

## LA AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE PERFORACIÓN DE ROCAS COMO FACTOR DE SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA

Jadir Pedro Alves a,b  
Carlos Enrique Arroyo Ortiz, Adilson Curi, Royer Inca a

4. a Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Federal de Ouro Preto (UFOP), Brasil.
5. b Supervisor Técnico de productos de perforación en Epiroc Brasil.

### Resumen:

Este artículo presenta los resultados obtenidos en la investigación realizada sobre el uso de nuevas tecnologías y la transformación digital en el proceso de perforación de rocas en minas a cielo abierto. La automatización se presenta como un factor disruptivo y un impulsor de mejoras que brindan sustentabilidad en la perforación de rocas. Se usó siete parámetros operativos principales para combinar la medición durante la perforación (MWD) y otra información generada por el equipo durante la perforación de taladros, en seis litologías diferentes de una mina de hierro ubicada en la región central de Minas Gerais en Brasil. Se realizaron ajustes y correcciones a los datos recopilados para minimizar las influencias externas distintas a la roca misma, asegurando la efectividad de los análisis. Finalmente, se buscó comparar el rendimiento del proceso de perforación en los modos de operación manual y automático, demostrando así la eficiencia e impacto en la sustentabilidad de las operaciones de perforación de rocas en minas a cielo abierto.

**Palabras clave:** Automatización; Transformación Digital; Perforación de rocas; Medición durante la perforación (MWD); Parámetros operativos

### Abstract

This article presents the results obtained in the research on the use of new technologies and digital transformation in the rock drilling process in open pit mines. Automation is presented as a disruptive factor and a driver of improvements that provide sustainability in rock drilling. Seven main operating parameters were used to combine measurement while drilling (MWD) and other information generated by the rig while drilling holes in six different lithologies in an iron ore mine located in the central region of Minas Gerais in Brazil. Adjustments and corrections were made to the data collected to minimize external influences other than the rock itself, ensuring the effectiveness of the analyses. Finally, we sought to compare the performance of the drilling process in manual and automatic modes of operation, thus demonstrating the efficiency and impact on the sustainability of rock drilling operations in open pit mines.

**Keywords:** Automation; Digital Transformation; Rock Drilling; Measurement While Drilling (MWD); Operational Parameters.

### 1. Introducción

Para Fox (2019), durante siglos la minería fue considerada una de las tres industrias más peligrosas del mundo. Actualmente, esta reputación está disminuyendo a medida que se incorpora la tecnología en los procesos productivos y la automatización alcanza un nuevo estándar dentro de estos entornos. Así, puede decirse que uno de los principales motores de cambio en la minería es, sin duda, la llegada de la automatización, ya que la realidad de automatizar funciones y operaciones hace el

trabajo más seguro y eficiente, teniendo un profundo efecto en la forma en que ha funcionado la minería, aunque haya sido un proceso lento.

El principal factor que impulsa a las empresas a adoptar la automatización es el desarrollo de tecnologías avanzadas y la mejora en la adquisición y análisis de datos en los últimos años. Esto ha permitido automatizar una serie de operaciones unitarias en minería con mayor rapidez y a un costo cada vez más accesible.

Hoy en día, la minería a cielo abierto enfrenta desafíos, pero también oportunidades significativas, especialmente en áreas como la perforación y la voladura de rocas. Desde los primeros tiempos, cuando el ser humano comenzó a perforar la tierra para obtener los recursos minerales necesarios tanto para fabricar herramientas como para construir edificaciones, el panorama ha cambiado drásticamente.

Según Abbaspour et al. (2018), la perforación y la voladura de rocas son las operaciones iniciales más cruciales en la minería a cielo abierto, y pueden influir de manera significativa en las operaciones aguas abajo. Debido al aumento en la producción mundial de minerales, la demanda por operaciones de perforación y voladura de alta calidad se ha intensificado.

La profundización de los tajos y los cambios en las características de los macizos rocosos representan obstáculos que requieren una transformación cultural en los procesos operativos dentro de las minas. Es fundamental implementar controles más precisos y eficientes en las operaciones de perforación para garantizar voladuras confiables y controladas, asegurando de esta forma la sustentabilidad de las operaciones. Las propiedades geomecánicas de la roca cambian con cada metro perforado, lo que hace necesario un monitoreo constante. El uso de perforadoras autónomas ya no es más una visión futura, sino una realidad en varias minas que buscan optimizar sus condiciones operativas, mejorar la seguridad, y aumentar tanto la rentabilidad como la eficiencia en los procesos productivos.

