de energía aumentaba exponencialmente cuando el tamaño de liberación se encontraba por debajo de $100 \mu m$. Como respuestas a este desafío los molinos de agitación resultan energéticamente más eficientes en comparación con los molinos de bolas. Estos equipos son entre un 35% a 40% más eficientes que los molinos de bolas en tareas de molienda fina [11].

Los molinos de agitación utilizan medios de molienda con un tamaño de 15 mm hasta 1 mm que contribuye a una eficiencia energética alta, porque los medios de molienda pequeños contribuyen a una mayor área superficial disponible para la molienda.

En los molinos de agitación la carga de medios de molienda tiene un efecto significativo en el rendimiento y eficiencia de molienda. Estos equipos logran una eficiencia energética alta porque la carga de medios de molienda es alrededor de un 50% al 80% del volumen del molino aumentando las probabilidades de impacto con el mineral obteniendo una reducción del 50% en su demanda energética [11].

Los molinos de agitación cuentan con una alta velocidad de agitación (3-21 m/s) en un volumen pequeño permitiendo una constante interacción entre partículas de mineral y medios de molienda. La combinación de la intensidad energética y la alta eficiencia de molienda conduce a molinos compactos capaz de instalarse en una planta con espacios limitados.

Los molinos de agitación han permitido que se procesen minerales con intercrecimientos de partículas finas ya sean menas o gangas. Además, la capacidad de producir una alimentación ultrafina para procesos de lixiviación mejora la cinética de la reacción haciendo factible la lixiviación directa de minerales en lugar de las rutas convencionales de tostación.

La creciente aceptación de las unidades HPGR en diseño de circuitos de molienda impulsa a proyectos para examinar la viabilidad de implementar esta tecnología en los circuitos, llegando a compararlos con los molinos SAG para ser utilizados en una etapa de molienda primaria.

Morley y Staples (2010) [17] indican que en los circuitos que implementan una unidad HPGR tienen costos de capital más altos en comparación con los molinos SAG por el control de la alimentación para proteger los rodillos. Las unidades HPGR para garantizar una alimentación a una etapa de molienda secundaria deben operar en circuito cerrado demandando equipos como cribas, bandas transportadoras, tolvas y equipos para el control de polvos que aumentan los costos de capital.

Una consideración que favorece a la implementación de unidades HPGR es la reducción de costos operativos debido a su eficiencia energética que permite moler un mayor tonelaje con una menor demanda energética y también porque elimina los costos relacionados con medios de molienda.

Morley y Staples (2010) [17] concluyeron " Las diferencias en el consumo de bolas en los molinos SAG y los costos de los revestimientos de las unidades HPGR son insignificantes, pero la potencia instalada para un circuito con un HPGR es menor que en los circuitos que implementan un molino SAG". Esta es la ventaja dominante que se traduce como una reducción significativa del consumo de energía reduciendo la huella de carbono de un proyecto. De acuerdo con Chelgani y Neisiani (2022) [3] utilizando unidades HPGR en etapas de molienda primaria se reduce el consumo de energía alrededor del 10% al 50%.

Evolución de los circuitos de molienda

Los primeros circuitos en utilizarse en la industria fueron los circuitos de molinos de barras y molinos de bolas, estos circuitos toman el producto de una trituradora secundaria o terciaria otorgando dos configuraciones: (1) Molinos de barras primario - molino de bolas secundario y (2) trituración de tres etapas - molino de bolas. Estos circuitos resultan deficientes para altos tonelajes por el desgaste que se produce en las trituradoras y por el número de líneas que se deben operar. En la Figura 6 se muestra la eficiencia energética de los molinos de barras, molinos de bolas, molinos SAG y unidades HPGR quedando claro la tendencia a una responsabilidad energética de los equipos de molienda.

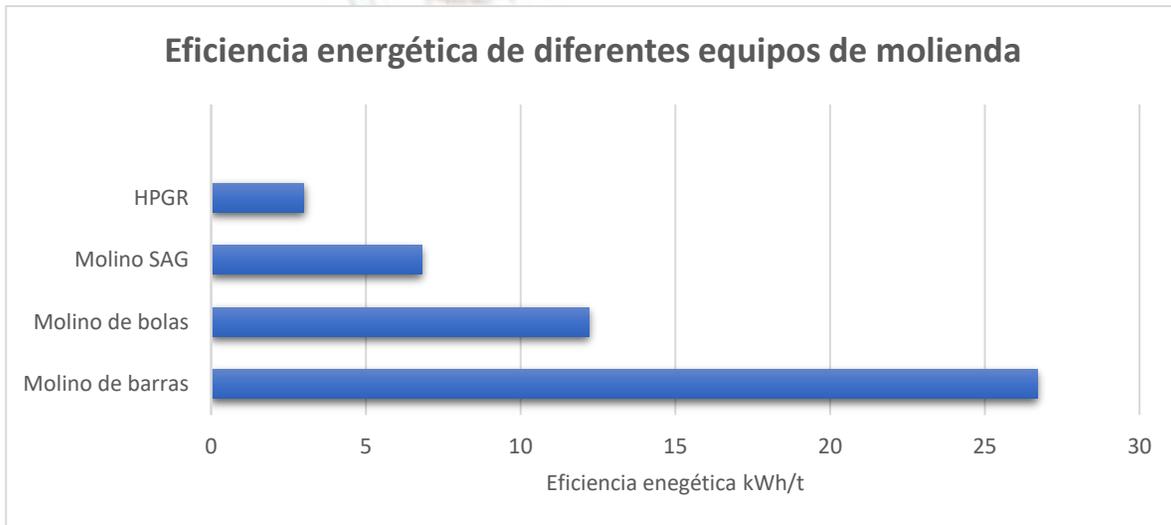


Figura 6. Comparación de la eficiencia energética de diferentes equipos de molienda. (Los datos se obtuvieron de Marks et al., 2012 [14]; Drozdiak et al., 2012[5]; Brenda Mines, 1989 [2]).

El desarrollo de nuevas tecnologías permitió su adaptación en los circuitos de trituración y molienda para el tratamiento de minerales de alta competencia, tamaño de liberación fino y grandes cuotas de producción. Desde el año de 1920 hasta 1950 la mayoría de los circuitos de trituración se diseñan con varias etapas de trituración seguida de molinos de barras y bolas. Para el año 1960 el uso de molinos de barras disminuyó a medida que se impulsó la aplicación de molinos de bolas con un mayor diámetro. Posteriormente en el año de 1990 se diseñaron molinos autógenos y semiautógenos de gran diámetro con una molienda secundaria con molinos de bolas [24].

Entre los años de 1980 hasta el año 2000 los molinos SAG y AG predominaron en las operaciones de alto tonelaje, pero actualmente se han empleado unidades HPGR en etapas de premolienda y molinos de agitación en etapas de molienda terciaria. La implementación de los molinos AG y SAG permitió reducir los

costos operativos con la disminución de los costos de medios de molienda y mantenimiento. Los circuitos que predominaban en la industria son:

- Trituración convencional – molino de bolas
- Molino autógeno de una etapa (SS-A)
- Molino semiautógeno de una etapa (SS-S)
- Molino autógeno – trituradora de guijarros (SS-AC)
- Molino autógeno – molino de bolas (AB)
- Molino semiautógeno – molino de bolas (SAB)

Con el objetivo de aumentar la eficiencia energética de los circuitos SAB se incluye una etapa de trituración de guijarros teniendo un circuito SABC teniendo dos arreglos cuando los guijarros triturados son recirculados al molino SAG se tiene una configuración SABC-A y cuando los guijarros se recirculan al molino de bolas se obtiene un circuito SABC-B.

Existen dos factores que impulsan a un cambio en la tendencia de incluir molinos autógenos o semiautógenos en los circuitos de molienda. Estos factores son el consumo de energía impulsado no sólo por la economía del proyecto sino por el interés de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la huella de carbono. El segundo factor es reducir el área que demandan las instalaciones de estos equipos [36].

La implementación de unidades HPGR para tratar el producto de las trituradoras de guijarros permite obtener un producto con finos y gruesos con microgrietas que reducen los requisitos de energía de la molienda secundaria llegando a circuitos HPGR -SABC. Esta modificación trae consigo un aumento en la capacidad sin aumentar la demanda de medios de molienda.

Un HPGR puede tratar con un tamaño de alimentación inferior a 90 mm y otorgar un producto menor a 4 mm. Por lo tanto, puede implementarse después de una trituración secundaria o terciaria para producir un tamaño de partícula para alimentar un molino de bolas o algún equipo de molienda fina [40].

La molienda exigirá costos operativos bajos y un menor consumo de energía otorgando una eficiencia alta. Un primer indicio es la implementación de unidades HPGR. Esto nos lleva a operaciones que se centren en las características del mineral y no en el uso de circuitos estándares.

