



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE BROCAS
TRICÓNICAS DE ACUERDO A LA PRODUCTIVIDAD EN LA
UNIDAD MINERA DE TOQUEPALA”**

EXAMEN DE SUFICIENCIA DE COMPETENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR:

Bach: YAMEL ALFREDO QUISPE HUISA

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÙ

2019



DEDICATORÍA

A mi padre Bartolomé (†) y hermana Jhurema (†) que, a pesar de estar separados físicamente, siento que siempre están conmigo, aunque nos faltaron muchas cosas por vivir, estoy seguro que desde el cielo comparten la alegría de terminar esta etapa de mi vida como ellos siempre lo desearon.

A mi madre Aurelia y hermana Eudocia por ser los motores de mi vida profesional, por su cariño y apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida.

A mis sobrinos Brayan, Bayro y Jafet por ser mi motivación especial de desarrollo profesional y que este logro represente un estímulo para ellos en sus vidas.

Yamel Quispe



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano-Puno y especialmente a la Facultad de Ingeniería de Minas, que con experiencias y conocimientos implantaron una base sólida en mi formación como Ingeniero de Minas.

Al Centro Tecnológico Minero- Lima, por las enseñanzas prácticas para desarrollar habilidades y conocimientos en el área de Operaciones Mina.

Mi más profundo agradecimiento a la empresa Southern Perú, en especial a la Gerencia Mina de Toquepala, por brindarme la oportunidad al permitirme desarrollar mis prácticas profesionales en medio de brillantes profesionales de minería.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORÍA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 8

ABSTRACT..... 9

I. INTRODUCCIÓN..... 10

1.1. OBJETIVO GENERAL 11

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 11

II. MARCO TEÓRICO 12

2.1. REVISIÓN LITERARIA 12

III. MATERIALES Y MÉTODOS..... 13

3.1. PROTÓCOLO DE PRUEBAS 14

3.1.1. Protocolo N°01: 14

3.1.2. Protocolo N°02: 14

3.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE BROCAS 14

3.3. DESARROLLO DE PRUEBAS 17

3.3.1. Perforadora 12: 18

3.3.2. Perforadora 16: 19

3.3.3. Perforadora 19: 20

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 22

4.1. VAREL 23

4.2. TDC Y METRAJE:..... 23

4.3. VELOCIDAD DE PENETRACION 24



4.4. RYDER	25
4.5. TDC Y METRAJE:.....	25
4.6. VELOCIDAD DE PENETRACION:	26
4.7. EVALUACIÓN DE LA BROCA N°6:	27
4.8. EVALUACIÓN DE LA BROCA N°2:	27
4.9. COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN PROYECTADO PARA EL AÑO 2020	27
4.10. EVALUACIÓN FINAL DE PROTOCOLOS	31
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	35

Área: Ingeniería de Minas

Línea: Optimización de Costos Operativos en la Minería Superficial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 15 de noviembre 2019



ÌNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de brocas en prueba	18
Tabla 2. Brocas de prueba en DR12	18
Tabla 3. Brocas de prueba en DR16	20
Tabla 4. Brocas de prueba DR19	21
Tabla 5. Consolidado de costos de perforación Mayo 2019.....	22
Tabla 6. Consolidado de costos de perforacion - Junio 2019	22
Tabla 7. Consolidado de costos de perforación Julio 2019	23
Tabla 8. Resultados para la empresa Varel.....	23
Tabla 9. Resultados para la empresa Varel.....	25
Tabla 10. Evaluación de la broca N°2	27
Tabla 11. Plan de perforación 2020	28
Tabla 12. Costo total de perforación 2020.....	29
Tabla 13. Comparación de resultados Ryder VS Varel	31
Tabla 14. Evaluación de protocolos entre Ryder y Varel	32



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rendimiento de brocas en DR12.....	19
Figura 2. Rendimiento de brocas en DR16.....	20
Figura 3. Rendimiento de brocas en DR19.....	21
Figura 4. TDC y metraje alcanzado por Varel.....	24
Figura 5. Velocidad de penetración por Varel.....	24
Figura 6: TDC y metraje alcanzado por Ryder	26
Figura 7. Velocidad de penetración por Ryder.....	26

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

TDC:	Costo Total de perforació
PDC:	Costo parcial de perforación
MTDC:	Costo de perforación total modificado
ROP:	Velocidad de penetración



RESUMEN

El artículo presenta un análisis detallado del costo total de perforación con respecto al metraje alcanzado de brocas tricónicas de 12 ¼ para evaluar económicamente el más rentable entre dos proveedores, las pruebas se realizaron entre mayo y julio del 2019, donde se evaluaron resultados económicos entre la empresa Varel y Ryder en la Unidad minera de Toquepala. La finalidad de la investigación es proyectar el costo total de perforación primaria para el año 2020, de acuerdo al acero de mayor importancia económica en el proceso de perforación. Las pruebas se realizaron en tres perforadoras, cambiando las brocas de forma intercalada en la Fase 6 donde se tiene un tipo de roca que ha representado un reto en los últimos meses, se clasifica como Aglomerado Volcánico, caracterizado por la variabilidad en su comportamiento. Se utilizó el indicador TDC¹ para realizar un análisis comparativo donde se obtuvieron los siguientes resultados. El costo total de perforación de la empresa Ryder es de US\$ 13.44/m. con un promedio de metraje alcanzado por broca de 2,532 m. Asimismo, de la empresa Varel es de US\$15.22/m. con un promedio de metraje alcanzado de 1,918 m. El costo total de perforación proyectado para el 2020 es de US\$ 24,358,401.98. Para proyectar un costo con mayor certeza se requieren hacer pruebas en la Fase 5 y la Fase 4 del tajo.

Palabras Clave: Costo total de perforación, proveedores, Aglomerado Volcánico, metraje, Fase.



ABSTRACT

The article presents a detailed analysis of total drilling costs regarding meters reached of triconic drill bits 12 ¼ to evaluate economically the most profitable between two suppliers, tests were made between May and July 2019, where economic results were valued between the company Varel and Ryder in Toquepala mine. Investigation purpose is to project primary total drill cost by 2020, according to greater economic important steel in drilling process. Tests were made in three drilling machines, changing in form interspersed drill bits in phase 6 where there is a type of rock that has represented a challenge in recent months, it is classified as volcanic agglomerate, characterized by the variability in its behavior. TDC indicator was used to perform a comparative analysis where the following results were obtained. Ryder`s total drilling costs is 13.44 (US\$ / m) with meters average reached per drill bit of 2,532m. Also, Varel is 15.22 (US \$ / m) with meters average reached of 1,918 m. Total drilling cost projected for 2020 US\$24,358,401.98. In order to project a cost with greater certainty, tests are required in Phase 5 and Phase 4 of pit.

Keywords: Total drilling cost, suppliers, volcanic agglomerate, meters reached, phase.



I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la minería es la actividad económica con mayor tecnología e innovación con la finalidad de lograr sostenibilidad. Asimismo, utilizan dichos mecanismos para crear mayores oportunidades de implementación y mejoras continuas en sus procesos donde lo más importante es reducir sus costos sin afectar la productividad, para aumentar su rentabilidad económica.

