



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y
MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

EVALUACIÓN TÉCNICA DE DESEMPEÑO EN EXCAVACIÓN VÍA TBM APLICADO A
UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PIETRO FERNANDO CAYO VARGAS

PROFESOR GUÍA:
SEBASTIAN CARMONA CALDERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
IGNACIO FERNANDEZ QUEREZAJU
GONZALO MONTES ATENAS

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL DE
MINAS
POR: PIETRO FERNANDO CAYO VARGAS
FECHA: 12/01/2016
PROFESOR GUÍA: SEBASTIAN CARMONA**

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE DESEMPEÑO EN EXCAVACIÓN VÍA TBM APLICADO A
UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO**

Cada vez que aparece una tecnología innovadora, el cambio de paradigma es la barrera principal de entrada hacia las personas para aceptarla o rechazarla. La forma ingenieril de llevar a cabo este cambio se basa en el ensayo de prueba y error en conjunto al estudio y análisis profundo de aquello que es más nuevo ojalá logrando determinar con total exactitud cuánto y porque es mejor, lo cual representa el objetivo primordial de este estudio.

El trabajo realizado consiste la evaluación técnica de desempeño del método mecanizado *Tunnel Boring Machine*, la cual se lleva a cabo para el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo a cargo de AES Gener. Toda la información para realizar análisis proviene de una fuente empírica constituida por la experiencia de construcción con la TBM Robbins MB139-396 en el túnel Volcán (V5) en el sector de El Yeso, Cajón del Maipo. El análisis se concentra en buscar los todos eventos que alteran el rendimiento de excavación otorgándoles un peso relativo según la deficiencia causada de forma tal que se jerarquice el grado de impacto. Esto genera valor al proyecto dando una mayor capacidad de respuesta al mandante en las decisiones que puede tomar al enfrentar contingencias tales como el clima, los incidentes, los cambios en la geología, entre otros.

De entre los resultados más relevantes, se puede afirmar que el rendimiento para el periodo *Ramp-up* logra solo un tercio de lo esperado, debido a las eventualidades ocurridas. Explicando lo anterior se encuentra que, en orden decreciente en relación al impacto sobre el rendimiento, las tres contingencias más sobresalientes son primero, las deficiencias en curva de aprendizaje a raíz del cambio geológico del túnel. Segundo, el incidente en el periodo de invierno y por último las condiciones climáticas adversas presentadas por V5.

Por otra parte al realizar un modelo de ajuste personalizado y aplicado a un *Forecast* se tiene que para un escenario en donde se mitigan todas las desviaciones y sólo se predispone a la incertidumbre geológica, entonces el túnel Volcán tendría un rendimiento promedio de 16.1 [m/d] con una desviación estándar de 6 [m/d] y una probabilidad de desviación por causa geológica de un 44% al modelar según una distribución normal. Esto implica que túnel V5 culmina su excavación con TBM dentro de 458 días, es decir, el 31 de Diciembre de 2016.

Agradecimientos

Se acaba, sí al fin se acaba y... ¿Ahora qué? Avanzar, decidir y forjar el nuevo camino. Un gran desafío, sin embargo, tengo las herramientas necesarias, el conocimiento anhelado y por sobre todo a las personas que aquí serán mencionadas quienes me apoyaron, me acompañaron, me forjaron o me tendieron una mano para llegar a ser el próximo InJeniero de minas de la Universidad de Chile.

Primero están las grandes personas que me trajo el 2015 como André mi leal compañero de oficina durante el semestre, gracias por no dejar que me volviera loco haciendo la memoria y brindarme tu apoyo en el momento preciso. Agradecimientos a mi querida Fernanda quien pese a ser más pequeña y con menos experiencia me apoyo con gran disposición mostrándome la rigurosidad “u-sachina” y siendo la primera lectora y validadora de este documento.

Luego están los grandísimos profesionales con quienes tuve la oportunidad de trabajar y conocer en este importante periodo de memoria. Muchas gracias a don Ignacio Fernández quien guio mi trabajo brindándome un excelente ejemplo a seguir además de otorgarme la oportunidad de participar de un magno proyecto como lo es Alto Maipo.

Muchísimas gracias a mi profesor Sebastián Carmona por motivarme a realizar una memoria innovadora y desafiante teniendo una grata disposición hacia mí, escuchando mis ideas y mostrándome una visión positiva a través de su liderazgo sobre el equipo de comisión de memoria.

Por supuesto ahora destaco a todos mis amigos quienes de alguna u otra forma han influido en el profesional que próximamente verá la luz. Mis queridos “bachis” que desde la época de oro en Juan Gómez Millas me acompañaron junto a los “bucheffianos” que luego pudieron seguirnos el ritmo, Ignacio, Matías, Andrés, Julio me alegra poder contarlos con una sola la mano, pues sé que son los de verdad, gracias por todos los “terraceos”, salidas y tallas juntos. Y por supuesto, doy las gracias siempre de haber tenido como ejemplo durante todos estos años a la mejor estudiante y la más matea, Dámaris, la profesional más destacada que conocí en mi pasar por la Universidad.

Por último escalando hacia el máximo agradecimiento están mis padres, Magdalena y Fernando. No hay forma de decirles todo, no tengo las palabras exactas y podría extenderme otra memoria completa tratando de expresar mi cariño y gratitud. Sólo puedo decir que ustedes han dado absolutamente todo para que yo llegara a donde estoy, jamás terminaría de agradecerles, pero si les puedo prometer que serán muy felices, pues yo personalmente me encargaré de eso.

Por último solo me queda decirles que este profesional integro, con ganas de seguir aprendiendo y avanzando nace aquí y ahora esperando de todo corazón seguir su camino junto a ustedes, Muchas Gracias.

Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo General.....	3
1.3 Objetivos Específicos	3
1.4 Alcances.....	3
Capítulo 2: Antecedentes bibliográficos.....	4
2.1 Casos Históricos	4
2.1.1 Los Sulfatos: (Anglo American)	4
2.1.2 Hidroeléctrica Central Chacayes: (Pacific Hidro).....	5
2.1.3 Túnel de aducción Rio Blanco: (CODELCO, Teniente).....	5
2.2 Tecnología TBM (“Túnel Boring Machine”)	6
2.2.1 Velocidad de corte o avance.....	7
2.2.2 Tiempo neto de excavación.....	7
2.2.3 Tiempo de fortificación.....	8
2.3 TBM v/s D&B	9
2.3.1 Ventajas Operacionales	9
2.3.2 Costos.....	9
2.3.3 Seguridad.....	11
2.4 Herramientas de gestión.....	12
2.4.1 Estructura PMBOK (Project Manager Body Of Knowledge).....	12
2.4.2 Tripla: Presupuestado-Incurrido-Producido	14
2.4.3 Cuenta de Resultados	15
2.5 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM)	16
2.5.1 Descripción general y localización	16
2.5.2 Ventajas comparativas.....	17
2.5.3 Contextualización del estudio	19
2.6 Selección de TBM	19
2.6.1 TBM Robbins MB139-396	21
2.7 Selección de túneles.....	25
2.7.1 Túnel El Volcán V5-V1	25
Capítulo 3: Metodología.....	33
Capítulo 4: Evaluación técnica de desempeño	35
4.1 Análisis Exploratorio de Datos	35
4.1.1 Planificación de CNM.....	35
4.1.2 Demoras programadas.....	35

4.1.3 Demoras no programadas.....	36
4.1.4 Estadística básica.....	37
4.1.5 Geología.....	38
4.2 Resultados y discusión.....	40
4.2.1 Situación final.....	40
4.2.2 Análisis mensual.....	42
4.3.2 Modelo de ajuste.....	43
4.3.3 Desviaciones.....	45
4.3 Medidas correctivas.....	53
4.3.1 Demoras que no detienen el avance.....	53
4.3.2 Demoras que detienen el avance.....	54
4.4 Predicciones a través de <i>Forecast</i>	58
4.4.1 <i>Best Case</i> y <i>Worst Case</i>	58
4.4.1 Modelos de ajuste personalizados.....	60
4.5 Extrapolación de resultados a túnel minero.....	66
4.5.1 Adit, 74 NNM.....	66
4.5.2 Extrapolación de rendimientos TBM.....	67
4.5.3 Tiempo de construcción empleados.....	67
Capítulo 5: Conclusiones.....	70
Capítulo 6: Futuras líneas de Investigación y Recomendaciones.....	72
Capítulo 7: Bibliografía.....	73
Capítulo 8: Carta Gantt.....	75
Capítulo 9: Anexos.....	76

Índice Tablas

TABLA 1: COMPARACIÓN DE EXCAVACIONES CON TBM, CHILE.....	6
TABLA 2: RESUMEN Y CONTRASTE DE CUALIDADES TÉCNICAS TBM V/S D&B.....	12
TABLA 3: ÁREAS DEL CONOCIMIENTO DENTRO DE UN PROYECTO (MALLORCA, P., 2010).....	13
TABLA 4: ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA POR TRAMO, TÚNEL VOLCÁN V5-V1, (GALERA, J., 2015).....	29
TABLA 5: CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO, FORMACIÓN ABANICO ESTE, SOBRECARGA 500M (GALERA, J., 2015).....	31
TABLA 6: PARÁMETROS DE ROCA EN ZONA DE DEBILIDAD (APROX. CONTINUA).....	32
TABLA 7: SETS DE ESTRUCTURAS, FORMACIÓN RIO DAMAS (0+200- 0+700).....	32
TABLA 8: PROPIEDADES DE RESISTENCIA EN DISCONTINUIDADES.....	32
TABLA 9: DEMORAS PROGRAMADAS, TÚNEL V5.....	36

TABLA 10: RESULTADOS DE ESTADÍSTICA BÁSICA, TÚNEL V5	37
TABLA 11: RESULTADOS SEGÚN TIPO DE ROCA, TÚNEL V5.....	39
TABLA 12: SITUACIÓN FINAL HACIA 30 DE SEPT. 2015, TÚNEL V5	40
TABLA 13: ALCANCES EN TÚNEL V5	41
TABLA 14: RESULTADOS GLOBALES DE RENDIMIENTO POR MES, V5	43
TABLA 15: CLASIFICACIÓN DE DESVIACIONES	45
TABLA 16: ESTADÍSTICA BÁSICA, MUESTRA FILTRADA PARA AVANCES REGULARES, V5.....	58
TABLA 17: RESULTADOS DE PROYECCIÓN, <i>BEST/WORST CASE</i>	59
TABLA 18: CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA FACTOR DE AJUSTE POR EXPERIENCIA (BIENAWSKI Z.T., CELADA B., GALERA J.M., TARDÁGUILA I., 2008).....	61
TABLA 19: ESTADÍSTICA BÁSICA PARA FILTRO EN ROCA TIPO III, V5	63
TABLA 20: RESULTADOS DE FACTORES DE AJUSTE POR GEOLOGÍA	64
TABLA 21: <i>FORECAST</i> DE AJUSTES PERSONALIZADOS, V5	65
TABLA 22: RESULTADOS DE <i>FORECAST</i> PERSONALIZADOS.....	65
TABLA 23: ADIT 74 v/s V5, CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	66
TABLA 24: CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA SEGÚN NGI-Q, ADIT 74	66
TABLA 25: RESULTADOS DE EXTRAPOLACIÓN DE RENDIMIENTOS PARA NNM.....	67
TABLA 26: TIEMPOS DE CONSTRUCCIÓN POR FASES, ADIT 74 NNM.....	68
TABLA 27: TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN TOTAL, ADIT 74 NNM.....	69

Índice Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA LOS SULFATOS, ANGLO AMERICAN	4
ILUSTRACIÓN 2: UBICACIÓN GEOGRÁFICA HIDROELÉCTRICA CHACAYES Y ACERCAMIENTO RIO CACHAPOAL, PACIFIC HIDRO	5
ILUSTRACIÓN 3: EJEMPLO DE WBS, (MALLORCA, P., 2010)	14
ILUSTRACIÓN 4: EJEMPLOS DE DESVIACIÓN EN PRODUCCIÓN, COSTOS Y PLAZOS, (MALLORCA, P., 2010).....	15
ILUSTRACIÓN 5: CORTADORES DE CABEZA, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014).....	23
ILUSTRACIÓN 6: SISTEMA DE COJINETE, ENGRANE PRINCIPAL Y SELLO, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014).....	90
ILUSTRACIÓN 7: SOPORTE DE CABEZAL, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014).....	91
ILUSTRACIÓN 8: CONJUNTO DE PRESURIZACIÓN DEL CABEZAL DE CORTE, TBM ROBBINS MB139- 396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014).....	92
ILUSTRACIÓN 9: ENSAMBLAJE "MAIN DRIVE", TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	92
ILUSTRACIÓN 10: CONJUNTO DE ZAPATAS, VISTA TRANSVERSAL, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	95
ILUSTRACIÓN 11: CONJUNTO DE ZAPATAS, VISTA PLANTA, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	95
ILUSTRACIÓN 12: CONJUNTO DE SECCIÓN TRASERA, VISTA PERFIL/TRANSVERSAL, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	96
ILUSTRACIÓN 13: CONJUNTO DE TRNASPORTE, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	97

ILUSTRACIÓN 14: CONJUNTO DE ESTACIÓN DEL OPERADOR, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	98
ILUSTRACIÓN 15: SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO, TBM ROBBINS MB139-396 (THE ROBBINS COMPANY, 2014)	100
ILUSTRACIÓN 16: TÚNEL EL VOLCÁN V5-V1, DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN (HOCHTIEF-CMC, 2015)	26
ILUSTRACIÓN 17: MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DE TÚNEL VOLCÁN (DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA FCFM, 2015)	27
ILUSTRACIÓN 18: VISTA TRIDIMENSIONAL, TÚNEL EL VOLCÁN (DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA FCFM, 2015).....	27
ILUSTRACIÓN 19: PERFIL TÚNEL VOLCÁN Y DOMINIOS LITOLÓGICOS IMPORTANTES. TIA: F. ABANICO; KIC: F. COLIMAPU; KILV: F. LO VALDÉS; JSRD: F. RIO DAMAS. SECCIONES ROJAS: ZONA DE ALTERACIÓN. LINEA ROJA: TRAZA DEL TÚNEL. CUERPOS TABULARES CELESTES: LENTES DE YESO. (DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA FCFM, 2015).....	28

