

TBM_s COMO ALTERNATIVA A LA P&V EN LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES

TBM_s like Alternative to D&B in Tunnels Excavation

MSc. Emiliano Mauro Giraldo Paredez*

RESUMEN

La “Perforación y Voladura” (P&V) en la excavación de túneles, viene siendo reemplazado por una variedad de tipos y tamaños de máquinas tuneladoras (TBM_s); por el avance tecnológico, exigencias de productividad y control ambiental. El presente estudio, pretende ser un marco de referencia para la selección del sistema más conveniente de excavación, bajo una longitud mínima que justifique su aplicación. Tanto la TBM MK 12 como la P&V se estudiaron en el túnel de aducción N° 4 del Proyecto Hidroeléctrico de Yuncan. Se demuestra que para la excavación de túneles de gran longitud, las TBM_s tienen mayores ventajas que la P&V, además de la mínima perturbación a la roca remanente, la rapidez de la excavación, mayor seguridad para el personal y maquinaria, inexistencia de gases de voladuras, menor área de excavación, entre otros.

Palabras claves: Minado continuo, máquinas tuneladoras, TBM, tunelería, túneles, perforación y voladura.

ABSTRACT

Drilling and Blasting (D&B) system applied to tunnels excavation is being gradually replaced for different types and sizes of tunnel boring machines (TBM_s). This change occurs due to technical advances, productivity demands and environmental restrictions. This research is addressed to select the most advantageous excavation system, considering the minimum excavation length in order to justify its applicability. Both MK 12 TBM and D&B systems were applied and performed in N° 4 headrace tunnel of Yuncan Hydroelectric Power Project. Experiences have shown that in excavation of long tunnels, TBM_s tunneling system is more advantageous than D&B system. Furthermore, the stability of rock around the excavation is minimum affected, fast excavation, more safety for personnel and equipment, no pollution of blasting and uniform excavation.

Key words: Continuous mining, tunnel boring machine, TBM, tunneling, tunnel, drilling and blasting.

I. INTRODUCCIÓN:

El autor considera que la fragmentación artificial de rocas es la actividad que más ha contribuido al progreso y desarrollo de la humanidad, al permitir aprovechar las riquezas del subsuelo, facilitar la comunicación y desarrollo de los pueblos y países, generación de energía, entre otros. La fragmentación de rocas en el pasado se hizo principalmente mediante voladuras, cuyos efectos negativos son ampliamente conocidos, a esto se sumó las exigencias de productividad y la preservación ambiental, factores que impulsaron la invención y desarrollo de máquinas cada vez más eficientes, como los minadores continuos y dentro de ello las TBM_s.

Tanto la TBM MK 12 como la P&V se estudiaron en el túnel de aducción N° 4, del Proyecto Hidroeléctrico de Yuncan, como se detalla en los capítulos II y III. En el capítulo IV se analiza los estudios de campo respecto a la TBM, para luego en el capítulo V hacer un análisis técnico – económico, sobre este sistema de excavación. En el capítulo VI, se presenta toda la información y análisis referente a la P&V, análogo al caso de la TBM. Finalmente en el capítulo VII se hace una discusión comparativa entre ambos sistemas considerando 40 ítems, demostrándose numéricamente que, para túneles de gran longitud, las TBM_s tienen mayores ventajas que la P&V.

El Perú como país emergente, requiere entre otras infraestructuras la construcción de grandes túneles carreteros, de aducción, trasvases, metros, etc. que propicien su desarrollo. Estos retos exigen la aplicación de tecnologías de punta en la excavación de rocas, como las TBM_s, que comparadas con la P&V tienen una serie de ventajas. No obstante que el presente estudio no abarca todas las variedades de “TBM_s” ni la gama de tamaños y aplicaciones, sus resultados servirán como referencia para la selección y aplicación de “TBM_s” en el Perú.

1.1 HIPÓTESIS: Las TBM_s tienen mayores ventajas que la P&V en la excavación de túneles de gran longitud.

* Magister en Ciencias, Profesor de la EAP de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: egiraldop@hotmail.com, egiraldop@unmsm.edu.pe.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

- a) Demostrar técnica y económicamente, el sistema más conveniente de excavación de túneles.
- b) Establecer, los criterios de selección de las TBMs, respecto a la P&V.
- c) Establecer las longitudes económicas de excavación, con uno u otro sistema.
- d) Mostrar la aplicación de la “TBM MK 12” en el Proyecto Hidroeléctrico de Yuncan.

II. MARCO TEÓRICO:

2.1 EL MACIZO ROCOSO: Durante la etapa de Estudio y construcción de un proyecto de excavación, es de vital importancia contar con la información necesaria sobre las características litológicas estructurales, de los esfuerzos e hidrología de un macizo rocoso (Alonso et al., 2007 y Hoek, 2006). Todo trabajo de ingeniería, requiere llevar las condiciones del macizo rocoso a valores numéricos, a fin de calcular y dimensionar una obra y sus etapas. Las propiedades del macizo rocoso son: a) Tipo de roca que conforma el macizo, b) Estructura del macizo rocoso, y c) Estado de conservación de la roca (Abril, E. G., 2007). La clasificación del macizo rocoso se agrupa en dos: Clasificación de Ingeniería (Terzaghi, Lauffer, Deere y Wickham) y clasificación geomecánica (Bieniawski y Barton) (Hoek, 2006). La clasificación de Bieniawski (RMR), toma en cuenta 6 parámetros (Abril, 2007 y Hoek et al. 2006). La clasificación de Barton o índice de calidad de túneles (Q), también toma en cuenta 6 parámetros (Palmstrom et al., 2006), pero como este índice estuvo orientado a excavaciones con perforación y voladura, para la aplicación de TBMs ha sido necesario reformularla incluyendo otras propiedades del macizo rocoso y el cortador.