En su tesis (Mata-Gutierrez, 2005) menciona que en México existe una gran oportunidad para que las operaciones de minado a cielo abierto realicen reducciones sustanciales en sus costos de operación e incrementan su productividad. El hacer realidad estos beneficios requieren una orientación enfocada al costo real de perforación. Además del ahorro en costos, se debe observar la velocidad de penetración, realizar una evaluación económica genera un flujo de ganancia adicional.

Umasi-Carlos (2013) recomienda usar el costo por TDC para evaluación económica deberá utilizar en futuros proyectos de perforación.

Southern Perú cuenta con el Sistema JMineOps que permite analizar la información a partir de los reportes que genera. Justamente el TDC es un indicador de perforación, que se encontró como una oportunidad de mejora por la innovación y tecnología disponible. El TDC incluye variables de perforación como velocidad de penetración, metraje alcanzado por broca, costo horario del equipo, costo de la broca, estos lo hacen el más importante dentro del proceso de perforación, por ello, Mata-Gutierrez (2005) recomienda ser incluida dentro de una evaluación real de costos.

Según Umasi-Carlos(2013), las evaluaciones económicas que se pueden lograr son muy significativas en cifras, no olvidar que se trata costo/metro.



El plan de perforación primaria del año 2020 en Toquepala es de 1,812,381.10 metros. Por lo tanto, una evaluación económica del indicador TDC a partir de análisis productivos entre dos proveedores lograra tomar la mejor decisión para la empresa proyectando el TDC anual 2020.

Según Roldan-Juarez (2012), los costos de perforación son más altos cuando la vida útil de las brocas es menor. Sin embargo, Rivera (2012), menciona que este se verá reducido cuando la velocidad de penetración se incremente, esta optimización tendrá un gran impacto dentro el TDC. En un proceso de perforación la supervisión es un factor importante en el cumplimiento de los objetivos y el personal de perforación se debe capacitar permanentemente (Sanchez-Villalta, 2017).

La presente investigación se centra en analizar las variables del proceso de perforación que nos permita realizar una evaluación económica eficiente del TDC entre Ryder y Varel para proyectar el costo total de perforación anual 2020 en la Unidad Minera de Toquepala.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proyectar el costo total de perforación primaria para el año 2020, de acuerdo al acero de mayor importancia económica en el proceso de perforación.

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Analizar los parámetros de perforación obtenidos por las brocas y su impacto en los resultados finales.



II. MARCO TEÓRICO

2.1. REVISIÓN LITERARIA

EL 2004 en la Unidad Minera de La Caridad en México (Mata-Gutierrez, 2005) realizó un análisis de brocas tricónicas de 12 ¼ con el objetivo de evaluar el posible comportamiento del presupuesto de perforación y gasto para el año 2005, las pruebas la realizaron con 4 empresas proveedoras donde se obtuvieron resultados con un TDC de 13 US\$/m y un plan de perforación de 439,552.54 metros, el TDC proyectado anual 2005 fue de US\$ 5, 817, 936.94. Por lo tanto, nuestra proyección de costo total de perforación 2020 no es algo nuevo, pero se encuentra aplicada a nuestra empresa con características y evaluaciones diferentes.

En la Unidad Minera Tintaya (Roldan-Juarez, 2012) hizo una evaluación de las brocas tricónicas de 12 y ¼ entre Atlas Copco y Sandvick, con la empresa Atlas Copco el costo unitario de su broca fue de US\$ 6,500 y el TDC fue de US\$ 12.20. Las brocas Sandvick tienen el mismo costo unitario de broca y resultaron con un TDC de US\$ 11.5/m. Estos resultados fueron propuestos para una evaluación económica en el proyecto de Antapaccay para la inversión en el departamento de perforación. Nuestra investigación sobre el TDC permite a las empresas que inician proyectos mineros, brindarles bases para evaluaciones económicas de inversión.

En un modelo de mina a tajo abierto de Cajamarca (Llaique-Nuñoncca & Sanchez Guevara, 2015) realizo un análisis de brocas de 10 5/8 en la que ha obtenido un TDC de US\$ 8.41/m en roca dura ya que relaciona más el TDC con el tipo de terreno durante la perforación aduciendo que se ha inyectado demasiada agua al taladro para minimizar el polvo, provocando que la broca sufra un desgaste prematuro.



III. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la Unidad Minera de Toquepala, la misma que se encuentra con tres fases en explotación en el presente año. Se determinó realizar las pruebas en la Fase 6 donde se tiene el mayor costo total de perforación en el tajo, esto debido a la presencia Aglomerado Volcánico, un tipo de roca que presenta variabilidad en su comportamiento geológico.

La empresa Southern Perú utiliza el sistema JMineOps, en la que se almacena información de operaciones, ingeniería, perforación y voladura, geología, geotecnia en mina. (Llaique-Nuñoncca & Sanchez Guevara, 2015) recomiendan mantener buenos registros de brocas utilizadas para facilitar un cálculo preciso de los costos totales de perforación y así evitar los errores en los cálculos. Asimismo, el área de perforación y voladura cuenta con un libro de rendimiento de aceros en cada una de las 13 perforadoras rotativas, este libro nos permite cotejar los parámetros, rendimientos, fechas, horas, series de perforación a diario.

La investigación se realizó desde un enfoque cuantitativo con un alcance correlacional, ya que se proyectará un costo total de perforación 2020 a partir de los resultados obtenidos. Asimismo, el diseño de investigación es de tipo experimental puro, puesto que se realizará análisis de resultados entre dos empresas proveedores de brocas tricónicas. Se realizaron en 3 perforadoras primarias, la técnica que se utilizara es el cambio de brocas intercaladas por empresa proveedora.

Los instrumentos para la recolección de datos empleado es un análisis de contenido cuantitativo, pruebas estandarizadas, datos secundarios e indicadores.



3.1. PROTÓCOLO DE PRUEBAS

En la Unidad Minera Toquepala para realizar pruebas en brocas se tienen protocolos que superar, cualquier empresa proveedora nueva entra con los siguientes objetivos:

3.1.1. Protocolo N°01:

Alcance un TDC menor en un 10% con respecto a la línea base de Toquepala que es US\$ 15.5/m. Por lo tanto, cualquier empresa proveedora de brocas tiene que llegar a un TDC de US\$ 13.95/metro como mínimo.

3.1.2. Protocolo N°02:

Superación de metraje a la base de Toquepala en un 10% con respecto a la línea base de Toquepala que es 2000 metros. Por lo tanto, cualquier empresa proveedora de brocas tiene que llegar a 2200 metros como mínimo.

La proyección del costo total de perforación 2020 se tiene que dar solo con la empresa que cumpla ambos protocolos.

3.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE BROCAS

Según el manual de (Sandvick Mining and Construction, 2006) el mejor medio de determinar cuál es la broca ideal a utilizar es hacer una evaluación de los aspectos económicos.

Las dos maneras más comunes de calcular el costo de perforación se conocen por las siglas PDC (Partial Drilling Cost = costo parcial de perforación) y TDC (Total Drilling Cost= costo total de perforación).

