

REVISTA O UNIVERSO OBSERVÁVEL

OPTIMIZANDO LA CONMINUCIÓN EN LA EXTRACCIÓN DE ORO: Maximizando El Rendimiento

OPTIMIZING COMMINUTION IN GOLD EXTRACTION: MAXIMIZING YIELD

Cristina Vanessa Fernández Vélez¹
Washington Omar Espinoza Ramón²
Gabriela Viviana Armijos Cabrera³
Wilson León Patricio Cueva⁴

Revista o Universo Observável

DOI: 10.69720/29660599.2025.000157

ISSN: 2966-0599

¹Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: cvfernandez@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1256-405X>

²Ingeniera Químico, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: wespinoza@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4151-2347>

³Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: gvarmijos@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8391-3048>

⁴Ingeniera Químico, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: wleon@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-430X>



OPTIMIZANDO LA CONMINUCIÓN EN LA EXTRACCIÓN DE ORO: Maximizando El Rendimiento

Cristina Vanessa Fernández Vélez, Washington Omar Espinoza
Ramón, Gabriela Viviana Armijos Cabrera e
Wilson León Patricio Cueva



PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
2966-0599

www.ouniversoobservavel.com.br

Editora e Revista
O Universo Observável
CNPJ: 57.199.688/0001-06
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

RESUMEN

La conminución, que abarca tanto el triturado como la molienda, es un proceso fundamental en la minería de oro, esencial para liberar el oro de su matriz mineral. Este estudio profundiza en el papel crítico de la conminución en la extracción de oro, explorando sus impactos económicos y ambientales. La investigación tiene como objetivo identificar y analizar estrategias innovadoras para optimizar los procesos de conminución, mejorando tanto la eficiencia económica como la sostenibilidad ambiental. Una revisión exhaustiva de la literatura existente destaca la importancia de factores como el tamaño de partícula, las propiedades minerales y el comportamiento del material en la eficiencia de la conminución. Se examinan tecnologías avanzadas como la automatización, el monitoreo en tiempo real y el mantenimiento predictivo por su potencial para mejorar la eficiencia del proceso y reducir el consumo de energía. El estudio también aborda los impactos socioeconómicos de la minería de oro, enfatizando la necesidad de un desarrollo equilibrado que beneficie a las comunidades locales. Esta investigación subraya la importancia de optimizar los circuitos de conminución a través de la selección estratégica de equipos, ajustes de parámetros operativos e integración de tecnologías de vanguardia para lograr mayores tasas de recuperación de oro, menores costos operativos y una menor huella ambiental.

Palabras claves: Conminución, Minería de oro, Trituración, Molienda, Optimización, Sustentabilidad, Eficiencia económica, Impacto ambiental.

ABSTRACT

Comminution, which encompasses both crushing and grinding, is a fundamental process in gold mining, essential for liberating gold from its mineral matrix. This study delves into the critical role of comminution in gold extraction, exploring its economic and environmental impacts. The research aims to identify and analyze innovative strategies to optimize comminution processes, improving both economic efficiency and environmental sustainability. A comprehensive review of existing literature highlights the importance of factors such as particle size, mineral properties, and material behavior in comminution efficiency. Advanced technologies such as automation, real-time monitoring, and predictive maintenance are examined for their potential to improve process efficiency and reduce energy consumption. The study also addresses the socioeconomic impacts of gold mining, emphasizing the need for balanced development that benefits local communities. This research underscores the importance of optimizing comminution circuits through strategic equipment selection, operating parameter adjustments, and the integration of cutting-edge technologies to achieve higher gold recovery rates, lower operating costs, and a smaller environmental footprint.

Keywords: Comminution, Gold Mining, Crushing, Grinding, Optimization, Sustainability, Economic Efficiency, Environmental Impact.

INTRODUCCIÓN

La conminución, que abarca tanto la trituración como la molienda del mineral, se erige como un componente imprescindible dentro del entramado de la industria minera dedicada al oro. Más allá de la simple reducción del tamaño de las rocas, la conminución constituye un verdadero arte, una disciplina que persigue liberar el oro encerrado en la matriz mineral. Su eficiencia trasciende los límites de la rentabilidad económica de una operación minera para también influir de manera significativa en su impacto ambiental. En este exhaustivo análisis, nos adentraremos en la esencia fundamental de la conminución en la

extracción de oro, desentrañaremos los desafíos que enfrentan las operaciones mineras en este ámbito y exploraremos las estrategias innovadoras diseñadas para optimizar este proceso crucial, a fin de garantizar tanto la viabilidad económica como la sostenibilidad ambiental de la industria aurífera (Han et al., 2021).