Índice Gráficos

GRÁFICO 1: RENDIMIENTO DE EXCAVACIÓN V/S TIPO DE ROCA, PROYECTO HIDROELÉCTRICO YUNCÁN, PERÚ 2000-2005 (GIRALDO M., 2008).....	7
GRÁFICO 2: TIEMPO NETO DE EXCAVACIÓN V/S TIPO DE ROCA, PROYECTO HIDROELÉCTRICO YUNCÁN, PERÚ 2000-2005 (GIRALDO M., 2008).....	7
GRÁFICO 3: TIEMPO DE FORTIFICACIÓN V/S TIPO DE ROCA, PROYECTO HIDROELÉCTRICO YUNCÁN, PERÚ 2000-2005 (GIRALDO M., 2008).....	8
GRÁFICO 4: USO DE TBM A TRAVÉS DEL TIEMPO (J. TARKOY, 1995).....	9
GRÁFICO 5: COMPARACIÓN DE COSTOS TBM V/S D&B PARA MÚLTIPLES EXCAVACIONES (J. TARKOY, 1995)	10
GRÁFICO 6: VARIACIÓN DE COSTOS TBM V/S D&B PARA MÚLTIPLES EXCAVACIONES (J. TARKOY, 1995).....	10
GRÁFICO 7: COMPARACIÓN DE COSTOS A LARGO PLAZO D&B V/S TBM (PALMA A., 2010). 11	
GRÁFICO 8: EJEMPLO DE CUENTA DE RESULTADOS, (MALLORCA, P., 2010)	16
GRÁFICO 9: HISTOGRAMA DE DATOS, TÚNEL V5	38
GRÁFICO 10: DISTRIBUCIÓN SEGÚN TIPO DE ROCA, TÚNEL V5	39
GRÁFICO 11: SITUACIÓN FINAL AVANCE PLANIFICADO V/S AVANCE REAL EN V5 HACIA EL 30/09/15	40
GRÁFICO 12: <i>FORECAST</i> CASO IDEAL A PARTIR DE SEPT 2015, TÚNEL V5	42
GRÁFICO 13: RENDIMIENTOS TBM POR MES REAL V/S PLANIFICADO, TÚNEL V5	43
GRÁFICO 14: DÍAS DE PROGRESO POR MES, TÚNEL V5.....	44
GRÁFICO 15: AVANCES MENSUAL, TÚNEL V5	45
GRÁFICO 17: DESVIACIONES PORCENTUALES MES DE JUNIO, TÚNEL V5	46
GRÁFICO 18: TIEMPO MUERTO POR DESVIACIÓN MES DE JUNIO, TÚNEL V5	46
GRÁFICO 19: DESVIACIONES PORCENTUALES MES DE JULIO, TÚNEL V5.....	47
GRÁFICO 20: TIEMPO MUERTO POR DESVIACIÓN MES DE JULIO, TÚNEL V5.....	48
GRÁFICO 21: DESVIACIONES PORCENTUALES MES DE AGOSTO, TÚNEL V5	49
GRÁFICO 22: TIEMPO MUERTO POR DESVIACIÓN MES DE AGOSTO, TÚNEL V5	50
GRÁFICO 23: DESVIACIONES PORCENTUALES MES DE SEPTIEMBRE, TÚNEL V5	51
GRÁFICO 24: TIEMPO MUERTO POR DESVIACIÓN MES DE SEPTIEMBRE, TÚNEL V5.....	52
GRÁFICO 25: PESO DE DESVIACIONES QUE NO DETIENEN EL AVANCE	53

GRÁFICO 26: PESO DE DESVIACIONES QUE SI DETIENEN EL AVANCE	54
GRÁFICO 27: REGRESIÓN CASO BASE, V5	59
GRÁFICO 28: <i>FORECAST BEST/WORST CASE</i> , V5	60
GRÁFICO 29: CURVA EMPÍRICA DE CÁLCULO PARA FACTOR DE ADAPTACIÓN (BIENAWSKI R., CELADA B. , 2007)	62
GRÁFICO 30: CURVA EMPÍRICA PARA CÁLCULO DE FACTOR AJUSTE POR DIÁMETRO (BIENAWSKI R., CELADA B. , 2007)	63

Índice Ecuaciones

ECUACIÓN 1: MODELO DE AJUSTE EMPÍRICO, TÚNEL V5	60
ECUACIÓN 2: FACTOR DE AJUSTE POR EXPERIENCIA	61

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

La idea fundamental de la memoria es trabajar en terreno con la empresa AES Gener, mandante a cargo del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) y la empresa de Inspección Técnica R&Q Ingeniería, en un análisis técnico económico profundo que sea capaz de mostrar el potencial del uso de la tecnología *Tunnel Boring Machine (TBM)*, máquina diseñada para mejorar el rendimiento logrando túneles con incluso seis veces mayor diámetro y hasta tres veces mayor rendimiento en comparación a los métodos convencionales. (J. Tarkoy, 1995) Además se mecaniza el sistema de construcción de túneles aminorando el riesgo del personal todo ello al costo de una dependencia más alta de un sistema mecanizado, sin embargo, al hacer uso de una TBM, un proyecto es capaz de disminuir los costos totales en forma considerable a partir de una determinada longitud de excavación. La empresa estipula el uso de esta tecnología para dos sectores de la hidroeléctrica que se está construyendo en forma subterránea en el sector del Cajón del Maipo. La gran mayoría de las instalaciones contempladas son subterráneas, en particular, el complejo de túneles utilizado para generar caídas de agua, las cuales bajo los conceptos básicos de la física logran transformar energía contenida en la masa de agua desde potencial a cinética y captarla a través de las dos estaciones de máquinas contempladas por el proyecto, Alfalfal 2 y Las Lajas. Todo lo anterior requiere la construcción de aproximadamente 70km de túnel, para lo cual está contemplado el uso parcial de “*Drill and Blast*”, método convencional compuesto por las operaciones unitarias de marcado, perforación, carguío, tronadura, ventilación, retiro de marina, acuñadura y fortificación. Estas operaciones realizadas en forma cíclica son las que permiten el desarrollo de túneles en minería subterránea, no obstante, requiere de personal altamente especializado para cada una, lo cual acarrea estándares de seguridad de gran exigencia e inminentemente un mayor riesgo asociado a la integridad de los trabajadores. Dado lo anterior en suma a un análisis técnico económico realizado por PHAM los túneles de mayor extensión utilizan D&B solo en su inicio mientras que el resto sería construido por TBM, tecnología que no había sido utilizada anteriormente para un proyecto de las magnitudes de Alto Maipo en materia de construcción en Chile.

El avance tecnológico es un paso absolutamente necesario cuando se está en busca de objetivos tales como la minimización de los tiempos de construcción, mitigación del impacto ambiental y el resguardo de la seguridad en el trabajo, no obstante, la idea de cambiar desde un sistema clásico como D&B a otro mecanizado como la TBM tiene un sin número de factores a considerar que dicen relación con el riesgo que enfrenta el proyecto al tomar esta decisión. La medición de los factores técnicos que se han dado a través del desarrollo del proyecto son datos importantes a ser analizados y comparados según los dos métodos de excavación en Alto Maipo. Un ejemplo de esto es el rendimiento de avance, variable clave en la medida de la eficiencia del proyecto. Además se validará el estudio técnico económico ya realizado por PHAM para tomar la decisión del uso de la TBM y a partir de ello obtener conclusiones relevantes que permitan enfrentar cautelosamente experiencias futuras de excavación.

Siguiendo el objetivo principal de *Evaluar el desempeño de excavación con TBM* se miden una serie de parámetros técnicos atendiendo el grado de impacto que causan en el rendimiento de avance y los tiempos involucrados de elegir una alternativa de excavación como la TBM, lo cual se contrasta al método clásico D&B. La evaluación se realiza eligiendo un escenario acotado acorde al tiempo estipulado para el trabajo de memoria lo que se traduce en tomar una sección específica de un túnel en el sector de El Yeso como lo es por ejemplo el túnel V5, el cual utiliza TBM. La extensión y condiciones geológicas, tiempo previo de ejecución, costo de oportunidad y rendimiento de excavación son algunas de las variables que permiten una real comparación y posterior evaluación del desempeño de la máquina. Se reúnen datos a partir del segundo semestre del 2015 observando en terreno el comportamiento de la máquina, la cual está programada para iniciar su operación dentro del periodo estipulado para este trabajo por lo que el análisis recae en el *Ramp-up* de la excavación, ejecutándose el método mecanizado primero en el sector El Yeso y posteriormente en El Colorado. Todo lo anterior presenta una oportunidad de desarrollo en el conocimiento de esta materia a través del trabajo de esta memoria, lo cual generaría valor al proyecto y el aporte al desarrollo profesional del autor.

1.2 Objetivo General

Realizar un análisis técnico económico sobre el desempeño de una excavación vía TBM en el proyecto Alto Maipo.

1.3 Objetivos Específicos

- 1) Evaluación de rendimiento utilizando *Key Performance Indicators (KPI's)* como velocidad de desarrollo metros/día y la frecuencia de eventos no deseados (desviaciones).
- 2) Análisis de los rendimientos operacionales reales versus los estimados en la ingeniería.
- 3) Identificar las principales causas de desviaciones, su impacto en proceso y proponer medidas correctivas que disminuyan las brechas significativas.
- 4) Análisis anexo que comente y compare el desempeño real de la TBM con lo que podría haber rendido D&B.
- 5) Extrapolación de resultados hacia un túnel minero de NNM.

1.4 Alcances

- 1) El trabajo es realizado en un horizonte temporal máximo de 6 meses dado el contrato de trabajo entre el autor y AES Gener.
- 2) La evaluación de desempeño se realiza para una longitud específica de un túnel específico acorde al tiempo de trabajo disponible para la memoria. Esto queda definido solo tras el ingreso a faena (1 de Septiembre).
- 3) La TBM bajo análisis es definida una vez ingresado el autor a la empresa y el criterio de selección queda supeditado a lo que la empresa estime conveniente evaluar.
- 4) Todo el trabajo se realiza únicamente por el equipo de memoria, el cual está conformado por integrantes de la Universidad de Chile y la ayuda de la gerencia de construcción de AES Gener.

Capítulo 2: Antecedentes bibliográficos

2.1 Casos Históricos

Se presenta a continuación túneles construidos anteriormente en Chile con el método de excavación Tunnel Boring Machine.

2.1.1 Los Sulfatos: (Anglo American)

En 2002 Anglo American compró Los Bronces y comenzó su estrategia de encontrar nuevos recursos dentro del distrito. Entre 2002 y 2003 la división de exploraciones centró sus esfuerzos en detectar recursos en sectores cercanos a la operación, pero no fue hasta la temporada 2006-2007, con ocho sondajes con 6.613 m, que se afirmó la presencia de un depósito de pórfidos de clase mundial.

Proyecto inicia el 2008 con un costo estimado de \$ 77M. La TBM inicia excavación en agosto de 2009 contemplando el desarrollo del túnel hacia el 2011 seguido de una perforación subterránea (~100.000m), dirigida a completar un Conceptual y PFS a finales de 2013. (Beamish B., 2009)

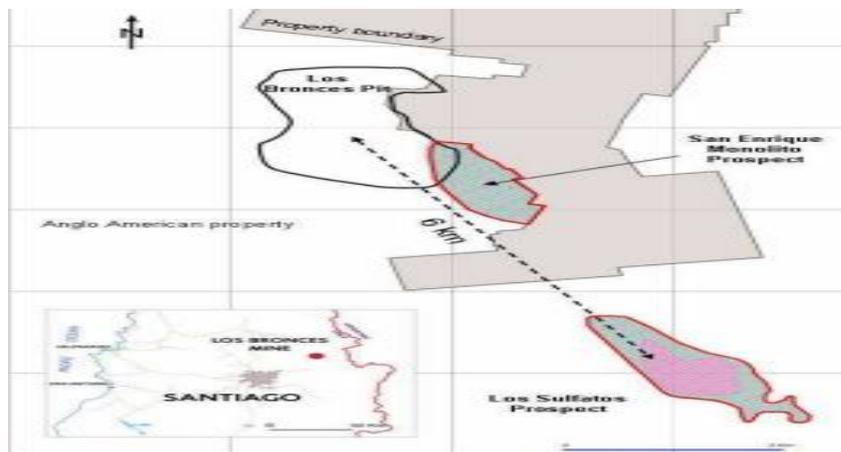


Ilustración 1: Ubicación geográfica Los sulfatos, Anglo American

A 6 km al Sur-Este de Los bronces conforma una de las partes más anchas del sistema cuprífero. La mineralización de cobre en el depósito corresponde a calcopirita y bornita principalmente, y se aloja en varios cuerpos de pórfidos y brechas, presentándose en texturas diseminadas y en vetillos intensos. La estimación de recursos en este depósito, efectuada durante agosto de 2008, y basada en 22.000 metros de sondajes, arrojó recursos en categoría de inferidos de 1.200 millones de toneladas con una ley media de 1,46% CuT. (American, 2011)

La actividad de exploración hace uso de un túnel de longitud programada superior a los 8.000 [m], que atraviesa gran parte del proyecto Los Sulfatos. Este sería llevado en condiciones de 4000 m.s.n.m.; clima extremo, topografía abrupta y temporadas cortas para explorar debido a las limitaciones climáticas; el prospecto se localiza en un área sensible ambientalmente dado que se

trata de un proyecto ubicado en las cercanías de Santiago por lo que la TBM cumple en parte con esta última restricción de construcción. La idea final es materializar más de 200.000 metros de sondajes en un periodo de cuatro años, a partir de 2012.