Marks et al. (2012) [14] analizaron plantas operativas similares que incorporan un solo molino SAG seguido de dos molinos de bolas. En la Tabla 1 se presentan las plantas analizadas, potencias instaladas y un rendimiento energético.

Tabla 1. Rendimiento energético de circuitos SABC.

Operación	Localización	Circuito	Capacidad tph	Producto de la molienda, micras.	Rendimiento energético kW/t
Peñasquito	México	SABC	4982	130	14.78
Andacolla	Chile	SABC	2491	150	14.43
Kori - Kollo	Bolivia	SABC	698	65	19.15
Mantos de oro	Chile	SABC	550	150	17.23
Copper Mountain	Canadá	SABC	1585	150	24

Datos se obtuvieron de Marks et al., 2012 [14].

Giblett y Hart (2016) [9] señalan diversas operaciones que utilizan diferentes circuitos de molienda siendo los principales SAB, SABC -A, SABC -B y SS-S permitiendo conocer su rendimiento, ver Tabla 2.

Tabla 2. Rendimiento energético de circuitos de molienda utilizando diversas tecnologías.

Operación	Localización	Circuito	Capacidad TPH	Producto de la molienda, micras.	Rendimiento energético kW/t
Ahafo	Ghana	SABC/A	786	106	23.6
Akyem	Ghana	SABC/A	857	75	19
Batu Hijau	Indonesia	SABC/B	5000	260	10.1
Boddington	Australia	HPGR -BM	4428	160	14.7
Mt Charlotte	Australia	SAB	298	150	17.4
Tanami	Australia	SS MB	524	155	17
Sage	USA	SAB	130	55	34.8
Yanacocha	Perú	SS-S	726	164	17.5

Datos se obtuvieron de Giblett y Hart, 2012 [9].

Analizando los datos de cada operación se muestra que SAB tiene un mayor consumo de energía por tonelada con 34.8 kW/t. Los circuitos SABC se mantienen en un rango de 14 - 24 kWh/t (ver, Figura 7). Dentro de un circuito de molienda se tienen variables a considerar con las características del mineral como su índice de trabajo y abrasión, además del tonelaje que se procesa y tamaño del producto para determinar que circuito tiene un mayor rendimiento energético.

Evaluando la capacidad de cada circuito con su consumo de energía (kW/h) el proyecto de Sage con un circuito SAB tiene el menor consumo por el tonelaje que procesan, el proyecto de Peñasquito con una energía específica de 14.78 kWh/t y el proyecto de Batu Hijau con una energía específica 10.1 kWh/t permiten que el proyecto procese grandes tonelajes en proporción al rendimiento energético del circuito. De esta manera se muestra como un circuito SABC permite un aumento en el rendimiento de una operación, ver Figura 8.

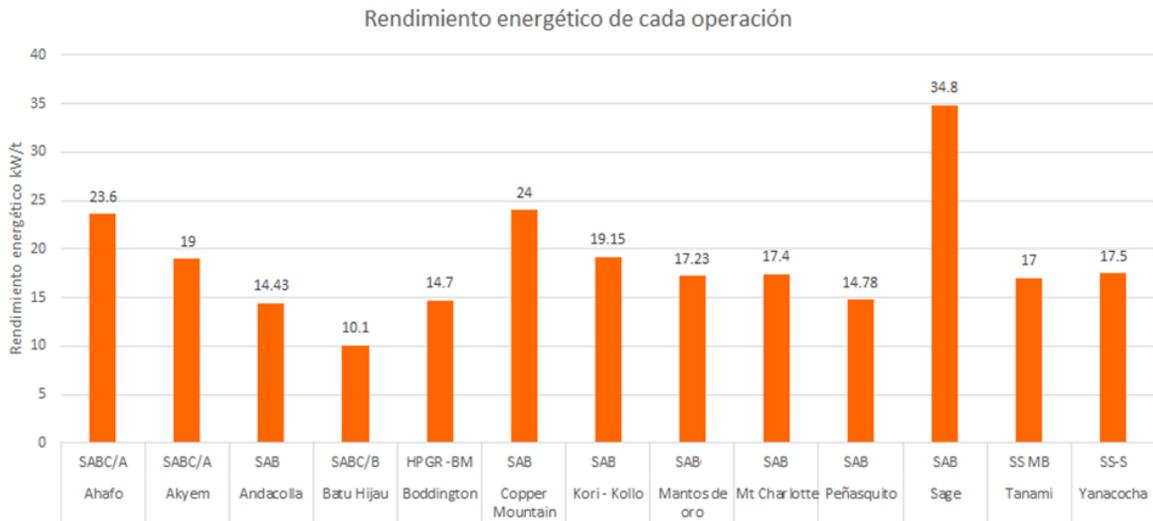


Figura 7.- Comparación del rendimiento energético de cada circuito de molienda. (Los datos se obtuvieron de Marks et al., 2012 [14]; Giblett y Hart, 2012 [9]).

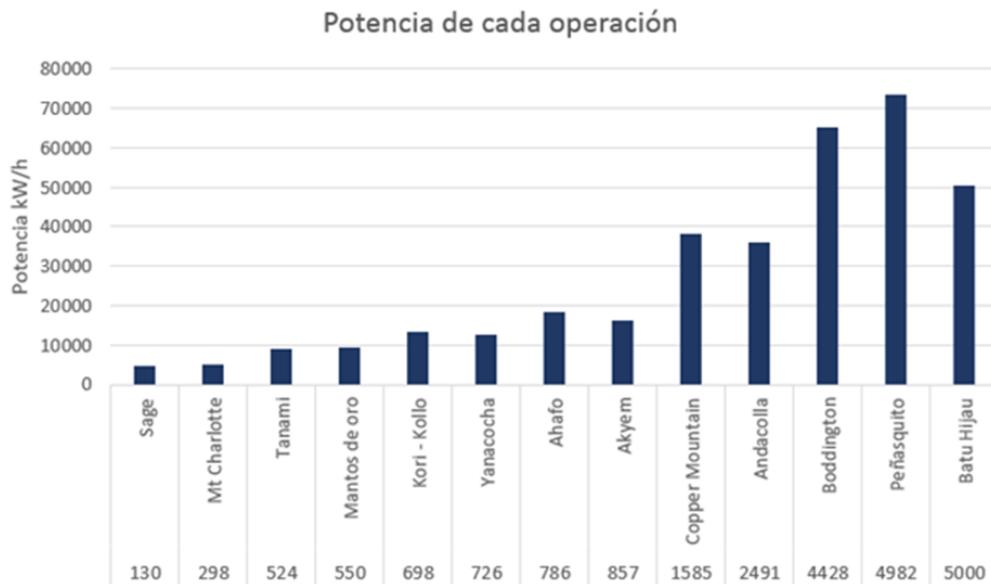


Figura 8.- Comparación del rendimiento energético de cada circuito de molienda y su capacidad. (Los datos se obtuvieron de Marks et al., 2012 [14]; Giblett y Hart, 2012 [9]).

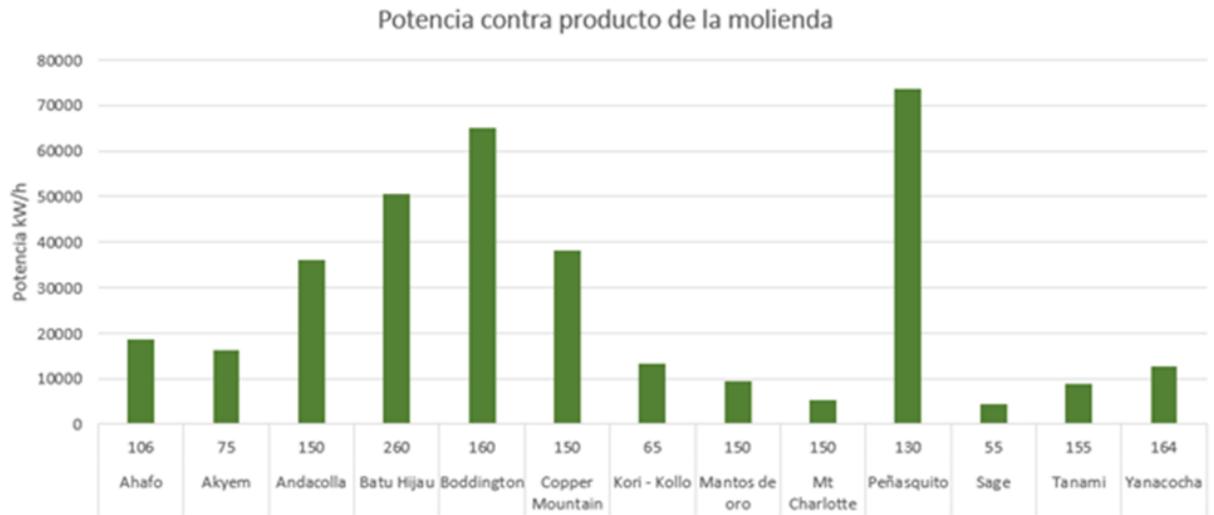


Figura 9.- Comparación del rendimiento energético de cada circuito de molienda y el tamaño de su producto. (Los datos se obtuvieron de Marks et al., 2012 [14]; Giblett y Hart, 2012 [9]).