## **2. Perforación Autónoma**

La perforación autónoma implica la independencia de la presencia y decisión humana sobre un conjunto de tareas relacionadas con el proceso de perforación. El concepto de independencia de la presencia y decisión humana es crítico y, en la práctica, se trata del uso de tecnologías capaces de utilizar la inteligencia artificial en la toma de decisiones, buscando así la optimización de toda la cadena de producción.

### **2.1 Tipos de Datos Disponibles**

Las máquinas de perforación con el sistema a bordo RCS tienen cuatro opciones de registro de datos disponibles en los formatos de datos IREDES (extensión XML) y texto (extensión txt).

- Registro MWD (medición durante la perforación) - incluye el registro/informe de eventos (anomalías) y el registro/informe de estado del equipo (perforación, locomoción, etc.); el registro se envía cuando el taladro se finaliza de perforar.
- Registro de Calidad - se aplica cuando se usa el sistema de posicionamiento global (GPS), en este caso, el archivo se genera al completar el taladro.
- Registro de Estado - muestra el estado operativo del equipo.
- Registro de eventos - Registra la entrada/salida del operador, operación, locomoción, nivelación, códigos de demora definidos por el usuario, consumibles y fallas de producción.

### **2.2 Tasa de Penetración (ROP)**

Se han realizado diversos esfuerzos para optimizar los parámetros operativos durante la perforación, buscando determinar la mejor combinación posible de rotación (RPM) y peso sobre la broca (WOB) en el proceso de perforación.

El objetivo principal es maximizar la tasa de penetración (ROP) mientras se minimiza el consumo de energía. Esta tarea es compleja, aunque esencial, debido a varios factores complejos limitan la velocidad de perforación, como la limpieza del fondo del taladro, las condiciones de la roca, el riesgo de atascos en la sarta de perforación, y los límites operacionales de las herramientas y máquinas.

Según Rocha et al. (2019), una estrategia para lograr una mayor precisión en la productividad es establecer un límite máximo de ROP, lo cual también es señalado por Barbosa et al. (2019).

Esta estrategia se enfoca en el uso de técnicas de aprendizaje automático para desarrollar

modelos más precisos y reportar resultados de manera eficiente. Además, es importante conocer cuál es la tasa máxima de avance obtenida con el modelo de perforadora seleccionado. La solución más directa consiste en determinar el par de fuerza correcto para el avance (WOB) y la rotación (RPM). Aunque a primera vista parece sencillo, esta tarea es bastante compleja, ya que involucra diversas variables que afectan directamente el ROP, tales como la tasa de flujo de aire, la rotación de la perforadora (RPM), el peso sobre la broca (WOB), el diámetro de la perforadora, entre otras (Bourgoyne et al., 2013). Por lo tanto, existe una fuerte tendencia a intentar mejorar el ROP modificando únicamente la fuerza aplicada sobre la broca (WOB).

Aadnoy et al. (2022) afirman que un ajuste inadecuado de los parámetros de perforación puede generar graves problemas en el proceso, provocando un desperdicio innecesario de energía. Este exceso de energía se disipa en forma de calor, ruido y vibraciones, las cuales afectan negativamente el proceso, ocasionando pérdidas de productividad, tiempos de inactividad no deseados en el equipo y pandeo de los tubos de perforación.

La falta de un modelo confiable para predecir el ROP se considera un obstáculo que dificulta el desarrollo sostenible del proceso de perforación de rocas. Existen pocos modelos adecuados para este propósito, y los disponibles tienen limitaciones que impiden su uso de manera universal, rápida y segura.

Para Maurer, en pruebas de laboratorio, concluyó que el aumento en la rotación de la herramienta de perforación, que genera un aumento en el ROP, solo es posible cuando existe un cierto peso en la broca; este entendimiento le permitió determinar una ecuación capaz de proporcionar la tasa máxima de penetración. Una vez determinado el límite superior (la capacidad máxima posible), se puede establecer un rango favorable de ROP que debe cumplirse durante el proceso de perforación. Este modelo de predicción de la tasa de perforación se muestra en la ecuación 1.

$$\text{Tasa de penetración predicha} = P_b \times R_B \quad (1)$$

Donde: ROP es la tasa de penetración (m/h),  $P_b$  es la profundidad de penetración del botón en la roca (metros) y  $R_B$  es la rotación de la perforadora (RPM).