2.2 FRAGMENTACIÓN DE ROCAS: Prácticamente es todo lo que ocurre sobre la corteza terrestre. El hombre fragmenta la roca básicamente con dos propósitos: a) aprovechamiento del material fragmentado y/o b) Disponer de un espacio libre en el seno un macizo rocoso. Se podría clasificar en mecánicas, físicas, químicas y naturales.

2.3 FRAGMENTACIÓN MECÁNICA DE ROCAS: El principio de fragmentación mecánica de rocas consiste básicamente en vencer su resistencia a la compresión (σ_c), ejerciendo empuje solo o acompañado de otros mecanismos como la rotación y/o percusión. Los índices de perforabilidad (DRI), desgaste de la broca (BWI) (Person P. et al., 1994 y Tapia C., 2006) y índice de duración de los cortadores (CLI), están basados en resultados de pruebas de laboratorio (Bilgin et al., 2003 y Bruland A., 1998). La DRI está en función del tipo de roca y el equipo aplicado. El concepto de excavabilidad del macizo rocoso (RME), fue estudiado inicialmente por Kirsten (1982), como una herramienta objetiva, para decidir el sistema de excavación a aplicar, P&V o TBM. Bieniawski y otros (2006), formularon el RME como el mejor modelo para decidir la aplicación de las TBMs y pronosticar su rendimiento. Lilly (1986, 1992), formuló el Índice de Volabilidad (BI), basado en 5 parámetros geomecánicos del macizo rocoso. Aduvire y Lopez Jimeno (1992), consideran que la propiedad geomecánica más determinante para estimar la volabilidad o ripabilidad, es la velocidad sísmica del macizo rocoso (luengo et al., 2004).

2.4 PERFORACIÓN: Se caracteriza por tener los siguientes elementos comunes: a) Una fuente energética. b) Un medio de transmisión de energía. c) Elementos de corte. d) Evacuación de la roca fragmentada. Es el método artificial más importante en sus distintas presentaciones y aplicaciones, que permite perforar la roca con diversas profundidades y diámetros. La perforación se clasifica en: a) percusión, b) roto percusión, c) rotativa y d) minado continuo.

2.5 LOS MINADORES CONTINUOS: Los minadores continuos, se clasifican en: Minadores continuos de superficie (rotopaldas, dragas, surface miner, etc.) y subsuelo (TBMs, mobile miner, roadheader, raise boring, shaft boring, borpak, y rozadoras). Las TBMs únicamente estuvieron orientadas a la excavación de túneles de uso civil, pero esto ha sido superado con la exitosa aplicación de la “TBM Robbins/Atlas Copco 156-275” en la mina Lower Kalamazoo de Magna Copper en Arizona, USA (Chadvik J., 1995; Janson H., 1995 y Cherie M., 1988).

2.6 MÁQUINAS TUNELERAS TIPO TBM: Diseñados para excavar túneles, galerías, rampas y cruceros (Wirth, 2000 y The Robbins Co., 1999). Los principales fabricantes actualmente, son: Robbins, wirth, Herrenknecht, Hitachi Ltd., Kawasaki Heavy Industries, Okomura, NFM Technologies y LOVAT Inc. Robbins clasifica a las TBMs, como: tipo Kelly, viga principal, doble escudo, simple escudo y “EPB TBM” (The Robbins Co. 1995, 1999). Para TBMs precisa hacer un análisis y evaluación de todos los factores que influyen en su operación y rendimiento, empezando por la geología a fin de elegir la máquina más apropiada (Giraldo, 2009).

III PROYECTO HIDROELÉCTRICO DE YUNCAN Y LA MÁQUINA TUNELERA TBM ATLAS COPCO JARVA MK 12

El proyecto hidroeléctrico de Yuncan está ubicado en el distrito de Paucartambo, provincia y Dpto. de Pasco (Perú) y se construyó para incrementar en 130 MW de potencia eléctrica a la red nacional, aprovechando la caída de agua de los ríos Huachón y Paucartambo. Las obras civiles (lote T-1) fueron ejecutadas por la Asociación SKANSKA, COSAPI y CHIZAKI (SKACUCHI). Para la excavación de los tramos largos de los túneles, se tuvo previsto utilizar

2 TBMs, Atlas Copco FORO 900S (3,50 m de diámetro); y TBM Atlas Copco Jarva MK12 (4,10 m de diámetro) (Giraldo, 2009).

3.1 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO:

La clasificación del macizo rocoso para los fines de la excavación y sostenimiento en el Proyecto Hidroeléctrico de Yuncán, se hizo considerando 3 factores: INTEMPERISMO, DUREZA y ESPACIAMIENTO DE LAS JUNTURAS, como: “A”, “B”, “CH”, “CM”, “CL” y “D” (Giraldo, 2009).

Figura 1 Unidad de accionamiento de la TBM MK 12



3.2 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LA TBM ATLAS COPCO JARVA MK 12:

Este tipo de TBM consta básicamente de 2 secciones, sección de fijación o estacionaria y la sección de trabajo o móvil (Robbins 1999). **La sección de fijación**, consta del cuerpo principal, 4 mordazas (grippers) y la pata delantera. Su función de esta sección es soportar todo el peso de la máquina y transferir las reacciones del torque y el empuje a la roca durante la excavación. La pata delantera está ubicado debajo del cuerpo, en el mismo plano que los grippers delanteros, haciendo una “T”. **La sección de trabajo** consta del tubo de torque fijado al portarrodaje, y la unidad de accionamiento (Fig. 1), y el transportador de escombros. El portarrodaje, soporta el rodaje principal al cual se monta el cabezal. El tubo de torque tiene una sección cuadrada y se desplaza pasante en el cuerpo principal sobre cojinetes de fricción y transfiere vía el cuerpo principal a los grippers y éstos a la roca, las reacciones del torque del cabezal. Los cilindros de empuje unen la sección de fijación con la de trabajo e impulsan su movimiento contra el frente de excavación produciendo la trituración de la roca.