El segundo parámetro para evaluar el rendimiento de cada operación es el tamaño del producto Sage tiene una descarga de $55 \mu m$ por lo tanto su rendimiento energético alto (34.8 kW/t) se debe a las metas de tamaño del producto requerido en comparación con Peñasquito que su circuito otorga una descarga de $130 \mu m$ con un rendimiento energético de 14.78 kW/t (ver, Figura 9).

Analizando los resultados de esta evaluación el proyecto SABC/B de Batu Hijau le permite procesar 500 tph con un rendimiento energético bajo (10.1 kWh/h), el circuito HPGR - molino de bolas de Boddington le permite procesar un gran tonelaje a un tamaño de molienda grueso a un rendimiento energético bajo (14.7 kW/h) en comparación con los circuitos SABC.

Los proyectos de Tanami con un circuito SAG - molino de bolas se ve limitado a una molienda gruesa con un rendimiento energético alto con una capacidad de 524 tph. De igual manera Yanacocha con un circuito SAG de una etapa está destinado a una molienda gruesa a una baja capacidad.

Cribado y clasificación

En un circuito de molienda en circuito cerrado con una correcta clasificación se reduce el consumo de energía y la posibilidad de una sobre molienda se elimina. Una incorrecta clasificación afecta la capacidad del circuito de molienda y el desempeño de las operaciones aguas abajo.

Generalmente las operaciones de cribado son utilizadas en circuitos que otorgan un producto grueso y para circuitos de molienda se utilizan hidrociclones que son equipos de alto rendimiento. Valine et al. (2012) [37] señala que la transición a los hidrociclones no ofreció mejoras significativas en la eficiencia de los circuitos,

pero redujo los costos de capital y los requisitos de espacio en comparación con los clasificadores de rastrillo y tornillo.

El principio fundamental de la clasificación de un hidrociclón es una función del tamaño de partícula y su gravedad específica, por lo tanto, no se proporciona una separación real solo por el tamaño de partícula. Es importante considerar que la eficiencia de la separación por tamaños en los hidrociclones se encuentra por debajo de un 70%.

El cribado de partículas finas se considera como una opción poco económica por su baja capacidad, altos costos operativos, requerimientos de espacio y la posibilidad de una obstrucción. La necesidad de tener un equipo de cribado húmedo eficiente, bajo consumo de energía, una vida aceptable de la superficie de cribado y bajos requisitos de mantenimiento llevó al desarrollo de cribas de alta frecuencia.

Este enfoque fue discutido por Rogers y Kenneth (1985) [23] que concluyeron después de pruebas piloto "Las cribas de alta frecuencia puede ser una alternativa para sustituir a los hidrociclones en la clasificación de finos". Actualmente la implementación de estos equipos es una realidad, el aumento de costos de energía y el alza en el precio de los metales obliga a tener una clasificación eficiente en los circuitos de molienda.

La implementación de estos equipos trae consigo beneficios metalúrgicos y económicos, que se traduce en mayores niveles de producción y menor consumo de energía por tonelada tratada. Esto se logra mediante la reducción de la carga circulante y mejorar la eficiencia de circuitos de flotación [38].

Un ejemplo es el proyecto de la Compañía Minera Condestable en Perú en donde las cribas de alta frecuencia han permitido que la carga circulante se reduzca de 204% a solo un 96% utilizando estos equipos de cribado, además de obtener una eficiencia alta en la clasificación que llega a un 85% que se traduce en un aumento en el tonelaje procesado en el circuito de molienda [38].

En México se implementó esta tecnología en Minera Saucito que permitió una disminución en el amperaje de la molienda secundaria y disminuyó la carga circulante a valores del 100% permitiendo que se incremente la alimentación de carga fresca. La implementación de estos equipos redujo el tiempo de mantenimiento pasando de 300 horas a cada 500 horas. Además, permitió cambios notables en el consumo de energía llevando a un ahorro del 11.8 % [6].

Concentración de minerales

En general los principales métodos de concentración requieren de un proceso húmedo para el transporte de mineral fino, eliminar la contaminación del aire y evitar afectaciones a los operadores por la generación de polvos. El incentivo económico para la concentración de minerales es la disminución de costos al tratar un menor tonelaje y eliminar materiales nocivos. Actualmente la concentración de minerales enfrenta desafíos como la reducción de las leyes de mineral, grado de liberación fino, reducir el consumo de agua

y mejorar aún más la recuperación y selectividad de los procesos. Como respuesta a estas necesidades se han adoptado nuevas tecnologías en las plantas concentradoras.

Actualmente los costos de flotación han llevado a algunas plantas a reevaluar la concentración gravimétrica, magnética y electrostática. La flotación de minerales es la ruta de beneficio más común para sulfuros, pero la presencia de minerales con propiedades superficiales similares en los depósitos plantea un nuevo desafío para la eliminación de la ganga y el deslamado antes de la flotación obteniendo un preconcentrado.

Los avances tecnológicos han permitido el beneficio de minerales de baja ley obligando a procesos selectivos que requieren una liberación por debajo de $75 \mu m$. Al trabajar con finos se requiere un proceso húmedo para procesar el mineral y mantener cuotas de producción altas.

Chelgani y Neisiani (2022) [3] señalan que las plantas de concentración dependen en gran medida del agua, cuya escasez representa un riesgo significativo para todos en la industria, por lo tanto, la gestión del agua es un tema estratégico para la industria minera. En la Figura 10 se muestra el porcentaje de la demanda de agua en cada operación.

El crecimiento de la población trae consigo la demanda de recursos obligando a la industria minera a replantear el futuro de la extracción de minerales. Se prevé que la población mundial aumente un 18% para el año 2040 que trae consigo la demanda en alimentos, agua, material primas de todo tipo incluyendo minerales y metales, esto trae consigo un aumento del 60% en el consumo mundial del agua [12].

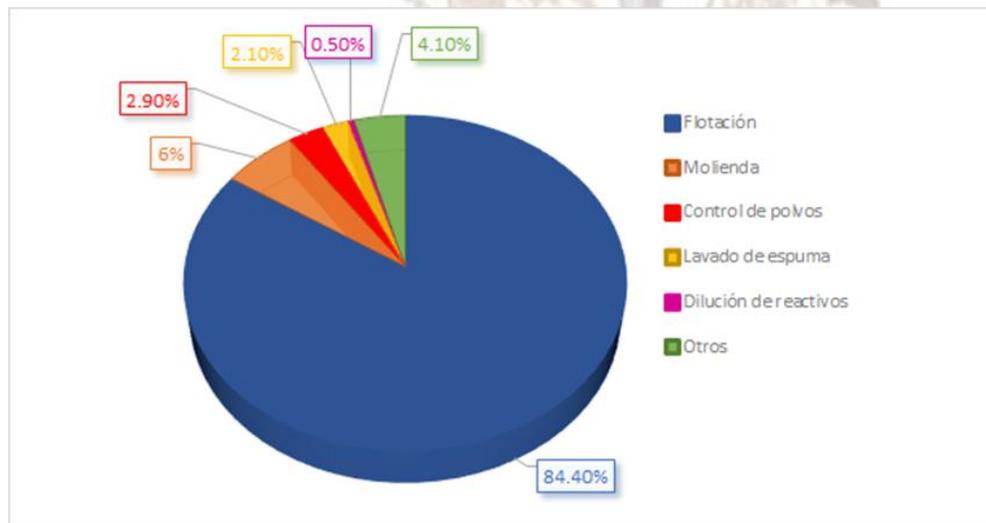


Figura 10. Demanda de agua de diferentes operaciones unitarias en las plantas concentradoras para ilustrar que la flotación de minerales demanda la mayor cantidad (Los datos se obtuvieron de Chelgani y Neisiani (2022) [3]).

De acuerdo con la UN -Water (2021) [35] la minería tiene una demanda del uso del agua de 80 kilómetros cúbicos por año que en comparación con otras industrias como la de alimentos y manufactura es relativamente pequeño (ver, Figura 11). En general el uso global del agua de todas las industrias se estima de alrededor de 4,500 kilómetros cúbicos por año que es alrededor del 10 % de la precipitación neta.