2.1.2 Hidroeléctrica Central Chacayes: (Pacific Hidro)

Ubicada en un entorno extraordinario de la Cordillera de Los Andes, a aproximadamente 10 kilómetros aguas arriba de nuestra central de pasada Coya, en la sexta región de Chile, Chacayes tendrá un importante rol para contribuir al país a reducir su dependencia de la energía generada a partir de combustibles fósiles.



Ilustración 2: Ubicación geográfica hidroeléctrica Chacayes y acercamiento río Cachapoal, Pacific Hidro.

Chacayes fue inaugurada en octubre de 2011 y requirió de una inversión de más de US\$450 millones. Se trata de una central hidroeléctrica de pasada que genera energía renovable suficiente para abastecer a más de 300 mil hogares chilenos. En 2012 fue registrada bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto para emitir bonos de carbono, equivalentes a más de 340 mil toneladas de gases de efecto invernadero al año. (PacificHydro, 2012)

Chacayes genera energía utilizando las aguas de los ríos Cachapoal y Cipreses, ubicados en la Región de O'Higgins. Para la construcción de sus túneles se utilizaron técnicas de mínimo impacto ambiental, y una parte importante de sus obras fueron realizadas bajo tierra para no intervenir ni afectar el entorno. Para excavar los túneles de esta central de pasada se utilizó la tecnología TBM (Tunnel Boring Machine), en vez del método convencional conocido como Drill and Blast (D&B). El uso de la TBM permitió avanzar con el proyecto con mayor eficiencia, reduciendo el ruido y los disturbios medioambientales. (PacificHydro, 2012)

2.1.3 Túnel de aducción Río Blanco: (CODELCO, Teniente)

Este proyecto se encarga de la ejecución de las obras necesarias para captar las aguas de Río Blanco y conducir las gravitacionalmente hasta el Estanque SAG en Alto Colón. De esta forma se

aprovechan los recursos hídricos existentes en la cuenca del Río Blanco que esta al Sur del Río Coya y Río Teniente, los cuales están a su vez en las instalaciones operativas de la división.

Esta obra comprende un túnel de 11kms de longitud, el cual originalmente estaba pensado para una sección de 4 x 4.3 m originalmente en herradura, pero se decidió optar por el uso de TBM finalmente con sección circular de diámetro igual a 4.5 m. El proyecto está estipulado para realizarse en un periodo de 3.5 años con un presupuesto de 35 [MUSD]. (Forascepi R., 1991)

Pese a que Chile es uno de los países más importantes mineros del mundo y ha utilizado tecnología de punta a lo largo su liderazgo, la TBM ha sido escasa comparada a los países vecinos. (Palma A., 2010)

La construcción vía TBM es más beneficiosa para los proyectos hidroeléctricos dado la menor sobre excavación del método, lo cual involucra una mejor funcionalidad para acueductos o túneles de aducción hidráulica lo que a su vez trae consigo una reducción de costos.

Proyecto	Años	Longitud [km]	Diámetro [m]	TBM	Área de aplicación	Largo total (back up) [m]	Rendimiento [m/día]
Río Blanco	1992	11	5	Abierta	Minería	120	9.5
Los bronces	2009	8	5	Doble escudo	Minería	90	20
Chacayes	2010	3	5	Abierta	Energía	150	30
Alto Maipo	2015	10	7	Abierta	Energía	150	17.8

Tabla 1: Comparación de excavaciones con TBM, Chile

2.2 Tecnología TBM (“Túnel Boring Machine”)

Las TBM son equipos de minado continuo que básicamente constan de dos parte básicas: la parte fija (*Back-up*), cuya función es sujetar a la máquina durante su operación, dentro de la que se encuentra básicamente el cuerpo, provisto de mordazas (*grippers*) y la pata delantera (*front leg*); y la parte móvil que viene a ser el conjunto que realiza el trabajo de excavación y está constituido básicamente por el cabezal (*cutterhead*) y la unidad de impulsión. (pistones de empuje, motores de rotación, etc.) (Giraldo M., 2008)

La productividad de TBM viene dada por distintos factores, dentro de los cuales se destaca la geología y estudios geomecánicos. Para exponer, por qué radica la mayor importancia en este aspecto, cabe mencionar las siguientes variables operacionales:

2.2.1 Velocidad de corte o avance

Se ve más afectada por los factores geológicos y de roca más que cualquier otra cosa, lo cual puede crear variaciones que alcanzan hasta 50 veces su valor entre un rendimiento óptimo en roca buena hasta el más ineficiente en roca mala. Un ejemplo de ello es el proyecto hidroeléctrico Yuncán.

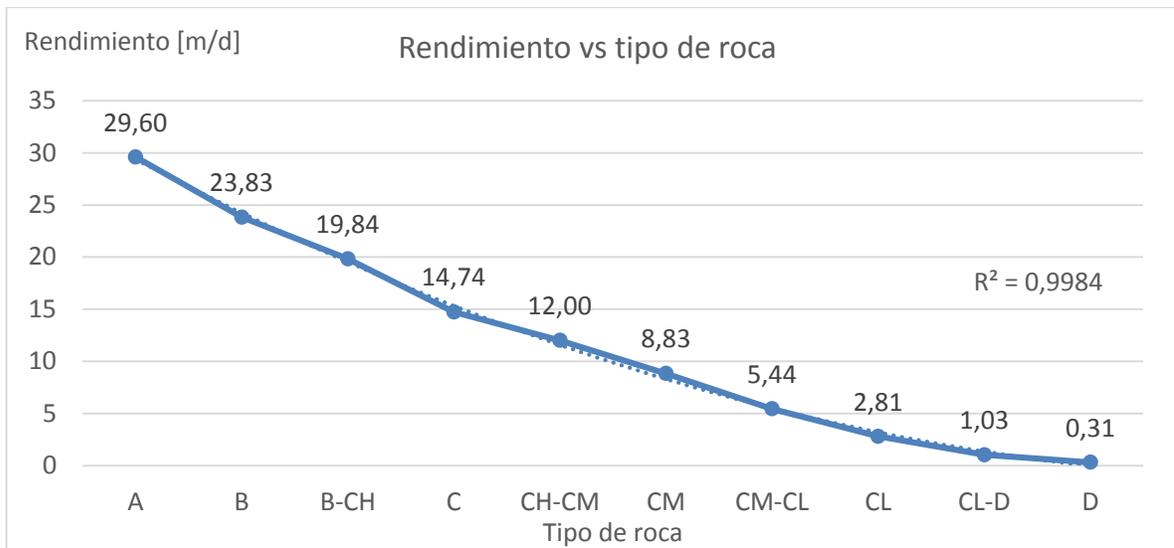


Gráfico 1: Rendimiento de excavación v/s tipo de roca, Proyecto hidroeléctrico Yuncán, Perú 2000-2005 (Giraldo M., 2008)

2.2.2 Tiempo neto de excavación

Varía proporcionalmente con el tipo de roca. A roca más competente se puede lograr entonces mejores tiempos netos. Un ejemplo de ello se puede ver reflejado en el siguiente gráfico

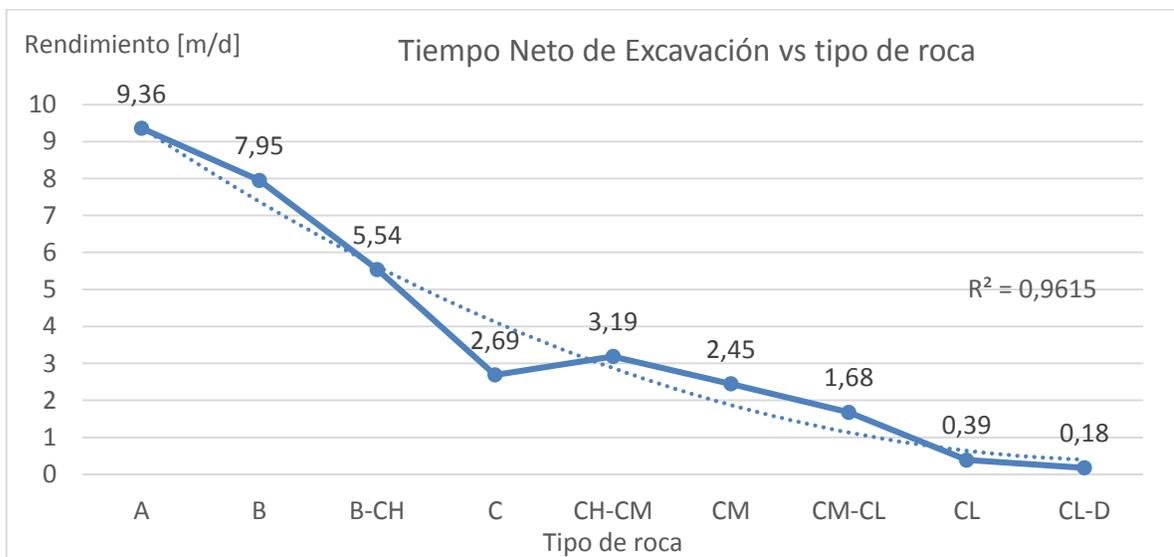


Gráfico 2: Tiempo neto de Excavación v/s tipo de roca, Proyecto hidroeléctrico Yuncán, Perú 2000-2005 (Giraldo M., 2008)

Se desprende de la gráfica que si la roca fuera tipo “A” (totalmente masiva y dura), el tiempo neto de excavación bordearía las 11 horas, que en porcentaje sería 45% de las horas nominales por día. Por el contrario, si el tipo roca fuera tipo “D” (roca suave, deleznable o muy fracturada), el tiempo neto de excavación alcanzaría tan solo 0,18 hr/día o 0,74% de las horas nominales por día, sumamente bajo.

2.2.3 Tiempo de fortificación

Así mismo como en los dos puntos anteriores se tiene que a roca más dura entonces el sostenimiento puede llegar incluso a ser innecesario mientras que para roca mala puede tomar más de la mitad del día para poder seguir avanzando. Esto lo podemos apreciar observando nuevamente el ejemplo del proyecto hidroeléctrico Yuncán.

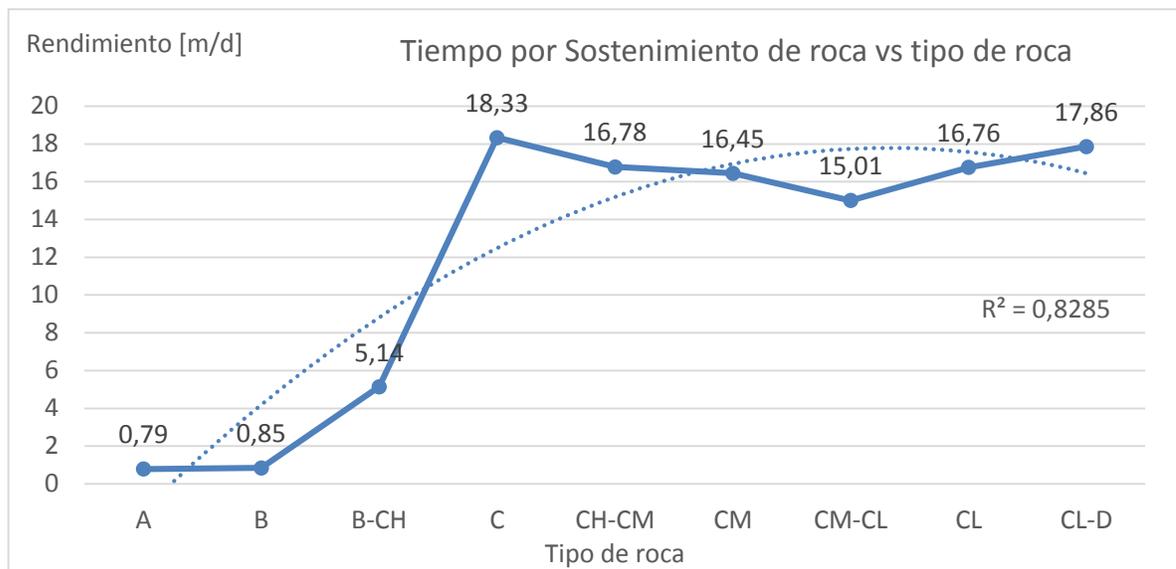


Gráfico 3: Tiempo de fortificación v/s tipo de roca, Proyecto hidroeléctrico Yuncán, Perú 2000-2005 (Giraldo M., 2008)

2.3 TBM v/s D&B

En el contexto de los avances tecnológicos concernientes a la excavación de túneles el uso de TBM ha ido en incremento a lo largo del tiempo en desmedro del método tradicional D&B. A continuación se aprecia el comportamiento descrito en forma gráfica.

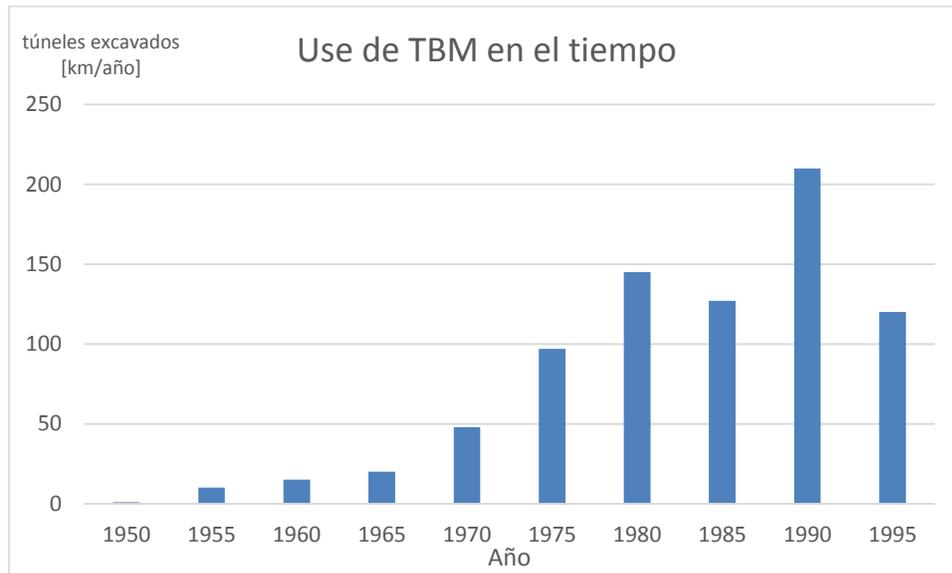


Gráfico 4: Uso de TBM a través del tiempo (J. Tarkoy, 1995)

Esto se debe principalmente a tres componentes claves:

2.3.1 Ventajas Operacionales

Proceso continuo, más amigable con el ambiente, no usa tronadura (por lo tanto utiliza menos fortificación), tiene mucho menor sobre excavación, no requiere personal tan especializado dado que es más repetitivo y menos dependiente de los trabajadores (operaciones más fáciles de capacitar). Por último esta tecnología es capaz de eliminar accesos temporales que necesariamente serían requeridos en D&B. (adits y piques)

2.3.2 Costos

De acuerdo a la data entregada por Groseclese y Tacklett en promedio los costos de utilización son siempre menores a los de un método convencional.