El costo parcial de perforación es el precio al que se adquirió la broca dividida por la distancia que perfora. El PDC puede expresarse por la fórmula:



$$\text{PDC} = \frac{\text{Precio de la broca (US\$)}}{\text{Distancia perforada (m)}}$$

El TDC es el PDC incluyendo la productividad en la ecuación. El TDC incluye el costo de la broca, el rendimiento por hora del equipo de perforación, pies o metros por hora y distancia perforada. La fórmula TDC se expresa normalmente por una de las dos ecuaciones siguientes:

$$\text{TDC} = \frac{\text{Precio de la broca (US\$)}}{\text{Distancia perforada (m)}} + \frac{\text{Costo de la perforadora por hora}}{\text{metros perforados por hora}}$$

Si el tiempo de perforación no es problema, el costo parcial de perforación (PDC) es probablemente la mejor forma de evaluar el funcionamiento de la broca. Sin embargo, si tiene poco tiempo para la perforación y está dispuesto a manejar la flota de perforadoras en razón de la productividad, el costo total de perforación (TDC) podría ser un buen criterio.

Asimismo, existe una manera más eficaz de evaluar el funcionamiento es por el uso de MTDC (Modified Total Drilling Cost=costo de perforación total modificado). El MTDC se expresa de la siguiente manera:

$$\text{MTDC} = \frac{\text{Costo de la broca (US\$)}}{\text{Metros perforada (m)}} + \frac{\text{Costo por hora de equipo modificado}}{\text{Velocidad de penetracion (ROP)}}$$

Hablar de la evaluación de los costos de perforación, es referirse a la velocidad de penetración y a los metros perforados por cada broca tricónica, ya que estos dos factores inciden fundamentalmente en la perforación. Debido a que existe una relación inversamente proporcional entre ambos, es imposible mejorar el rendimiento de uno sin afectar el otro. Para elegir una adecuada combinación de estos factores, se requiere un



patrón de medida en el cual, estén considerados todas las condiciones particulares de la operación, por lo que el mejor parámetro de evaluación está en función del costo métrico (Llaique-Nuñoncca & Sanchez Guevara, 2015).

La presente investigación se desarrollará en función de la siguiente formula del TDC que fue enunciada (Nguyen, 1996)

$$\text{TDC} = \frac{\text{B}}{\text{M}} + \frac{\text{D}}{\text{ROP}}$$

Donde:

TDC: Costo Total de Perforación [US\$/m]

B: Precio de la broca [US\$]

D: Costo horario del equipo de perforación [US\$/h]

ROP: Velocidad de penetración [m/Hora]

M: Metros perforados por el tricono [m]

El costo está en función de los metros perforados y de la velocidad de penetración obtenida en la perforación, es decir el ROP y M son inversamente proporcionales al TDC. Esto quiere decir que, a mayor velocidad de penetración, el costo total de perforación se reduce. El factor del costo horario de equipo está dado por costos directos como costos de mano de obra, costo de energía, costos relacionados con la mano de obra, costos de columna de perforación, costos de mantenimiento y reparación. Asimismo, costos indirectos como depreciación del equipo, seguros e impuestos, costo de supervisión, costos de inventarios (Llaique-Nuñoncca & Sanchez Guevara, 2015).



En la empresa minera Southern Perú, el costo horario de los equipos está dividido en 4 componentes claramente definidos.

1. Costo por mano de obra
2. Costo por operación
3. Costo por mantenimiento
4. Depreciación

Desde nuestro punto de vista existen otros aspectos para considerar en una evaluación económica de brocas como la propiedad del macizo rocoso, velocidad de barrido, capacidad del operador, supervisión.

3.3. DESARROLLO DE PRUEBAS

Las pruebas se realizaron de forma continua en la Fase 6 del tajo, se utilizaron 03 perforadoras primarias y se corrieron 10 brocas por empresa. (Roldan-Juarez, 2012) explica que la inadecuada aplicación de los parámetros de perforación ha ocasionado que el rendimiento de la broca tricónicas se encuentren por debajo de lo esperado, lo que genera un mayor costo de perforación. Por lo tanto, la investigación se realizó cumpliendo los procedimientos y parámetros de perforación, nivelación topográfica del mástil, lubricadores de broca operativos, pines de castillo en buen estado para garantizar la correcta verticalidad de la línea de perforación. Se realizaron alternadamente para garantizar igualdad de condiciones en las pruebas para ambos proveedores y obtener información más confiable.

Tabla 1.
Cantidad de brocas en prueba

PERFORADORA	MODELO	N° BROCAS
DR 12	CAT MD6640	12
DR 16	P&H 320XPC	4
DR 19	P&H 320XPC	4
TOTAL		20

Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Perforadora 12:

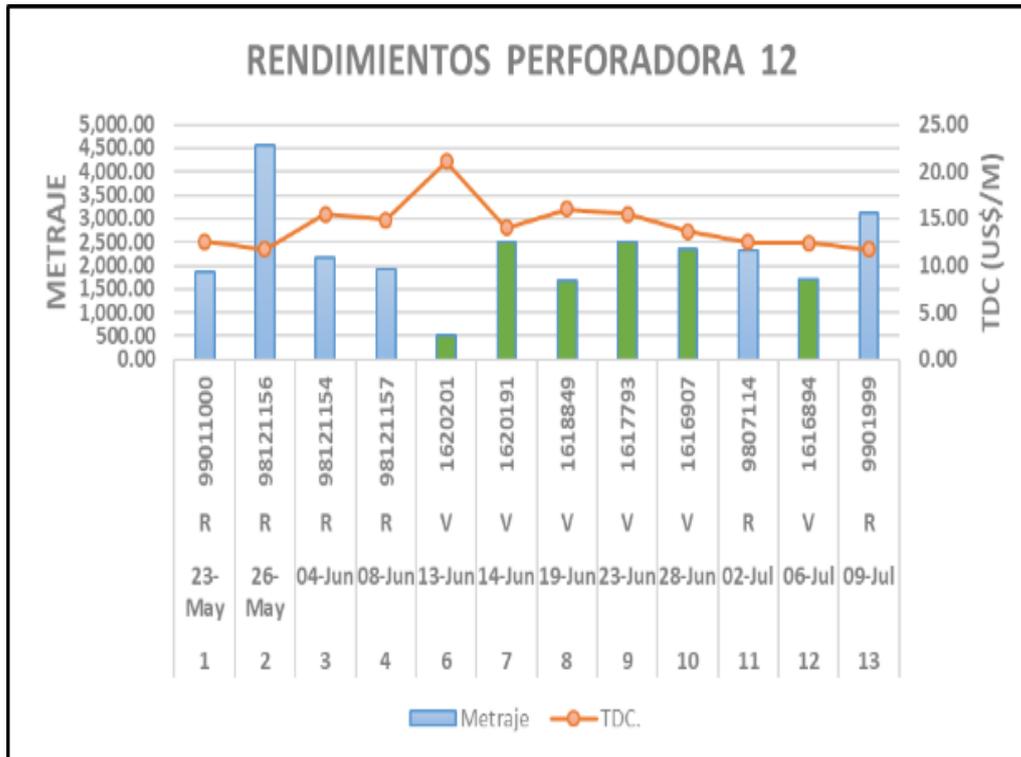
Las brocas estuvieron a prueba en forma intercalada por proveedor, en la Tabla 2 se muestra el orden cronológico de cambio.