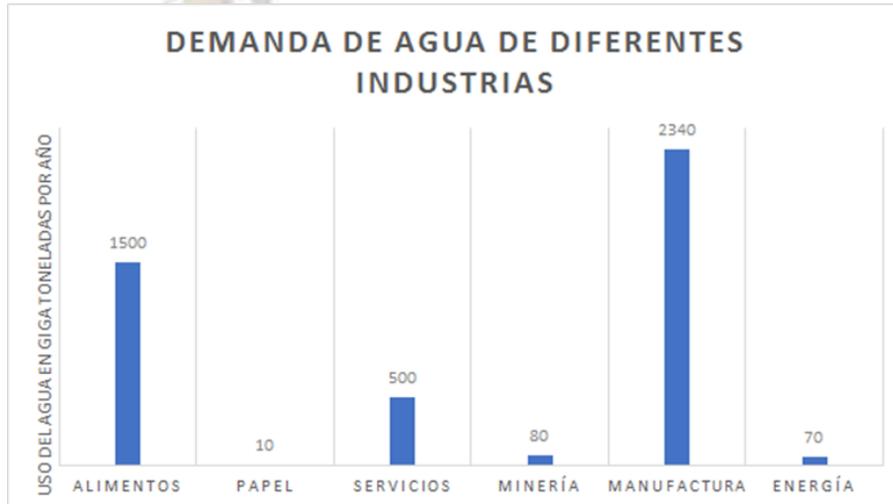


Figura 11.- Demanda de agua de diferentes industrias para ilustrar el uso de agua que tiene el sector minero (Los datos se obtuvieron de UN - Water (2021) [35]).

Para compensar y garantizar un suministro de agua para el beneficio de minerales, las operaciones deben analizar los recursos de agua superficial y subterránea dentro y fuera del sitio para satisfacer su demanda se requiere un balance hídrico regional. Para lograr este balance deben conocerse las condiciones climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas para eliminar incertidumbres asociadas con el suministro de agua [8].

Para compensar y garantizar un suministro de agua para el beneficio, las operaciones deben analizar los recursos de agua superficial y subterránea dentro y fuera del sitio para satisfacer su demanda requiriendo un balance hídrico regional. Para lograr estos balances deben conocerse las condiciones climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas para eliminar incertidumbres asociadas con el suministro de agua.

El consumo de agua puede variar según el tamaño del proyecto, mineral extraído, método de procesamiento y las prácticas generales del proyecto para el reciclaje del agua. El desarrollo de proyectos mineros en regiones áridas, estándares ambientales y la creciente demanda de agua requiere tomar acciones para el tratamiento del agua y su reciclaje.

Meißner (2021) [15] analizó diferentes publicaciones observando el consumo de agua en la minería y refinación de metales resumiendo en su investigación valores de consumo de agua para cada metal donde

se incluye el valor promedio del consumo específico de agua por tonelada procesada. Concluyendo que el consumo de agua es diferente en función del tipo de mineral, leyes y por lo tanto de la ruta de procesamiento. De acuerdo con el estudio el procesamiento de metales preciosos como el platino, oro y paladio tienen los mayores valores del consumo de agua por tonelada procesada (ver, Figura 12 y Figura 13).

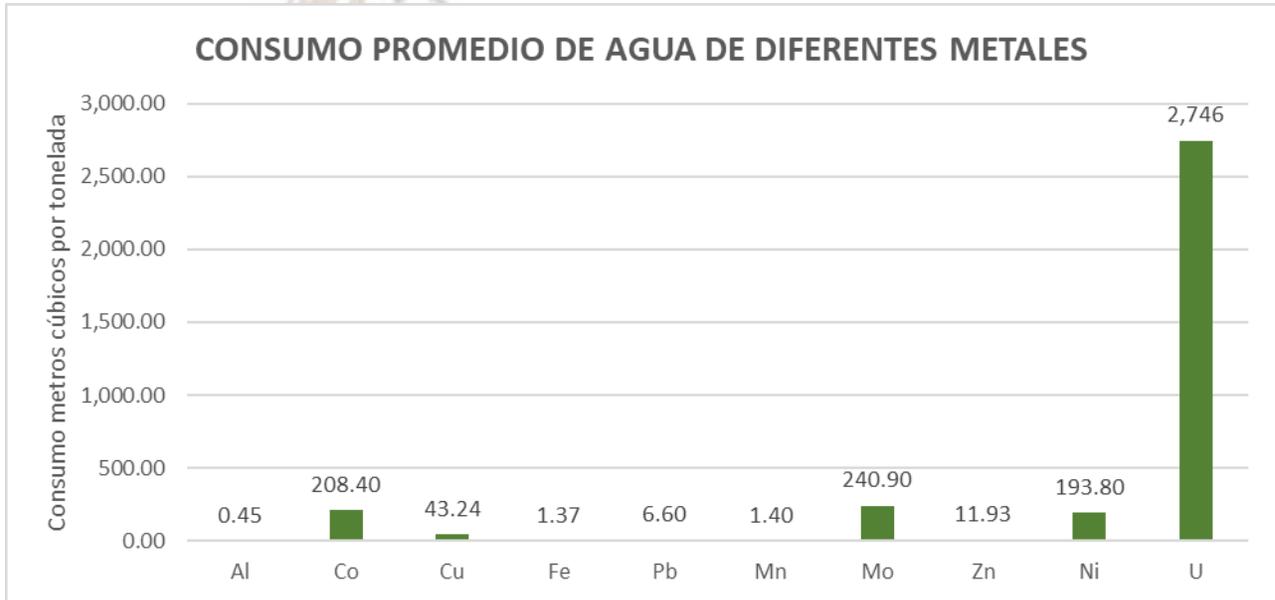


Figura 12.- Consumo promedio de agua de diversos metales (Los datos se obtuvieron de Meißner, 2021 [15]).

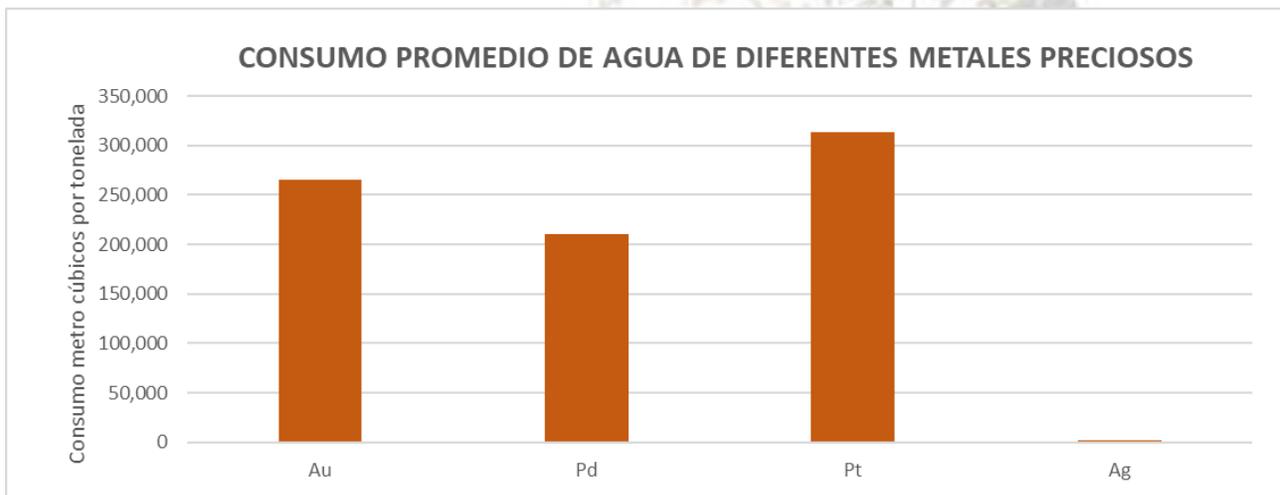


Figura 13.- Consumo promedio de agua de metales preciosos (Los datos se obtuvieron de Meißner, 2021 [15]).

Basado en los volúmenes de producción global el consumo total de agua estimado para todos los metales es de $4,000 \text{ Mm}^3$ en el año 2018 para poner este número en contexto la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Programa de Evaluación del Agua (WWAP) estimaron la extracción global de agua en 400 Gm^3 en 2014 y un consumo mundial de agua para la industria alimenticia de 1400 Gm^3 . Estos números comparativos muestran que a nivel global la demanda de recursos hídricos de la minería es comparativamente bajo. Pero la minería recibe atención por el potencial de impacto al medio ambiente en sus operaciones, en un futuro a medida que aumente la demanda mundial de metales y acciones contra el cambio climático ejercerá una presión sobre los recursos hídricos locales [15].

En el procesamiento de minerales se genera un alto volumen de material de desecho llamados jales que contienen minerales metálicos y no metálicos que forman parte de la ganga. Una tarea de la industria es gestionar sus residuos para evitar la movilización de materiales tóxicos y evitar su liberación mediante su neutralización o remoción de estos residuos. En la gestión de residuos mineros la estabilidad física y química de las instalaciones de almacenamiento de jales es fundamental para lograr los objetivos de gestión del agua [26].