Fuente: Elaborado por el autor

3.3 PRINCIPALES ESPECIFICACIONES DE LA TBM ATLAS COPCO JARVA MK 12:

DIÁMETRO DEL CABEZAL	4100 mm (con discos nuevos)
RODAJE PRINCIPAL	Doble rodillo ahusado
CABEZAL	
Capacidad instalada	1000 Kw
Velocidad de rotación – RPM	12,2 RPM
Torque	783 kNm (79 850,34 kg m)
Empuje recomendado del cabezal	7209 kN, máxima para continua operación
Tipo de cortador	Disco Robbins, cuña de traba de 432 mm
Disposición de cortadores de 17”	4 centrales (2 discos mellizos), 18 frontales y 5 cantoneras
Carga recomendable por cortador	267 kN (27 226,26 Kg)
Empuje recomendado del cabezal	7209 kN (735 116,15 Kg)
Carrera (stroke)	1500 mm
CONFIGURACIÓN DEL ACCIONAMIENTO	
Motores principales, número/tipo	250 Kw x 4 motores AC = 1000 Kw
Reducción, engranaje planetario	30,736:1 planetario de 2 etapas
Piñón/engranaje anular, $Z_p / Z_{rg} =$	21 / 83 <u>3,951:1</u>
Reducción total	121,482:1
SISTEMA HIDRÁULICO	
Presión máxima del Sist. hidráulico	345 bar (34,5 Mpa)
Máxima presión normal de trabajo	276 bar (circuito de empuje)
REMOCIÓN DE ESCOMBRO	
Transportador (conveyor)	Ancho de faja 600 mm
Velocidad de la faja transportadora	0 – 2,4 m/s, mando hidráulico
Distancia de retracción del transportador	4 200 mm
SISTEMA ELÉCTRICO	
Diseñado para suministro de energía de	7 200 V / 60 Hz
Circuito eléctrico del motor principal	660 V, 3 fases, 60Hz
Otros circuitos de motores eléctricos	460 V, 60 Hz
Iluminación y tomacorrientes	120 V, 60 Hz
Sistema de control PLC	24 V DC
Transformadores	2 x 630 kVA, 6 000 V / 660 V
	1 x 600 kVA, 7 200 V / 400 V
PESO DE LA MÁQUINA	190 Tons
Longitud de TBM + transportador primario	15,30 m.

IV ESTUDIO DE LA TBM MK 12 EN YUNCAN

En este capítulo se detalla todos los parámetros y factores que intervienen en el funcionamiento de la TBM MK 12, su operación, manejo y efectos de su funcionamiento. Asimismo, se analiza la velocidad de corte y el ciclo de excavación. También se determina el rendimiento de la TBM y los elementos de corte, entre otros aspectos.

4.1 DESPLAZAMIENTO DEL EQUIPO: La TBM se desplaza por la acción de pistones hidráulicos, dispuestos como mordazas, patas y cilindros de avance. Los 4 pistones de avance con una carrera de 1,50 m, empujan al cabezal contra la roca. Las mordazas están dispuestas adecuadamente en el cuerpo de la TBM para fijarla contra las paredes laterales del túnel, evitando su viraje por el alto torque que ejerce el cabezal, están provistas de zapatas curvas para acoplarse a la excavación. Las patas delanteras soportan el peso de la parte delantera de la TBM, haciendo una configuración de una “T” con las mordazas. Las 2 patas posteriores van fijadas en la parte inferior de la caja de engranajes y soportan el peso de la parte posterior de la TBM.

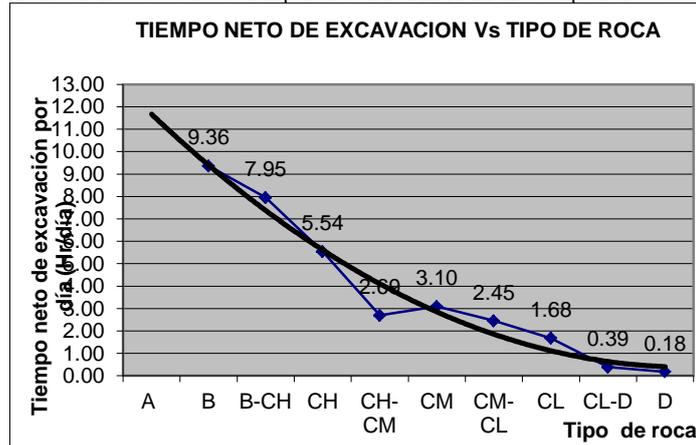
4.2 ESTUDIO DE TIEMPOS Y MOVIMIENTOS: Para este propósito, se establecieron una serie de formatos, entre otros: Reporte del Operador, Reporte Mecánico, Actividad Horaria de la TBM. Durante el estudio se pudo identificar al menos 50 factores que afectaban la operación de la TBM. El tiempo total por metro de avance varía de acuerdo al tipo de roca, como ilustra el cuadro 1.

Cuadro 1: Tiempo de excavación por metro (Hr/m) en función del tipo de roca.

ACTIVIDAD	TIPO DE ROCA								
	B	B-CH	CH	CH-CM	CM	CM-CL	CL	CL-D	D
CAMBIO DE CORTADORES	0,018	0,085	0,052	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000
DEMORAS OPERATIVAS	0,052	0,026	0,021	0,000	0,094	0,222	0,044	0,599	0,682
EXCAVACION	0,393	0,401	0,376	0,224	0,350	0,451	0,597	0,374	0,568
INSPECCION DEL CABEZAL	0,084	0,074	0,085	0,021	0,034	0,011	0,053	0,000	0,000
REINICIO DEL CICLO	0,114	0,101	0,135	0,044	0,114	0,201	0,180	0,235	0,873
REPARACION ELECTRICA	0,103	0,177	0,243	0,116	0,025	0,140	0,384	1,869	4,545
REPARACION MECANICA	0,193	0,303	0,270	0,026	0,054	0,173	1,075	1,267	2,545
SOPORTE DE ROCA	0,033	0,043	0,349	1,528	1,900	3,022	5,336	16,272	56,818
TIEMPOS MUERTOS	0,017	0,017	0,100	0,042	0,101	0,191	0,865	2,654	10,377
TOTAL (Hr/m)	1,008	1,228	1,631	2,000	2,725	4,409	8,534	23,270	76,409