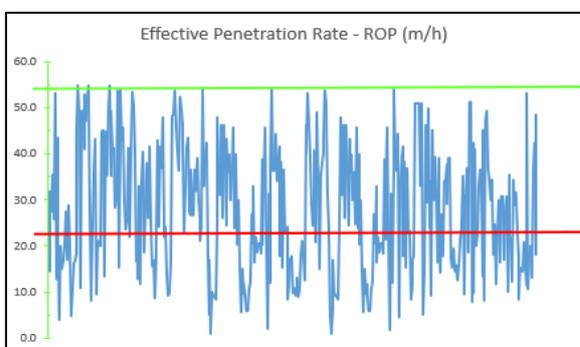
Los estudios muestran que el punto ideal de penetración en el botón, que permite una tasa de penetración máxima, se encuentra en el rango de 70% a 75% de su altura en la roca. Por lo tanto, se enfatiza que un valor máximo de WOB no necesariamente implica una ROP máxima, ya que es necesario mantener una distancia entre la cara de la perforadora y el macizo rocoso, de manera que se pueda realizar una limpieza eficiente, permitiendo la remoción de los residuos (grava) del fondo del taladro.

La Tabla 1 muestra los valores mínimos y máximos de la ROP estimada en función del tipo de perforadora utilizada en la mina (perforadora tricónica serie 60).

**Table 1.- Tasa de penetración estimada en función del tricóno utilizado**

Tricone Drill	Specified Rotation (RPM)	WOB Specified by diameter inches (KLb)		Estimated ROP (m/h)		Estimated Air Pressure (PSI)			
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
IADC	Button Height (mm)								
6	11.0	50	120	4	7	23.1	55.4	40.0	65.0

La Figura 1 muestra las tasas de penetración obtenidas durante el trabajo. Nótese que los límites superior e inferior coinciden con los valores mínimos y máximos estimados según la altura de los botones de la perforadora. El 71.5% de los valores de ROP están dentro del intervalo de confianza y el 28.5% se encontraban por debajo del valor mínimo estimado.



**Figura 1.- Tasa de Penetración Obtenida**  
**3. Metodología**

El presente estudio involucró las siguientes fases:

- Definición del área de estudio y del equipo a utilizar.
- Recolección de información.
- Pruebas.
- Análisis de datos.
- Resultados.

### 3.1 Local de estudio

Este estudio se realizó en una mina de hierro en Brasil, donde se encuentran litologías ricas en óxidos de hierro, con predominancia de itabiritos compactos (con contenido de hierro entre 40 y 50%), dolomitas ferruginosas y filitas hematíticas que constituyen un conjunto de formaciones ferríticas metamórficas.

### 3.2 Equipo de Perforación

Se utilizaron tres equipos de perforación Epiroc PV275D con un sistema de control a bordo llamado RCS (sistema de control de perforación). Este equipo es considerado básico en minería debido a su rendimiento y fiabilidad comprobados.

Estas perforadoras tienen una capacidad de carga de hasta 42.5 toneladas y pueden utilizar brocas o perforadoras tricónicas de hasta 311 mm de diámetro. Pueden perforar rocas de

varios tipos litológicos en minerales de cobre y hierro. La perforación puede alcanzar una longitud de 11.3 m en una sola pasada, o una profundidad total de 59.4 m en varias pasadas.

La plataforma de operación Rig Control System (RCS) ofrece capacidades de automatización escalables, ya que esta tecnología proporciona a las perforadoras diversas características de seguridad e interbloqueos, así como una base para agregar nuevas funcionalidades/opciones sin mayores esfuerzos. Pueden ser controladas por un operador a bordo utilizando opciones automatizadas como auto punzonado, auto nivelación y cambio automático de varillas de perforación, o bien operadas fuera de la máquina mediante el sistema de tecnología remota (BenchRemote).

El sistema de teleoperación permite que el mismo operador maneje hasta tres equipos simultáneamente, y es posible actualizarlo a un sistema de perforación autónomo con mínima interacción humana. La Figura 2 muestra el interior de la cabina de operación de la perforadora utilizada.