Gabora y Hoekstra (2022) [8] destacan que el uso del agua en las minas no es estático, existen acciones en toda la industria para reducir el consumo de agua, aumentar la conservación del agua (reducir la evaporación dentro TSF) y mejorar el porcentaje de agua reciclada. En los tanques espesadores se recupera el 80% del agua que otorga una pulpa con porcentaje de sólidos del 55% - 65%. En la filtración se produce una torta que tiene un porcentaje de sólidos entre un 80% - 90%.

Siendo una tendencia para los proyectos a futuro que el uso de agua se encuentre al frente de la planificación en el diseño de las minas en las primeras etapas del ciclo de vida del proyecto, y no solo en proyectos ubicados en regiones áridas. En un futuro el suministro de agua en las operaciones mineras será a menudo la principal limitación para la producción y desarrollo de proyectos, por eso es importante que las operaciones que cuenten con este vital líquido cumplan con las regulaciones locales y no impacten negativamente el medio ambiente o afecten el suministro de agua de comunidades cercanas.

En el mundo las compañías mineras están enfocándose en minimizar el impacto de las minas en el paisaje y en las comunidades circundantes, tratando de equilibrar los beneficios económicos con los impactos ambientales y sociales que puede tener una incorrecta planeación. De esta manera el diseño de operaciones metalúrgicas debe de buscar oportunidades de reducir el uso de agua y mitigar posibles impactos en la calidad del agua.

Un ejemplo documentado por Spenceley et al. (2018) [31] donde la Mina de Cobre la Escondida en la región del desierto de Atacama en Chile donde en la búsqueda de una solución sostenible se desarrolló un proyecto para desalinizar agua con el objetivo de contar con este recurso vital para su proyecto y también proteger el medio ambiente. La solución para mitigar el impacto del área que los rodea se vio favorable

desalinizar el agua de mar junto con un sistema de bombeo para transportar el agua desalinizada más de 180 km desde el océano a la mina. Este proyecto traería consigo un aumento en los costos de la operación, pero también otorga una fuente de agua dulce sostenible evitando perjudicar comunidades locales y al ecosistema. La planta EWS fue inaugurada con una capacidad de 2,500 l/s con planes de expandir su capacidad convirtiéndose en una de las plantas más grandes de Latinoamérica.

Beneficio de minerales en un ambiente seco. En el beneficio de minerales los métodos de concentración gravimétrica, magnética y electrostática permiten el procesamiento de minerales en un ambiente seco pero su uso es limitado porque sólo es posible la separación de partículas de grano grueso y otorgan una baja capacidad.

Los concentradores gravimétricos con un ambiente seco se convierten en un método atractivo para disminuir los costos de capital y operativos en comparación con un método húmedo, además de la nula demanda de agua, productos químicos y procesos de recuperación de agua. Su principal aplicación son la limpieza de carbón, oro en depósitos de placer, bauxita, tierras diatomeas, grafito, micas, cianita, menas de manganeso, vermiculita, fluorita y calcita.

La acción del aire en concentradores gravimétricos conlleva velocidades de asentamiento más lentas, por lo tanto, los concentradores tienen una eficiencia menor que los concentradores húmedos. Además, es importante tener un control estricto de la generación de polvos en la planta, esto resulta difícil al procesar grandes tonelajes a un bajo costo.

Los Jigs Neumáticos utilizan un flujo constante de aire para generar pulsaciones sobre el lecho de partículas, estos equipos tienen una capacidad de 20 a 100 toneladas por hora con la capacidad de procesar partículas con tamaño de 50 a 1 mm. Otro equipo utilizado son las mesas de aire que constan de una superficie vibrante porosa con una inclinación y recipientes colectores a lo largo de la mesa; estos equipos permiten separar efectivamente partículas de carbón de 6 mm y hasta de 1 mm con capacidades máximas de 120 tph.

El concentrador Allflux es un concentrador gravimétrico de lecho fluidizado diseñado para la separación de partículas con un rango de tamaño de 4 a 0.15 mm. Su operación consta de un flujo de aire ascendente en una cámara en donde se alimenta el mineral, provocando que las partículas ligeras y finas se eleven mientras que el concentrado permanece en el fondo.

La separación magnética permite la separación de la mena y ganga debido a sus diferencias en la susceptibilidad magnética. Los separadores de tambor son equipos de baja intensidad que pueden operar en un ambiente seco, estos separadores consisten en tambores giratorios que contienen de tres a seis imanes montados en un eje dentro de un tambor que tienen diámetro de 0.9 - 1.2 metros y suelen tener anchos de 3 metros. Los separadores de tambor secos están diseñados para desarrollar un campo

magnético de 1,000 a 7,000 G permitiendo la separación de partículas de un rango de 6 mm hasta 25 mm, su principal aplicación es la separación de minerales ferromagnéticos de grano grueso.

Otro separador magnético seco es el separador magnético de rodillo inducido (IRM) que producen un flujo magnético superior a 20,000 T y se obtienen gradientes altos. Estos equipos son ideales para concentrar o eliminar minerales paramagnéticos como biotita, calcopirita, cromita, columbita, hematita, pirrotita, ilmenita, monazita, siderita y estauroilita.

La separación electrostática por su naturaleza es un proceso que se realiza en un ambiente seco y permite separar partículas de tamaños de 1 mm hasta 40 μm , pero el material debe ser alimentado en una capa delgada de partículas para asegurar su eficiencia. La conductividad de los minerales varía de un mineral a otro, el proceso se aplica solo a un pequeño número de minerales con éxito. Los tres separadores industriales son los rodillos de alta tensión (HTR), separador de placas electrostáticas (EPS) y separador tribostático.

Los minerales conductores que pueden ser separados por los separadores electrostáticos son la casiterita, cromita, feldespatos, galena, oro, hematita, ilmenita, magnetita, pirita, rutilo, esfalerita, estibinita y wolframita. Además de permitir la separación de minerales no conductores como la wollastonita, barita, circón, berilo, fluorita, calcita, corindón, granate, yeso, cianita, monacita, scheelita, turmalina y zircón.

Una limitante de los separadores electrostáticos es que otorgan una capacidad máxima es de 50 toneladas por hora y que la separación es ineficiente en partículas por debajo de 30 μm debido a la interacción entre la carga de las partículas que interactúan de manera independiente. Además, es importante el efecto de la humedad en la superficie porque causa problemas en la conductividad por lo tanto se requiere de operaciones de lavado y secado. Los separadores HTR tiene una óptima separación a temperaturas superiores a 60° C, los separadores EPS a una temperatura superior a 50° C y para los separadores tribostáticos se tiene una correcta separación a temperaturas superiores a 100° C.

Evolución de los circuitos de concentración

La evolución de los circuitos de concentración responde a los retos de la reducción de las leyes del mineral, minerales de grano fino, realizar un proceso selectivo y con una alta recuperación. Estos retos aunados a la complejidad de los yacimientos minerales que se explotan en la actualidad obligan a una identificación precisa de los minerales mediante pruebas metalúrgicas para comprender sus asociaciones y ocurrencia. Algunos minerales que por sus asociaciones o modo de ocurrencia presentan problemas para su beneficio son:

- Partículas de minerales binarias de grano fino
- Menas refractarias
- Elementos de interés en diferentes especies mineralógicas

- Elementos contaminantes presentes
- Presencia de minerales poco comunes
- Remoción de materia carbonosa

Algunas de las acciones para responder a estos retos se abordan a continuación:

Flotación de finos. La flotación de minerales se convirtió en una técnica económica para concentrar minerales valiosos con tamaños de partícula de 10 – 500 μm . A medida que se agotan los yacimientos de alta ley, la industria minera tiene que procesar grandes tonelajes para lograr un proceso económicamente viable. Actualmente se pueden manejar fácilmente grandes tonelajes mediante la flotación gracias al aumento en el tamaño de las celdas de flotación.

La concentración de partículas finas se basa en la diferencia en la hidrofobicidad inducida por reactivos de flotación cuando interactúan con burbujas con tamaño de 0.4 – 1 mm son recolectadas para formar una capa de espuma. Pease et al. (2005) [21] menciona que las partículas finas, responden de manera diferente en la flotación debido a su mayor área de superficie. Las partículas finas tienen un mayor impulso al seguir las líneas de corriente del agua alrededor de las burbujas ascendentes como resultado se tiene una cinética de flotación lenta. Esta característica obliga a comprender las características de la liberación, diseño de circuito de flotación y entender la química de la pulpa de flotación.

