

Optimization of comminution in grinding to reduce operating costs at the Antamina mining project

Monsalve Vásques Royner¹  (N00374374); De La Cruz Capitán Adriana Del Pilar²  (N00392271);
Aguilar Julca, Paul Michael³ 

¹Universidad Privada del Norte (UPN); N00374374@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN); N00392271@upn.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN); paul.aguilar@upn.pe

Abstract– *High energy consumption during the comminution stage is one of the main challenges to the operational efficiency of Peruvian mining. In this context, this research focused on optimizing the comminution circuit at Compañía Minera Antamina S.A., located in the district of San Marcos, province of Huari, region of Ancash, Peru. The purpose of the study was to theoretically analyze the reduction in energy consumption and the operational benefits derived from the implementation of emerging technologies, such as machine learning, advanced process control, and high-pressure grinding (HPGR). The research was applied, descriptive-comparative in nature, and employed a non-experimental, cross-sectional design. It was based on a documentary analysis of technical reports and recent specialized literature (2019–2025). The results showed that modernizing the grinding circuit reduced specific energy consumption from 14 to 10.5 kWh/t, equivalent to an approximate 25% savings, and increased throughput from 2750 to 4400 tons per hour. These improvements demonstrated more efficient use of installed power and a reduction in the process's environmental footprint. In conclusion, optimizing the comminution circuit at Antamina represents an effective strategy for reducing energy costs, improving productivity, and strengthening the sustainability of the mining operation.*

Keywords- *Comminution, energy efficiency, machine learning, Antamina, sustainability.*

Optimización de la conminución en molienda para reducir costos operativos en el proyecto minero Antamina

Monsalve Vasques Royner¹ (N00374374); De La Cruz Capitán Adriana Del Pilar² (N00392271); Aguilar Julca, Paul Michael³

¹Universidad Privada del Norte (UPN); N00374374@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN); N00392271@upn.pe

³Universidad Privada del Norte (UPN); paul.aguilar@upn.pe

Resumen– El elevado consumo energético en la etapa de conminución constituye uno de los principales desafíos en la eficiencia operativa de la minería peruana. En este contexto, la presente investigación se centró en la optimización del circuito de conminución en la Compañía Minera Antamina S.A., ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, región Áncash, Perú. El propósito del estudio fue analizar teóricamente la reducción del consumo energético y los beneficios operativos derivados de la implementación de tecnologías emergentes, tales como machine learning, control avanzado de procesos y molienda de alta presión (HPGR). La investigación fue de tipo aplicada, con un nivel descriptivo-comparativo y un diseño no experimental de corte transversal, fundamentada en el análisis documental de reportes técnicos y literatura especializada reciente (2019–2025). Los resultados evidenciaron que la modernización del circuito de molienda permitió una reducción del consumo específico de energía de 14 a 10.5 kWh/t, equivalente a un ahorro aproximado del 25 %, además de un aumento del rendimiento de 2750 a 4400 toneladas por hora. Estos avances demostraron un uso más eficiente de la potencia instalada y una disminución de la huella ambiental del proceso. En conclusión, la optimización del circuito de conminución en Antamina representa una estrategia efectiva para reducir costos energéticos, mejorar la productividad y fortalecer la sostenibilidad de la operación minera.

Palabras clave– Conminución, eficiencia energética, machine learning, Antamina, sostenibilidad.

I. INTRODUCCIÓN

La minería moderna enfrenta el desafío constante de incrementar la eficiencia y reducir los costos operativos en sus procesos productivos, siendo la etapa de conminución una de las más críticas por su elevado consumo energético y repercusión directa en la rentabilidad. En este sentido, el proyecto Antamina, ubicado en la región de Áncash, es uno de los yacimientos polimetálicos más grandes y complejos del país, reconocido por su significativa producción de cobre y zinc [1]. Es uno de los yacimientos polimetálicos más grandes y complejos en el Perú, ha impulsado innovaciones tecnológicas y estratégicas orientadas a optimizar su circuito de molienda, con el objetivo de maximizar la producción metálica y minimizar los costos operativos asociados [2].

La conminución, que abarca las etapas de trituración y molienda, representa alrededor del 50 % o más del consumo

total de energía en una planta concentradora minera, siendo crucial para la reducción de los costos operativos y la huella ambiental del procesamiento de minerales [3]. En el contexto minero peruano, esta realidad se vuelve aún más crítica dada la presencia de minerales de dureza variable, leyes decrecientes y mayores exigencias medioambientales, que obligan a optimizar continuamente estos procesos.

En años recientes, Antamina ha implementado mejoras bajo metodologías de integración mina-a-molino y de optimización de procesos operativos (Process Integration & Optimization, PIO), trabajando en conjunto con proveedores tecnológicos para ajustar parámetros como fragmentación del material tras tronadura, tamaño de alimentación a los molinos SAG, adaptación de las chancadoras y manejo de los circuitos de reciclaje. Dichas intervenciones han logrado incrementar el tonelaje procesado por hora y reducir el consumo energético específico (kWh/t) del circuito de molienda [4].