**Figura 2.- Interior de la cabina de operación**  
**PV275D**

### 3.3 Análisis de Datos

Para facilitar el análisis y la discusión, los datos se dividieron en seis bloques que corresponden exactamente a los seis frentes de trabajo diferentes donde fueron generados, de los cuales tres bancos de mineral estaban ubicados en coordenadas altimétricas (835, 850 y 865) y tres bancos estériles se ubicaron en coordenadas topográficas (868, 900 y 950). La Figura 3 ilustra la distribución de los taladros perforados en los frentes de trabajo y las técnicas de perforación utilizadas.

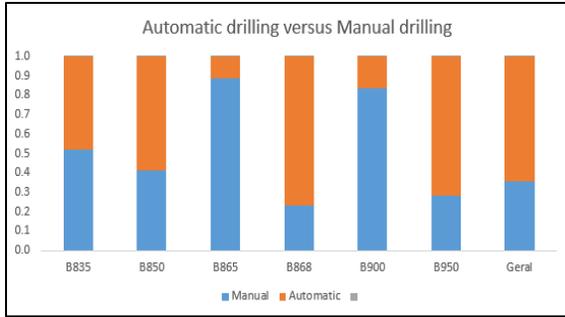


Figura 3.- Técnicas de perforación utilizada

#### 4. Resultados y Discusiones

En general, el sistema automatizado demostró ser más eficiente y mantiene una constancia

operativa en relación con una operación manual. Hay pocos estudios en la literatura sobre automatización en los procesos de producción minera; autores como Gustafson han publicado artículos en los que se evalúa la productividad en minería y se realizan comparaciones entre operaciones manuales y automatizadas.

En este trabajo, fue posible hacer una comparación entre la perforación manual y la automatizada, buscando un enfoque diferenciado con un sesgo orientado en base a siete variables (parámetros operativos) y enfocándose en el uso de energía específica mínima, según la tabla 2.

Parámetros	Acronym	Unity
Weight On the Bit	WOB	Kilo lbs. (pounds) - KLB
Rotation of the drill	RPM	Rotations per minute - RPM
Rate of Penetration	ROP	Meters per hour - m/h
Torque Rotation	TQR	Kilo lbs. (pounds) by force - KLB.F
Pounds of Air Pressure	PAR	Pounds by squared inches - PSI
Penetration of the Button	PEB	Percentage of the button height - %
Minimal Specific Energy	MSE	Mega pascal - Mpa

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos en relación con los parámetros de peso sobre la broca (WOB), rotación (RPM), tasa de penetración (ROP) y par de torsión (TQR). Desde

el punto de vista de la técnica operativa empleada, la ganancia de la perforación automatizada en términos de WOB fue del 18.7%.

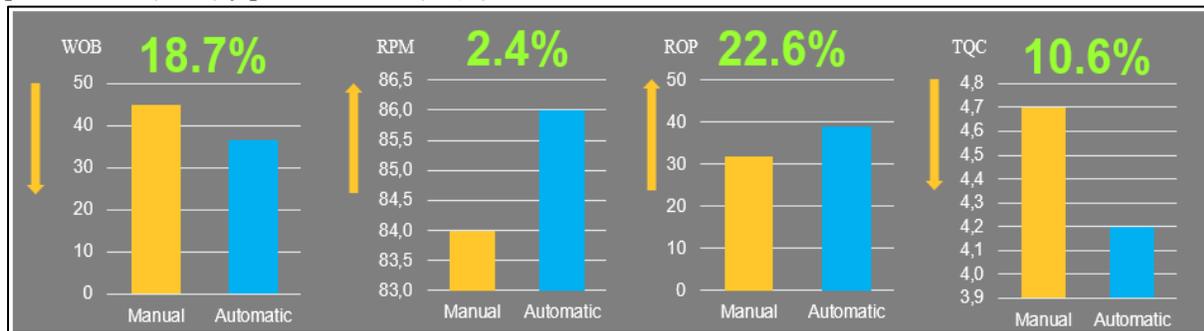


Figura 4.- Resultados obtenidos de los parámetros operativos WOB, RPM, ROP y TQR

El análisis de los datos de rotación de la broca (RPM) nos mostró una ganancia del 2.4% en el modo automático en comparación con el modo de perforación manual. La ganancia en la tasa de penetración (ROP) para la perforación automática frente a la manual fue del 22.6%. En cuanto a la reducción del par de torsión de

rotación, las ganancias representadas por la automatización fueron del 10.6%.