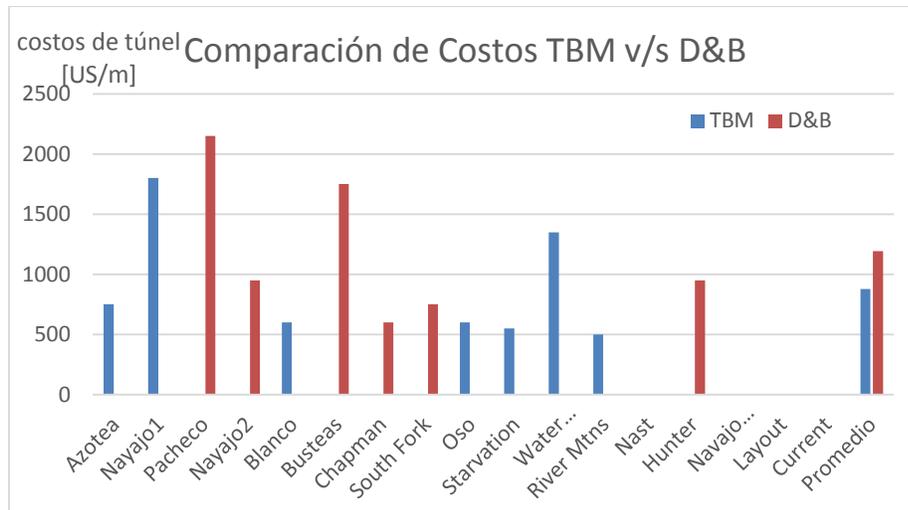


Gráfico 5: Comparación de costos TBM v/s D&B para múltiples excavaciones (J. Tarkoy, 1995)

Donde la baja de costos se encuentra principalmente en las ventajas operativas de avance (de 4 a 6 veces mayor rendimiento que D&B), menores costos de fortificación (dada la menor sobre excavación), costo inferior de equipo total (1 máquina v/s q equipo por cada operación unitaria convencional), costo de mano de obra (trabajo menos especializado) y eliminación de construcciones temporales que son necesarias en D&B.

Además esta tecnología tiene ventajas con respecto al sobre-costo posible asociados a una excavación de túnel, tal como se puede apreciar del siguiente gráfico.

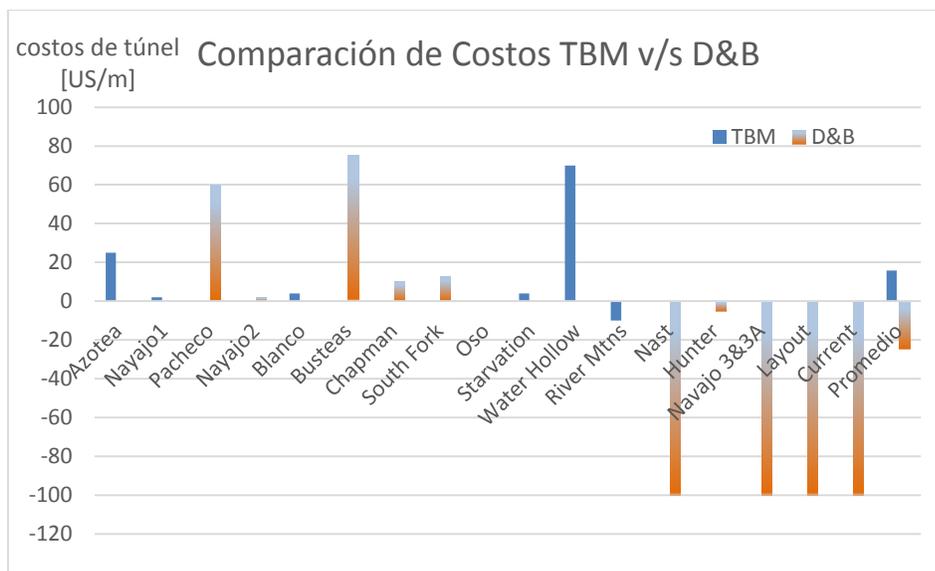


Gráfico 6: Variación de costos TBM v/s D&B para múltiples excavaciones (J. Tarkoy, 1995)

Además se conoce un comportamiento típico de la TBM llamado también la “regla de dedo”, la cual estipula que en general a partir de 7 km de túnel, los costos de un método convencional comienzan a ser mayores debido al transporte que se hace cada vez más costoso conforme crece la

longitud total de túnel. Dicho esto la construcción con D&B se torna ineficiente a partir de este punto tal como se muestra en el gráfico siguiente. (Palma A., 2010)

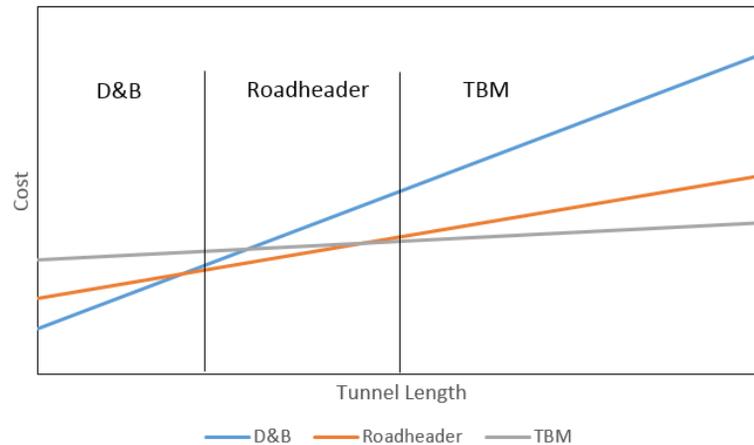


Gráfico 7: Comparación de costos a largo plazo D&B v/s TBM (Palma A., 2010)

2.3.3 Seguridad

Dado que la seguridad de las personas es un objetivo principal cada vez más común dentro de las organizaciones, el hecho de que este método tenga una tasa de accidentabilidad menor que un método convencional lo hace mucho más conveniente. Groseclose y Tackett examinaron varios aspectos de contrato de la USBR (US Bureau of Reclamation) para túneles construidos entre 1960 y 1970, logran hallar que la tasa de accidentabilidad era de casi la mitad para TBM con respecto a D&B a pesar de que 12 de los 19 proyectos examinados hayan sido hechos con TBM. Además considerando que el periodo en que se realiza el análisis es un escenario bastante favorable, la tecnología TBM ha mejorado su desempeño desde aquel punto haciéndola aún más segura hoy en día. Un factor importante que justifica la menor accidentabilidad es la menor especialización del equipo a cargo de una TBM donde hay menos tareas son más fáciles y repetitivas lo que permite su rápido aprendizaje y entrenamientos más cortos. (J. Tarkoy, 1995)

La única componente esencial a controlar es la precaución contra incendios, lo cual es crítico en la frente de trabajo dado que existen hidrocarburos emanados por componentes químicos que contienen este tipo de sustancia y que al ser utilizados en la labor de cortar roca o en fortificación llaman a un cuidado especial del sistema de ventilación. En particular esta situación se vuelve crítica en minería de carbón. (Belle B., 2015)

A modo de resumen se presenta a continuación un cuadro comparativo entre ambos métodos.

Parámetro	TBM	D&B
Sección [m ²]	12-800	16-49
Forma	Circular	en "D"
Tiempo previo a ejecución [años]	2	1
N° Equipos por frente	1	9
Cuadrilla [N° personas]	15-20	>=9
Rendimiento [m/día]	24	9
Radio de curvatura mínimo [m]	150	23
Granulometría	Fina y homogénea	Gruesa y heterogénea
Esponjamiento[%]	45-55	25-35
Sobre excavación	0	0
CAPEX	Elevadas(10MUSD)	Bajas (3MUSD)
OPEX	Estables	Aumentan con la profundidad
Seguridad	Contra incendios	Contra Incendios, gases, atropello, entre otros

Tabla 2: Resumen y contraste de cualidades técnicas TBM V/S D&B

De todas maneras todos los parámetros presentados en la tabla 2 quedan sujetos al tipo de túnel con sus condiciones específicas de geología y tipo de TBM a utilizar. Luego tanto los costos como el tiempo son relativos al caso a caso (Giraldo, E., 2009), no obstante, la condición de seguridad superior en TBM es inherente esta tecnología.

2.4 Herramientas de gestión

Para mostrar los resultados a partir de los datos de terreno, informes técnico económicos y otros documentos de AES Gener se utilizaran herramientas de gestión que permitan enfocarse de manera simple y rápida en los KPI y sus variaciones así como en las causas y medidas de control a las que se quiere llegar.

2.4.1 Estructura PMBOK (Project Manager Body Of Knowledge)

Este instrumento en términos simples es una guía para el manejo de los proyectos, la cual entrega los fundamentos básicos para direccionar el proceso utilizando buenas prácticas. Un ejemplo de

esto es estructurar el proyecto reconociendo las 9 áreas del conocimiento, las cuales se presentan en la siguiente tabla.

1	Gestión de la Integración del Proyecto	Asegurar que los distintos elementos del proyecto son coordinados apropiadamente.
2	Gestión de Alcance del Proyecto	Cumplir el alcance del producto, medido contra los requerimientos, y el alcance del proyecto, medido contra el plan.
3	Gestión del Cronograma	Asegurar que el proyecto termina en plazo.
4	Gestión de Costes	Asegurar que el proyecto termina con el presupuesto aprobado.
5	Gestión de la Calidad	Asegurar que el proyecto satisface las necesidades para las que fue concebido.
6	Gestión de los Recursos Humanos	Hace el uso más eficaz de las personas (todos los interesados) involucradas en el proyecto.
7	Gestión de la Comunicación	Asegurar la oportuna y apropiada generación, recolección, distribución, almacenamiento y disposición final de la información del proyecto.
8	Gestión de Riesgos	Identificar, analizar y responder a los riesgos del proyecto.
9	Gestión de Adquisiciones	Adquirir los bienes y servicios necesarios, provistos por terceros, ajenos a la organización.

Tabla 3: Áreas del conocimiento dentro de un proyecto (Mallorca, P., 2010)

Dentro del trabajo de memoria, las áreas más importantes son las de “Gestión Alcance del Proyecto”, “Gestión del Cronograma” y “Gestión de Costes. La primera área mencionada es fundamental dado que existe una conexión natural entre la evaluación de desempeño misma en relación al detalle de esta área, es decir, medir contra los requerimientos, y el alcance del proyecto, medido contra el plan. La evaluación, toma el plan como la referencia y va observando cómo se desarrolla en la práctica este mismo, por lo que tener en cuenta esta área es fundamental previo al comienzo de la evaluación de desempeño. En relación a la gestión del alcance se propone el uso de la herramienta Work Breakdown Structure (WBS), la cual consiste en una descomposición jerárquica orientada a entregables, relativa al trabajo que será ejecutado por el equipo del proyecto para lograr los objetivos del proyecto y crear los entregables requeridos (Mallorca, P., 2010). Organiza y define el alcance total del proyecto. Un ejemplo de WBS se puede apreciar a continuación.