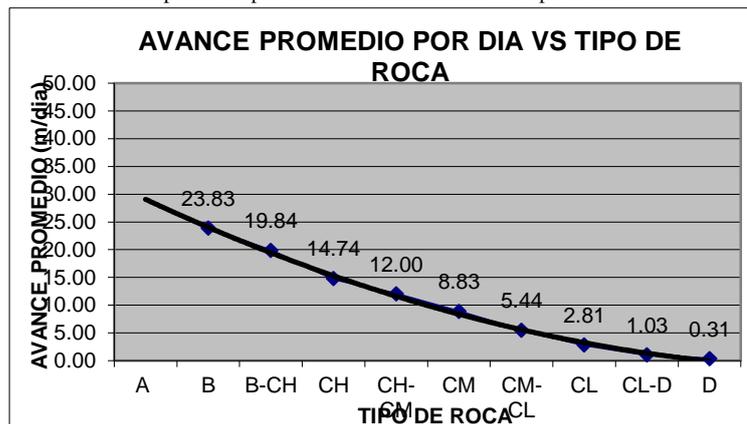
Fuente: Elaborado por el autor

Gráfico 1: Horas de excavación por día con la TBM MK 12 Vs. tipo de roca.



Fuente: Elaborado por el autor

Gráfico 2: Avance promedio por día con la TBM MK 12 Vs. tipo de roca.



Fuente: Elaborado por el autor

Figura 2: Almacén de discos de corte



Fuente: elaborado por el autor

4.3 VELOCIDAD DE CORTE O AVANCE DE LA “TBM MK 12” EN YUNCAN: La producción de la TBM estuvo afectado entre otros por factores geológicos y las frecuentes paralizaciones por diversos motivos. Se hizo un análisis del tiempo neto de excavación, tiempo de sostenimiento de roca, velocidad de penetración, penetración por giro, presión de empuje del cabezal y el tiempo total por metro de avance. El tiempo neto de excavación ilustra el gráfico 1, donde puede destacarse que cuanto más auto soportante fue la roca, este tiempo se hacía mayor. El avance promedio por día de la TBM, en distintos tipos de terreno se resume en el gráfico 2.

4.4 CORTADORES PARA LA TBM MK 12 EN YUNCAN: En Yuncan se probaron distintos tipos de discos de acero de 17”, entre ellos los HD-3/4” y simple AM-5/8”, HD-5/8”, HD-1/2”, AM-5/8” y XR-5/8”. Estandarizándose el uso de los discos HD-3/4” y AM-3/4”, los que ilustra la Fig. 2. Los cortadores de mayor desgaste fueron las cantoneras, cuyo rendimiento fue 97,08 m de túnel en promedio. Los cortadores frontales en promedio alcanzaron 375,56 m y los centrales 441,84 m de túnel. (Giraldo, 2009)

V ANÁLISIS TÉCNICO-ECÓNOMICO DE LA EXCAVACIÓN CON LA “TBM MK 12”

Este análisis se realiza a base de los resultados obtenidos en el capítulo IV, siendo la roca tipo “B” (avance promedio por día 23,83 m).

Para el análisis económico se ha supuesto un túnel de 10 km de longitud, con la finalidad de determinar los años que demandaría su excavación, para simular un flujo de caja y evaluar el valor actual neto (VAN) para los 8 primeros años del proyecto. La inversión estimada en la TBM MK 12, incluyendo instalaciones fue de USD 10 073 341. La vida útil de las TBM 15 años o 20 000 m de excavación. El costo de los cortadores en promedio fue 106,444 \$/m.

5.1 ANÁLISIS DE COSTOS POR METRO DE AVANCE: Para este cálculo, además de la inversión, se ha considerado todos los requerimientos para la adecuada operación de la TBM. Con un avance promedio de 23,83 m/día, resulta 1 369 \$/m, sin los costos de sostenimiento, revestimiento, ambientales, gastos generales, entre otros.

5.2 LONGITUD ECONÓMICA DE EXCAVACIÓN CON LA TBM MK 12: Las consideraciones para el presente análisis, fueron: inversión en el sistema de USD 10 073 341, costos totales de operación estimado en USD 679,942 \$/m, deducido para diferentes longitudes de túnel de 1 000 m á 20 000 m. obteniéndose una longitud económica de excavación para la TBM MK 12 de 6 500 m de túnel.

5.3 ANALISIS ECONÓMICO: Considerando la roca tipo “B” y suponiendo que la generación de energía se daría inmediatamente después de concluida la excavación de los 10 Km de túnel en 1,35 años, siendo el avance promedio de 23,83 m/día, operando 26 días por mes, el avance por mes y año resultó respectivamente, 619,45 m y 7 433,40 m. Análogamente, se estimó un ingreso bruto por la generación de energía de 60 147 360 \$/año, sin deducir los gastos operativos y distribución, para luego hacer un análisis de flujo de caja para los primeros 8 años del proyecto, obteniéndose un valor actual neto (VAN) de USD 232 896 721.

VI ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA EXCAVACIÓN CON P&V

El presente estudio se realizó en el mismo túnel de aducción N° 4 en roca tipo “B”. El análisis se hizo asumiendo la excavación de 10 km de túnel en “D” de 4,10 x 4,05 m, como ilustra la Fig. 3. El equipo de perforación fue el jumbo hidráulico Atlas Copco Rocket Boomer 282 de dos brazos, el diámetro de perforación 45 mm, profundidad promedio de taladros 2,85 m. Para las voladuras se emplearon básicamente dinamitas semexsa 65 de distintas dimensiones. El cuadro 2 presenta los promedios de los parámetros de voladura en el túnel N° 4 de Yuncan. Los accesorios de voladura empleados fueron Noneles TECNEL de período corto y largo, cordón detonante de 5 y 10 g/m, mecha de seguridad y fulminante común N° 8. El carguío del escombro se hizo con el cargador frontal LIEBHERR L 550 2plus2, con cuchara de 5 m³, siendo los equipos de transporte camiones VOLVO NL 12 con tolva de 12 m³ de capacidad (2 camiones).