Los resultados consolidados referentes a los parámetros de presión de aire (PAR), penetración del botón (PEB) y la energía específica mínima (MSE) se pueden ver en la Figura 5.

En el modo automático, se observó una mejora del 1.9% en la presión de aire (PAR) en comparación con el modo manual durante el proceso de perforación. El punto ideal de penetración del botón (PEB) en la roca, el cual es capaz de proporcionar la máxima tasa de

penetración de la broca, se encuentra en el rango del 70 al 75% de la altura del botón. Esto significa que cuando el botón penetra a este porcentaje en la roca, el ROP tiende a alcanzar su valor máximo. La automatización logró una ganancia del 16.7% en la penetración del botón

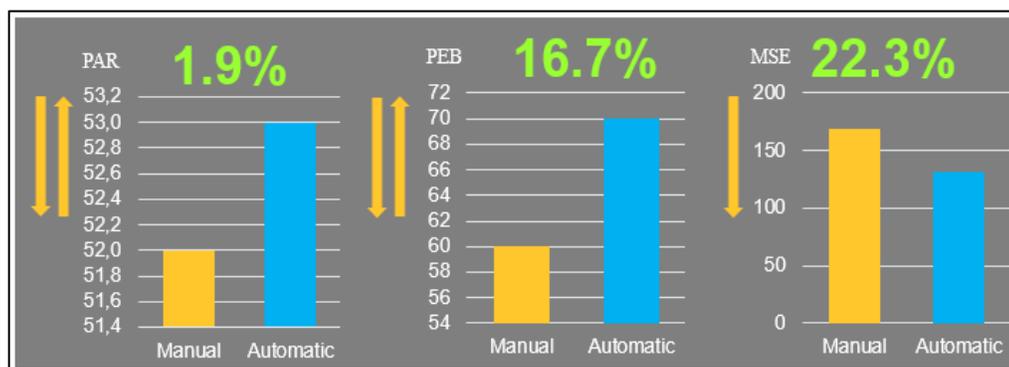


Figura 5.- Resultados obtenidos de los parámetros operativos PAR, PEB y MSE.

Autores como Teale propusieron metodologías más objetivas y precisas para evaluar el rendimiento del proceso de perforación. En 1965, Teale introdujo el concepto de energía específica mínima (MSE), además de la idea de alcanzar la máxima eficiencia cuando la energía utilizada por la sarta de perforación se acerca al valor de resistencia de la roca perforada. En otras palabras, la máxima eficiencia de perforación se logra cuando la energía aplicada en la broca es igual a la energía mínima necesaria para fragmentar la roca.

Este concepto sigue evolucionando, ya que otros autores han trabajado para reducir las variaciones derivadas del confinamiento de la roca y las incertidumbres operativas, con el fin de optimizar el proceso de perforación mediante el conocimiento preciso de esta variable. Los datos

obtenidos en la investigación indican que la perforación automatizada logró un incremento de eficiencia del 22.3% en términos de energía específica mínima empleada.

Al analizar la energía específica mecánica (MSE) mediante la aplicación individual de equipos de perforación en los seis tipos de litología donde se recopilaban los datos, se pueden observar las fluctuaciones en el consumo de energía debido a las variaciones en la dureza de la roca. Sin embargo, estas oscilaciones también dependen de los ajustes operativos utilizados y del desgaste de las herramientas de perforación. Es importante observar y comparar el gasto energético con el trabajo realizado, es decir, la tasa de penetración entregada, para evaluar la eficiencia operativa y energética del equipo.

La Figura 6 muestra el consumo de energía por metro perforado en el banco 835 (mineral) por las máquinas P51 y P53, que operaron tanto en modo de perforación manual como automático.