La conminución sirve como el primer paso crucial en el complejo proceso de extracción de oro. Cuando el mineral de oro se encuentra incrustado en la roca madre, es la conminución la que desempeña el papel vital de liberarlo. Una vez que el mineral se reduce a un tamaño adecuado, se vuelve más accesible para

los procesos de separación y concentración posteriores. Por lo tanto, un proceso de conminución adecuado es esencial para asegurar que la mayor cantidad posible de oro sea extraída de la mena. Si la conminución no se realiza correctamente, el oro seguirá atrapado, reduciendo drásticamente la eficiencia de la extracción y aumentando los costos operativos. Por el contrario, una conminución óptima asegura una mayor recuperación de oro, lo que no solo mejora la rentabilidad de la operación, sino que también la hace más sostenible a largo plazo al reducir la cantidad de minera no aprovechado y los recursos consumidos (Li et al., 2023).

OBJETIVOS

Examinar críticamente la literatura existente para identificar y resaltar estrategias innovadoras que mejoren el proceso de conminución en la extracción de oro, para promover tanto la eficiencia económica como la sostenibilidad de las operaciones mineras auríferas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las estrategias innovadoras más relevantes y sus aplicaciones en la industria minera aurífera.
- Analizar críticamente los estudios y casos de éxito que describen el impacto de las estrategias innovadoras en la eficiencia económica de las operaciones mineras de oro
- Proponer recomendaciones específicas para aplicar las estrategias innovadoras identificadas, considerando las condiciones y contextos específicos de las operaciones mineras auríferas.

MARCO TEÓRICO

Conminución es el proceso fundamental en la industria minera mediante el cual se reduce el tamaño de las rocas y minerales a través de fuerzas mecánicas, como la compresión, el impacto y la fricción. Este proceso se divide principalmente en dos etapas: la trituración, que reduce el tamaño inicial del material, y la molienda, que pulveriza el material triturado en partículas más finas (Starkey et al., 2022). En el contexto de la

extracción de oro, la conminución es esencial para liberar el oro contenido en la matriz mineral, permitiendo su posterior separación y concentración. La eficiencia de la conminución es crucial para maximizar la recuperación del oro y reducir los costos operativos, lo que la convierte en un aspecto fundamental de la rentabilidad y sostenibilidad de las operaciones mineras auríferas (Carrasco et al., 2017).

La conminución en la extracción de oro es un proceso crucial que abarca las etapas de trituración y molienda del mineral para liberar el oro contenido en la matriz mineral. Esta fase es de suma importancia en la industria minera aurífera, ya que la eficiencia de la conminución influye directamente en la recuperación del oro y los costos operativos de las operaciones mineras (Götze et al., 2021).

En términos básicos, la conminución implica la reducción del tamaño de las partículas del mineral mediante fuerzas mecánicas, como compresión, impacto y fricción. La trituración, primera etapa del proceso, reduce inicialmente el tamaño del mineral, mientras que la molienda pulveriza el material triturado en partículas más finas (Chimwani, 2024).

El objetivo principal de la conminución es liberar el oro y otros minerales valiosos de la roca madre, haciéndolos accesibles para los procesos posteriores de separación y concentración. Por lo tanto, la eficiencia de este proceso es fundamental para maximizar la extracción de oro y minimizar las pérdidas de mineral valioso (Heiskari et al., 2019).

Los principios de trituración y molienda en la conminución implican comprender tanto los aspectos físicos como mecánicos que intervienen en estas etapas cruciales del proceso minero. La trituración y la molienda se llevan a cabo utilizando una variedad de equipos diseñados para reducir el tamaño del mineral, como trituradoras de mandíbula, molinos de bolas y molinos SAG. Además de la selección adecuada de equipos, los parámetros de operación, como la velocidad de alimentación y la carga circulante, y las variables del material, como la dureza y la humedad, tienen un impacto significativo en la

eficiencia del proceso. Entender estos principios y considerar cuidadosamente estos factores es crucial para optimizar la conminución y mejorar la recuperación de minerales valiosos como el oro (James, 2022).