Cuadro 2: Promedios de los parámetros de voladura durante Abril y Mayo de 2001 en Yuncan

Mes	Num. de disparos por guardia (disp/Gdia)	Prof. de taladros (m)	Avance por disparo (m)	Taladros por disparo (tal/disp)	CARGA EXPLOSIVA POR TIPO DE TALADRO (kg/disp)					Tiempo de carguío y disparo (Hr/disp)
					Zapater.	Cortes	Ayuda	Cuadrad.	TOTAL	
Abril	2,13	2,73	2,65	56,19	17,64	28,81	42,77	22,51	111,74	0,93
Mayo	1,47	2,96	2,82	58,00	31,75	49,09	80,36	20,85	182,05	0,970
Total	1,80	2,85	2,73	57,10	24,70	38,95	61,56	21,68	146,89	0,781

Fuente: Elaborado por el autor

6.1 ESTUDIO DE TIEMPOS DE EXCAVACIÓN CON P&V: Este estudio se llevó a cabo a partir de los reportes de las diferentes actividades que se desarrollaron, entre ellos, perforación, voladura, ventilación, desquince, limpieza, topografía, servicios auxiliares u otros tiempos. El cuadro 3 presenta los promedios obtenidos durante los meses de Abril y Mayo de 2001, así como el número de disparos por guardia.

Cuadro N° 3: Tiempos promedios de de las unidades operativas por disparo (Abril y Mayo 2001).

PROMEDIOS	Núm. Disp. Por Guardia (disp/Gdia)	TIEMPOS POR UNIDADES OPERATIVAS (min/disp)									Total horas por disparo (Hr/disp)
		Perfor.	Carguío y disparo	Vent	Desq	Limp	Topog	Servicios auxiliares	Otros	Total	
Abril	2,13	92,27	35,56	33,63	33,67	90,26	30,38	17,08	22,70	355,55	5,93
Mayo	1,47	132,36	58,21	31,91	32,00	126,00	34,09	6,23	38,49	459,29	7,65
Total	1,80	112,32	46,88	32,77	32,83	108,13	32,23	11,65	30,59	407,42	6,79

Fuente: Elaborado por el autor

6.2 INVERSIÓN EN EQUIPOS E INSTALACIONES: La inversión en equipos para este sistema está en función de la longitud del túnel, por el incremento de unidades de transporte al profundizar la excavación, La inversión para 1000 m y 20 000 m sería respectivamente USD 1 595 001 y USD 3 155 014.

6.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA EXCAVACIÓN DEL TUNEL N° 4 CON P&V: El costo de perforación y voladura por metro de avance bajo los parámetros antes indicados se estimó en 438,566 \$/ma. El costo de carguío por metro 37,980 \$/ma, El costo de transporte varía de acuerdo a la longitud del túnel, tal es así que para 1000 m y 20000 m varía entre 27,223\$/ma y 381,123\$/ma, respectivamente. El costo total por metro de avance varía entre 694,027 \$/ma y 1047,927 \$/ma para 1000 m y 20000 m de túnel, respectivamente. Luego del análisis se obtiene que la longitud económica sería 2 500 m de túnel.

6.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA EXCAVACIÓN CON P&V: Asumiendo una longitud de 10 km de túnel en roca tipo "B", previamente se determinó los años que demandaría su excavación, con avance promedio de 9,14 ma/día. Asumiendo 26 días de operación por mes, se determinó el avance por mes y año de 237,76 m y 2 853,09 m, respectivamente. Con estos resultados, se determinó el costo de operación por kilómetro y año. El ingreso bruto anual por generación de energía es lo mismo que para la TBM, es decir, 60 147 360 \$/año, con lo cual se hizo el flujo de caja para los 8 primeros años del proyecto, estimándose un VAN de USD 142 895 247.

VII ANÁLISIS Y DISCUSIÓN ENTRE LA "TBM MK 12" LA "P&V"

Se ha considerado 40 parámetros comparativos, detallándose los más importantes a continuación.

7.1 SECCIONES DE LA EXCAVACIÓN: El diámetros de excavación con TBMs varía entre 2 y 16 m; mientras que con P&V se puede superar los 30 m (cavernas). La forma geométrica de la excavación con TBMs es únicamente circular, mientras que con P&V es muy variable a lo ancho y alto.

7.2 EQUIPO E INSTALACIONES NECESARIAS: La TBM es un solo equipo que realiza simultáneamente el corte, carguío y transporte; mientras que en P&V se requieren equipos de perforación, carguío y transporte. La tensión de corriente para el caso de las TBMs es mayor que para la P&V.

Figura 3: Jumbo hidráulico perforando en el túnel de aducción N° 4.



Fuente: Elaborado por el autor

7.3 ASISTENCIA TÉCNICA Y EL PERSONAL NECESARIO: Las TBMs son equipos complejos y de gran envergadura que requieren de asistencia técnica especializada. Por otro lado, el personal requerido para la operación de la TBM es menor que para la P&V.

7.4 VELOCIDAD DE EJECUCIÓN DE LA EXCAVACIÓN: El avance con P&V resultó 9,14 m/día y con TBM 23,83 m/día en roca tipo “B” (160% más de avance). Permitiendo recuperar la inversión en menor tiempo. El cuadro 4, ilustra que para los 8 primeros años del proyecto hidroeléctrico se tendría un ingreso adicional bruto de USD 90 001 474 como VAN, al aplicar TBM.