Por otro lado, investigaciones nacionales recientes destacan el papel de tecnologías de molienda de alta presión (HPGR), optimización estadística de parámetros operativos y uso de aprendizaje automático para prever y elevar la eficiencia en circuitos de molienda. Por ejemplo, en la tesis de Picón (2023), desarrollada en la UNI, la aplicación de HPGR en el circuito de chancado con fines de pre-molienda reportó un aumento de tonelaje en torno a 10.8 %, una disminución del work index del mineral alimentado en 9.8 %, una reducción del consumo de energía en 9.9 % y un descenso del uso de medios molidores de aproximadamente 14.1 % [5]. Estos resultados reafirman el potencial de esta tecnología como estrategia de optimización en plantas de conminución y fortalecen el fundamento del presente estudio aplicado a Antamina.

A partir de este marco, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo puede la optimización del circuito de conminución en el proyecto Antamina, a través de metodologías teóricas y el análisis de variables críticas, contribuir a la reducción de costos operativos y al incremento de la eficiencia energética sin necesidad de pruebas experimentales en campo o laboratorio?

Para responderla, el estudio se plantea como objetivo general analizar la optimización del circuito de conminución en Antamina como estrategia de reducción de costos operativos, sustentado en una revisión documental de estudios nacionales e internacionales recientes. De manera complementaria, se establecen como objetivos específicos: a) Identificar las variables críticas del proceso de conminución que condicionan la eficiencia operativa, b) Revisar y contrastar investigaciones sobre tecnologías emergentes de optimización aplicables al contexto de Antamina, c) Comparar casos internacionales y nacionales para contextualizar su situación en un marco global, d) Evaluar teóricamente los beneficios esperados en términos de reducción de consumo energético, incremento de productividad y sostenibilidad operativa. Según lo expresado tenemos como hipótesis: La integración de tecnologías como HPGR, control avanzado, mina-a-molino y machine learning en el circuito de conminución de Antamina puede reducir el consumo energético y de medios de molienda, prolongar la vida útil de los equipos y fortalecer la sostenibilidad y competitividad operativa.

En consecuencia, la presente investigación busca aportar una base técnica para la toma de decisiones estratégicas en la optimización del circuito de conminución de Antamina, evaluando alternativas tecnológicas que equilibren productividad, sostenibilidad y rentabilidad.

II. METODOLOGÍA

Este trabajo se propone profundizar en la optimización del circuito de conminución en Antamina como estrategia para la reducción de costos operativos, mediante el análisis de las variables críticas relevantes al proceso (energía, dureza del mineral, tamaño de alimentación, medios de molienda, configuración del molino, etc.), la evaluación de tecnologías emergentes (como HPGR, control avanzado, machine learning) y la cuantificación de los beneficios esperados en consumo de energía, productividad y vida útil de componentes.

El presente estudio se enmarca en una investigación de tipo aplicada y documental, con un enfoque cualitativo-cuantitativo. Su desarrollo no contempla pruebas experimentales en planta ni en laboratorio, sino que se basa en la revisión sistemática y el análisis crítico de literatura especializada publicada en los últimos cinco años, complementada con la integración de datos secundarios reportados en tesis, papers y reportes técnicos de operaciones mineras comparables a Antamina. Este enfoque permite contrastar la aplicabilidad de tecnologías emergentes en contextos geometalúrgicos similares, garantizando la validez y actualidad de la información analizada [6].

No obstante, como limitación explícita del presente trabajo, los valores numéricos reportados corresponden íntegramente a datos secundarios extraídos de fuentes especializadas; no se generaron datos experimentales propios ni se realizaron pruebas en planta. Esta condición restringe la

generalización directa de los resultados y constituye una oportunidad para futuras investigaciones que incorporen validación experimental en campo.

La presente investigación se basó en el siguiente flujograma (Ver Fig. 1), realizándose principalmente en 5 etapas, las cuales se detallan a continuación.

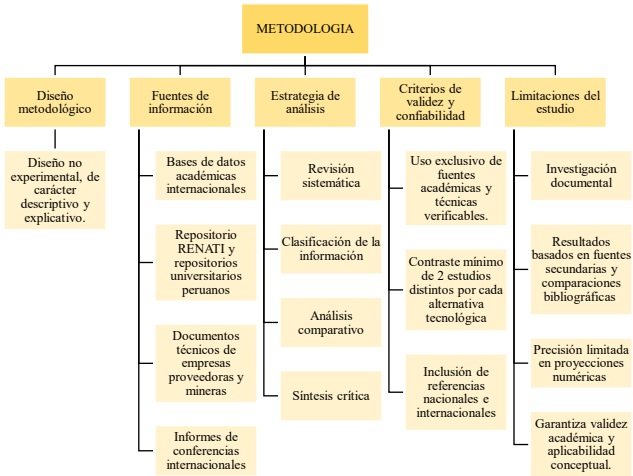


Fig. 1 Flujograma metodológico del estudio sobre optimización de la conminución en la operación de Antamina.