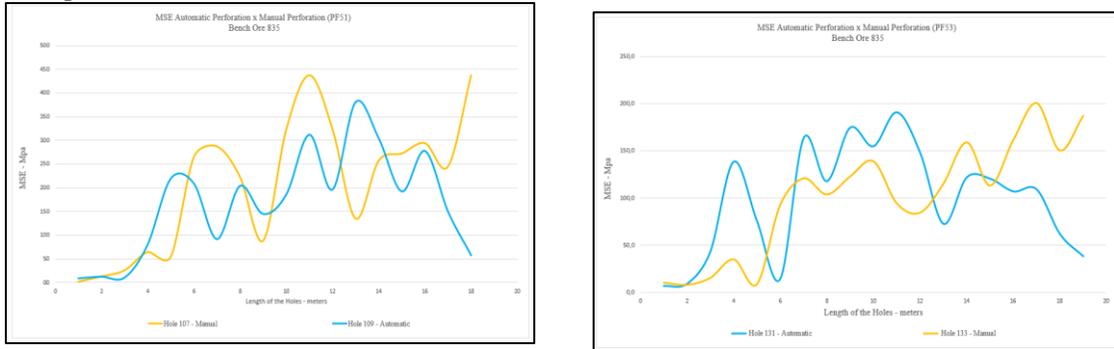


Figura 6.- MSE P51 y P53 en el banco 835 La Tabla 3 presenta una comparación directa entre el consumo medio de energía (MSE) y el trabajo realizado (tasa media de penetración - ROP) durante el proceso de perforación del banco 835. Tabla 3: Consumo de energía versus la tasa de penetración en el banco 835.

Banco	Litología	TAG Button	Profundidad del taladro (m)	Modo de operación	Parámetros Operacionales	
					MSE (Mpa)	ROP (M/h)
835	Ore					
Equipo	P51	107	16.0	Manual	208.0	30.7
		109	16.0	Automático	168.5	54.0
	P53	133	16.5	Manual	126.0	55.7
		131	16.0	Automático	98.0	88.6

Los datos de muestra del proceso de perforación en el banco 850 (mineral) pueden visualizarse a través de la Figura 7.

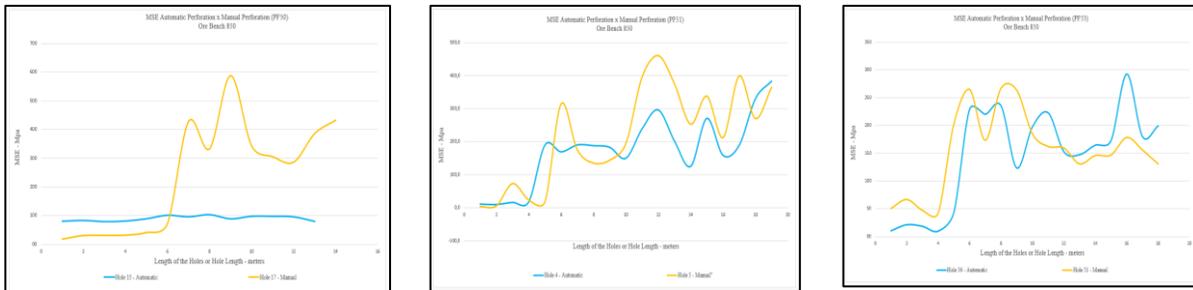


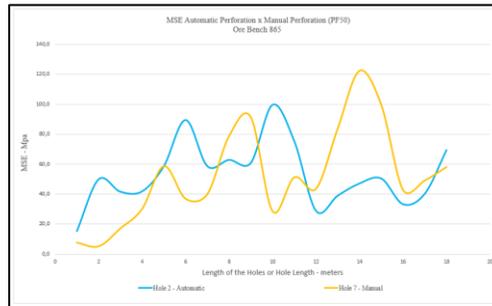
Figure 7.- MSE P50, P51 and P53 en el banco 850

La Tabla 4 muestra los datos de consumo medio de energía (MSE) y tasa media de penetración (ROP) obtenidos al perforar el banco 850.

**Tabla 4.- Energy consumption versus the rate of penetration bench 850.**

Banco	Litología	TAG Button	Profundidad del taladro (m)	Modo de operación	Parámetros Operacionales	
					MSE (Mpa)	ROP (M/h)
850	Mineral					
Equipo	P50	17	11.5	Manual	237.3	16.4
		15	10.5	Automático	183.8	35.6
	P51	5	17.0	Manual	218.7	41.9
		4	17.0	Automático	174.4	41.5
	P53	51	16.0	Manual	153.8	35.7
		56	16.0	Automático	146.5	53.0

El P50 fue el único equipo que operó en el banco 865, como se muestra en la Figura 8 y en la Tabla 5.