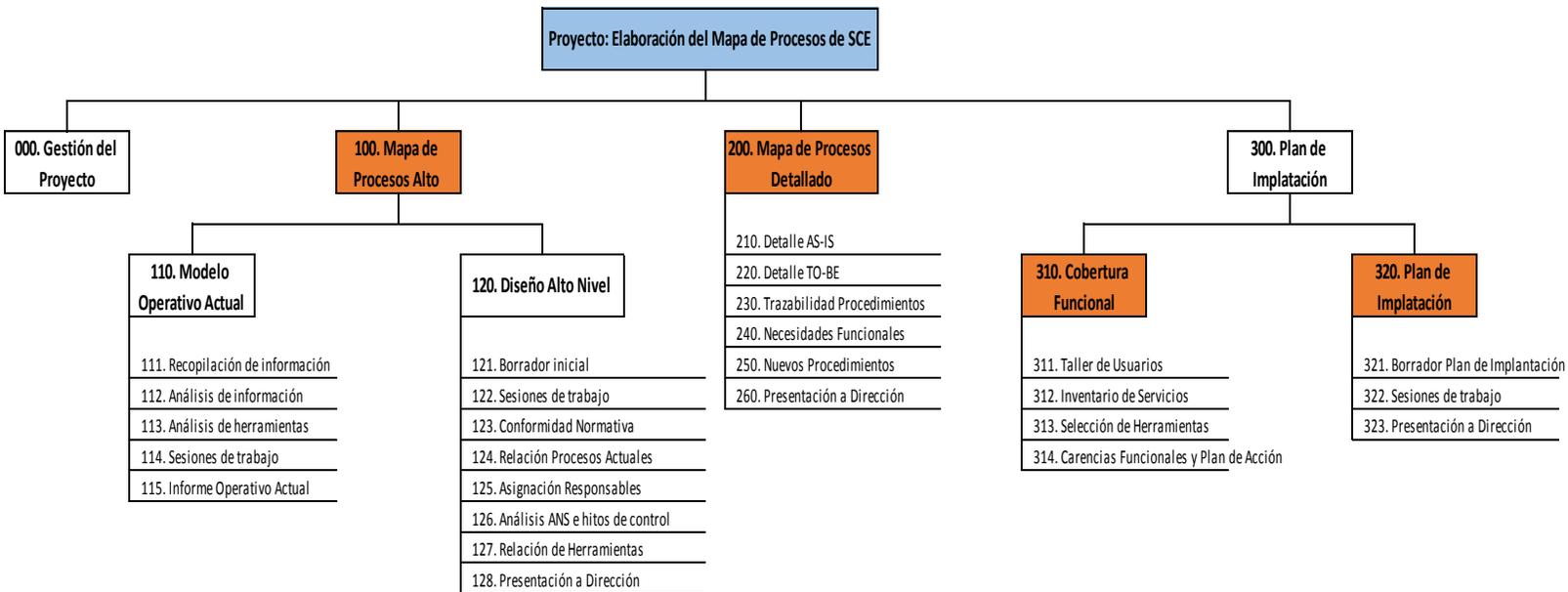
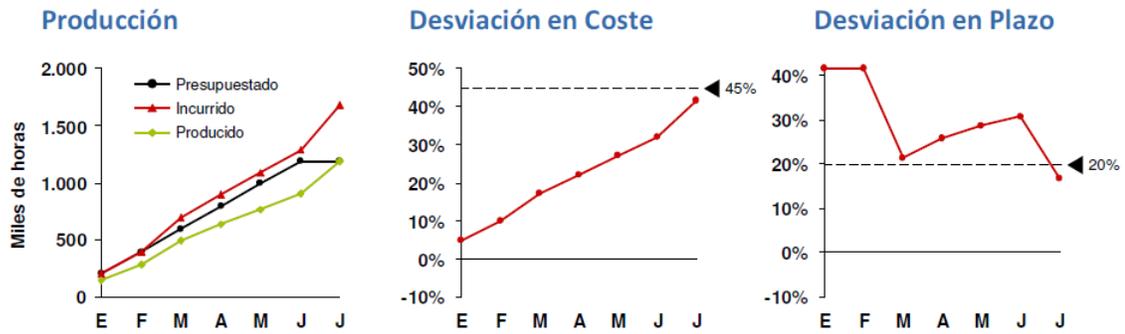


Ilustración 3: Ejemplo de WBS, (Mallorca, P., 2010)

Por otro lado el Cronograma es un área de interés dado que el proyecto se evalúa técnica y económicamente siendo el tiempo una variable transversal en los análisis de desviación. Además es importante conocer cuáles son las medidas que ya se planificaron para mantener los plazos y como estas se ejecutan en terreno a fin de cumplir los plazos estipulados para cada TBM. Un detalle importante en esta área del conocimiento es encontrar los puntos de inicio para cada TBM, ya que se debe considerar la capacidad del personal de la máquina para llegar a los rendimientos promedio presupuestados. En otras palabras se reconoce la existencia de una curva de aprendizaje o de *Ramp-up* operativo, la cual es imprescindible para explicar los rendimientos tempranos de una TBM.

2.4.2 Tripla: Presupuestado-Incurrido-Producido

Esta herramienta nos permitirá visualizar de manera gráfica los resultados de desviaciones tanto de costos como de rendimientos para un determinado periodo de tiempo proyectando incluso comportamientos futuros. A continuación se muestra un ejemplo de cada uno de los gráficos pertinentes a la evaluación de desempeño.



Gráfica de Producción

- En adjudicación: Se proyecta el presupuesto a lo largo del plazo (línea base de coste)
- En ejecución: En cada reunión de seguimiento, se representan las horas incurridas por el proveedor y las que representan el porcentaje completado, o producido.
- Al cierre del proyecto: Producido = 100% de Presupuestado
- Si hay ampliación del presupuesto, se cambia la línea base

Gráfica de Desviación en Coste

- En ejecución: En cada reunión de seguimiento, se representa:
 - El % de desviación en coste hasta la fecha (horas de sobre coste / horas presupuestadas)
 - El % de desviación en coste previsto (línea discontinua)
- Al cierre del proyecto: Último punto = línea discontinua = Desviación real

Gráfica de Desviación en Plazo

- En ejecución: En cada reunión de seguimiento, se representa:
 - El % de desviación en plazo hasta la fecha (días de retraso / plazo total)
 - El % de desviación en plazo previsto (línea discontinua)
- Al cierre del proyecto: Último punto = línea discontinua = Desviación real

Ilustración 4: Ejemplos de desviación en producción, costos y plazos, (Mallorca, P., 2010)

2.4.3 Cuenta de Resultados

Para mostrar finalmente como se exponen las desviaciones todas juntas al mismo tiempo en que se muestra el porcentaje asociado a cada causa detrás de la desviación, se utiliza un gráfico de cuenta de resultados tal como el siguiente ejemplo lo indica.

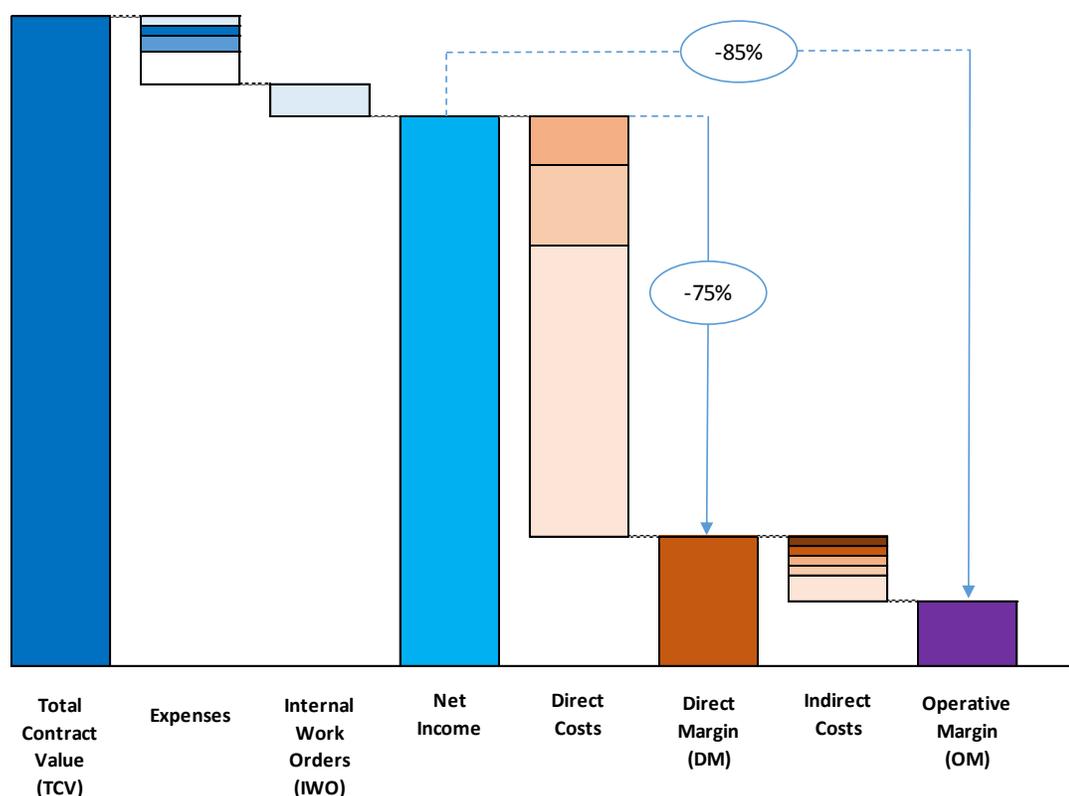


Gráfico 8: Ejemplo de Cuenta de resultados, (Mallorca, P., 2010)

La cuenta de resultados proveniente de la evaluación de desempeño fijará en el eje de las abscisas cada uno de los KPI's evaluados, mientras que en el eje de las ordenadas se utiliza unidad de porcentaje para mostrar quienes varían en mayor medida. Además los distintos colores representaran las causas y el peso relativo de estas con respecto a la desviación neta de un KPI.

Se presentan a continuación los antecedentes relacionados con el trabajo en faena, el cual inicia el 1 de Agosto de 2015.

2.5 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM)

2.5.1 Descripción general y localización

El Proyecto Alto Maipo está compuesto por dos unidades en serie hidráulica: Alfalfal II y Las Lajas. Entre ambas suman 531 MW de potencia. Para producir esta energía, se ocuparán parte de las aguas de los ríos Volcán, Yeso y Colorado, las que serán íntegramente devueltas al río Maipo 5 kilómetros aguas arriba de la bocatoma de la empresa de agua potable y de las captaciones de los canalistas, no afectando el abastecimiento de agua potable para Santiago, su uso para regadío y las actividades deportivas que se realizan en torno al río Maipo. La ubicación geográfica del proyecto se muestra a continuación.

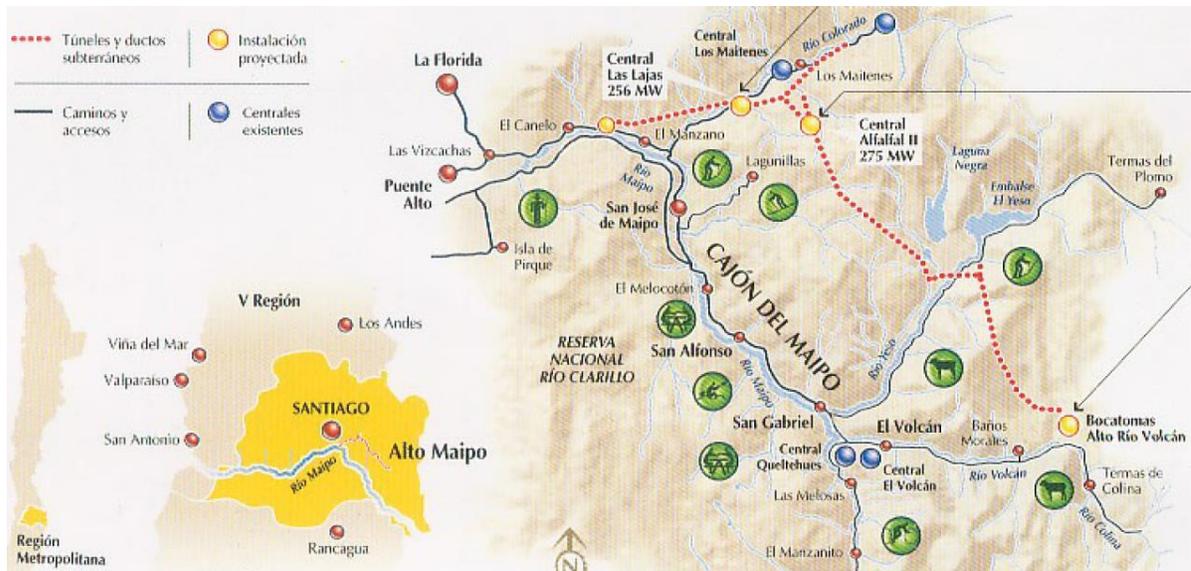


Ilustración 5: Ubicación geográfica PHAM (PHAM, 2015)

Con la construcción del proyecto Alto Maipo, AES Gener revitaliza su compromiso e interés con la comuna de San José de Maipo, con quien tiene una relación que se inició hace 90 años, con la construcción de la central Maitenes, la que se ha ido renovando y fortaleciendo posteriormente con las centrales Queltehues, Volcán y Alfalfal I.

2.5.2 Ventajas comparativas

Las principales características que hacen llamativa la construcción de PHAM sobre otros proyectos son las siguientes:

Energía Limpia: La hidroelectricidad, como lo indica su nombre, se obtiene a partir del agua, un recurso renovable. Ha sido un sistema de generación eléctrica convencionalmente usado desde hace más de un centenar de años como pequeñas centrales de paso accionadas por ruedas de paletas o canchilones o en centrales industriales de mayor capacidad, que han iluminado y motorizado históricamente el país. Un ejemplo de esto han sido las centrales Alfalfal I (1991) y Queltehues (1928).

Obra Subterránea PHAM incorpora una hidroeléctrica sin embalse con más del 90% de las instalaciones bajo tierra para su fin energético, lo cual la convierte en una central hidroeléctrica de pasada. Las obras civiles relevantes consideran 67 kilómetros de túneles excavados en roca sólida, a una profundidad promedio de 800 m. Su tamaño está definido por el caudal a transportar y por las dimensiones mínimas que requiere la operación de la maquinaria de excavación. Por diseño, los túneles conducirán el agua en presión y con baja velocidad, perdiendo muy poca energía hasta llegar a las cavernas de máquinas. Las dos cavernas de máquinas son espacios excavados y construidos a gran profundidad, en roca, que albergan todas las instalaciones de control, la maquinaria de generación eléctrica y de apoyo para su mantenimiento y los recintos para una cómoda y segura estadía del personal que se encargará del mantenimiento de los equipos de generación.

Para llegar a las cavernas de máquinas desde los túneles de aducción se dispone de piques de presión que son ductos verticales o inclinados que transportan el agua a una presión creciente desde el túnel de aducción a la profundidad de las cavernas de máquinas donde se alimentan los inyectores que accionan las turbinas. En las zonas de presión, estos piques van revestidos en tubería de acero de alta resistencia.

Antes de llegar a los piques de presión, los túneles de aducción incluyen chimeneas de equilibrio, que son piques verticales que permiten amortiguar las variaciones de presión que se originan por fluctuaciones puntuales de demanda de agua de las turbinas.

Como resultado se obtiene por ejemplo el Túnel de aducción Volcán que transporta un máximo de 12 m³/s de agua desde las bocatomas en el valle de la Engorda y el Morado hasta el valle de El Yeso.

Contribución a la eficiencia y seguridad de suministro: En caso de un *blackout* (interrupción generalizada del suministro eléctrico o “apagón”) las centrales hidroeléctricas son las primeras en reponer la inyección de energía al sistema, lo cual brinda a la capital una más rápida y mayor seguridad de operación.