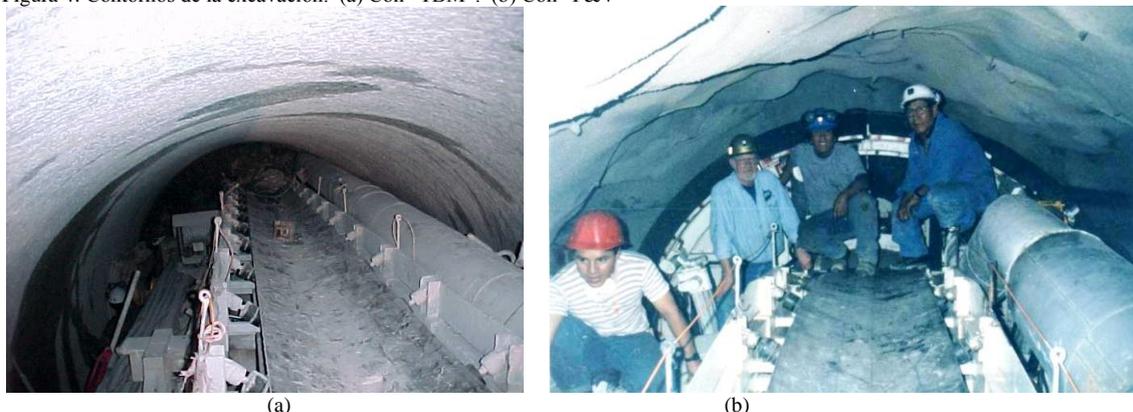
Cuadro 4: Valor actual neto (VAN) comparativo para TBM y P&V para túnel de 10 Km.

AÑO	FLUJO (USD)		Factor de actualización	Valor actual neto, VAN (USD)	
	TBM	P&V		TBM	P&V
0	-10 073 341	-2 315 000	1,000	-10 073 341	-2 315 000
1	-5 439 535	-1 840 416	0,909	-4 945 032	-1 673 105
2	38 019 831	-1 960 668	0,826	31 421 348	-1 620 387
3	60 147 360	-2 080 920	0,751	45 189 602	-1 563 426
4	60 147 360	29 054 297	0,683	41 081 456	19 844 476
5	60 147 360	60 147 360	0,621	37 346 778	37 346 778
6	60 147 360	60 147 360	0,564	33 951 617	33 951 617
7	60 147 360	60 147 360	0,513	30 865 106	30 865 106
8	60 147 360	60 147 360	0,467	28 059 187	28 059 187
TOTAL				232 896 721	142 895 247
INGRESO ADICIONAL RESPECTO A P & V				90 001 474	0

Fuente: Elaborado por el autor

7.5 CONTORNO DE LA EXCAVACIÓN: El contorno de la excavación con “TBMs” es prácticamente liso (Fig. 4a), no hay presencia de protuberancias o rocas colgantes como en el caso de la excavación con “P&V” que ilustra la Fig. 4b.

Figura 4: Contornos de la excavación. (a) Con “TBM”. (b) Con “P&V”



Fuente: Elaborado por el autor.

7.6 SOBRE EXCAVACIÓN Y PERTURBACIÓN A LA ROCA REMANENTE: Como ilustra la Fig. 6 a, la sobre excavación con TBMs es prácticamente nula, salvo en rocas fracturadas se podría considerar un 5 %; en P&V varía entre 25 – 35%. La perturbación de la roca remanente con la TBM es prácticamente nula.

7.7 SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO DE LA EXCAVACIÓN: El costo de sostenimiento, está en función del tipo de roca. Como ejemplo en roca tipo “CM” en el túnel N° 4 en Yuncan, el espesor del revestimiento fue con TBM fue 0,30 m, mientras que con perforación y voladura fue 0,60 m.

7.8 GENERACIÓN DE GASES: No existen gases nocivos por el funcionamiento de las TBMs; mientras que en P&V las emanaciones son abundantes.

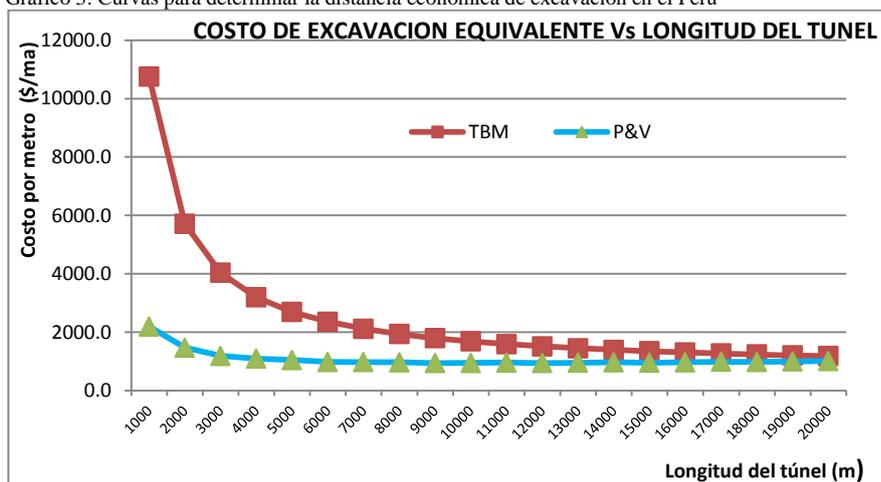
7.9 COSTOS: El resumen de costos por metro de excavación muestra el cuadro 5. La diferencia de costos entre TBM y P&V se reduce para túneles de gran longitud.

Cuadro N° 5: Costo por metro de excavación (\$/ma)

Costo por metro de excavación (\$/ma)	TBM	P&V
Costo de propiedad	688,98	137,00
Costo de operación	679,94	281,80
Costo de voladura	0,00	438,57
TOTAL	1 368,92	857,37

Fuente: Elaborado por el autor

Gráfico 3: Curvas para determinar la distancia económica de excavación en el Perú



Fuente: Elaborado por el autor

7.10 LONGITUD ECONÓMICA DE EXCAVACIÓN: El gráfico 3 ilustra las longitudes económicas de excavación con TBM y P&V, es decir, 6500 m y 2500 m, respectivamente.