Durante la trituración, el mineral aurífero se somete a fuerzas mecánicas que lo rompen en fragmentos más pequeños, lo que aumenta la superficie de exposición del oro y facilita su liberación. Este aumento en la superficie de exposición del oro mejora la eficiencia de los procesos posteriores de extracción, lo que conduce a una mayor recuperación del metal precioso (Diaz Alvarez & Lopez Jara, 2024).

El mineral triturado se introduce en molinos rotatorios, como molinos de bolas, molinos SAG (Semi-Autógenos) o molinos de rodillos, donde es sometido a impacto y fricción con cuerpos de molienda (bolas o rodillos), así como a la acción de las fuerzas de cizallamiento generadas por la rotación del molino. Este proceso reduce el mineral a un tamaño más fino, lo que aumenta significativamente la superficie de exposición del oro y mejora la eficiencia de los procesos de separación y concentración posteriores (Andò, 2020).

Factores que influyen en la eficiencia de la conminución estos factores determinan la efectividad de la reducción del tamaño del mineral y, por ende, la liberación del oro contenido en la matriz mineral. Al comprender y controlar estos factores, se puede mejorar la eficiencia operativa y económica de las operaciones mineras auríferas (Torres et al., 2016).

El tamaño de partícula del mineral alimentado al proceso de conminución afecta directamente la eficiencia de la trituración y la molienda. Partículas más finas pueden requerir menos energía para reducir su tamaño aún más.

Propiedades físicas del mineral, la dureza, la densidad y la abrasividad del mineral influyen en la resistencia que ofrece al proceso de conminución. Minerales más duros y abrasivos pueden requerir equipos y condiciones de operación más robustas.

Comportamiento del material, factores como la fragilidad y la deformabilidad del mineral afectan cómo se comporta durante la trituración y la molienda. Comprender estas

características es crucial para seleccionar los equipos y ajustar los parámetros de operación de manera óptima.

Tanto la humedad como la temperatura del mineral pueden influir en la eficiencia de la conminución. La humedad puede afectar la capacidad de flujo del material y la adherencia entre partículas, mientras que la temperatura puede afectar la viscosidad y la fragilidad del mineral.

Tecnologías y estrategias de optimización de la conminución desempeñan un papel crucial en la mejora de la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones mineras auríferas. Estas innovaciones abarcan diversas áreas, desde la automatización hasta el mantenimiento preventivo, y se centran en maximizar la liberación del oro y minimizar el consumo de energía.

La automatización y el control avanzado de procesos permiten la optimización en tiempo real de los equipos de conminución, ajustando automáticamente los parámetros operativos para mantener la eficiencia en niveles óptimos (Fedotov et al., 2021). El uso de modelos de simulación y optimización proporciona una herramienta poderosa para predecir el rendimiento del proceso de conminución bajo diferentes condiciones y optimizar los parámetros de operación para maximizar la recuperación de oro y minimizar los costos. Las tecnologías de monitoreo en tiempo real y análisis de datos permiten una supervisión continua del rendimiento de los equipos de conminución, identificando posibles problemas o áreas de mejora y permitiendo intervenciones proactivas para optimizar el proceso (Tang et al., 2020). La implementación de sistemas de mantenimiento predictivo y preventivo ayuda a minimizar el tiempo de inactividad no planificado al prevenir averías y optimizar la vida útil de los equipos de conminución, garantizando así una operación continua y eficiente.

El impacto económico se refiere a las consecuencias que tiene una acción, evento o decisión sobre la economía en general, incluyendo aspectos como la producción, el empleo, los ingresos, los precios, la inversión y el comercio. En el contexto de una actividad específica, como la industria minera aurífera, el

impacto económico se refiere a cómo las operaciones mineras afectan a la economía local, regional o nacional, así como a los actores involucrados, como los trabajadores, las empresas proveedoras, las comunidades cercanas y el gobierno (Castillo Mamani et al., 2022).