Tabla 2.
Brocas de prueba en DR12

N°	INGRESO	SERIE	MARCA	Metraje	TDC.
1	23-May	99011000	Ryder	1,872.00	12.58
2	26-May	98121156	Ryder	4,545.00	11.70
3	04-Jun	98121154	Ryder	2,157.00	15.46
4	08-Jun	98121157	Ryder	1,932.00	14.88
6	13-Jun	1620201	Varel	502.00	21.09
7	14-Jun	1620191	Varel	2,519.00	14.02
8	19-Jun	1618849	Varel	1,664.00	16.04
9	23-Jun	1617793	Varel	2,495.00	15.47
10	28-Jun	1616907	Varel	2,350.00	13.64
11	02-Jul	9807114	Ryder	2,316.00	12.53
12	06-Jul	1616894	Varel	1,700.00	12.44
13	09-Jul	9901999	Ryder	3,132.00	11.70
Total				2,265.33	14.30

Fuente: Elaboración propia

Figura 1.
Rendimiento de brocas en DR12



Fuente: Elaboración propia

Se observa que falta la broca N° 5 que corresponde a la broca Ryder 98121153 que se retiró con 241 metros y quedó en stand-by para que la broca de prueba N° 6 Varel 1620201 entre en operación en dicha perforadora.

La broca Ryder N°5 que quedó en stand-by en la DR12, pasó a la DR 16 y se descartó con 2031 metros.

3.3.2. Perforadora 16:

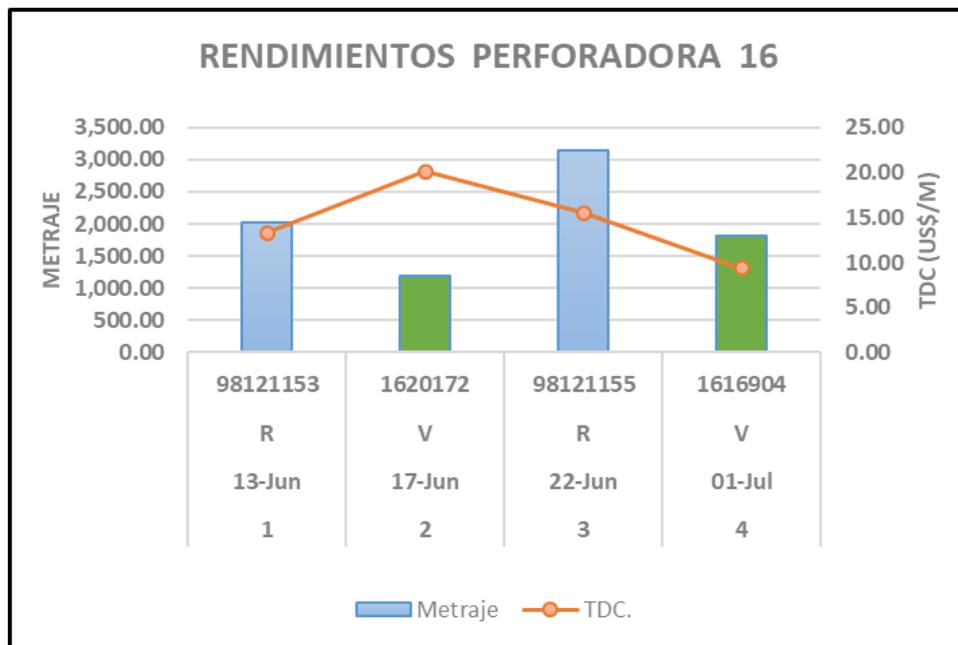
Las brocas estuvieron a prueba en forma intercalada por proveedor, en la Tabla 4 se muestra el orden cronológico de cambio.

Tabla 3.
Brocas de prueba en DR16

N°	INGRESO	RETIRO	MARCA	SERIE	Metraje	TDC.
1	13-Jun	17-Jun	Ryder	98121153	2,031	13.30
2	17-Jun	22-Jun	Varel	1620172	1,187	20.09
3	22-Jun	01-Jul	Ryder	98121155	3,149	15.52
4	01-Jul	07-Jul	Varel	1616904	1,804	9.33
Total					2,042.75	14.56

Fuente: Elaboración propia

Figura 2.
Rendimiento de brocas en DR16



Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Perforadora 19:

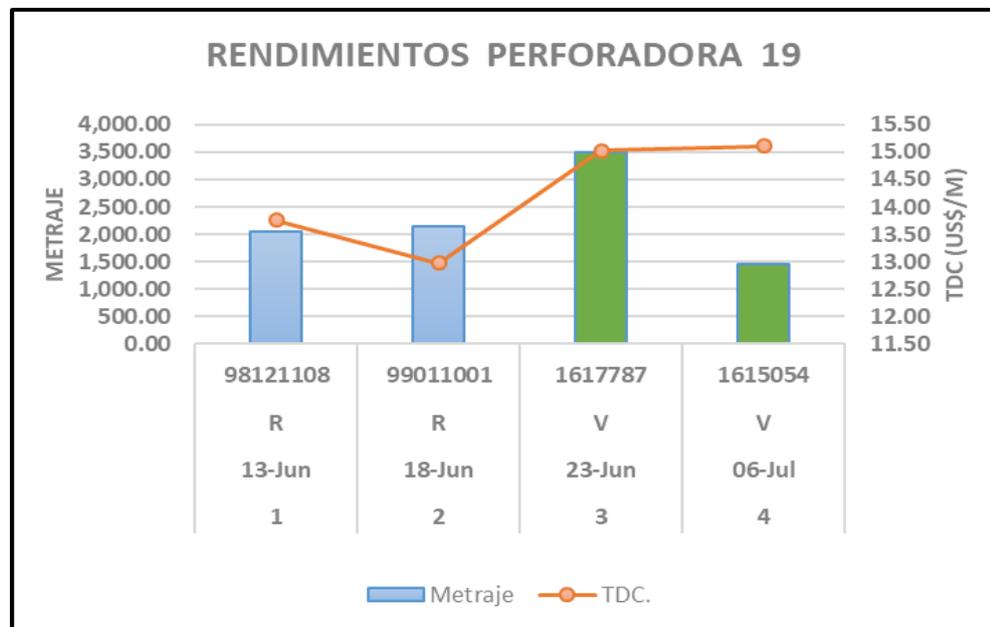
Las brocas estuvieron a prueba en forma intercalada por proveedor, en la Tabla 6 se muestra el orden cronológico de cambio, donde se muestra un promedio regular para la empresa Ryder.