III. RESULTADOS

A. Área de estudio

La mina Antamina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari en la Región Ancash, a 200 km. de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4300 msnm (Ver Fig. 2). Además, también cuenta con el puerto de embarque Punta Lobitos, ubicado en la provincia costera de Huarmey [7].

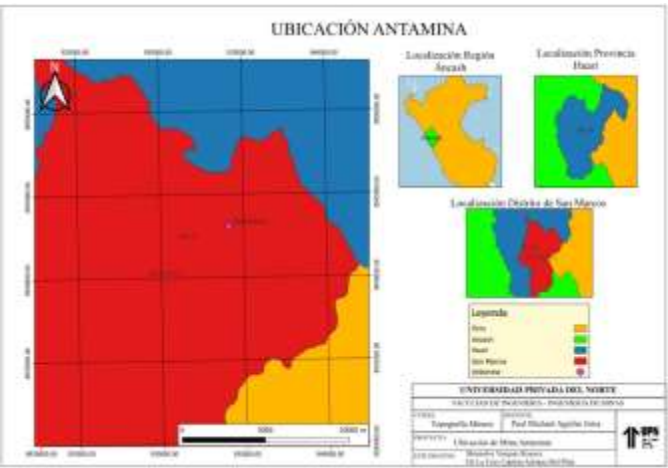


Fig. 2 Ubicación geográfica de la mina Antamina en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, región Áncash, Perú.

B. Comparación granulométrica y su incidencia en la eficiencia de conminución

Uno de los principales parámetros operativos que determinan la eficiencia de la conminución es la granulometría de alimentación al molino, expresada como P_{80} , es decir, el tamaño por debajo del cual pasa el 80 % del material procesado. Este indicador controla en gran medida el consumo energético específico (kWh/t), el rendimiento del molino y la liberación mineral posterior en flotación [8].

En particular, esta heterogeneidad impacta el índice de trabajo (Work Index) y el consumo energético específico del circuito de molienda, pues cada litología exige diferentes cargas de medios, tiempos de residencia y velocidades de molienda. Frente a este escenario, la implementación de analítica avanzada plantea una vía para cuantificar la variabilidad, segmentar los lotes de material según su comportamiento esperado y adaptar las condiciones de molienda para reducir el consumo energético y mejorar el rendimiento de forma sistemática [9].

En la Tabla 1 resume los valores reportados o estimados de P_{80} de alimentación y/o producto de molienda en diferentes operaciones mineras del Perú, considerando únicamente fuentes técnicas o reportes NI 43-101. Esta comparación permite analizar la relación entre la granulometría de entrada al molino y las estrategias de optimización implementadas en cada operación.

TABLA 1 COMPARACIÓN GRANULOMÉTRICA (P_{80}) EN OPERACIONES MINERAS PERUANAS		
OPERACIÓN MINERA	INDICADOR REPORTADO (P_{80})	EQUIVALENCIA (μm)
Antamina	P_{80} del mineral alimentado al molino: 50 – 60 mm	50000 – 60000
Constancia	P_{80} del producto de molienda: 0.15 mm	150
Cerro Verde	P_{80} del producto de molienda: 0.12 – 0.13 mm	120 – 130
Las Bambas	P_{80} de descarga del molino SAG: 0.11 mm	110
Toquepala	P_{80} del producto final de molienda: 0.18 mm	180

Nota. El valor de Antamina (50000 – 60000 μm) corresponde al P_{80} de alimentación al molino, no al producto de molienda, por lo que no es directamente comparable con los valores de las demás operaciones. Esta diferencia refleja distintas etapas del proceso de conminución.

En conjunto, los datos sugieren que la eficiencia energética y la rentabilidad operativa no dependen exclusivamente del tamaño de partícula alcanzado, sino del equilibrio entre fragmentación, consumo energético y liberación metalúrgica.

Antamina se posiciona dentro de un rango operativo intermedio, donde el desafío radica en ajustar la granulometría de alimentación y descarga del molino para maximizar la recuperación metálica sin incrementar los costos energéticos.

Estos resultados sustentan la necesidad de continuar la optimización del circuito de conminución mediante metodologías integradas mina-a-molino, control avanzado y análisis de datos predictivos, con miras a reducir el Work Index efectivo y aumentar la eficiencia global del proceso.

El parámetro P_{80} representa el tamaño de partícula (en micrómetros, μm) por debajo del cual pasa el 80 % del material procesado. Es un indicador clave del grado de molienda en las plantas concentradoras. Un valor de P_{80} más bajo indica una molienda más fina, lo que generalmente mejora la liberación de minerales, aunque puede incrementar el consumo energético.

En la Fig. 3 se comparan los valores de P_{80} reportados por distintas operaciones mineras peruanas. Se excluye Antamina debido a que su valor (50 – 60 mm) corresponde al mineral alimentado al molino y no al producto de molienda, siendo por tanto incomparable con los demás.