Para aumentar la recuperación de partículas se han desarrollado equipo con condiciones hidrodinámicas que aumentan la interacción entre partículas y burbujas, además de disminuir la turbulencia en las celdas de flotación mediante el uso de reactores de flotación.

En búsqueda de una flotación controlada y una interacción eficiente entre partículas - burbujas se han diseñado reactores de flotación que son una respuesta al aumento de las celdas de flotación con la búsqueda de reducir los tiempos de residencia y controlar la espuma. En estos reactores se llevan a cabo en cada cámara un proceso, en una se realiza la interacción entre partículas y burbujas, en una segunda cámara se da estabilidad a las burbujas y en la última cámara se recolecta la espuma estos equipos son la Eriez StackCell® con dos cámaras y los reactores de flotación por etapas (SRF) de Woodgrove® con tres cámaras.

Otra solución propuesta es la floculación selectiva de partículas finas y utilizar microburbujas es decir diámetros menores a 50 μm para aumentar la recuperación de finos, estas ideas continúan en desarrollo para ser llevado a nivel industrial para tener un control en este proceso [7].

Preflotación. La presencia de minerales de ganga hidrofóbicos que resultan fáciles para flotar en minerales no ferrosos crea problemas para su beneficio. El grupo que componen estos componentes de ganga consiste en talco, azufre elemental y diversas formas de materia carbonosa, incluidos el carbono orgánico

y grafito. La presencia de materia carbonosa en minerales auríferos resulta un problema de pre robo esta condición de carbono orgánico se encuentra generalmente como esquisto negro.

El problema de cantidad excesiva de materia orgánica carbonosa en los depósitos minerales se ha resuelto mediante una etapa de preflotación que elimina esta materia orgánica. El desarrollo de celdas neumáticas ha permitido que sean utilizados para aumentar la capacidad de los circuitos de limpia, etapas de preflotación y reducir el arrastre de elementos contaminantes. En las celdas neumáticas se introduce aire a través de difusores que permite crear burbujas finas que le otorga una alta intensidad de interacción con las partículas de mineral creando una cinética de flotación rápida. Actualmente existen una variedad de celdas neumáticas que modifican su disposición de alimentación respecto a los difusores algunos equipos son la Jameson Cell®, Imhoflot G - Cell®, Allflot Cell® y columnas de flotación.

Ante estas circunstancias dentro de los circuitos de concentración será común encontrar etapas de preflotación y en las etapas de limpia para retirar ganga hidrofóbica y reducir el arrastre de elementos contaminantes aumentando la ley de los concentrados. En México en el proyecto de Peñasquito de acuerdo con Lind et al. (2016) [13] la presencia de materia carbonosa en algunos niveles del tajo por parte de la formación Caracol que alberga el cuerpo intrusivo afecto el rendimiento de las operaciones de flotación aumentando el consumo de reactivos disminuyendo la ley de los concentrados, para dar una solución se diseñó un circuito de preflotación del carbono.

Otro ejemplo documentado por Smith et al (2008) [29] es el proyecto de Red Dog en USA donde el mineral de Zn, Pb y Ag contenía altos niveles de azufre elemental y carbono orgánico que disminuye la calidad del concentrado. Mediante pruebas piloto con el equipo Jameson Cell® se redujo las pérdidas de Zn y Pb eliminando el carbono orgánico hasta un 35%. La implementación de este equipo en etapas de preflotación aumento la recuperación de plomo de un 47% a un 59% y para el zinc paso de 54% al 64% además de aumentar las leyes de plomo de 39% a 54% y para el zinc de 47% a 52%.

Flotación Flash. Es un proceso que se incluye en algunas plantas nuevas de procesamiento de minerales como parte del circuito de molienda. El diseño de esta celda responde a la necesidad de recuperar minerales valiosos que se encuentran libres en tamaños gruesos y que regularmente permanecería en la carga circulante del molino formando parte del overflow del hidrociclón. En ocasiones esto no ocurre en minerales de alta densidad que a pesar de tener un tamaño fino por su densidad forman parte del underflow. La flotación flash tiene el objetivo de recuperar estas menas de tamaño grueso fáciles de flotar antes de su molienda excesiva.

Las celdas de flotación flash permiten obtener un concentrado de alta ley en los circuitos de molienda antes de alimentar al circuito de concentración. Se han utilizado para flotar minerales auríferos, sulfuros de cobre y níquel. A diferencia de las celdas convencionales tienen tiempos de residencia cortos y permite recuperar

partículas con un tamaño de 20 - 170 μm . La concentración temprana de estos minerales minimiza la cantidad de energía de molienda y minimiza los costos operativos al disminuir el consumo de reactivos.

Celdas de flotación de alta capacidad. La ampliación de las celdas de flotación ha sido rápida en el año de 1990 las celdas de flotación más grandes tenían un tamaño de celda de 50 metros cúbicos, actualmente se tienen celdas con capacidades hasta de 730 metros cúbicos respondiendo al aumento en las capacidades de procesamiento, ver Figura 14.

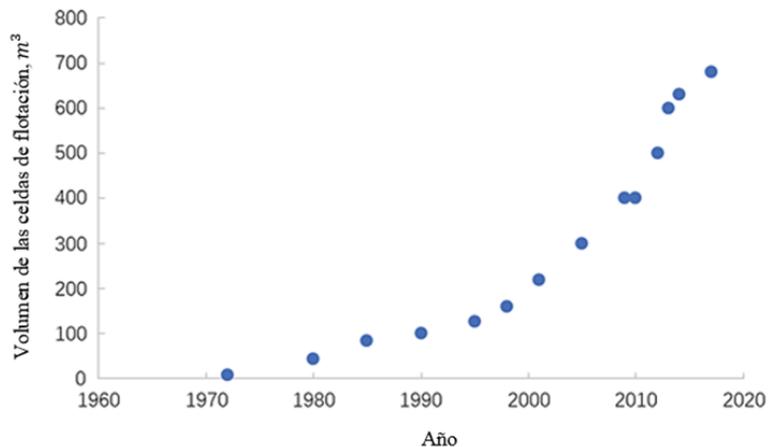


Figura 14.- Cambios en el volumen de las celdas de flotación (Figura tomada de Shen, 2021 [28]).

Grönstrand et al. (2010) [10] realizaron pruebas en celdas de 300 metros cúbicos y celdas con volumen de 160 metros cúbicos donde se obtuvo que la recuperación y ley fueron iguales que dos celdas de 160 metros cúbicos. Pero el consumo de energía fue menor que en las dos celdas de menor tamaño y el mantenimiento disminuyó esto se debe al diseño de los rotores y difusores. En búsqueda de conseguir una adecuada dinámica en las celdas, en el mercado se encuentran diferentes diseños de rotores y difusores como los Door - Oliver®, Wemco® y FloatForce® obligando a la flotación de minerales a prestar atención en la hidrodinámica que ofrecen las diferentes celdas de flotación.

Concentradores gravimétricos centrífugos. El método de concentración gravimétrica ha evolucionado y gran parte se debe a la introducción de concentradores centrífugos con una alta eficiencia y rentables como los concentradores Knelson® y Falcon® que permiten concentrar partículas con un tamaño de 20 μm hasta 3 μm . La principal ventaja de estos equipos es su capacidad para eliminar partículas compuestas de manera eficiente, tienen grandes capacidades y utilizan una menor área en las plantas de concentradoras.

Generalmente los concentradores centrífugos se utilizan para recuperar oro libre como un complemento del proceso de flotación para aumentar la recuperación de metales preciosos. En los procesos de molienda

el oro libre tiende a acumularse en las etapas de molienda por dos razones: (1) tiene una alta densidad en relación con otros minerales que se alimentan al molino, por lo tanto, en la clasificación se descarga en los hidrociclones y (2) las partículas de oro tienen una menor capacidad de ser molido por su maleabilidad.

Por estas razones en la actualidad la recuperación de oro mediante la implementación de concentradores centrífugos complementa a los procesos de cianuración o flotación, aumenta la recuperación general de oro entre un 1 - 10%. Además, en los circuitos de flotación se realiza un pago más alto por el oro doré que en las proformas de liquidación de concentrados. De acuerdo con Adams (2016) [1] en México la operación de minera Tizapa la instalación de un concentrador Knelson® resulto en un aumento en la recuperación de oro mayor al 10%.

Etapas de remolienda con molinos de agitación. Algunas operaciones necesitan de la liberación de partículas finas para aumentar su recuperación. Esto obliga a diseñar circuitos de remolienda para garantizar la liberación de partículas binarias de tamaño fino, y tener una excelente recuperación de finos en procesos de flotación. Los equipos de molienda fina y ultrafina han transformado el diseño de circuitos de remolienda porque crean superficies limpias en un entorno inerte y una distribución de tamaño uniforme.