Por otra parte, la proximidad del proyecto Alto Maipo a Santiago, independiza a la capital de cualquier eventualidad en el suministro debido a interrupciones de la red de transmisión en otros puntos del país.

2.5.3 Contextualización del estudio

Para entender el contexto contractual en que se desarrolla la memoria y bajo la cual opera PHAM se presenta el siguiente esquema.

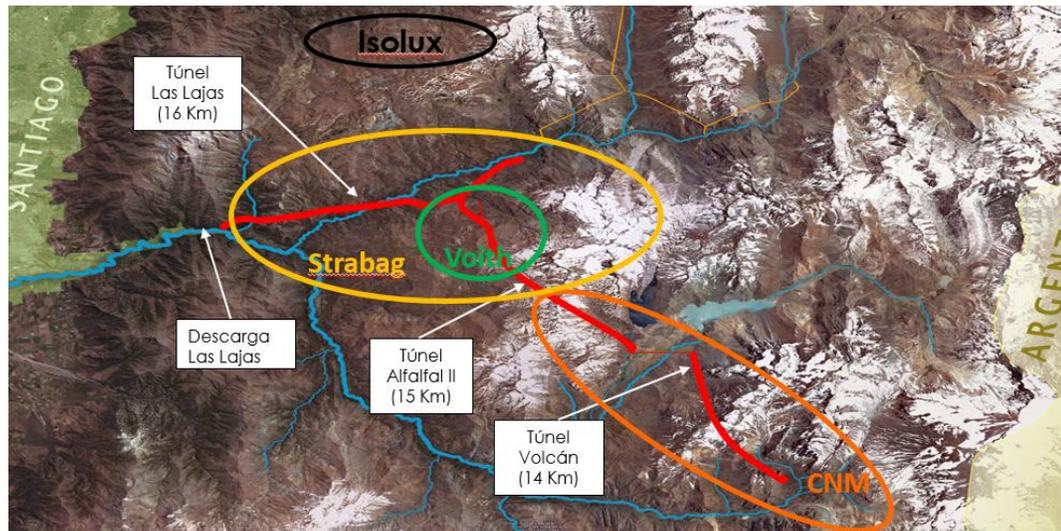


Ilustración 6: Esquema contractual, PHAM (AES Gener, 2015)

En total existen cuatro contratistas de construcción a cargo de las obras requeridas por PHAM. Los más importantes son Strabag a cargo del contrato 630-620A, el cual abarca el área en amarillo en el sector de El Colorado, el cual tiene el túnel las Lajas y el túnel Alfalfal II entre otros. Por otro lado el consorcio entre Hochtief-CMC llamada Constructora nuevo Maipo (CNM) está a cargo del contrato 620B en donde está contemplada la construcción del túnel Volcán en el área de El Yeso.

Por último se encuentran las subcontratistas Isolux a cargo de las líneas de transmisión superficiales y Voith quien juega un papel importante más adelante en el proyecto dado que es el principal proveedor de servicios y maquinaria hidráulica.

2.6 Selección de TBM

En el proyecto PHAM está planificado el uso de tres TBM para la construcción de los túneles de aducción de aguas con un total de 29 Km aprox. bajo esta metodología equivalentes a un 43.3% de toda la excavación subterránea.

Los requerimientos básicos para seleccionar una TBM que fueron evaluados por el por PHAM son los siguientes:

- Estar equipada para enfrentar distintos tipos de roca según sea roca dura o mixta según el diámetro de la sección requerida, un diámetro mínimo para los cortadores y una potencia mínima de energía para el cabezal de corte (capacidad de torque)
- Se debe contar con un sistema de transmisión de frecuencia variable (*Variable Frequency Drive system*)
- Equipamiento de un sistema de monitoreo y registros de los datos de operación TBM. Los datos deben ser tomados en tiempo real y tener la capacidad de transmitirse vía método manual o por cable tal que los archivos sean exportables a aplicaciones *MS Excel* y *MA Access*. Complementando la accesibilidad del sistema, la instalación de un lector de Ampere y registro en la unidad de transformador de suministro de la TBM es necesaria. Estos deben estar conectados en el sitio de oficinas para mantener el control de actividades continuo
- Se requiere un sistema de *Back-up* que permita la excavación y geometría del túnel incluyendo la capacidad de pasar a través de las áreas donde el sobrecorte de 100 mm se lleva a cabo por la cabeza de corte, o cuando se reduce debido a un alto grado de fortificación
- Techos de protección sólidos tienen que ser instalados sobre todos los lugares de trabajo, es decir, lugares donde los trabajadores están estacionados en una base más o menos continua
- El metraje de avance debe ser continuamente medido con láser y guiado por el sistema de monitoreo y registro con alta precisión tal que se cumpla con las estrictas tolerancias para el alineamiento del túnel definido en planos
- La TBM se construirá de forma que es posible una instalación adecuada y eficiente de todos los elementos de fortificación tanto en la zona de la máquina como en la zona de equipos de respaldo
- Dependiendo de las condiciones de roca puede ser necesaria una fortificación inicial cercana a la frente al frente de los *grippers*. En esta área se debe acomodar dos perforadoras para la instalación de pernos, cada una en los extremos de la viga principal. Estas perforadoras pueden montarse bajo un diseño personalizado que permita su uso mientras la TBM está avanzando y puedan perforar un patrón de hoyos en la roca para la instalación de los pernos y planchuelas
- Un erector de marcos circular debe ser instalado inmediatamente detrás del cabezal de corte y su capacidad debe ser tal que se permita la instalación de este tipo de fortificación en esta área cuando sea requerido
- Los *Grippers* de la TBM deben ser equipados con rebajes para no deformar los marcos de acero y vigas de celosía
- La TBM debe contar con un mínimo de 2 perforadoras en la frente que cumplan con los propósitos de exploración y *grouting*.
- La capacidad de movimiento de las perforadoras en la viga principal debe ser tal que les permita un perímetro cercano a los 360 grados y un ángulo de inclinación entre 10 a 30 grados desde la línea de centro del túnel. Todo esto sujeto a la aprobación del mandante
- Se deben tener completas dos líneas de *grouting* instaladas y operadas a lo largo del sistema *Back-up*.
- *Roboshots* de alta capacidad para rociar concreto durante el proceso de excavación deben ser posicionados en la zona de maquinaria. Se requieren baldes colectores de material de rebote asociados a cada rociador de concreto y además que el sistema sea provisto por bombas gemelas de concreto instaladas a lo largo del *Back-up*
- La instalación de dovelas en la zona de máquinas durante la excavación debe ser permitida. El segmento e instalación deben proporcionar el espaciamiento necesario para no interrumpir con la puesta de marcos de acero y vigas de celosía en la misma área. Además

se requiere de la limpieza de esta zona previa a la puesta de dovelas. Por último estos segmentos deben poder incrustarse con morteros de cemento para una buena nivelación

Con estas condiciones es como se llega finalmente a las tres TBM que se utilizarán en PHAM, las cuales se presentan a continuación.

TBM 1 – Robbins MB139-396: Posee 4.13 [m] de diámetro para excavar el túnel el Volcán (desde V5 a V1) en el sector El Yeso. La obra está a cargo de CNM (Constructora Nuevo Maipo), consorcio entre Hochtief y CMC, la cual se encarga del contrato 620B.

TBM 2 – Herrenknecht S-887: Posee 6.9 [m] de diámetro para excavar el túnel de descarga Las Lajas (L1) en el sector de El colorado. La obra está a cargo Strabag SpA, contratista encargada del contrato 630.

TBM 3 – Herrenknecht S-889: Posee 4,5m de diámetro para excavar el túnel de aducción Alfalfal II (VA2) en el sector de El colorado. La obra está a cargo Strabag SpA, contratista encargada del contrato 620A.

Atendiendo al periodo de estudio para este trabajo de memoria, se focaliza el estudio hacia el túnel V5, pues posee la primera TBM en entrar en operación. Dicho lo anterior se continúa con la descripción técnica de la tuneladora Robbins.

2.6.1 TBM Robbins MB139-396

La TBM en cuestión ha sido diseñada específicamente para la excavación de V5 y por lo tanto se ajusta a las condiciones previstas por el cliente. En particular las especificaciones técnicas de la máquina se muestran a continuación.

Especificaciones técnicas

- Diámetro de la máquina (con cortadores nuevos): 4130mm (162.6’’)
- Cortadores (Series 17’’(432mm)):
 - N° de cortadores de disco centrales 17’’: 4
 - N° de cortadores frontales y perimetrales 17’’: 23
 - Carga máxima recomendada por cortador: 60023 lb/pie (267 kN)
- Cabezal de corte
 - Empuje máximo de operación del cabezal de corte: 7209 kN
 - Transmisión del cabezal de corte: Motores eléctricos, engranes reductores acoplamiento safeset y freno
 - Potencia de cabezal de corte: 1700 kW (425 kW x4)
 - Velocidad del cabezal: [0-12.9] rpm
 - Par del cabezal de torsión: 1564 kNm @ [0-10.4] rpm; 1260 kNm @ 12.9 rpm
- Cilindros de empuje principales
 - Desplazamiento 79’’(2007mm)

- N° de cilindros de empuje principales: 2
- Sistema hidráulico: Potencia
 - Presión máxima del sistema: 285 bar(4133.5 psi)
 - Presión de operación del sistema (Empuje): [34-275] bar (493-3988.5 psi)
- Sistema eléctrico
 - Tensión primaria: 20 kV, 50 Hz
 - Tensión secundaria 690 V, 400V
 - Circuito motor: 690 VAC, trifásico, 50 Hz
 - Sistema de iluminación: 230 VAC, 50 Hz
 - Sistema de control: 24 VDC
 - Tamaño Transformador: 2 piezas- 1150 kVA – 23 kV/690V; 1 pieza- 1000 kVA- 23kV/400V
- Cinta transportadora de la máquina
 - Ancho: 711mm (28’’)
- Peso total de la TBM (+-10%): 399 ton

Descripciones técnicas: Para comprender las funciones y los sistemas de operación de la máquina se deja a continuación una reseña de los sectores más importantes.

Conjunto cabezal de corte: Ubicado en el sector de la frente misma, el cabezal de corte está montado al conjunto del cojinete principal, mismo que recibe carga radial y de empuje. El par de impulso para el cabezal de corte proviene de cuatro motores eléctricos CA trifásicos, enfriados con agua y de frecuencia variable. Estos motores, que transmiten su impulso por medio de conjuntos de engranes reductores a un engrane anular principal (engrane maestro) que va fijo al conjunto del cabezal de corte, hacen rotar el conjunto del cabezal de corte de 0 a 12.9 RPM en dirección de las manecillas del reloj, visto desde la parte posterior de la máquina. Estructuralmente el conjunto del cabezal de corte está hecho de placa de acero pesada, reforzada internamente con cucharones para quitar los recortes de roca. Los dispositivos de recolección, o cucharones, recogen el material del piso del túnel y lo entregan por gravedad al sistema de transportador dentro del soporte del cabezal de corte conforme cada cucharón gira hasta la corona del túnel. Estos cucharones están equipados con bordes duros reemplazables.

El conjunto de la cabeza de corte es la estructura de montaje de los 23 conjuntos de cortadores, con un total de 27 anillos de corte reemplazables, que se usan en esta máquina durante su operación normal. Los 4 anillos de corte localizados al centro de la cabeza de corte van montados sobre un pedestal cuadrangular. Los otros 23 anillos de corte van montados sobre carcasas individuales. Los anillos de corte individuales están numerados de forma radial desde el centro hacia afuera empezando por el número 1 hasta el 27. A los anillos de corte del 22 al 27 se les llama comúnmente cortadores perimetrales; sin embargo el cortador 27, al ser el más externo, es en realidad el que da el tamaño final o diámetro del túnel.

Todos los conjuntos son reemplazables desde atrás de la cabeza de corte. Cada anillo de corte describe su propio patrón radial individual, conforme la cabeza de corte gira y completa una

revolución. La cabeza de corte también es la base de montaje de las boquillas de aspersión de agua y la tubería relacionada con el sistema de aspersión de agua, que se describe en un tema aparte.

Se usan dos tipos de cortadores en esta máquina. Estos son los conjuntos de cortador central, el frontal/perimetral, o los conjuntos de casco y de tiro, tal y como se les llama en los dibujos de montaje. Los conjuntos de cortador central utilizan anillos de corte reemplazables de 17" (431.8 mm) y son de doble disco, para poder minimizar la separación entre anillos al centro de la cabeza de corte. Los conjuntos de cortadores frontal y diametral utilizan anillos de corte de 17" (482.6 mm). Los cortadores diametrales, que cortan el diámetro final del túnel, están configurados para ser instalados y retirados con facilidad, dada su proximidad con la pared del túnel.