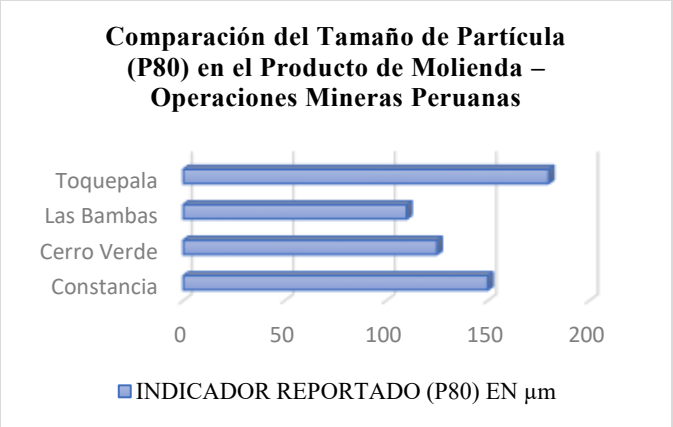


Fig. 3 Tamaño de partícula (P_{80}) en μm

Los valores de P_{80} muestran diferencias operativas entre las plantas. Las Bambas presenta la molienda más fina (~110 μm), orientada a una mayor liberación mineral, mientras que Toquepala tiene un producto más grueso (~180 μm), posiblemente por optimización energética. Cerro Verde y Constancia mantienen valores intermedios (120–150 μm), reflejando un equilibrio entre eficiencia y consumo de energía.

C. Impacto energético y económico de la optimización del circuito de conminución

Diversas investigaciones recientes destacan el efecto directo de la optimización del circuito de conminución sobre los costos operativos totales y el consumo energético específico de las plantas concentradoras. Según Metso (2014), Antamina al inicio del proyecto, la operación alcanzó un rendimiento de

2600 t/h con un consumo de energía específico de 14 kWh/t. Al final del proyecto, se alcanzó y mantuvo un rendimiento de 4500 t/h (reportado también como ~4400 t/h según distintas versiones de la misma fuente) con una energía específica de 10.5 kWh/t. Esto representa un aumento significativo en la eficiencia de los recursos al reducir el impacto ambiental total de la producción de concentrado metálico, con un ahorro de energía del 25% para Antamina [10].

La optimización del circuito de conminución no solo mejora la eficiencia energética y metalúrgica, sino que también traduce esos avances en reducción de costos operativos significativos. Según un estudio desarrollado en Chile, los procesos de conminución corresponden a uno de los procesos con mayor consumo de energía eléctrica, representando en algunos casos cerca del 70 % del gasto energético de una planta minera [11]. Por tanto, optimizar la conminución mediante la incorporación de tecnologías de alta presión (HPGR), control avanzado de procesos y aprendizaje automático no solo representa una estrategia técnica, sino también económica y ambientalmente necesaria para garantizar la competitividad del sector minero peruano en el contexto actual de transición hacia operaciones más sostenibles.

Como muestra la Tabla 2, en operaciones mineras peruanas como Antamina y Constancia, la implementación de tecnologías como machine learning combinado con control avanzado y predictivo ha conseguido reducciones significativas en el consumo energético, del 25% y 35% respectivamente, traduciéndose en un ahorro considerable considerando los elevados tonelajes anuales de producción.

TABLA 2 COMPARACIÓN DE AHORRO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO EN OPERACIONES MINERAS PERUANAS			
OPERACIÓN MINERA	TECNOLOGÍA IMPLEMENTADA	REDUCCIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO	TONELAJE ANUAL (T/A)
Antamina (Perú)	Machine learning + control avanzado	25 % (14 a 10.5 kWh/t)	450000 t de cobre y 450000 t de zinc.
Constancia (Perú)	Machine learning + Control predictivo de molienda	35%	99001 t de cobre, 98226 onzas de oro y 1323 t de molibdeno.

La aplicación de tecnologías como machine learning y control predictivo en los circuitos de conminución ha demostrado mejorar la eficiencia energética y operativa de minas como Antamina y Constancia. En la primera, el consumo específico se redujo en torno al 25 %, mientras que en la segunda alcanzó una disminución cercana al 35 %. Estos avances evidencian que la digitalización de los procesos mineros contribuye a un uso más racional de la energía y a una producción más sostenible.

En la Fig. 4 se puede visualizar las diferencias en eficiencia energética entre las principales operaciones mineras peruanas que han implementado tecnologías digitales en sus circuitos de conminución, que muestra el porcentaje de reducción del consumo energético logrado por Antamina y Constancia. Este análisis permite comparar el impacto de la automatización y el machine learning sobre la optimización de la molienda en minas de gran escala.