Pease et al. (2005) [21] señala que las malas experiencias en operaciones que realizaban una molienda fina en circuitos de flotación se debía a la implementación de molinos de bolas que otorgaban una amplia distribución de tamaños y realizaba una degradación de la superficie del mineral al utilizar medios de molienda de acero.

Un ejemplo del correcto diseño de un circuito de remolienda fue documentado por Nielsen et al. (2016) [18] en el proyecto de Kevitsa donde se realiza una flotación bulk Cu - Ni, un análisis mineralógico determinó que la mayor parte de Ni se encuentra como un compuesto de bipartículas de petlandita - calcopirita de grano fino que requieren de una mayor liberación para liberar la calcopirita. Para esta tarea se empleó un HIGmill® que recibía el concentrado de las celdas primarias/agotativas para obtener un producto fino que alimentaba a la etapa de limpia de cobre y las colas se envía al circuito de Ni. Esto permitió un aumento en la recuperación del cobre de un 10% y la ley del concentrado aumento un 3% y el porcentaje de níquel en el concentrado de cobre disminuyó del 0.9% al 0.6% lo que mejoro la selectividad del proceso de flotación.

Procesos de metalurgia extractiva

Los procesos de metalurgia extractiva se han desarrollado para recuperar y producir metales de alta pureza. Actualmente estos procesos enfrentan dos grandes retos, en primer lugar, el cuidado al medio ambiente y segundo disminuir su demanda energética. Las operaciones de extracción modernas cumplen con altas exigencias para cumplir con bajo niveles de emisión de gases de efecto invernadero con un bajo consumo de energía. Implementando materias primas utilizadas para la producción de metales que consisten en minerales, chatarra y residuos que contienen metales para maximizar los ingresos económicos y minimizar el impacto ambiental de la cadena de procesos.

Los esfuerzos para la concentración de minerales tienen el objetivo de reducir el tonelaje a procesar, eliminar impurezas, disminuir el consumo de reactivos, energía y desechos generados durante el proceso. En conjunto se garantiza una extracción eficiente del metal y lograr una pureza alta del producto. Además de la reducción de los costos asociados con el manejo de un menor tonelaje se garantiza que el material a procesar contiene un alto porcentaje del elemento de interés.

Los procesos pirometalúrgicos se han utilizado durante décadas para la recuperación de metales base. Recientemente las regulaciones ambientales más estrictas han hecho que la deposición de desechos de procesos pirometalúrgicos sea difícil y costoso. Los procesos pirometalúrgicos son adecuados para la extracción de metales debido a las altas temperaturas y sus rápidas velocidades de reacción, capacidad de controlar el potencial de oxidación o reducción para lograr la separación deseada de un metal, eliminación de hierro y otras impurezas como una escoria estable y la capacidad para producir un metal de alto valor para su venta.

La pirometalurgia es uno de los procesos extractivos más antiguos que implica procesos a alta temperatura demandando una gran cantidad de energía y la posibilidad de emitir contaminantes al aire si no se cuenta con instalaciones para el control de polvos y gases. Actualmente algunos procesos pirometalúrgicos han dejado de ser empleados debido a la cantidad de residuos que se producen como escorias, polvos, chatarra de aleaciones y otros residuos. Estas características, sumado a la cantidad de energía que demanda estos procesos abrió la oportunidad a otras alternativas para la extracción de algunos metales no ferrosos mediante procesos hidrometalúrgicos.

Los contaminantes del aire se pueden clasificar como gases o partículas en suspensión, en el procesamiento de minerales las emisiones de gas se dan por fuentes de emisión que se clasifican como móviles y estacionarias. Las fuentes de emisión móviles incluyen camiones y otros equipos de excavación. Las fuentes de emisión estacionarias son las operaciones de secado, tostación y fundición donde las emisiones de gases son controladas mediante filtros o mediante un proceso para ser tratadas para su correcta deposición como residuo.

Los procesos de tostación y fundición son considerados como fuentes antropogénicas de emisiones de dióxido de azufre. De acuerdo con Ravi et al. (2016) [22] el procesamiento de metales no ferrosos y ferrosos representan el 16% (93,338 toneladas métricas) y 4% (25,940 toneladas métricas) respectivamente de las fuentes industriales de emisión de dióxido de azufre, ver Figura 15.

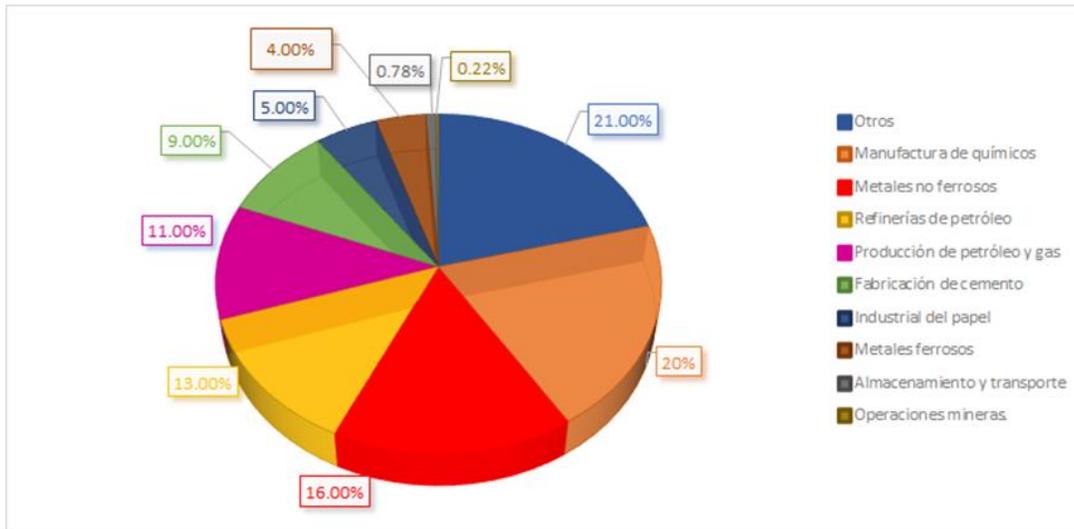


Figura 15.- Emisiones de dióxido de azufre de cada industria (Los datos se obtuvieron de Ravi et al., 2016 [22]).

Cox et al. (2022) [4] señalan que la minería juega un papel importante en la producción de energía renovable que a su vez demanda diversos minerales y metales. Si bien la industria minera contribuye a las emisiones globales de dióxido de carbono, la industria también es fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los metales para lograr esta transición energética son Cu, Ni, Pb, Zn, Ag, Au, Pt, Pl, Al y Fe. El sector de minería y metales contribuye a aproximadamente el 8% de la huella de carbono mundial, sin embargo, en comparación con las emisiones globales de carbono, su huella de emisiones es pequeña, ver Figura 16.

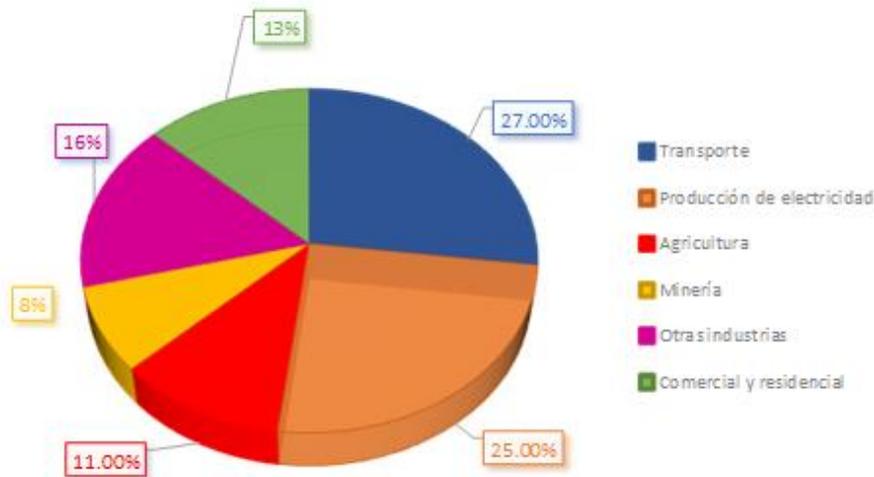


Figura 16.- Emisiones de dióxido de carbono de cada industria (Los datos se obtuvieron de Cox et al., 2022) [4]).

La hidrometalurgia moderna se remonta a finales del siglo XIX este proceso se ocupa del procesamiento de metales por medio de reacciones químicas que involucran soluciones acuosas y orgánicas. El desarrollo de sistemas de lixiviación, el desarrollo en resinas de intercambio iónico y extractantes han revolucionado los procesos de extracción de metales.