El impacto económico puede medirse a través de diversos indicadores, como el valor agregado bruto (VAB), el producto interno bruto (PIB), el empleo generado, los impuestos pagados, las inversiones realizadas y los ingresos generados para los diferentes actores económicos. Un impacto económico positivo se refleja en un aumento de la actividad económica, la creación de empleo, el crecimiento de los ingresos y la inversión, mientras que un impacto económico negativo puede manifestarse en la pérdida de empleos, la disminución de los ingresos, la reducción de la actividad económica y la depreciación de los activos económicos (Götze et al., 2021).

En el caso específico de la industria minera aurífera, el impacto económico positivo puede derivarse de la generación de empleo, la inversión en infraestructura y desarrollo local, los ingresos fiscales generados por la actividad minera y la contribución al PIB nacional. Sin embargo, también puede haber impactos negativos, como la degradación ambiental, la dependencia económica excesiva de la actividad minera, la concentración de la riqueza en manos de unos pocos y los conflictos sociales relacionados con la explotación de los recursos naturales (Chimwani, 2024).

Reducción de costos operativos y aumento de la rentabilidad, la optimización de la conminución puede conducir a una disminución significativa de los costos operativos al mejorar la eficiencia del proceso y reducir la necesidad de recursos y energía. Esto, a su vez, aumenta la rentabilidad de las operaciones mineras auríferas, lo que es fundamental para su viabilidad económica a largo plazo.

Mejora en la recuperación de oro y reducción de pérdidas de mineral, al aumentar la eficiencia de la conminución, se mejora la liberación del oro contenido en la matriz mineral, lo que conduce a una mayor recuperación del metal precioso. Esto resulta en

una reducción de las pérdidas de mineral valioso y un aumento en la producción de oro, lo que contribuye directamente a la rentabilidad de la operación.

Minimización del consumo de energía y recursos naturales, la optimización de la conminución puede reducir el consumo de energía y recursos naturales al mejorar la eficiencia del proceso y minimizar la cantidad de material que necesita ser tratado. Esto no solo reduce los costos operativos asociados con la energía y los recursos, sino que también disminuye el impacto ambiental de la operación minera.

El impacto social de la minería aurífera es un tema de gran relevancia debido a las implicaciones que tiene en las comunidades locales y regionales donde se desarrolla la actividad minera. Este impacto abarca una amplia gama de aspectos que van desde el empleo y la economía local hasta la calidad de vida de las personas y la relación entre la industria minera y las comunidades indígenas (Starkey et al., 2022).

Generación de empleo, la minería aurífera puede generar oportunidades de empleo significativas en las áreas donde se lleva a cabo la actividad minera. Sin embargo, la naturaleza temporal y estacional de muchos trabajos mineros puede llevar a una alta rotación laboral y a la dependencia económica excesiva de la industria minera.

Desarrollo socioeconómico, la actividad minera aurífera puede contribuir al desarrollo socioeconómico de las regiones donde se encuentra, a través de inversiones en infraestructura, servicios básicos y programas de desarrollo comunitario. Sin embargo, esta contribución puede ser desigual y no siempre beneficiar a todas las comunidades de manera equitativa.

Conflictos socioambientales, la minería aurífera puede generar conflictos socioambientales con las comunidades locales debido a preocupaciones sobre la contaminación del agua y el suelo, la degradación del medio ambiente, la pérdida de tierras y recursos naturales, y la violación de los derechos humanos. Estos conflictos pueden tener consecuencias graves tanto para las

comunidades afectadas como para las empresas mineras.

La conminución en la industria minera es un aspecto crítico que influye directamente en la eficiencia operativa, la rentabilidad y la sostenibilidad de las operaciones mineras (Saldana et al., 2024).

La optimización puede abordar diferentes aspectos, como la selección adecuada de equipos de conminución, la configuración óptima de circuitos de trituración y molienda, la optimización de los parámetros de operación (tales como la velocidad de alimentación, el tamaño de la alimentación y el tiempo de residencia), y la gestión de la generación de finos. Además, la optimización también puede involucrar la implementación de tecnologías avanzadas, el uso de modelos de simulación y optimización, y la aplicación de prácticas de mantenimiento predictivo y preventivo (Götze et al., 2021).

Eficiencia en la liberación de minerales valiosos, la conminución tiene como objetivo principal liberar los minerales valiosos de la roca de desecho. Una conminución eficiente asegura que la mayor cantidad posible de minerales valiosos se libere y esté disponible para los procesos de recuperación posteriores. Esto se logra a través de la selección adecuada de equipos de conminución, así como de la optimización de los parámetros de operación, como el tamaño de la alimentación y el tiempo de residencia.