7.11 SELECCIÓN DEL SISTEMA MAS CONVENIENTE DE EXCAVACIÓN DE TUNELES: Para seleccionar el sistema más conveniente de excavación, primero se estableció una “ESCALA DE PONDERACIÓN” ilustrada en el cuadro 6, con la cual se calificó cada uno de los 40 ítems considerados en el cuadro 7, demostrándose que la TBM aventaja a la P&V en 89,85 puntos (54,8 % más conveniente).

Cuadro N° 6: Escala de valores y ponderación

Escala de valores	Ponderación
Muy importante	10
Importante	8
Medianamente importante	6
Poco importante	2

Fuente: Elaborado por el autor

Cuadro N° 7: Análisis y evaluación de la TBM y la P&V, para seleccionar el sistema más conveniente de excavación.

a) PARÁMETROS TÉCNICO – OPERACIONALES

N°	PARAMETROS DE EVALUACIÓN DESCRIPCIÓN	Valores/ Apresiasión		Puntuación		Pond.	Calificación	
		TBM	P&V	TBM	P&V		TBM	P&V
1	Sección de la excavación del túnel de aducción N° 4 (m ²)	13,20	14,28	1,00	0,92	10,00	10,00	9,25
2	Forma de la sección de la excavación	Circular	Variable	0,20	1,00	2,00	0,40	2,00
3	Rango de secciones de excavación	< 16 m de ø	> 16 m de ancho	0,50	1,00	6,00	3,00	6,00
4	Radio de curvatura de la excavación (m)	amplia > 100	Reducida <50	0,30	1,00	6,00	1,80	6,00
5	Longitud económica de excavación (m)	6500,00	2500,00	0,38	1,00	10,00	3,85	10,00
6	Avance promedio por día en roca tipo "B" (ma/día)	23,83	9,14	1,00	0,38	10,00	10,00	3,84
7	Tiempo de excavación de 10 km de túnel, roca tipo "B"(años)	1,35	3,50	1,00	0,38	10,00	10,00	3,84
8	Rugosidad de los contornos de excavación, rora tipo "B" (m)	0,01	0,30	1,00	0,03	2,00	2,00	0,07
9	Sobre excavación sobre la sección nominal (%)	5,00	20,00	1,00	0,25	6,00	6,00	1,50
10	Daño a la roca remanente durante el proceso de excavación	Nulo	Elevado	1,00	0,00	10,00	10,00	0,00
11	Equilibrio de esfuerzos en el entorno de la excavación	Excelente	regular	1,00	0,50	8,00	8,00	4,00
12	Vibración del terreno durante el proceso de fragmentación	Mínimo	Elevado	1,00	0,10	6,00	6,00	0,60
13	Afluencia de aguas subterráneas por efecto de la excavación	Mínimo	Elevado	1,00	0,10	8,00	8,00	0,80
14	Granulometría promedio del material arrancado (cm)	10,00	35,00	1,00	0,29	6,00	6,00	1,71
15	Esponjamiento del material (%)	50,00	35,00	0,70	1,00	8,00	5,60	8,00
16	Demora para la disponibilidad del equipo en obra (meses)	18,00	9,00	0,50	1,00	2,00	1,00	2,00
17	Número de equipos para 10 km de túnel	1,00	9,00	1,00	0,11	10,00	10,00	1,11
18	Número de operadores por guardia para 10km de túnel	2,00	9,00	1,00	0,22	8,00	8,00	1,78
19	Disponibilidad del (los) equipo(s) (%)	62,34	75,00	0,83	1,00	10,00	8,31	10,00
20	Riesgo de accidentes durante el proceso de excavación	Bajo	Alto	1,00	0,20	10,00	10,00	2,00
21	Requerimiento de tendido de rieles para servicios u otros	Sí	No	0,00	1,00	6,00	0,00	6,00
22	Sistema de mitigación del polvo durante la excavación	eficiente	deficiente	1,00	0,20	10,00	10,00	2,00

Sub total parámetros técnico-operacionales

137,96 82,49

b) PARÁMETROS ECONÓMICOS

PARAMETROS DE EVALUACIÓN		Valores /Apreciación		Puntuación		Pond.	Calificación	
Nº	DESCRIPCIÓN	TBM	P&V	TBM	P&V		TBM	P&V
23	Inversión para 10 km de túnel (USD)	9969202,32	2315000,00	0,23	1,00	10,00	2,32	10,00
24	Valor de salvataje después de 10 Km de excavación (USD)	4800000,00	694500,00	1,00	0,14	8,00	8,00	1,16
25	Costo de Propiedad por metro de excavación (\$/m)	688,98	137,00	0,20	1,00	10,00	1,99	10,00
26	Costo de operación y voladura para 10 km de túnel (\$/m)	679,94	720,36	1,00	0,94	10,00	10,00	9,44
27	Costo de cortadores o brocas por m3 de roca triturada (\$/m3)	13,90	179,65	1,00	0,08	2,00	2,00	0,15
28	Costo de cortadores/aceros de perforación, túnel N° 4 (\$/m)	106,44	213,68	1,00	0,50	10,00	10,00	4,98
29	Costo de voladura por metro de avance (\$/ma)	0,00	438,57	1,00	0,00	10,00	10,00	0,00
30	Costo por metro de excavación para túnel de 10 km (\$/ma)	1368,92	857,37	0,63	1,00	10,00	6,26	10,00
31	Valor actual neto, primeros 8 años del proyecto (USD)	232896721	142895247	1,00	0,61	10,00	10,00	6,14
32	Retorno de la inversión, túnel de 10 km (años después)	2,00	4,00	1,00	0,50	10,00	10,00	5,00
33	Ingreso adicional en los primeros 8 años del proyecto (USD)	90001474,06	0,00	1,00	0,00	10,00	10,00	0,00
34	Costo de revestimiento para la excavación en roca tipo "CL"	287,28	652,98	1,00	0,44	8,00	8,00	3,52
Sub total parámetros económicos							88,57	60,39