Tabla 4.
Brocas de prueba DR19

N°	INGRESO	MARCA	SERIE	Metraje	TDC.
1	13-Jun	Ryder	98121108	2,038.00	13.75
2	18-Jun	Ryder	99011001	2,144.00	12.98
3	23-Jun	Varel	1617787	3,494.00	15.02
4	06-Jul	Varel	1615054	1,464.00	15.11
Total				2,285.00	14.22

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.
Rendimiento de brocas en DR19



Fuente: Elaboración propia

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado final las tablas de consolidados mensuales es el indicador TDC, si analizamos porque en los meses de Mayo y Junio el TDC es mayor a Julio, observaremos que el factor de mayor influencia es operación puesto que en los meses de Mayo y Junio tienen un costo de US\$ 1,055,687 y US\$ 1,037,883 respectivamente, lo que hace que el TDC mensual sea de US\$ 13.29/m y hasta US\$ 14.21/m. La evaluación económica de brocas y sus índices de productividad tiene influencia directa en el factor de operaciones

Tabla 5.
Consolidado de costos de perforación Mayo 2019

FECHA: MAYO 2019									
EQUIPO	C O S T O S					HORAS	METROS	COSTO/HORA	COSTO/MT.
	MANO DE OBRA	OPERACION	MANTENIMIENTO	DEPRECIACION	TOTAL	OPERACION	PERFORADOS	(USD)	(USD)
(1) Perf. P&H 120A	10,003	131,995	18,148	10,976	171,122	508	10,461	336.78	16.36
(0) Perf. P&H 100XP	11,714	-	14,588	39,792	66,094	-	-	-	-
(5) Perf. BE 49HR	54,140	264,142	391,698	203,178	913,159	2,600	63,064	351.20	14.48
(2) Perf. BE 49RIII	23,448	147,486	80,227	21,892	273,053	1,006	19,788	271.43	13.80
(1) Perf. QUBEX DR560	-	50,977	82,233	10,740	143,950	532	10,439	270.81	13.79
(3) Perf. QUBEX DR580	-	227,659	146,323	36,542	410,524	1,655	30,255	248.05	13.57
(5) Perf. P&H 320XPC	46,617	233,428	190,209	206,293	676,548	2,690	65,776	251.50	10.29
TOTAL	145,921	1,055,687	923,427	529,414	2,654,449	8,991	199,783	295.24	13.29

Fuente: Ingeniería Mina-Toquepala

Tabla 6.
Consolidado de costos de perforación - Junio 2019

FECHA: JUNIO 2019									
EQUIPO	C O S T O S					HORAS	METROS	COSTO/HORA	COSTO/MT.
	MANO DE OBRA	OPERACION	MANTENIMIENTO	DEPRECIACION	TOTAL	OPERACION	PERFORADOS	(USD)	(USD)
(1) Perf. P&H 120A	24,525	93,137	54,865	10,976	183,503	469	9,894	390.85	18.55
(0) Perf. P&H 100XP	10,880	166	2,498	39,792	53,336	-	-	-	-
(5) Perf. BE 49HR	61,267	268,123	415,508	205,530	950,429	2,524	60,573	376.51	15.69
(2) Perf. BE 49RIII	21,182	138,110	43,886	21,892	225,071	969	20,396	232.39	11.04
(1) Perf. QUBEX DR560	-	46,440	42,601	10,740	99,780	534	9,784	186.80	10.20
(3) Perf. QUBEX DR580	-	147,864	199,688	36,542	384,094	1,418	25,791	270.89	14.89
(5) Perf. P&H 320XPC	53,595	344,042	183,985	154,662	736,285	2,392	58,846	307.87	12.51
TOTAL	171,450	1,037,883	943,030	480,136	2,632,498	8,306	185,284	316.94	14.21

Fuente: Ingeniería Mina-Toquepala

Tabla 7.
Consolidado de costos de perforación Julio 2019

FECHA: JULIO 2019									
EQUIPO	C O S T O S					HORAS OPERACION	METROS PERFORADOS	COSTO/HORA (USD)	COSTO/MT. (USD)
	MANO DE OBRA	OPERACION	MANTENIMIENTO	DEPRECIACION	TOTAL				
(1) Perf. P&H 120A	9,094	74,709	9,325	10,977	104,105	428	8,967	243.05	11.61
(0) Perf. P&H 100XP	12,605	-	2,118	46,146	60,869	-	-	-	-
(5) Perf. BE 49HR	57,651	248,360	311,062	198,754	815,827	2,567	61,044	317.86	13.36
(2) Perf. BE 49RIII	23,866	105,960	97,396	19,214	246,436	994	18,924	247.98	13.02
(1) Perf. QUBEX DR560	-	52,817	27,235	10,740	90,792	576	11,269	157.72	8.06
(3) Perf. QUBEX DR580	-	107,903	78,166	36,542	222,611	1,509	27,846	147.52	7.99
(5) Perf. P&H 320XPC	45,934	201,037	223,573	202,713	673,257	2,589	65,567	260.02	10.27
TOTAL	149,150	790,787	748,874	525,086	2,213,897	8,663	193,617	255.57	11.43

Fuente: Ingeniería Mina-Toquepala

4.1. VAREL

Los resultados de las pruebas para las brocas de Varel, que utiliza el modelo RB67G que tiene un costo unitario de US\$ 3,673.75 por broca

Finalizaron con un TDC (Total Drilling Cost) de US\$15.2/metro, las brocas alcanzaron un metraje promedio de 1918 metros con una velocidad de penetración promedio de 28.61 (m/h).

Tabla 8.
Resultados para la empresa Varel

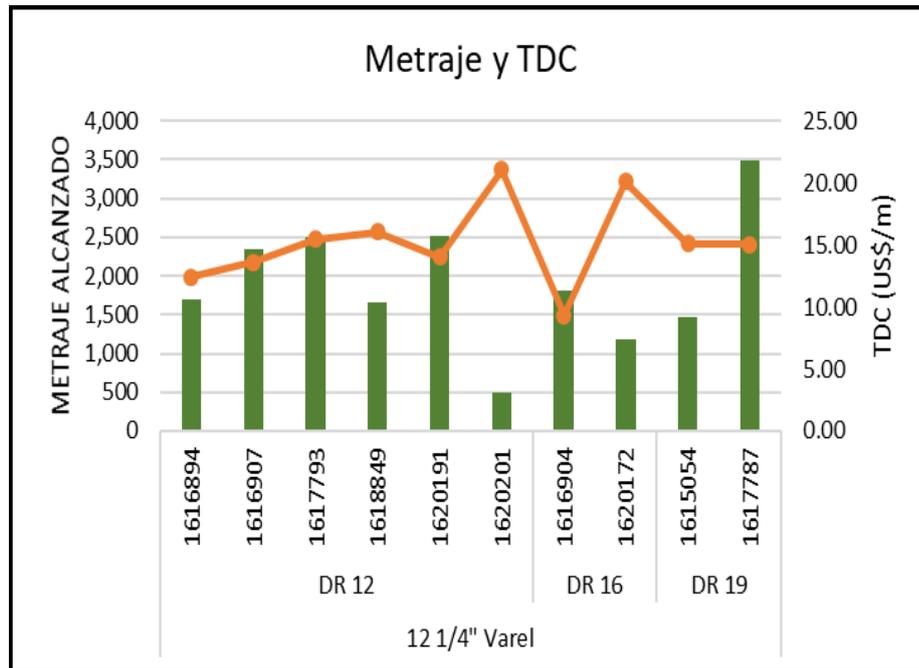
DR	INGRESO	RETIRO	SERIE	ROCA	TIPO DE ROCA	ROP (m/hr)	Metraje	PDC (US\$/m)	TDC (US\$/m)
DR 12	06-Jul	09-Jul	1616894	Duro	Agl-Volc, Aa	36.64	1,700	2.16	12.4
	13-Jun	14-Jun	1620201	Duro	Agl-Volc, Fill	27.33	502	7.32	21.1
	14-Jun	19-Jun	1620191	Duro	Agl-Volc	29.98	2,519	1.46	14.0
	19-Jun	23-Jun	1618849	Duro	Agl-Volc, Aa	27.22	1,664	2.21	16.0
	23-Jun	28-Jun	1617793	Duro	Agl-Volc, Fill	26.90	2,495	1.47	15.5
	28-Jun	02-Jul	1616907	Duro	Agl-Volc	31.18	2,350	1.56	13.6
DR 12 Total						29.88	1,872	2.70	15.4
DR 16	01-Jul	07-Jul	1616904	Duro	Agl-Volc, Aa	42.22	1,804	2.04	9.3
	17-Jun	22-Jun	1620172	Duro	Agl-Volc, Aa	18.12	1,187	3.09	20.1
DR 16 Total						30.17	1,496	2.57	14.7
DR 19	06-Jul	09-Jul	1615054	Duro	Agl-Volc, Aa	24.43	1,464	2.51	15.1
	23-Jun	04-Jul	1617787	Duro	Agl-Volc, Aa	22.04	3,494	1.05	15.0
DR 19 Total						23.24	2,479	1.78	15.1
Grand Total						28.61	1,918	2.49	15.2