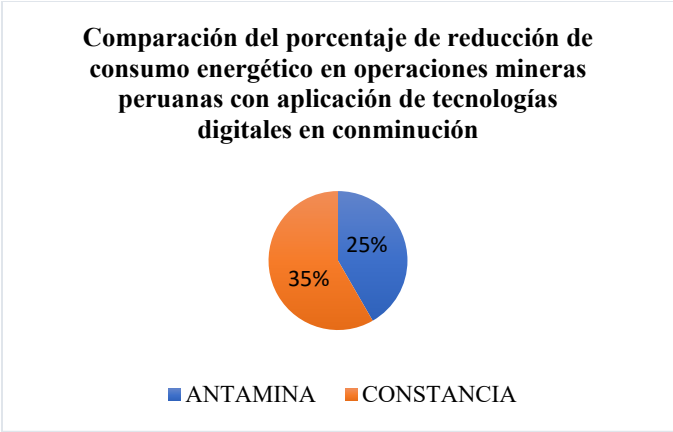


Fig. 4 Reducción de consumo energético

El gráfico evidencia que Constancia alcanzó una reducción energética del 35 %, superando el 25 % registrado por Antamina. Este resultado se asocia a la incorporación de control predictivo de molienda, el cual complementa las estrategias de machine learning y permite mantener estable la granulometría de alimentación, optimizando el uso de potencia en el molino. En ambos casos, los resultados reflejan que la digitalización de los procesos de conminución no solo mejora la eficiencia energética, sino que también impulsa la productividad y sostenibilidad de las operaciones mineras peruanas.

D. Comparar casos internacionales y nacionales para contextualizar su situación en un marco global

En la economía globalizada, la minería constituye hoy un pilar de intensa competencia y fuerte interdependencia, pero con el desafío comunicar mejor estos avances y demostrar que una minería moderna es compatible con sostenibilidad y bienestar. Las compañías mineras, impulsadas por la búsqueda de progreso, están constantemente enfocadas en optimizar el circuito de conminución como un desafío clave para mejorar la eficiencia [12].

En la Tabla 3 presenta evidencia de casos de optimización en diferentes operaciones mineras a nivel nacional e internacional, sirviendo como base para establecer el contexto y las tendencias de mejora a escala global.

TABLA 3
COMPARACIÓN DE CONMINUCIÓN EN MOLIENDA EN OPERACIÓN
MINERA NACIONAL E INTERNACIONAL

	ANTAMINA (PERÚ)	LA ESCONDIDA (ANTOFAGASTA)
Capacidad de Procesamiento (t/d)	Inicial: 70000; Actual: 145000; Objetivo: 208000	Cerca de 400000 toneladas por día (t/d)
Rendimiento Conminución (t/h)	De 2750 a 4400 (para minerales duros)	N.D.
Consumo Específico de Energía (kWh/t)	Reducción del 23-25% en conminución (por optimización)	30 %
Estrategia de Optimización	Optimización "mina a molienda", logística de chancadora	Optimización de Procesos Productivos y Control de Costos (Meta corporativa).
Tipo y Especificaciones de Molinos	Flsmidth TS 63" X 114" (TSUV). Potencias de hasta 1000 kW	Molinos SAG (Semi-Autógenos) y Molinos de Bolas.

Nota. Dato en t/h no disponible en fuentes consultadas.

Tanto Antamina como La Escondida han mejorado su eficiencia energética y productiva mediante la optimización de sus circuitos de conminución. Antamina incrementó su capacidad de procesamiento y redujo su consumo específico de energía en alrededor del 25 % gracias a estrategias “mina a molienda” y a la modernización de sus molinos. La Escondida, con una capacidad cercana a 400 000 t/d, logró una reducción energética cercana al 30 % mediante control de procesos y gestión de costos. Ambos casos reflejan cómo la innovación tecnológica impulsa una minería más eficiente y sostenible.

E. Evaluación del Ahorro Energético y Productividad con HPGR en Conminución

La evaluación teórica de los beneficios esperados por la incorporación de tecnologías como HPGR en minería contempla principalmente tres aspectos clave: reducción del consumo energético, incremento de productividad y sostenibilidad operativa. Se basan en investigaciones y datos recientes (2020-2025) que demuestran importantes ventajas técnicas y económicas.

1. Reducción del consumo energético

Los HPGR (High Pressure Grinding Rolls) consumen hasta un 35% menos de energía comparados con sistemas tradicionales basados en molinos SAG, dependiendo del tamaño del producto final y la dureza del mineral. El ahorro energético proviene tanto del menor consumo directo en trituración como de la menor demanda en etapas posteriores de molienda. Estudios in situ en minas como Can Huckleberry han evidenciado una reducción del 21% al 34% en consumo energético al utilizar HPGR. Esto se debe a la microfisuración que generan los HPGR en los minerales, facilitando la liberación metalúrgica y la molienda subsecuente [13].

2. Incremento de la productividad

Estructuras de minerales tratadas con HPGR presentan mejores características para molienda y procesos hidrometalúrgicos, permitiendo procesar mayor tonelaje con menor desgaste de medios y equipos. La capacidad de manejar variaciones en la dureza mineral también mejora la estabilidad operativa. El incremento en productividad varía según el caso, pero reporta aumentos de hasta 10% y más en tonelaje procesado y eficiencia metalúrgica [14].

3. Sostenibilidad operativa

Desde la perspectiva ambiental, el ahorro energético reduce la huella de carbono de la operación minera. Además, al reducirse el consumo de agua y medios de molienda, se prolonga la vida útil de los equipos, disminuyen los residuos y se mejora la seguridad operativa. La tecnología HPGR apoya así una transición hacia operaciones más limpias, alineadas con objetivos globales de sostenibilidad minera [15].