c) MISCELÁNEOS

PARAMETROS DE EVALUACIÓN		Valores /Apreciación		Puntuación		Pond.	Calificación	
Nº	DESCRIPCIÓN	TBM	P&V	TBM	P&V		TBM	P&V
35	Tensión de corriente, transformador primario en la labor (V)	10 000	1 000	0,10	1,00	10,00	1,00	10,00
36	Generación de gases nocivos durante la excavación	No	Sí	1,00	0,00	8,00	8,00	0,00
37	Contaminación de las labores por polución	Mínimo	Alto	1,00	0,20	8,00	8,00	1,60
38	Facilidad de apilamiento del escombros en los botaderos	Difícil	Fácil	0,30	1,00	6,00	1,80	6,00
39	Contaminación ambiental (ríos, suelo, etc.) por el sistema	Bajo	Alto	1,00	0,20	8,00	8,00	1,60
40	Facilidad de reforestación de los botaderos	Fácil	Difícil	0,30	1,00	2,00	0,60	2,00
SUB TOTAL MISCELANEOS							27,40	21,20
CALIFICACIÓN TOTAL							253,93	164,08
DIFERENCIA DE CALIFICACIÓN A FAVOR							89,85	0,00

Fuente: Elaborado por el autor

VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Para túneles de gran longitud, conviene aplicar TBMs, basado en su ventaja comparativa de 54,8 % respecto a la P&V.
2. Para seleccionar una adecuada TBM intervienen muchos parámetros, siendo el principal lo geológico.
3. La longitud mínima de túnel para aplicar una TBM de 4,10 m de diámetro en el Perú, sería 6 500 m, y para la P&V con alta mecanización 2 500 m.
4. La velocidad de excavación con TBM es 2 á 3 veces más rápido que con P&V, permitiendo recuperar la inversión en menor tiempo y con mayor rentabilidad de un proyecto tunelero.
5. El factor que más afecta la productividad de las TBMs descubiertas es el tipo de terreno. La TBM MK 12 alcanzó avances hasta de 32,45 m/Gdia y 48,60 m/día en roca tipo B y en roca mala (C-L), 0,18 m/día.
6. En terrenos deleznales el mayor porcentaje del tiempo se emplea en sostenimiento.
7. La aplicación de minadores continuos ha aumentado vertiginosamente en sustitución de la P&V.
8. La TBM deja un contorno de excavación liso, no perturba a la roca remanente requiriendo menos elementos de sostenimiento y revestimiento, su funcionamiento no produce emanación de gases ni polución.
9. El costo de excavación con TBM, sin considerar el sostenimiento, revestimiento, ventilación, etc., resulta superior a la de la P&V. Sin embargo, para grandes longitudes esta diferencia es mínima o nula.
10. Invocar a las autoridades universitarias y al gobierno central, dar más apoyo a la investigación tecnológica y científica, como una única vía para propiciar el desarrollo de nuestro país.
11. Implementar laboratorios para pruebas de perforabilidad, desgaste de las brocas, desgaste de los cortadores, excavabilidad, volabilidad, ripabilidad, y cortabilidad de las rocas peruanas.
12. Realizar estudios más específicos de los parámetros de operación de las TBMs, caso: Tipo de TBM para rocas peruanas, estudio de cortadores, parámetros de excavación, entre otros.

IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abril, E.G. (2007). *Macizos Rocosos*. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. pp. 1-25.
2. Alonso R., Fco. Javier (2007). *Caracterización de los Macizos Rocosos*. Oviedo, España: Facultad de Geología (Petrología y Geoquímica), Universidad de Oviedo. pp. 1-14
3. Bilgin N. & Kahraman, S. (2003). *Drillability Prediction in Rotary Blast Hole Drilling*. Maslak, Tukey: Mining Engineering Department, Istanbul Technical University. pp. 177-181
4. Bruland, Amund (1998). *Hard Rock Boring – Drillability Statistics of Drillability Test Results*. (Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology), Vol. 10 of 10. pp. 3-22.
5. Chadvik, John (1995). Por fin se pone en marcha el Lower K de Magma. *Mining, Edición en Español*, pp. 21-29.

6. Giraldo P., E. Mauro (2009). Productividad de las Máquinas Tuneladoras tipo TBM Vs. Tipo de Roca. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 12 N° 23, Enero – Junio 2009. pp. 53-58.
7. Giraldo P., E. Mauro (2009). Durabilidad de los Cortadores en las Máquinas Tuneladoras tipo TBM de acuerdo a su Posición en el Cabezal. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 12 N° 24, Julio – Diciembre 2009. pp. 69-80.
8. Hoek, Evert (2006). *Rock Mass Classification*. pp. 34-37.
9. Janson, Hans (1995). *TBM for Development in Block Caving Mine, San Manuel, Arizona*. Third International Symposium on Mine Mechanisation and Automation. V1. Golden, Colorado, USA. pp. 1-16.
10. Luengo R., Francisco J. y Gonzáles S., Salvador (2004). *Definición Racional de Ripabilidad de los Macizos Rocosos. Factores Económicos y Técnicos*. Oviedo, España: Unión Española de Explosivos S. A. pp. 1-16
11. Palmstrom, Arild & Broch, Einar (2006). Use and Misuse of Rock Mass Classification systems with Particular Reference to the Q-System. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology. pp. 1-31.
12. Robbins Company (1995). *Know – How and equipment for mechanical rock excavation in every direction*. Kent, Washington, USA: Robbins Boring Systems. pp. 3-23.
13. Tapia Cubillos, Milton (2006). *Indices de Perforabilidad: Una variable de Terreno en Perforación Rotativa. Su Uso en el Diseño de Mallas de Tronaduras en Minas a Cielo Abierto*. Antofagasta, Chile: Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Antofagasta. Pp. 19-24
14. The Robbins Company (1999). *Hard Rock Solutions. Performance. Leadership*. Kent, Washington, USA. pp. 2-16
15. Wirth (2000). *Tunnel Boring Machines*. Erklenz, Germany. pp. 3-11