Fuente: Elaboración propia

4.2. TDC Y METRAJE:

El mayor TDC es de US\$21.1/metro, esto debido a que la broca alcanzó un metraje mínimo de 502 metros.

Figura 4.
TDC y metraje alcanzado por Varel

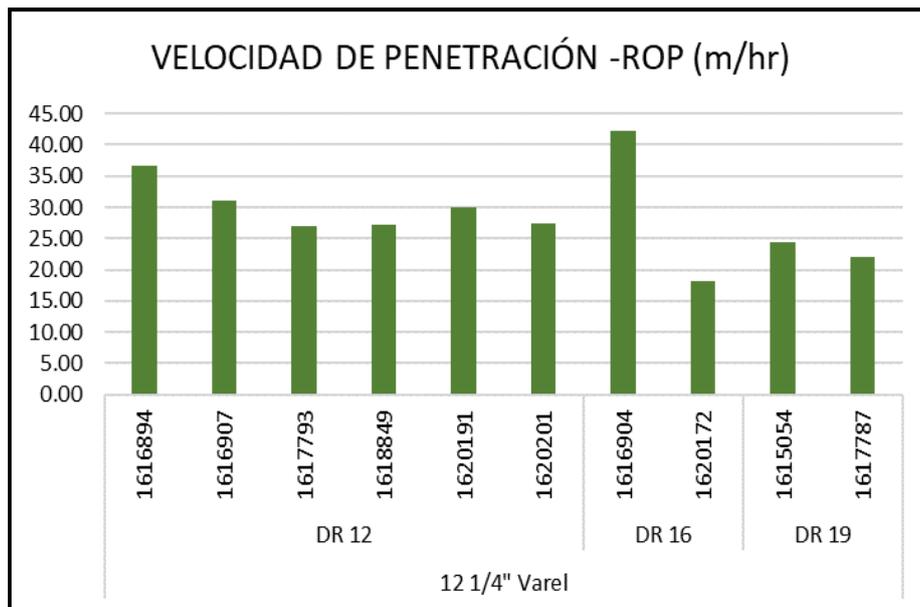


Fuente: Elaboración propia

4.3. VELOCIDAD DE PENETRACION

La mayor fue de 42.22 (m/h) que permitió reducir el TDC a US\$9.30/metro.

Figura 5.
Velocidad de penetración por Varel



Fuente: Elaboración propia

4.4. RYDER

Los resultados de las pruebas para las brocas de la empresa Ryder modelo CN70 que tiene un costo unitario de US\$ 3,750 por broca. Finalizaron con un TDC de US\$ 13.44/metro, las brocas alcanzaron un metraje promedio de 2532 metros con una velocidad de penetración promedio de 29.63 (m/h).

Tabla 9.

Resultados para la empresa Varel

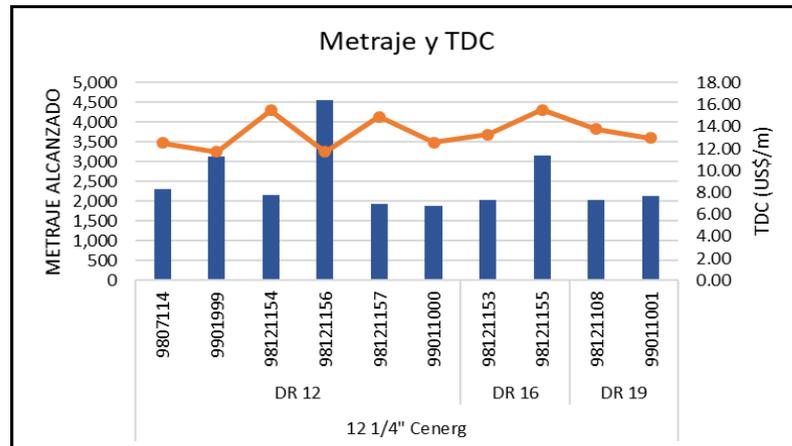
DR	INGRESO	RETIRO	SERIE	ROCA	TIPO DE ROCA	ROP	Metros_	PDC_	TDC_
DR 12	02-Jul	06-Jul	9807114	Duro	Agl-Volc, Tr, Fill	34.52	2,316	1.62	12.53
	04-Jun	08-Jun	98121154	Duro	Agl-Volc, Aa	27.43	2,157	1.74	15.46
	08-Jun	12-Jun	98121157	Duro	Agl-Volc	29.09	1,932	1.94	14.88
	09-Jul	15-Jul	9901999	Duro	Agl-Volc, Fill	35.84	3,132	1.20	11.70
	23-May	26-May	99011000	Duro	Agl-Volc	33.2	1,872	2.00	12.58
	26-May	04-Jun	98121156	Duro	Agl-Volc, Aa	34.63	4,545	0.83	11.70
		DR 12	Total				2,659	1.55	13.14
DR 16	13-Jun	17-Jun	98121153	Duro	Arg-volc	26.89	2,031	1.85	13.30
	22-Jun	01-Jul	98121155	Duro	Agl-Volc, Tr, Fill	21.48	3,149	1.19	15.52
			DR 16	Total				2,590	1.52
DR 19	13-Jun	18-Jun	98121108	Duro	Agl-Volc	25.84	2,038	1.84	13.75
	18-Jun	23-Jun	99011001	Duro	Agl-Volc, Aa	27.42	2,144	1.75	12.98
			DR 19	Total				2,091	1.79
Grand Total							2,532	1.60	13.44

Fuente: Elaboración propia

4.5. TDC Y METRAJE:

El mayor TDC es de US\$ 15.52/metro, esto debido a que la broca tuvo una baja velocidad de penetración de 21.48 (m/h).