En la Tabla 4 se presenta una comparación de los principales parámetros operativos y beneficios obtenidos al sustituir o complementar un circuito SAG con un sistema HPGR, basada en reportes industriales y estudios técnicos publicados en los últimos cinco años

TABLA 4
COMPARACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS Y BENEFICIOS DE
HPGR FRENTE AL SISTEMA TRADICIONAL DE MOLIENDA SAG

PARÁMETRO	SISTEMA TRADICIONAL (MOLINO SAG)	SISTEMA CON HPGR	% MEJORA / AHORRO
Consumo energético (kWh/t)	14.7	9.5 - 10.5	25 - 35% ahorro
Reducción energía consumo total	N.D.	21 - 34% (Can Huckleberry)	Ahorro in situ significativo
Incremento en tonelaje procesado	N.D.	+10% o más	Mejora relevante
Disminución del desgaste medios	Alto	Reduce desgaste, mayor vida	Bajo mantenimiento
Ahorro agua y reducción residuos	Alto	Reduce consumo agua y residuos	Mejora ambiental importante

Nota. N.D.: Dato no disponible.

Los datos muestran que la incorporación de HPGR puede transformar la eficiencia operativa, reduciendo costos energéticos y mejorando la producción al facilitar etapas posteriores de procesamiento con menor esfuerzo. Esto se traduce también en mayor sostenibilidad ambiental, vital para la minería moderna.

Con el propósito de aportar un análisis cuantitativo propio basado en los datos secundarios recopilados, se construyó un Índice de Eficiencia Relativa (IER) para Antamina. El IER

permite expresar el impacto de la optimización en función del consumo inicial, como se presenta en la Tabla 5.

TABLA 5
 ÍNDICE DE EFICIENCIA RELATIVA (IER) — ANTIMINA

PARÁMETRO	VALOR
Consumo inicial (kWh/t)	14.0
Consumo final (kWh/t)	10.5
Ahorro energético (%)	25
IER	1.79

Nota. $IER = (Ahorro\ energético\ \%) / (Consumo\ inicial\ kWh/t) = 25 / 14.0 = 1.79$

IV. DISCUSIÓN

El análisis detallado de la granulometría y el work index, piezas clave en la eficiencia de la molienda, reafirma la importancia de la segmentación granular para optimizar la operación. Estudios recientes destacan que la gestión granular y la capacidad de adaptación a la variabilidad mineral potencian la reducción de desgaste y costos operativos (Nunton Sandoval, 2025), los cuales son resultados consistentes con la aplicación de mantenimiento predictivo basado en inteligencia artificial, que puede disminuir en un 25% los tiempos de paro no planificado y reducir en un 18% los gastos operativos [16]. Este enfoque inteligente aplicado a la maquinaria garantiza mayor disponibilidad y sostenibilidad operativa, básicas para el desempeño competitivo de las plantas concentradoras contemporáneas.

La optimización del circuito de conminución en el proyecto *Antamina* ha demostrado la eficacia de integrar tecnologías avanzadas como HPGR, control predictivo y machine learning para reducir el consumo energético específico y potenciar la productividad, reflejando una tendencia alineada con casos internacionales recientes. Estudios en la operación Toromocho (Fangrong et al., 2023) mostraron mejoras de hasta el 14% en rendimiento mediante la adopción de estrategias integradas mina-planta, lo que confirma la necesidad de un enfoque holístico que considere desde la fragmentación hasta la alimentación fina a molinos SAG para maximizar la eficiencia del proceso [17]. Esta visión se complementa con reportes en Constancia que indican incrementos del 6 al 8% en productividad tras ajustes basados en simulaciones y evaluación dinámica del circuito (Medina et al., 2023) [18].

Asimismo, los resultados de esta investigación, que demuestran reducciones significativas en el consumo energético y mejoría en la productividad mediante la aplicación de tecnologías avanzadas en la molienda, encuentran coherencia con trabajos recientes como el de Samur (2024), este autor resalta la relevancia de la caracterización avanzada y el uso de técnicas de aprendizaje automático para modelar propiedades primarias que optimizan la conminución, lo que respalda la efectividad de los sistemas predictivos implementados en Antamina para ajustar de manera dinámica las variables operativas al tipo y características del mineral [19].

En paralelo, Álvarez (2023), quien desarrolló un sistema de mantenimiento predictivo basado en algoritmos de aprendizaje automático aplicados a la industria minera [20]. Este sistema optimiza la detección temprana de fallas, reduce los tiempos de paro y minimiza los costos operativos, alineándose con las mejoras en disponibilidad y sostenibilidad observadas en el circuito de conminución estudiado. Esta apoya la integración de técnicas digitales para una gestión eficiente de activos en minería, fundamental para la competitividad y sostenibilidad del sector.