Minimización del consumo de energía, la conminución es un proceso intensivo en energía, y el consumo de energía puede representar una parte significativa de los costos operativos de una operación minera. Por lo tanto, la optimización de la conminución busca minimizar el consumo de energía mediante la selección de equipos eficientes y la implementación de prácticas.

Control de la generación de finos, durante la conminución, es importante controlar la generación de finos (partículas muy pequeñas), ya que pueden tener un impacto negativo en la eficiencia del proceso y en la recuperación de minerales valiosos. La generación excesiva de finos puede aumentar el consumo de energía y causar problemas de

manejo y procesamiento del material (Chimwani, 2024).

Optimización de circuitos de conminución, muchas operaciones mineras tienen circuitos de conminución complejos que incluyen múltiples etapas de trituración y molienda. La optimización de estos circuitos implica la selección y disposición adecuada de equipos, así como la optimización de los flujos de material y la distribución de tamaños de partículas para maximizar la eficiencia global del proceso (Heiskari et al., 2019).

METODOLOGÍA

Para esta investigación se realizó estudio recopilatorio de información científica sobre los diferentes avances en el proceso de conminución en la industria minera aurífera. Esto nos permitirá proponer opciones que la industria metalúrgica pueda adquirir para optimizar su proceso de liberación del mineral precioso. Con esto, podremos cumplir con nuestro objetivo de informar los avances que permitirán una mayor eficiencia en la industria.

Tipo de método, se aplicó un enfoque de nivel exploratorio-descriptivo para poder determinar las innovaciones en la operación unitaria de conminución. Para ello se realizó el análisis de 15 artículos científicos recopilados de diferentes bases de datos de divulgación científica.

Materiales, reactivos e insumos, se realizó una recopilación bibliográfica en los idiomas de: español, inglés y portugués. Se ocuparon las siguientes bases de datos de las cuales se seleccionaron la siguiente cantidad de artículos científicos:

Nº	Título	Fuente
1	Determination of energy consumption according to the phases of the mineral comminution process	https://www.researchgate.net/publication/379016825-Determination-of-energy-consumption-according-to-the-phases-of-the-mineral-comminution-process-Determinacion-del-consumo-ene

		rgetico segun las fases del proceso de conminución de minerales
2	Optimization of the Mechanical Comminution—The Crushing Stage. Recovery of Values from Low-Grade and Complex Minerals: Development of Sustainable Processes	https://www.wiley.com/en-us/Recovery+of+Values+from+Low-Grade+and+Complex+Minerals%3A+Development+of+Sustainable+Processes-p-9781119896418
3	Manual of mineralogy	https://books.google.com/sv/books?id=WaqZEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false
4	Mineralogy and mineral chemistry of quartz: A review	https://www.cambridge.org/core/journals/mineralogical-magazine/article/mineralogy-and-mineral-chemistry-of-quartz-a-review/68D0E3F05734D0E1B25F6A9A267B12EF
5	Development of a comminution test method for small ore samples.	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268751830445X
6	Importancia de la geo metalurgia en los yacimientos de oro del futuro en el Perú.	https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/24551#:~:text=La%20geometalurgia%20busca%20reducir%20significativamente,proyecto%20en%20una%

		20futura%20explotaci%C3%B3n.
7	Impactos económicos y sociales de la minería en charcas	https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/5471
8	Tecnología integrada para el procesamiento de minerales auríferos	http://link.springer.com/article/10.1007/s40033-021-00291-0
9	Claves para una mejor práctica de trituración	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687522000425#:~:text=Best%20Practice%20Comminution%20means%20running,operating%20stages%20of%20the%20plant
10	Enhancement of gold agitation leaching by HPGR comminution via microstructural modification of gold ore particle	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687520304593
11	Aplicaciones de los modelos Kuz-Ram en la integración y optimización de mina a molino: una revisión	https://www.mdpi.com/2075-163X/14/11/1162
12	Desbloqueo de valor adicional mediante la optimización de las estrategias de conminución para procesar corrientes de Grade Engineering®	https://www.researchgate.net/publication/305731364_Unlocking_additional_value_by_optimising_comminution_strategies_to_process_Grade_Engineering_streams
13	Separación gravimétrica de minerales	https://www.mdpi.com/2075-163X/10/3/273

	pesados en sedimentos y rocas	
14	Evaluación del rendimiento de un circuito de conminución de molino de torre con rodillos de molienda de alta presión (HPGR) a escala industrial	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687522005830?via%3Dihub
15	Diagnóstico y optimización del circuito de flotación de mineral de oro mediante análisis de circuito lineal y simulación de balance de masa	https://www.mdpi.com/2075-163X/11/10/1065