Figura 6:
TDC y metraje alcanzado por Ryder

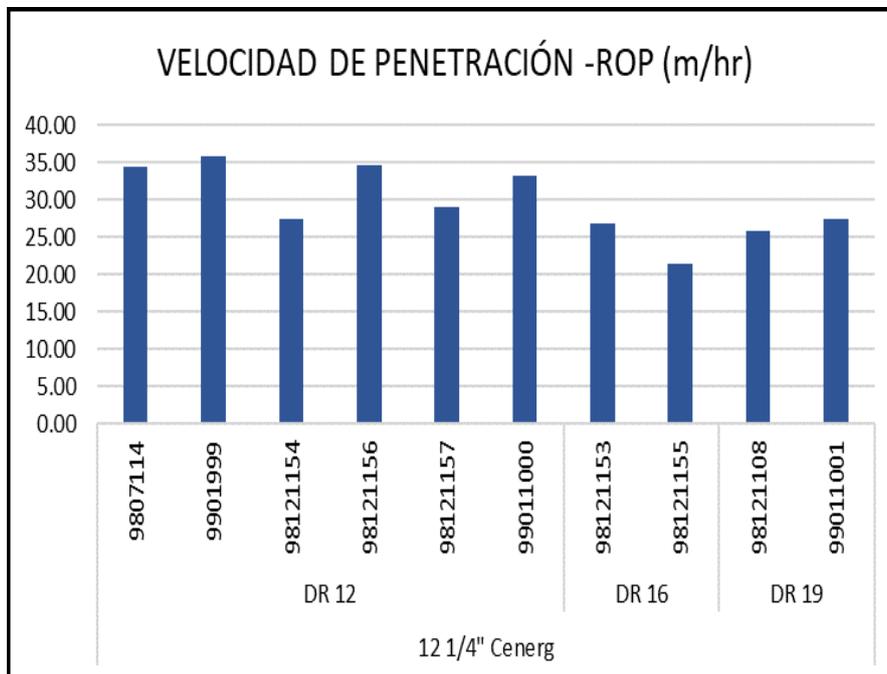


Fuente: Elaboración propia

4.6. VELOCIDAD DE PENETRACION:

La mayor velocidad de penetración fue de 42.22 (m/h) que permitió lograr el TDC mínimo de US\$ 11.70/metro

Figura 7.
Velocidad de penetración por Ryder



Fuente: Elaboración propia

4.7. EVALUACIÓN DE LA BROCA N°6:

El TDC es de US\$ 21.09, esto debido a la muerte prematura con 502 m. Las causas de su muerte se deben a la rotura del inserto en el área de la nariz, se observó problemas con la geometría del rodamiento de bolas y los puntos de contacto bajo los cuales se acoplan el rodamiento de bolas y la pista de rodadura del rodamiento de cabeza (Bonilla-Junior, 2019).

4.8. EVALUACIÓN DE LA BROCA N°2:

El TDC es de US\$ 11.70/m, esto debido a que llego a un 227% de rendimiento con respecto a la línea base del protocolo de metraje que tiene Toquepala. Las causas de su muerte son insertos rotos, cono trabado, desgaste de rodamientos.

Tabla 10.
Evaluación de la broca N°2

CENERG	
Serie	98121156
Modelo	CN70
Costo	3,750.00
Metraje	4545
Fecha de Ingreso	26-May
Fecha de retiro	04-Jun
Equipo	DR12
Estado de Broca final	
Insertos rotos fila de calibre de los 3 conos. C-3 trabado. Desgaste de rodamiento 5.	

Fuente: (Guillen-Nuñez, 2019)

4.9. COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN PROYECTADO PARA EL AÑO 2020

Para el año 2020, en la Unidad Minera de Toquepala se tiene planeado perforar 1,812,381.10 metros en la Fase 4, Fase 5, Fase 6 del tajo.

Tabla 11.
Plan de perforación 2020

ITEM	PRIMARIAS(m)	PRE-CORTE(m)
ENERO	156686.00	21566.00
FEBRERO	138375.70	23375.00
MARZO	145474.00	21208.14
ABRIL	148892.60	23552.10
MAYO	142639.10	26033.78
JUNIO	158238.00	22683.07
JULIO	157098.00	24827.92
AGOSTO	160001.10	24565.16
SETIEMBRE	149051.60	23201.62
OCTUBRE	145095.10	24514.70
NOVIEMBRE	158618.40	21271.49
DICIEMBRE	152211.50	22096.92
TOTAL	1,812,381.10	278,895.90

Fuente: Ingeniería Mina-Toquepala

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas y el plan de perforación primaria para el año 2020, el costo total de perforación usando brocas de Varel se estima

en US\$ 27,548,192.72 y usando brocas de Ryder se estima en US\$ 24,358,401.98. La diferencia es de US\$ 3,189,790.74 a favor de la empresa proveedora Ryder con las brocas de Cenerg modelo CN-70.

Tabla 12.
Costo total de perforación 2020

ITEM	TDC (USD/m)	Drilling Plan (m)	TDC 2020
TDC Ryder	13.44	1,812,381.10	\$24,358,401.98
TDC Varel	15.2	1,812,381.10	\$27,548,192.72
DIFERENCIA	1.76	-	\$ 3,189,790.74

Fuente: Elaboración propia

EL 2004 en la Unidad Minera de La Caridad en México (Mata-Gutierrez, 2005) realizó un análisis de brocas tricónicas de 12 ¼ con el objetivo de evaluar el posible comportamiento del presupuesto de perforación y gasto para el año 2005, las pruebas la realizaron con 4 empresas proveedoras donde se obtuvieron resultados con un TDC de 13 US\$/m y un plan de perforación de 439,552.54 metros, el TDC proyectado anual 2005 fue de US\$ 5, 817, 936.94. Por lo tanto, nuestra proyección de costo total de perforación 2020 no es algo nuevo, pero se encuentra aplicada a nuestra empresa con características y evaluaciones diferentes.

En la Unidad Minera Tintaya (Roldan-Juarez, 2012) hizo una evaluación de las brocas tricónicas de 12 y ¼ entre Atlas Copco y Sandvick, con la empresa Atlas Copco el costo unitario de su broca fue de US\$ 6,500 y el TDC fue de US\$ 12.20. Las brocas Sandvick tienen el mismo costo unitario de broca y resultaron con un TDC de US\$ 11.5/m. Estos resultados fueron propuestos para una evaluación económica en el proyecto de Antapaccay para la inversión en el departamento de perforación. Nuestra investigación



sobre el TDC permite a las empresas que inician proyectos mineros, brindarles bases para evaluaciones económicas de inversión.