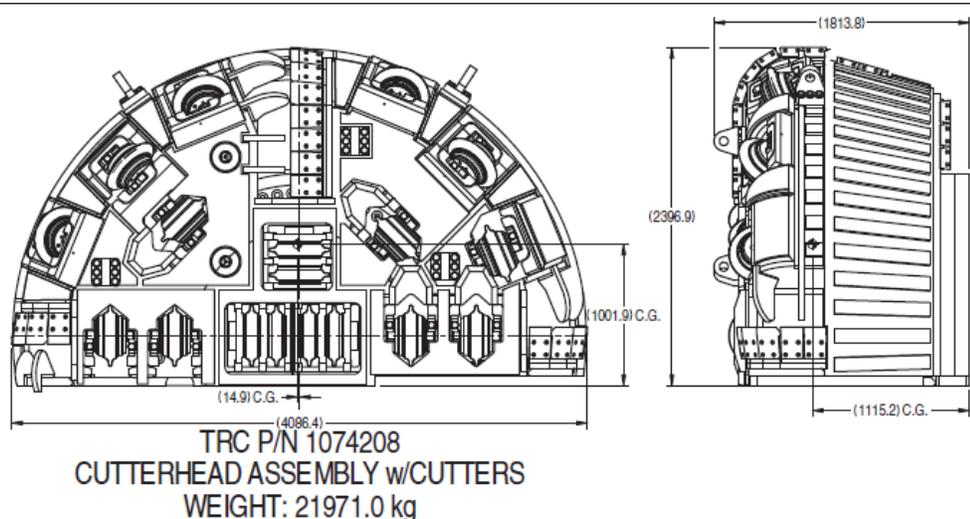


Ilustración 7: Cortadores de cabeza, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Plataforma L1: Fortificación primaria que incluye una perforadora de TBM con movimiento de riel a través del sector y radial para la puesta de pernos (hasta 105°) hasta 30 metros de la frente. La fortificación puede hacerse o no bajo los *Finger Shields*, los cuales son básicamente unas vigas de protección que sirven de techo a los trabajadores al momento de ejecutar trabajos en L1. Dicho lo anterior las actividades en este sector son las siguientes:

-Bajo *Finger Shields*:

- Instalación manual de malla electrosoldada
- Instalación de pernos c/perforadora TBM
 - helicoidal con lechada
 - autoperforante
 - con resina
- Instalación de Marco

-Fuera de *Finger Shields*:

- Acuñaadura convencional o con perforadoras TBM
- Sello manual (pre-*Shotcrete*)
- Instalación de pernos con perforadora TBM
 - helicoidal con lechada

- helicoidal con resina
- Autoperforante
- Instalación manual de Malla
- *Shotcrete*

Plataforma L2: A continuación de la zona L1 (30m) está el sector L2, el cual realiza fortificación secundaria que incluye una perforadora con movimiento radial mayor que en L1 (hasta 315°) y un robot de proyección de *Shotcrete*. En este sector se realizan las siguientes actividades:

- Instalación de pernos c/perforadora TBM
 - Con resina
 - Con lechada
 - Autoperforante
- Instalación de pernos manual
- *Shotcrete* c/roboshot TBM
- *Shotcrete* manual

Sistema Back up: plataformas equipadas con miembros estructurales para apoyar las líneas de ventilación, cañerías de agua, cañerías neumáticas, bandejas de cable y mangueras. En total se cuenta con 23 plataformas de back up (175m aprox.).

El detalle de las funciones en cada plataforma back-up e información adicional de descripciones técnicas pueden encontrarse en los anexos de este trabajo.

2.7 Selección de túneles

Existen tres túneles en Alto Maipo que serán construidos bajo la metodología de TBM

Túnel VA2 (Ventana Lajas 2): ubicado en el sector de El Colorado y formando parte del contrato 630-620^a a cargo de Strabag. Este túnel contempla una extensión de 6.5Km aprox. con un diámetro de 4,5 m y se tiene planificado partir las actividades con TBM la segunda semana de Enero de 2016, según TILOS (*Time Location Sistem*).

Túnel L1-L4: ubicado en el sector de El Colorado y formando parte del contrato 630-620A a cargo de Strabag. Este túnel contempla una extensión de 5Km aprox. con un diámetro de 6.9 m el cual se tiene planificado partir las actividades con TBM la última semana de Diciembre de 2015, según TILOS (*Time Location Sistem*).

Túnel V5-V1: ubicado en el sector de El Yeso y formando parte del contrato 620B a cargo de CNM. Este túnel contempla una extensión de 14.1 Km aprox. con un diámetro de 4.13 m el cual está en plena construcción partiendo el 14 de Junio de 2015 de acuerdo a los registros de planificación de Alto Maipo.

Como se mencionó en el punto 2.6.1 de acuerdo al tiempo de contrato para efectuar la memoria, se decide partir por el análisis del túnel V5-V1 aprovechando además que el túnel está en construcción y aún no ha alcanzado su máximo rendimiento sino que se encuentra en la etapa de *Ramp-up* al momento de iniciar el estudio. Luego, el estudio asociado la curva de aprendizaje hace innovador el análisis, pues incorpora la experticia de los trabajadores a cargo de la excavación y la capacidad de adaptación de los nuevos integrantes en la flota TBM hasta alcanzar el régimen.

Dicho lo anterior se describe en detalle el túnel V5-V1.

2.7.1 Túnel El Volcán V5-V1

Esta obra de excavación consta de un total de 14.1km, no obstante, se debe tomar en consideración que el túnel no será excavado en su totalidad bajo la metodología de TBM, solo 7 km del túnel partiendo desde el PK 14+100 hasta el 7+100 faltando aún probar si es factible el uso de TBM en los dos últimos kilómetros de túnel (PK: 9+100-7+100) de otro modo se terminaría excavando bajo el método tradicional D&B. Este último método mencionado es necesario para otorgar el espacio requerido por la máquina y su instalación previa a la excavación. La secuencia de excavación de este túnel se puede apreciar en la siguiente imagen

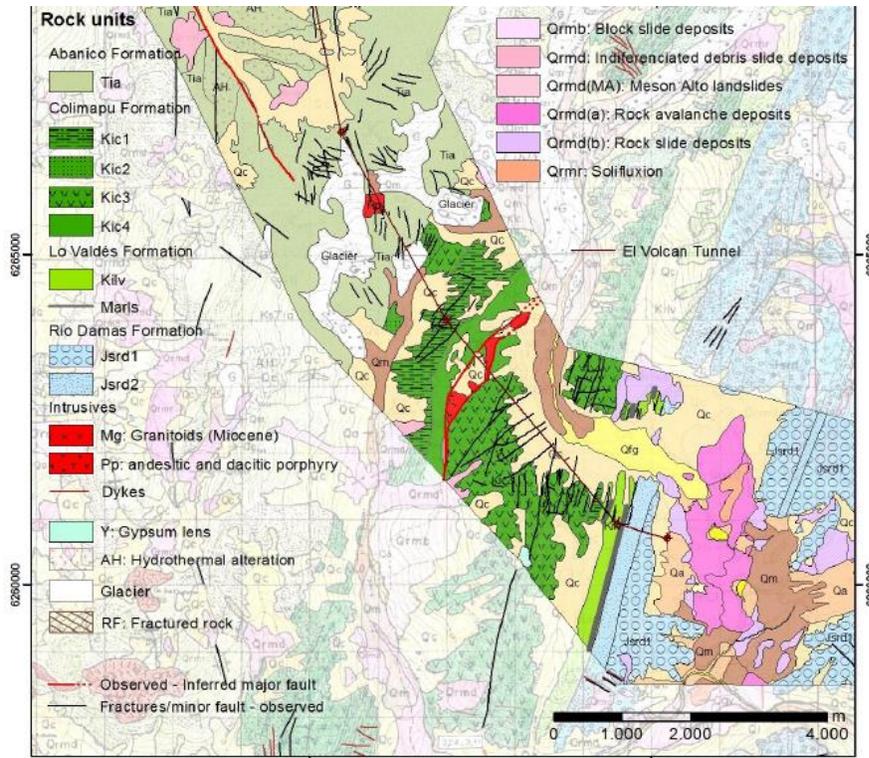


Ilustración 9: Mapa geológico simplificado de túnel Volcán (Departamento de Geología Fcm, 2015)

Un modelo 3D permite visualizar de mejor forma las estructuras presentes a lo largo del túnel tal como se muestra a continuación.

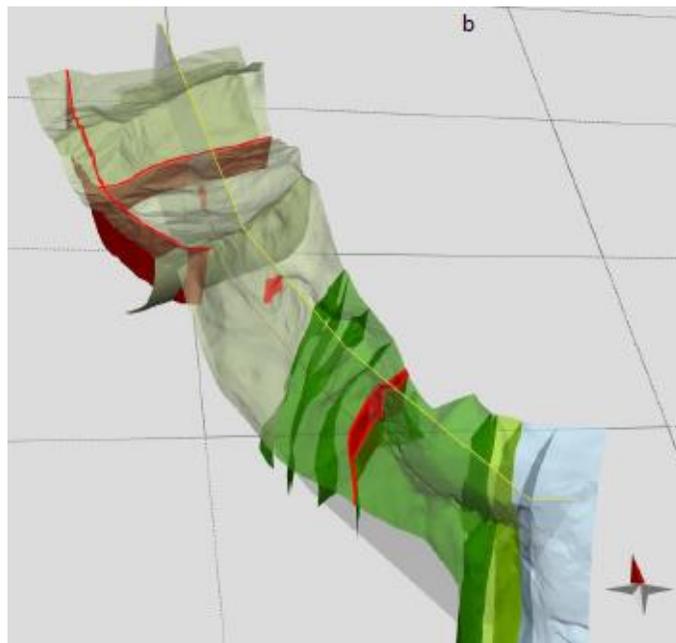


Ilustración 10: Vista tridimensional, Túnel El Volcán (Departamento de Geología Fcm, 2015)

La información estructural compilado fue digitalizada y georeferenciada en PSAD56-19S Datum. Además, se construyó un modelo digital de elevación (DEM), basado en 1: 50.000 contornos escala, obtenida del Instituto Geográfico Militar (IGM). Toda la información georeferenciada estaba envuelto en la DEM para producir un modelo de superficie geológica 3D preliminar.

Además, con base en la fotografía y por satélite imágenes aéreas en algunas zonas, se pudo incluir en el modelo, las estructuras (fallas / fracturas) que no fueron incluidos en informes anteriores (Departamento de Geología Fcfm, 2015).

A partir del modelo 3D se construye una sección transversal siguiendo la traza del túnel el Volcán, el cual representa los cuatro dominios presentes así como las intersecciones de fallas a lo largo de la obra.

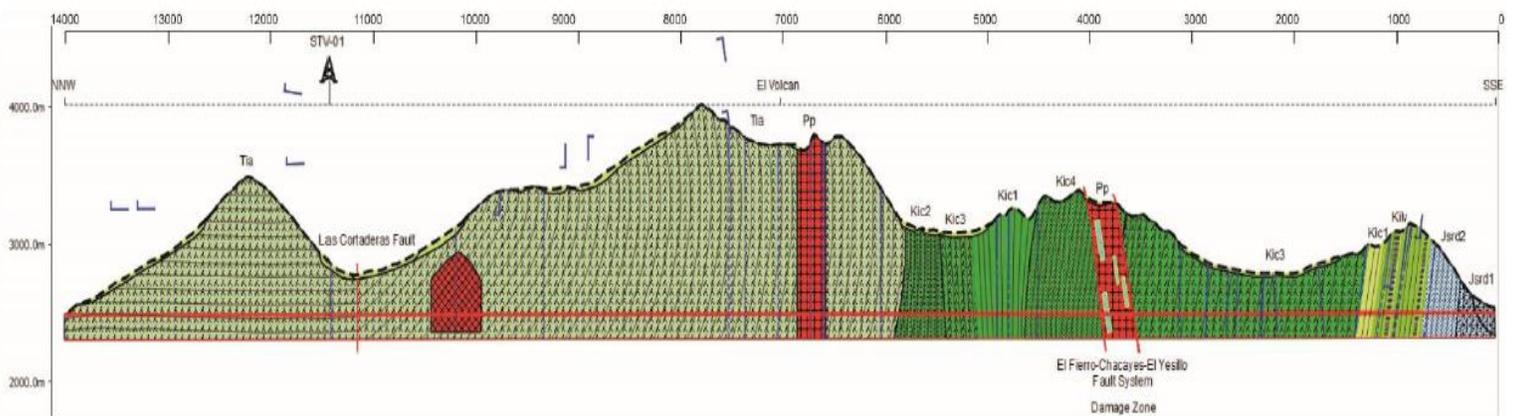


Ilustración 11: Perfil túnel Volcán y dominios litológicos importantes. Tia: F. Abanico; Kic: F. Colimapu; Kilv: F. Lo Valdés; Jsrd: F. Rio Damas. Secciones rojas: Zona de alteración. Línea roja: traza del túnel. Cuerpos tabulares celestes: Lentes de Yeso. (Departamento de Geología Fcfm, 2015)

Se aprecia de la imagen que la primera parte del túnel está bajo un dominio de abanico Este (Tia) hasta aproximadamente un poco más allá de la mitad del túnel por lo que este dominio es el que juega un rol clave en este trabajo dada la extensión de la zona de estudio.

Consideraciones importantes con respecto a la geología del túnel son las siguientes:

- El área del proyecto podría ser afectada por la actividad de subducción interplacas con epicentros desde 15 a 50 km de profundidad. Por otro lado la actividad minera y volcánica podría gatillar sismicidad, pero que no logra magnitudes mayores. Además la actividad volcánica no ha sido vaticinada para el área de construcción
- Dentro del túnel se encuentran rocas intrusivas alojadas por estas formaciones que incluyen sills y diques principalmente andesíticas y dacíticos y algunos pequeños cuerpos irregulares

de composición diorítica y dacítica que surgen a lo largo de un rango hacia el sur de la montaña de El Morado

- En cuanto al sistema de estructuras importantes, el túnel presenta una ancha zona de falla con fuerte deformación ubicada en la zona central del túnel envolviendo lo que es la formación de abanico, esencialmente es un brazo vertical que expone una sección completa de la sucesión del Mesozoico. El sistema falla principal que atraviesa la traza propuesta del túnel Volcán con una dirección de tendencia vertical, El sistema de Fallas El Fierro - Chacayes - El Yesillo. Por último esta la falla Las Cortaderas subvertical y se considera a menor escala fracturas y fallas en las formaciones Rio Damas, Colimapu Lo Valdés y Abanico, pero se destaca que ninguna de estas fallas estaría presente en la zona bajo estudio en este trabajo por lo que solo se podría ver afectado el rendimiento de la TBM por fallas no previstas
- El área de construcción, en específico en donde está ubicada la faena de V5 presenta deslizamientos de roca, avalanchas y morrenas que configuran lo que es llamado Complejo La Engorda en donde la caída de rocas y las avalanchas de nieve son el peligro que asecha constantemente la obra además de un clima de invierno que favorece este tipo de fenómenos
- El mapeo geológico que determina el perfil de rocas con las que se enfrentará la excavación es realizado netamente con data superficial, es decir, que no hay una gran cantidad de sondajes en la zona, porque a diferencia de lo que podría ser un proyecto minero en donde se trabaja bajo concesión, la cual permite explorar libremente un área determinada, PHAM solo tiene derechos de exploración limitados y además el lugar contiene una alta cantidad de reservorios estratégicos que no se pueden intervenir lo que como consecuencia genera mayor incertidumbre geológica

Además el detalle de la distribución de cada formación a lo largo del túnel se presenta a continuación.