La regeneración de agentes lixiviantes, resinas de intercambio iónico, solventes y carbón activado permiten disminuir los desechos generados por el proceso. En general la hidrometalurgia ha permitido el procesamiento de minerales complejos, procesar minerales de baja ley, reducir emisiones de dióxido de azufre y un control en el manejo de residuos de la lixiviación mediante un sistema de tuberías en comparación con las escorias y matas fundidas. Algunos de los avances que resultaron innovadores para la hidrometalurgia que lo convierte en un proceso que se adapta son:

- Lixiviación directa de sulfuros.
- Lixiviación con cloro e hipoclorito
- Lixiviación de oro con tiosulfatos, tiourea y haluros.
- Biooxidación de sulfuros de cobre
- Biooxidación de minerales auríferos

El desarrollo de estos procesos permite ver la evolución que ha tenido la metalurgia extractiva en búsqueda de una industria sostenible y con responsabilidad ambiental. Dados los costos que presenta la minería y que son pocos los depósitos con una alta ley y de gran tonelaje se debe tener una mentalidad de maximizar la recuperación de metales con procesos eficientes.

Sengupta (2021) [26] señala si la tasa de extracción de un elemento excede su tasa de reciclaje por un factor de 10 o más, el metal debe ser considerado como un contaminante potencial. Por esta razón además de la metalurgia extractiva se requiere de una cultura de reciclaje porque metales como Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb, Sb, Sn y Zn presentes en basura industrial y electrónica pueden considerar como material con un potencial peligroso para el medio ambiente. Los aspectos ambientales deben ser parte integral de la industria de minerales y metales.

CONCLUSIONES

Es importante centralizarnos en que la minería satisface los metales y minerales que demanda todo el mundo todos los días. Siendo el sector minero una de las industrias más juzgadas, también es el primero en demostrar su sostenibilidad y permitir su evaluación.

La minería además de formar parte integral de nuestra vida cotidiana es la base en la producción de energías renovables la cual demanda diversos minerales y metales para lograr esta transformación. Hoy la minería se encuentra entre dos grandes retos; en primer lugar, cumplir con la demanda de metales y minerales partiendo de depósitos de baja ley y minerales complejos; en segundo lugar, responder con una gestión responsable y sostenible. Esto obliga a abordar con mayor atención el diseño de operaciones metalúrgicas para cumplir con el correcto aprovechamiento de los recursos minerales y buscar oportunidades para reducir el uso de agua, energía eléctrica y mitigar posibles impactos ambientales. También resulta importante prestar atención en las nuevas tecnologías como las unidades HPGR, molinos de molienda fina y ultrafina, además de prestar atención a los procesos que rodea el beneficio de partículas finas.

Como bien se señala, si bien la industria minera contribuye a las emisiones globales de dióxido de carbono, también es la piedra angular para reducir estas emisiones de gases de efecto invernadero en los demás sectores. Por lo tanto, las metas del sector es dirigirse en desarrollar proyectos que satisfacen las necesidades de mundo actual sin poner en peligro el desarrollo de las generaciones futuras. La industria minera no se encuentra sola ante estos retos los avances tecnológicos y la investigación son sus mejores aliados para hacer frente a los retos actuales.

REFERENCIAS

1. Adams M. (2016). Gold ore processing. Project Development and Operations. Elsevier.
2. Brenda Mines (1989). Rod and ball mill circuits. Operation and Maintenance in Mineral Processing Plants.
3. Chelgani y Neisiani (2022). Dry Mineral Processing. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93750-8>
4. Cox B., Innis S., Kunz N. y Steen J. (2022). The Mining Industry as a net beneficiary of a global tax on carbon emissions. Communications Earth & Environment. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00346-4>.
5. Drozdiak J., Klein B., Nadolski S. y Bander A. (2012). A pilot – scales examination of a high pressure grinding roll/ stirred mill comminution circuit. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
6. Estrada H. y Gómez S. (2015). Utilización de Cribas Derrick en Sustitución de Hidrociclones como medio de clasificación. Memoria de Convención No. 31.

7. Farrokhpay S., Filippoca I., Filippov L., Picarra A., Nickolaj R. y Fornasiero D. (2020). Flotation of fine particles in the presence of combined microbubbles and conventional bubbles. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106439>.
8. Gabora M. y Hoekstra D. (2022). Influence of Water Management. En Finke K. (Ed). Tailings Management Handbook A Life – Cycle Approach. SME.
9. Giblett A. y Hart S. (2016). Grinding Circuit Practice at Newmont. 13 th AUSIMM Mill Operators´conference.
10. Grönstrand S., Morales P., Coddou F. y Elgueta H. (2012). Operational Characteristics of the TankCell 300 at Codelco´s Chiquicamata Concentrator. 42nd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors.
11. Jankovic A. (2003). Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. Miner Engineering 16. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00007-4)
12. Kalin – Seidenfaden M. y Wheeler W. (2022). Mine Wastes and Water Ecological Engineering and Metals Extraction. Springer.
13. Lind P., Tomlinson M. y Awmack C. (2018) Organic Carbon mitigation at Peñasquito. 50th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference.
14. Marks A., Sams C. y Major K. (2012). Grinding Circuit Design for Similco Mines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
15. Meißner S. (2021). The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities – A GIS – Based Water Impact Assessment. <https://doi.org/10.3390/resources10120120>.
16. Metso:Outotec (2021). Basics in Minerals Processing (12a ed.). Metso Outotec Corporation. <https://www.mogroup.com/insights/e-books/basics-in-minerals-processing-handbook/>
17. Morley C. y Staples P. (2010). SAG or HPGR? – The Current Dilemma. 42nd Annual Meeting of Canadian Mineal Processors.
18. Nielsen B., Lento H. y Musuku B. (2016). Design, Installation, Commissioning and Operation of Fine Grinding Technology at the Kevitsa Mine. 13 th AUSIMM mill operators´ conference.
19. Nordberg (1993). Reference Manual (4a ed.). Nordberf Group Company.
20. Palaniandy S., Powell M., Hilden M., Kermanshabi K, Allen J. y Mwansa S. VertiMill Development of circuits survey and perfomance evaluation protocols. Metplant.

21. Pease J., Curry D. y Young M. (2005). Designing Flotation Circuits for High Fines Recovery. Centenary of Flotation Symposium.
22. Ravi K., Zengdi C. y Jeremy K. (2016). Environmental Impact of Mining and Mineral Processing. Elsevier.
23. Rogers R. y Kenneth B. (1985). High Frequency screens versus hydrocyclones for closed circuit fine grinding. Society of Mining Engineers of AIME 85 – 142.
24. Rosario P., Grundy M. y Hall R. (2010) Some Approaches to High – Tonnage Comminutions. SME Annual Meeting.
25. Saramak D. y Gawenda T. (2012). The application of hybrid comminution circuits with high – pressure grinding rolls in mineral processing. XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC) 2012 Proceedings.
26. Sengupta M. (2021). Environmental Impacts of Mining. CRC Press.
27. Sepro Minerals (2020). Sepro Grizzly -King Heavy Duty Jaw Crusher.
28. Shen Z. (2021). Principles and Technologies of Flotation Machines. Springer Tracts in Mechanical Engineering. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-0332-7>
29. Smith J., Lin D., Brigitte L. y Anderson G. (2008). Removal of organical carbon with a Jameson Cell at Red Dog Mine. Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
30. Soofastei A. (2022). Advanced Analytics in Mining Engineering. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91589-6>
31. Spenceley J., Hays B., Dominguez R. y Tafra A. (2018). Delivering Sustainable Water Supply in the Atacama Desert. SME
32. STRIM “Strategic Research and Innovation Agenda for the Swedish Mining and Metal Producing Industry” (2016). Agenda for the Mining and Metal Producing.
33. Szczelina P., Drescher F. y Silberman F. (2017). Kompakt, robust und leistungsstark: Neuer Exzenterwalzenbrecher ERC25-25 revolutioniert die Primärzerkleinerung unter Tage. Mineral Processing Europe.
34. Thyssenkrupp (2020). Trituradora de rodillo excéntrico ERC. Mining Technologies.
35. United Nations, UN Water (2021). Water usage facts and Water scarcity. <https://www.unwater.org/>
36. Valery W. y Jankovic A. (2002). The future of comminution. Proceeding of 34 th on Mining and Metallurgy Conference.

37. Valine S., Wheeler J. y Albuquerque (2012) Applications of Fine Screen in Grinding Circuits. 11 th Mill Operators Conference 2012.
38. Wheeler J. y Packer B. (2011). Increasing Capacity and Efficiency of Grinding Circuits with High Frequency Screens. Metallurgical Plant Design and Operations Strategies.
39. Wills B. y Finch J. (2016). Mineral Processing Technology (8a ed.). Elsevier B.V.
40. Yahyaei M., Hilden M., Shi F. y Liu L. (2016). Comminution. En Merkus H. y Meesters G. (Eds.). Production Handling and Characterization of Particulate Materials. Springer.