En un modelo de mina a tajo abierto de Cajamarca (Llaique-Nuñoncca & Sanchez Guevara, 2015) realizo un análisis de brocas de 10 5/8 en la que ha obtenido un TDC de US\$ 8.41/m en roca dura ya que relaciona más el TDC con el tipo de terreno durante la perforación aduciendo que se ha inyectado demasiada agua al taladro para minimizar el polvo, provocando que la broca sufra un desgaste prematuro, se considera esto como malas prácticas operativas. Asimismo, recomienda intervalos de parámetros óptimos de perforación.

Los resultados de esta investigación son diferentes a la nuestra, puesto que estos se realizaron en una mina modelo mas no son datos reales ya que no tienen confiabilidad, validez, objetividad (Hernandez-Sampieri, Fernandez-Collado, & Baptista-Lucio, 2014).

En la Unidad Minera Cerro Verde (Umasi-Carlos, 2013) realizo análisis de brocas tricónicas de 12 ¼ donde la marca de brocas PDB muestra un mejor TDC de US\$4.03/m frente a empresa como Atlas Copco, Sandvick y el mismo Varel. En la misma unidad minera (Rivera, 2012) concluye que se tiene un TDC histórico de US\$ 6.91/m, llevando un estudio estadístico y controlando todos los parámetros de perforación los cuales nos brinden la máxima velocidad de penetración posible, se logrará una reducción del costo total de perforación considerable a US\$ 6.06/m, como es el caso del presente estudio, logrando reducir en un 12 % al costo total de perforación en comparación con el costo histórico. Esto significa que aplicando los estudios propuestos por este trabajo podemos obtener un ahorro de US\$ 408,000.00 en el TDC anual.

En ambos estudios realizados en Cerro Verde el TDC es mucho menor a nuestros resultados, esto debido a que no considera la depreciación del equipo, por lo tanto, el TDC no sería el real sino el modificado.

En la Unidad Minera El Toro (Calderon-Alayo, 2018), realizo un estudio sobre la optimización de costos en el proceso de perforación y voladura, donde cálculo los costos en función de toneladas métricas, por lo que nuestros resultados no se pueden discutir por la unidad del mismo. El costo unitario de perforación en dicha unidad es de US\$ 0.159/TM.

4.10. EVALUACIÓN FINAL DE PROTOCOLOS

Ryder Perú cumplió con los protocolos establecidos por Toquepala, el TDC que propone es de US\$ 13.44/m reduciendo en un 12 % y el metraje alcanzado que proponen es de 2530 superando en un 32%.

Tabla 13.

Comparación de resultados Ryder VS Varel

MODELO BROCA	N° Brocas	ROP (m/hr)	Promedio Metraje	Total Metraje	PDC (US\$/m)	TDC (US\$/m)
12 1/4" Cenerg	10	29.63	2,531.6	25,316	1.60	13.44
12 1/4" Varel	10	28.61	1,917.9	19,179	2.49	15.22
Grand Total	20			45,346		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14.
Evaluación de protocolos entre Ryder y Varel

Tipo de Terreno	Duro	
Marca	12 1/4" Varel	12 1/4" Cenerg
Precio (US\$)	3,673.75	3,750.00
Metraje Promedio	1,917.90	2,531.60
Metraje Total	19,179	25,316
TDC Promedio (US\$/m)	15.22	13.44
Protocolo 1	Si cumple (supera en un 12%)	
Protocolo 2	Si cumple (menor en un 32%)	

Fuente: Elaboración propia

Si Varel hubiese sido el evaluado en base a los rendimientos de Ryder, ya que estos proponen los resultados líneas arriba mencionadas, hubiese tenido que pagar una penalidad de garantía.

Aplicando la fórmula:

$$\text{Número de Brocasa reponer} = \frac{\text{Total de metros}_B \times (\text{TDC}_B - \text{TDC}_A)}{\text{Costo de Broca}_B}$$

Donde

A: Proveedor con rendimiento mayor

B: Proveedor con rendimiento menor



$$Brep = \frac{20,030 \text{ m} \times (15.55 - 13.58) \text{ US\$/m}}{\$3673.75}$$

Brocas a reponer por Varel = 11 brocas



CONCLUSIONES

Finalizada la evaluación económica, se concluye que el costo total de perforación anual proyectado para el año 2020 sería de US\$ 24,358,401.98, esto utilizando brocas tricónicas de 12 ¼ Cenerg modelo CN-70 de la empresa proveedora Ryder Perú.

Evaluando el TDC se llega a la conclusión que el factor de mayor importancia es la velocidad de penetración. Mientras aumente la velocidad de perforación el TDC se reduce incluso restándole importancia al metraje alcanzado por la broca. Sin embargo, el indicador TDC se hará más eficiente cuando se encuentre el punto de equilibrio entre la velocidad de penetración y el metraje alcanzado.

Para realizar un cálculo con mayor exactitud y afianzar los resultados obtenidos por Ryder Perú, se requiere realizar una segunda etapa de pruebas en la Fase 5 y Fase 4 del tajo. Asimismo, se recomienda investigar el punto de equilibrio de la broca entre la velocidad de penetración y el metraje alcanzado con una adecuada supervisión y capacitación del personal.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bonilla-Junior, L. (2019). *Reporte de analisis de muerte de brocas*. Perú.
- Calderon-Alayo, A. A. (2018). *Optimización de costos mediante modificación de variables controlables de perforacion y voladura en mina El Toro*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Guillen-Nuñez, L. (2019). *Informe mensual de perforacion y voladura en Toquepala, Setiembre 2019*. Peru.
- Hernandez-Sampieri, R., Fernandez-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. D. P. (2014). *Metodologia de la investigacion* (6th ed., Vol. 66). Mc Graw Hill Education.
- Llaique-Nuñoncca, A. A., & Sanchez Guevara, W. O. (2015). *Determinacion del costo total de perforacion para optimizar esta operacion unitaria en mina modelo a tajo abierto, Cajamarca-Peru,2015*. Universidad Privada del Norte.
- Mata-Gutierrez, L. A. (2005). *Elementos para la seleccion y evaluacionde brocas triconicas en la mineria Mexicana a cielo abierto*. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Nguyen,J.P.(1996).*Drilling*.Retrievedfrom,<https://books.google.com.pe/books?id=OgkyKivqAP4C&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22JeanPaul+Nguyen%22&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwif5dX457XIAhXKtVkKHanLDPUQ6AEIJzAA#v=onepa>
- Rivera, J. (2012). *Incremento de la velocidad de perforacion, controlando variables que afectan a la labor de perforacion en la Unidad Minera Cerro Verde*. Universidad Nacional San Agustin.
- Roldan-Juarez, A. (2012). *Parametros de perforacion y rendimiento de las brocas triconicas en el tajo abierto de la mina Tintaya y propuesta para el tajo abierto Antapaccay,2012*. Universidad Nacional Micaela Bastidas.
- Sanchez-Villalta, J. A. (2017). *Reducción de desgaste en el uso de brocas triconicas en la mina Toquepala* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sandvick Mining and Construction. (2006). *Brocas triconicas en la mineria de superficie* (i). Peru: Sandvick Peru.
- Umasi-Carlos, W. (2013). *Estudio de comparacion entre rendimientos en brocas de 12 1/4 en yacimientos skarn a tajo abierto para seleccion optima*. Universidad Nacional de San Agustin.