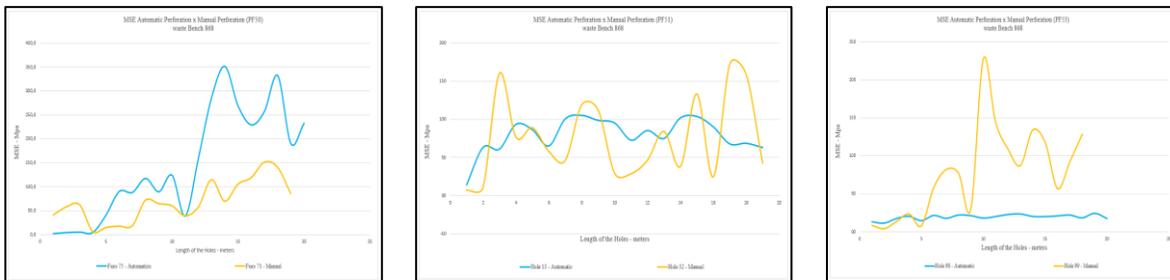


**Figura 8.- MSE P50 en el banco 865**

**Tabla 5.- Consumo de energía versus tasa de penetración en el banco 865.**

Banco	Litología	TAG Button	Profundidad del taladro (m)	Modo de operación	Parámetros Operacionales	
					MSE (Mpa)	ROP (M/h)
865	Estéril					
Equipo	P50	2	16.0	Manual	53.3	77.5
		7	16.0	Automático	52.4	112.0

La Figura 9 muestra las variaciones de la energía específica mecánica durante el proceso de perforación en el banco 868 (residuos).



**Figura 9.- MSE P50, P51 y P53 en el banco 868**

**Table 6.- Energy consumption versus rate of penetration bench 868.**

Banco	Litología	TAG Button	Profundidad del taladro (m)	Modo de operación	Parámetros Operacionales	
					MSE (Mpa)	ROP (M/h)
868	Ore					
Equipments	P50	71	16.5	Manual	68.3	78.2
		75	18.0	Automático	145.3	62.3
	P51	32	17.0	Manual	75.7	69.1
		13	17.0	Automático	79.3	44.4
	P53	99	16.0	Manual	77.7	74.6
		98	17.5	Automático	19.4	112.0

Las variaciones de la energía mínima específica durante la perforación del equipo P53 en el banco 900 (mineral) se pueden visualizar en la Figura 10. La Tabla 7 presenta la correlación entre MSE y ROP.

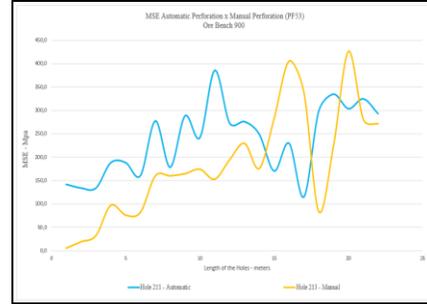


Figura 10.- MSE P53 en el banco 900

Table 7.- Consumo de energía versus tasa de penetración en el banco 900.

Banco	Litología	TAG Button	Profundidad del taladro (m)	Modo de operación	Parámetros Operacionales	
					MSE (Mpa)	ROP (M/h)
900	Esteril					
Equipments	P53	213	20.0	Manual	183.5	35.2
		211	20.5	Automatic	235.7	20.5

Finalmente, la Figura 11 presenta los valores de muestra de MSE y ROP obtenidos durante

la perforación en el banco 950 (estéril) realizados por los equipos P51 y P53.

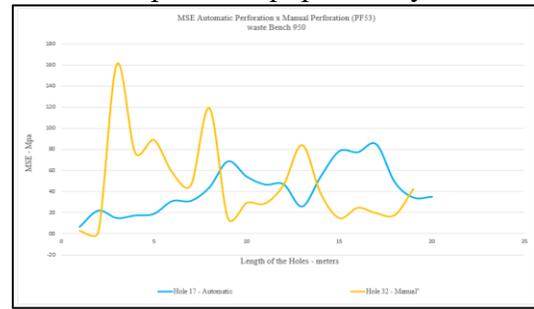
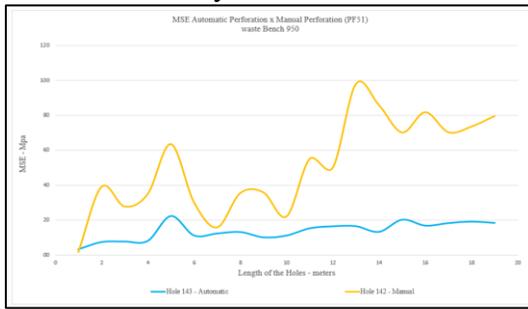


Figura 11.- MSE P51 y MSE 53 en el banco 950

Table 8.- Consumo de energía versus tasa de penetración en el banco 950.