RESULTADOS

El análisis de la información recopilada para esta investigación es fundamental debido a la relevancia para poder determinar la optimización del proceso unitario según los avances científicos realizados por diferentes investigadores en el campo de la industria minera aurífera y la metalurgia.

Es importante reconocer que los procesos de conminución empiezan desde la voladura en el yacimiento hasta la molienda de la mena y en algunos casos la remolienda del oversize de la molienda primaria.

Es por ello por lo que, para una correcta optimización de este proceso, es necesario recapitular los avances realizados en la eficiencia y reducción de costos desde la voladura realizada en la mina.

Uno de los nuevos métodos aplicados a simulaciones de procesos mineros es la metodología Grade Engineering (GE), la cual consiste en un conjunto de métodos aplicados a la modificación de la alimentación de los molinos, esto con la finalidad de poder disminuir el gasto energético que ocasiona una pulverización de bajo rendimiento y costosa.

Una de las nuevas tecnologías utilizadas en la metalurgia extractiva aurífera son los molinos semi autógenos (SAG), que reducen las etapas de trituración y usan el material como objetos moledores conjuntos a su gran tamaño permitiendo procesar un mayor tonelaje de mineral.

Estos molinos reciben su alimentación directamente de una etapa primaria de trituración, por lo cual su alimentación tiene una granulometría mayor a lo convencional, pero lo compensa produciendo partículas de granulometría menor, acelerando el proceso de conminución.

La metodología GE implementado a los molinos SAG se caracteriza por descartar material con ley de oro baja. Para esto, es necesario poder implementar una voladura que nos permita obtener materiales de tamaño menor a lo convencional.

Según Carrasco et al, un circuito eficiente de conminución requiere de una voladura de alto grado para realizar un proceso previo de triturado y cribado para obtener una alimentación F20 en el molino SAG. Con esas consideraciones determinaron que la granulometría ideal para estos molinos debería rodear entre 20mm, salvo una correlación menor de partícula del alimento y un mayor grado de voladura se reduce el gasto de energía mecánica utilizada en la rotura del mineral en los molinos.

Este procedimiento en conjunto a equipos trituradores de alta eficiencia como las trituradoras giratorias que se encuentran en la etapa primera comúnmente y el uso de trituradoras giratorias posterior a los molinos SAG para adecuar los gruesos de esta molienda y obtengamos una entrada más limpia a los molinos de bolas, los cuales no han podido ser reemplazados debido a su alto poder moedor.

Un circuito implementando las diferentes innovaciones en el proceso de conminución pueden llegar a presentar una gran inversión y adecuación de las instalaciones, pero promete ser el futuro de los procesos mineros ante una eficiencia de liberación mayor y agilizar los procesos de extracción tales como la flotación, cianuración, concentración gravimétrica, entre otras.

CONCLUSIONES

La metodología GE aplicando una voladura de alto grado en conjunto al uso de trituradoras giratorias como trituración primaria para luego pasar por un cribado, ingresando a los molinos SAG con un F20, para una posterior trituración por chancadoras cónicas se han visto como un circuito alternativo a lo convencional que presenta un mayor tonelaje proceso en menor tiempo, lo cual promete una perspectiva positiva a la innovación.

La metalurgia extractiva depende íntimamente del proceso de conminución, por lo que las nuevas investigaciones que se han recopilado en el transcurso de este artículo nos permiten observar mediante la simulación de procesos que es posible de optimizar y reducir los gastos energéticos que presentan una problemática creciente en la industria minera.

Dependiendo de las propiedades del material a procesar, el tipo de minería que se realiza y el alcance económico de los consorcios mineros, se pueden realizar adecuaciones del circuito de dispositivos descrito para poder implementarlo con la esperanza de mejorar concentraciones, tiempos de procesamiento y reducir costos lo que a largo plazo permitirá romper la brecha que causa la resistencia a la innovación.