Finalmente, la tesis de Salazar (2020), que experimentó con la aptitud de molienda de minerales mixtos, se complementa con nuestros hallazgos en la importancia de la gestión granular y la segmentación de minerales para maximizar la eficiencia en el proceso de molienda. La alineación entre estos estudios confirma la necesidad de enfoques adaptativos que consideren las variabilidades del mineral para optimizar la molienda, reducir el desgaste y mantener una sostenibilidad operativa en el tiempo [21]. De esta manera, nuestros resultados fortalecen la propuesta de que la combinación de tecnologías digitales y físicas en el circuito de conminución es fundamental para avanzar hacia una minería más eficiente, rentable y ambientalmente responsable.

Sin embargo, es necesario reconocer las limitaciones que restringen la extrapolación directa de estos resultados. En primer lugar, la brecha entre el ahorro del 25 % logrado por Antamina y el 30 % alcanzado por La Escondida se explica por las diferencias en escala operativa y en las estrategias de optimización implementadas en cada operación. En segundo lugar, los datos comparativos de Constancia (35 % de ahorro) corresponden a un contexto de menor volumen de procesamiento, por lo que la comparación directa puede inducir expectativas sobreestimadas para Antamina. En tercer lugar, los modelos de machine learning revisados fueron desarrollados con datos específicos de cada operación; su transferencia directa requiere recalibración y no garantiza los mismos porcentajes de mejora.

En función de estas brechas, las líneas prioritarias de investigación futura deberían centrarse en: (a) la validación experimental en planta mediante pruebas piloto de HPGR en el circuito de conminución de Antamina; (b) el desarrollo de modelos de machine learning entrenados con datos propios de la operación; y (c) el análisis de costo-beneficio que incorpore la inversión de capital asociada a la implementación de HPGR frente al ahorro energético proyectado.

V. CONCLUSIONES

A partir de la investigación y la evaluación de los resultados presentados, se puede concluir que para optimizar la conminución y reducir los costos operativos en un rango del 25% al 35%, el circuito de molienda de Antamina

implementa una estrategia avanzada donde combina sus Molinos SAG existentes con la eficiencia de los HPGR con ahorro energético de 21% hasta 34% y aumento de productividad de un 10% y el control predictivo proporcionado por sistemas de Inteligencia Artificial (Machine Learning).

El análisis de la granulometría empleado para validar la hipótesis confirma que Antamina utiliza un tamaño de alimentación al molino de 50 a 60 mm. La prioridad de la empresa es optimizar el proceso para conseguir la máxima eficiencia y, al mismo tiempo, controlar el gasto energético. Las métricas de mejora proyectan un rendimiento de 4400 t/h con una reducción en el consumo a 10.5 kWh/t, mejorando la eficiencia y minimizando las consecuencias ambientales de la conminución.

A pesar de la validación de nuestra hipótesis, existe un margen de mejora en el ahorro energético de Antamina. Al contrastar con referentes internacionales, se observa que el ahorro del 25% logrado por Antamina es superado por otras empresas que alcanzan un ahorro de hasta el 30%, incluso con niveles de producción más altos.

Un componente clave en la optimización de la conminución es la integración de tecnologías en la Molienda de alta presión (HPGR), esto representa un ahorro de 21 a 34%, pero al mismo tiempo incrementando su tonelaje, reduciendo desgaste de los equipos y ahorro de agua, así como reducción de residuos contaminantes. Antamina es un ejemplo de éxito en la aplicación de innovación: han evolucionado hasta alcanzar una capacidad de 4400 t/h con un consumo energético de solo 10.5 kWh/t. Esta eficiencia, atribuible a las nuevas tecnologías, representa un notable ahorro del 25% en su gasto energético.

Como trabajo futuro se propone validar experimentalmente los parámetros teóricos analizados mediante pruebas piloto en el circuito de conminución de Antamina, lo que permitiría contrastar los beneficios proyectados con datos reales de operación.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional y el esfuerzo de nuestros padres, cuyo sacrificio y perseverancia son una fuente constante de inspiración.

Extendemos nuestro profundo agradecimiento al MsC. Paul Michael Aguilar Julca por su guía experta, compromiso y valiosa paciencia como docente del curso, siendo su acompañamiento un factor determinante en la culminación de esta investigación y en nuestra formación profesional. Finalmente, reconocemos y agradecemos sinceramente a todas

las personas que contribuyeron de diversas maneras a este proyecto.

Del mismo modo a Nuestra Casa de Estudios la Universidad Privada del Norte (UPN) por brindarnos la formación académica de alta calidad y proporcionarnos los recursos e infraestructura necesarios para desarrollar y finalizar esta investigación.