Banco	Litología	TAG Button	Profundidad del taladro (m)	Modo de operación	Parámetros Operacionales	
					MSE (Mpa)	ROP (M/h)
950	Esteril					
Equipo	P51	142	16.5	Manual	51.8	107.5
		143	16.5	Automático	13.8	99.2
	P53	32	17.0	Manual	48.2	175.3
		17	18.0	Automático	41.9	105.6

## CONCLUSIONES

Con este trabajo fue posible demostrar la viabilidad del sistema automatizado para la perforación de roca, verificando que el uso y aplicación de nuevas tecnologías en las operaciones unitarias mineras, especialmente en la perforación, es un proceso posible, seguro, efectivo y sostenible, capaz de generar ganancias directas e indirectas para los procesos posteriores.

Podemos concluir que el proceso de perforación automatizada presentó una ganancia energética del 22.3% en comparación con la perforación manual. Por lo tanto, la búsqueda es obtener un mejor sincronismo entre los parámetros operacionales para lograr una tasa de penetración (ROP) deseada con el mínimo consumo de energía posible, es decir, la búsqueda de eficiencia en la perforación no es el fin del esfuerzo, sino más bien una búsqueda

interminable, ya que los procesos siempre pueden ser optimizados y mejorados.

## REFERENCIAS

1. Aadnoy B., Cooper I., Miska S., Mitchell R., Payne M. *Advanced Drilling and Well Technology*, Society of Petroleum Engineers, E.U.A., 2009.
2. ASHRAFI, S. B. et al. *Application of hybrid artificial neural networks for predicting rate of penetration (ROP): A case study from Marun oil field*. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 175, p. 604–623, 1 abr. 2019.
3. Atlas Copco. *Blasthole Drilling in Open Pit Mining*. Garland - USA: Atlas Copco Rock Drills AB; 2011.
4. E.P. Pfeleider, R.L. Blake. *Research on the cutting action of the diamond drill bit*. Mining Eng, 5 (1953), pp. 187-195.
5. E. Kabwe. “*Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy*,” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 523–533, 2018.
6. Ernest & Young global mining & metals center. *The business risk report Mining and metals 2014–2015*. Accessed on 21 August 2021. Available at: <https://miningforzambia.com>.
7. Frolov V. *Identifying core functions of asset management*. In: AMADI–ECHENDU, J. E. et al. *Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management*. Engineering Asset Management Review, 2010, Volume 1, Part II, DOI: 10.1007/978-1-84996-178-3-1.
8. Hany G., Salaheldin E., Ahmed A., Abdulazeez A. *Intelligent Prediction for Rock Porosity While Drilling Complex Lithology in Real Time*, Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2021, Article ID9960478, 12 pages, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9960478>
9. IREDES – International Rock Excavation Data Exchange Standards. Accessed on 03 July 2021. Available at: <http://www.iredes.org>.
10. Marklund S. *The comparison of automatic and manual loading in an underground mining environment*. Accessed September 10, 2021. Available at: <http://mining.sandvik.com>.
11. Navarro et al. *Blastability and Ore Grade Assessment from Drill Monitoring for Open Pit Applications*. Accessed on 19/06/21. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02354-2>.
12. Park J., Kim K. *Use of drilling performance to improve rock-breakage efficiencies: A part of mine-to-mill optimization studies in a hard-rock mine*. Int J Min Sci Technol 2020;30(2):179–88.
13. R. Altindag. *Estimation of penetration rate in percussive drilling by means of coarseness index and mean particle size*. Springer-Verlag (2004), pp.1-10.
14. Rafezi H., Hassani F. *Drilling signals analysis for tricone bit condition monitoring*. International Journal of Mining Science and Technology. Available online 19 January 2021. Accessed September 15, 2021. Available at: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>.
15. SOARES, C.; DAIGLE, H.; GRAY, K. *Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 34, p. 1225–1236, 1 ago. 2016.
16. Suraj Kumar, Rahul Talreja, V.M.S.R. Murthy. *Development of a drill energy utilization index for aiding selection of drill machines in surface mines*. International Journal of Mining Science and Technology, Volume 27, Issue 3, 2017, Pages 393-399. ISSN 2095-2686. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.03.002>.

Artículo recibido en: 12.10.2024

Artículo aceptado: 07.11.2024