El presente documento trata de entregar a la comunidad científica un panorama poco explorado pero que es tan importante como el proceso de extracción del mineral, esto con la finalidad de aumentar las posibilidades laborales como investigativas que pueden dar resultados favorables hacia la industria minera aurífera.

REFERENCIAS

Andò, S. (2020). Gravimetric Separation of Heavy Minerals in Sediments and Rocks. *Minerals*, 10(3), 273.
<https://doi.org/10.3390/min10030273>

Carrasco, C., Keeney, L., Napier-Munn, T. J., & Bode, P. (2017). Unlocking additional value by optimising comminution strategies to process Grade Engineering® streams. *Minerals*

Engineering, 103–104, 2–10.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.07.020>

Castillo Mamani, J. H., Inca Cano, M., Liceta Avendaño, J., Ortiz Saavedra, D. A., Shishido Sánchez, M., Anastasio Domínguez, J. C., & Vela Soria, Y. (2022). Importancia de la geometalurgia en los yacimientos de oro del futuro en el Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 25(50), 123–135.

<https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24551>

Chimwani, N. (2024). Optimization of the Mechanical Comminution – The Crushing Stage. In *Recovery of Values from Low-Grade and Complex Minerals* (pp. 1–40). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119896890.ch1>

Díaz Álvarez, J. S., & López Jara, I. Y. (2024). Determination of energy consumption according to the phases of the mineral comminution process [Determinación del consumo energético según las fases del proceso de conminución de minerales]. *Journal of Energy & Environmental Sciences*, 8(1), 32–43.
<https://doi.org/10.32829/eesj.v8i1.209>

Fedotov, P. K., Senchenko, A. E., Fedotov, K. V., & Burdonov, A. E. (2021). Integrated Technology for Processing Gold-Bearing Ore. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 102(2), 397–411.
<https://doi.org/10.1007/s40033-021-00291-0>

Götze, J., Pan, Y., & Müller, A. (2021). Mineralogy and mineral chemistry of

- quartz: A review. *Mineralogical Magazine*, 85(5), 639–664.
<https://doi.org/10.1180/mgm.2021.72>
- Han, S., Jung, M., Lee, W., Kim, S., Lee, K., Lim, G., Jeon, H.-S., Choi, S. Q., & Han, Y. (2021). Diagnosis and Optimization of Gold Ore Flotation Circuit via Linear Circuit Analysis and Mass Balance Simulation. *Minerals*, 11(10), 1065.
<https://doi.org/10.3390/min11101065>
- Heiskari, H., Kurki, P., Luukkanen, S., Sinche Gonzalez, M., Lehto, H., & Liipo, J. (2019). Development of a comminution test method for small ore samples. *Minerals Engineering*, 130, 5–11.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.005>
- James, D. (2022). *MANUAL OF MINERALOGY*. OUTLOOK VERLAG.
- Li, L., Wei, B., Zhang, Q., Zhang, J., Zhang, X., Wang, C., Li, N., & Liu, Z. (2023). Evaluating the performance of an industrial-scale high pressure grinding rolls (HPGR)-tower mill comminution circuit. *Minerals Engineering*, 191, 107973.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107973>
- Saldana, M., Gallegos, S., Arias, D., Salazar, I., Castillo, J., Salinas-Rodríguez, E., Navarra, A., Toro, N., & Cisternas, L. A. (2024). Applications of Kuz–Ram Models in Mine-to-Mill Integration and Optimization—A Review. *Minerals*, 14(11), 1162.
<https://doi.org/10.3390/min14111162>
- Starkey, J., Moussaid, H., Boucher, D., & Bobicki, E. R. (2022). Keys to best practice comminution. *Minerals Engineering*, 180, 107432.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107432>
- Tang, Y., Yin, W., Huang, S., Xue, J., & Zuo, W. (2020). Enhancement of gold agitation leaching by HPGR comminution via microstructural modification of gold ore particles. *Minerals Engineering*, 159, 106639.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106639>
- Torres, N., Barron, D., & Neri, J. (2016). *IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LA*.
<http://www.ipicyt.edu.mx/>