REFERENCES

- [1] H. Valdivia, H. Paredes, E. Estrella, y A. Álvarez, "Incremento de Producción Metálica en Planta Concentradora Mediante la Implementación de Machine Learning en Antamina", INGEMET, 2024. Disponible en: <https://app.ingemet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-306.pdf>
- [2] K. Coaquira, "Cadena de suministros de minerales y la productividad en la empresa minera Antamina SA Ancash-Perú", 2023. Disponible en: <https://repositorio.unifsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7302>
- [3] S. Parvathareddy et al., "Transformando la optimización energética de la minería: una revisión de las técnicas y desafíos del aprendizaje automático", Frontiers, 2025. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1569716>
- [4] Metso, "Aumento de la eficiencia de la producción y de la energía para la optimizada mina Antamina", 2021. Disponible en: <https://www.metso.com/es/informacion/casos-exitosos/mineria-y-refinacion-de-metales/aumento-de-la-eficiencia-de-la-produccion-y-de-la-energia-para-la-optimizada-mina-antamina/>
- [5] C. Picón, "Aplicación de la tecnología HPGR al circuito de chancado para aumentar el tonelaje en molienda", UNI, 2023. Disponible en: <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/27177>
- [6] M. Guillén, G. Iriarte, H. Montes, G. San Martín, y N. Fantini, "Análisis comparativo de modelos de predicción de rendimiento en circuitos de molinos SAG: Un enfoque geometalúrgico", Minería, vol. 5, núm. 3, pág. 37, 2025. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/mining5030037>
- [7] Compañía Minera Antamina S.A. (s. f.). Quiénes somos. Disponible en: <https://www.antamina.com/quienes-somos/>
- [8] WipWare, "Comprensión del P80 en trituración y procesamiento de materiales", 2025. Disponible en: <https://wipware.com/understanding-p80-in-crushing-and-material-processing/>
- [9] H. Valdivia, H. Paredes, D. Estrella, y A. Álvarez, "Incremento de producción metálica en planta concentradora mediante la implementación de machine learning en Antamina", Revista Minería, 2023. Disponible en: <https://revistamineria.com.pe/actualidad/incremento-de-produccion-metalica-en-planta-concentradora-mediante-la-implementacion-de-machine-learning-en-antamina>
- [10] Metso, "Mayor producción y eficiencia energética para la mina Antamina", 2014. Disponible en: <https://www.metso.com/insights/case-studies/mining-and-metals/increased-production-and-energy-efficiency-for-optimized-antamina-mine/>
- [11] M. Pereira, R. Schröer, R. Vásquez, y J. Hueichapán, "Reporte energía en minería", 2021. Disponible en: <https://www.energiaenmineria.cl/wp-content/uploads/2021/04/Reporte-plataforma-pirometalurgia-marzo2021.pdf>
- [12] Energiminas, "La minería es el sector que puede impulsar el crecimiento y promover el desarrollo como ningún otro", 2025. Disponible en: <https://energiminas.com/2025/09/24/la-mineria-es-el-sector-que-puede-impulsar-el-crecimiento-y-promover-el-desarrollo-como-ningun-otro/>
- [13] Tecnología Minera, "HPGR: Cómo esta tecnología permite un gran ahorro de energía para las minas", 2024. Disponible en: <https://tecnologiamineria.com/noticia/hpgr-como-esta-tecnologia-permite-un-gran-ahorro-de-energia-para-las-minas-1726100289>
- [14] Tecnomin Productos, "FLS, líder global en la tecnología HPGR PRO", 2023. Disponible en: <https://tecnominproductos.com/noticia/fls-lider-global-en-la-tecnologia-hpgr-pro-zyQL0>
- [15] Rumbo Minero, "Nuevo informe identifica grandes oportunidades de reducción de emisiones de carbono en la minería global", 2021. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/peru/noticias-noticias->

- [energia/grandes-oportunidades-de-reduccion-de-emisiones-de-carbono-en-la-mineria-global/](#)
- [16] J. Nunton, "Optimización del mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad en el área de mantenimiento en una minera, 2024", 2025. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/18096>
- [17] L. Fangrong et al., "Optimización Integrada de la Mina a la Planta de la Operación Toromocho de Minera Chinalco en Perú", Hatch Inc., 2023. Disponible en: <https://www.hatch.com/es-CL/About-Us/Publications/Technical-Papers/2023/09/Integrated-Mine-to-Mill-Optimization-of-Toromocho-Operation-at-Minera-Chinalco-Peru>
- [18] J. Medina et al., "Revisión y Optimización del Circuito de Conminución del yacimiento Constancia de Hudbay", Hatch Inc., 2023. Disponible en: <https://www.hatch.com/es-CL/About-Us/Publications/Technical-Papers/2023/09/Revisión-y-optimización-del-Circuito-de-Comminución-Constancia-Hudbay>
- [19] S. Samur, "Modelamiento de propiedades primarias para la conminución mediante caracterización avanzada y técnicas de aprendizaje automático", Tesis de maestría, Universidad de Chile, 2024. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203289>
- [20] D. Álvarez, "Sistema de mantenimiento predictivo utilizando algoritmos de machine learning para la industria minera", Tesis de maestría, Universidad César Vallejo, 2023. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_5be5d9fb24a00d560b1c88b3c39ea569
- [21] O. Salazar, "Aptitud de molienda de minerales mixtos para la liberación de oro a nivel experimental", Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre, 2020. Disponible en: <https://repositorio.unifsc.edu.pe/handle/20.500.14067/3859>