Chainage	Length	Stratigraphy	Lithology
0+000- 0+700	700 m	Rio Damas Formation	Conglomerates, sandstones and limonites
0+700- 1+200	500 m	Lo Valdes Formation	Limestone and marls
1+200- 1+380	180 m	Colimapu Formation	Red lutites
1+380- 3+780	2400 m	Colimapu Formation	Andesites, andesitic breccias and tuff
3+780- 3+870	90 m	Colimapu Formation	Dikes and stocks with gypsum and anhydrite lenses
3+870- 4+530	660 m	Colimapu Formation	Limestone
4+530- 5+130	600 m	Colimapu Formation	Red lutites
5+130- 5+320	190 m	Colimapu Formation	Andesites, andesitic breccias and tuff
5+320- 5+500	180 m	Colimapu Formation	Red sandstone
5+500- 6+660	1160 m	East Albanico Formation	Alternation and tuffs and volcanic breccias
6+660- 6+900	240 m	Intrusive Rock	Granitoids
6+900- 14+100	7200 m	East Albanico Formation	Alternation and tuffs and volcanic breccias

Tabla 4: Estratigrafía y litología por tramo, Túnel Volcán V5-V1, (Galera, J., 2015)

Los primeros 5.5km de túnel intersectan roca de formación Rio Damas, Lo Valdes y Colimapu mientras que los últimos 8.6km lo hacen con formación Abanico Este. Se destaca que entre los Pk 6+690- 6+900 el túnel intersecta roca intrusiva.

Por otro lado la sobrecarga del túnel varía desde los 1540m (7+900 aprox.) hasta los 300m (11+300 aprox) a lo largo de todo el cerro que es abarcado por la excavación.

En particular para cada estrato la formación rio Damas es una secuencia fuerte en conglomerados y conglomerado de mediano y grueso para brechas. Intercepciones con areniscas, limonitas y lava andesítica. Este estrato presenta un ángulo de inclinación de 70° con la vertical. Por otro lado la formación Lo Valdes es una secuencia de limonitas, lutitas, areniscas calcáreas, conglomerados y brechas. Esta secuencia sigue un ángulo fuertemente inclinado de 80° hacia el Oeste. Para el caso de la formación de Colimapu esta consiste en areniscas y lutitas, matriz de arena roja y conglomerados con intercalaciones de tobas, lava andesítica y areniscas con niveles secundarios de yeso en capas laterales discontinuas. Existe la particularidad de estructuras en este estrato, pues cruzan diques de alta densidad en determinados tramos. El dip del estrato varía entre 70 y 90° hacia NO/O. Por último la formación de Abanico este es una alternación entre toba y brechas volcánicas con intercalaciones de lava andesítica y riolítica y rocas volcanoclásticas. Es roca altamente alterada y dentro de esta formación se distingue un segmento particular (13+100- 14+100) consistente en megabloques (Cerro Mesón Alto). La dirección de este estrato es al principio tendiente a la vertical, pero a medida que se avanza en el PK va cambiando a horizontal siendo en el último tercio la formación sub-horizontal.

Con respecto a las estructuras mayores que cruzan el tramo de interés se distinguen 7 fallas verticales que pueden ser vistas desde superficie, 5 en la formación de Colimapu y 2 en los PK 11+500 y 12+100.

Finalmente con respecto a la permeabilidad de la roca se prevé baja con excepción de lo que ocurre en forma local para las zonas de falla y diques donde esta puede aumentar por lo que es de suma importancia comprobar en terreno la efectividad del estudio con mapeo geológico.

Esfuerzos in Situ: Los esfuerzos no han sido medidos para el sector del proyecto Alto Maipo por lo que se asume un comportamiento del esfuerzo mayor vertical proporcional a la profundidad con respecto a la superficie y el peso específico [kN/m³] adecuado. Además la razón entre el esfuerzo horizontal y vertical k_0 se obtiene a partir del *World Stress Map* y se distingue para sectores y tipos de roca como sigue.

- Dirección Este- Oeste: $k_0 = 1.6 - 2.0$
- Norte- Sur: $k_0 = 0.7 - 1.2$
- Roca muy buena: $k_0 = 0.95 - 2.0$
- Roca buena: $k_0 = 0.95 - 1.8$

- Roca regular: $k_0 = 0.95 - 1.6$
- Roca o terreno malo/fallas $k_0 = 1.0$
- Sobrecarga en suelo. $k_0 = 0.5$

Los esfuerzos mencionados tanto en magnitud como en orientación están sujetos a variabilidad a lo largo del túnel asociada a baja sobrecarga, sobreposición de laderas y roca desfavorable en zonas de discontinuidades.

Parámetros geotécnicos de suelo y roca: Se presenta a continuación una de las tablas correspondientes a las características de clase, GSI, RMR, módulo de Young, ángulo de fricción interna, cohesión (en TBM y B&B) y la razón de k_h/k_v de esfuerzos. Esto último para cada tipo de roca.

Classification			E_m	ϕ	c'_{TBM}	$c'_{D\&B}$	k_h/k_v
Class	GSI	RMR	[GPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]
ALTERNATION OF TUFFS AND VOLCANIC BRECCIAS							
Very Good	76-95	80-100	31.0-54.0	45-50	6.2-17.3	4.4-15.8	0.95-2
Good	56-75	60-80	13.3-31.0	35-45	2.9-7.0	1.9-5.0	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	7.1-13.3	25-35	2.1-3.6	1.0-2.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	4.0-7.1	22-25	1.2-1.9	0.5-1.0	1.0
Very Poor	<20	15-25	2.5-4.0	20.00	0.5-0.9	0.2-0.4	1.0
ALTERNATION OF TUFFS AND VOLCANIC BRECCIAS WITH HIGHER ALTERATION							
Very Good	76-95	80-100	14.9-26.0	45-50	3.5-8.4	2.4-7.6	0.95-2
Good	56-75	60-80	6.4-14.9	35-45	1.9-3.9	1.0-2.7	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	3.4-6.4	25-35	1.3-2.3	0.8-1.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	1.9-3.4	22-25	0.7-1.2	0.2-0.7	1.0
Very Poor	<20	15-25	1.2-1.9	20.00	0.4-0.5	0.2	1.0
MEGABLOCKS (CERRO MESÓN ALTO)							
Very Good	76-95	80-100	20.7-36.0	45-50	4.4-13.0	3.1-10.6	0.95-2
Good	56-75	60-80	8.9-20.7	35-45	2.3-5.0	1.4-3.5	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	4.8-8.9	25-35	1.8-2.9	0.8-1.8	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	2.7-4.8	22-25	1.0-1.7	0.5-0.7	1.0
Very Poor	<20	15-25	1.7-2.7	20.00	0.5-0.7	0.2-0.4	1.0

Values are representative for an overburden of 500m; $\gamma = 26-28$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Tabla 5: Características del macizo rocoso, formación Abanico Este, sobrecarga 500m (Galera, J., 2015)

El caso de estudio se concentra en los primeros 430 m de túnel excavados desde el PK 14+100 hacia el PK 13+670 donde domina la Formación Abanico Este con una baja sobrecarga. Dicha formación se compone de rocas volcánicas, tobas, lavas básicas, ignimbritas y aluvial-intercamas, sedimentos fluviales y lacustres, con un espesor mínimo de 3 km expuestos. El rango máximo de edad compilado por regiones para la Formación Abanico va de 16 a 36 Ma, lo que indica una Eoceno tardío-tardía edad Mioceno temprano, y están invadido por acciones, diques de pórfido y cuellos volcánicos. A lo largo de la sección del túnel, la Formación Abanico se compone esencialmente de tobas cineríticas y lapilli y brechas volcánicas andesíticas entre camaras con andesítica gruesa a flujos de lava riolíticos. En general, estas rocas muestran una buena o regular calidad de la roca geotécnica; sin embargo, en algunos niveles tobáceas altamente alterados la calidad de la roca geotécnica es pobre. (Robinson D., 2004)

Existen distintas consideraciones para cada formación y por esta razón se tiene una tabla de similar a la anterior para diferentes sobrecargas (500-1000m) en los cuatro dominios mencionados para V5. Estas pueden hallarse en los anexos de este informe.

Por otro lado también hay que tomar en cuenta los parámetros de roca estimados para zonas de falla, la cual en particular para el caso de estudio no están presentes, pero dado que la fuente es un estudio geológico preliminar es de suma importancia tener precaución y una idea del comportamiento de este tipo de zonas.

E_{rm}	ν	γ	ϕ'	c'	k_h/k_v
[MPa]	[-]	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[-]
100-200	0.3	22.00	20-30	10-50	0.5

Tabla 6: Parámetros de roca en zona de debilidad (aprox. continua)

Orientación y propiedades de estructuras: Para la formación Rio Damas se tienen las siguientes orientaciones de estructuras.

Join Set	Dip	Dip Direction	Remarks
1.00	68°	013°	-
2.00	28°	193°	-
3.00	37°	241°	-
4.00	80°	280°	-

Tabla 7: sets de estructuras, formación Rio Damas (0+200- 0+700)

Estructuras de las propiedades quedan bajo criterios de ingeniería tabuladas como sigue.

Joint Grading ¹⁾	c'	ϕ'	Wedge Scale Parameter ²⁾	
	[kPa]	[°]	Persistency [m]	Apex Height [m]
Good	0.00	32.00	15	9
Fair	0.00	28.5		
Poor	0.00	25.00		

1) Engineering judgment

2) Wedge scale factor = MIN{Persistency: 15m; Wedge Apex Height: 9m}

Tabla 8: Propiedades de resistencia en discontinuidades

Capítulo 3: Metodología

Para este trabajo de memoria se utiliza un enfoque de investigación mayoritariamente exploratorio dado la escasa información sobre el tema en Chile. Se forma un marco teórico lo suficientemente fuerte como para determinar qué factores son relevantes al problema para luego ser evaluados. Además se utiliza investigación descriptiva, pues se requiere de una muestra de las variables de interés para luego establecer conductas a partir de estos datos (Gross, M., 2010). Lo anterior bajo un enfoque positivista que hace relación a lo cuantitativo del estudio (Collazos, 2009). El procedimiento paso a paso es el siguiente:

1) Recopilación de antecedentes e información: Incluye la revisión de eventos pasados en Chile donde se haya utilizado tecnología TBM. Información acerca de las herramientas de gestión clave para la evaluación de desempeño. Información acerca de las ventajas de la excavación con TBM por sobre métodos convencionales y por último se investiga acerca el proyecto minero al cual serán extrapolados los resultados finales del trabajo.

2) Identificación de las áreas relevantes del conocimiento: Dentro del proyecto existen 9 áreas dentro de las cuales debe ceñirse un proyecto acorde a un buen funcionamiento de este. (Mallorca, P., 2010) En particular se identifican tanto la gestión del alcance, cronograma y planificación de corto plazo. Esta información se toma del informe de factibilidad de PHAM.

3) Definición de la estructura de trabajo: La herramienta WBS (Work Breakdown Structure) se genera para obtener los alcances del trabajo de memoria visualizados en forma simple y esquemática (Mallorca, P., 2010). Se define aquí la sección, el túnel, la TBM, el tiempo de toma de datos y hasta donde queda acotada la evaluación de desempeño en pos de la entrega de resultados en los plazos definidos por la empresa y Universidad.

4) Levantamiento de datos de terreno: Luego de estipular el tiempo en el punto 3) se procede con la toma de datos en terreno, la cual consiste principalmente en visitar el túnel asignado en la jornada de trabajo y reunir una base de datos empírica relevante para la evaluación de desempeño, es decir, el rendimiento de avance y las contingencias ocurridas en el transcurso de la muestra.

5) Análisis y comparación de resultados: Se ordenan los datos para calcular los parámetros de interés de la evaluación de desempeño. Estos se comparan con aquellos encontrados en factibilidad e ingeniería cuantificando las desviaciones y confeccionando resultados a través de herramientas de gestión tales como la tripla presupuestado-incurrido-producido, gráficos de producción [m/día] y cumplimiento de plazos [% de tiempo]. Todo lo anterior en pos de mostrar los resultados en forma clara y simplificada en los entregables de la memoria. Además, con las desviaciones se procede a calificar cuales son las causas puntuales que las generan y con ello otorgar medidas de control adecuadas en cada caso.

6) Discusión Extrapolación y Conclusiones: Se emiten conclusiones sobre los resultados obtenidos a partir del análisis y discusión del punto parte 5) y se simula como los resultados arrancarían en un proyecto minero, en particular el Adit 74 de Nuevo Nivel Mina, Teniente.

Capítulo 4: Evaluación técnica de desempeño

4.1 Análisis Exploratorio de Datos

De acuerdo a los acontecimientos ocurridos en Alto Maipo se tiene que de las tres TBM planificadas para la construcción de túneles solo una está en proceso de excavación en tanto que las dos restantes iniciarían puesta en marcha hacia Enero de 2016. Debido a esto el desarrollo de la memoria se evocara en la evaluación del desempeño de la TBM que actualmente está en funcionamiento para el túnel en El yeso. (de V5 a V1).

Consideraciones con respecto a la muestra de datos utilizada para el análisis los datos son:

- La muestra contempla el registro tanto de R&Q (*Shift Reports*) como del área de planificación de AES Gener, adicionando a esto datos confirmados desde terreno
- La muestra está compuesta por los datos a partir del inicio del túnel hasta el 30 de Sept. De 2015

4.1.1 Planificación de CNM

Este túnel está siendo ejecutado por CNM contratista encargada del contrato 620B, el cual incluye en forma particular el túnel en estudio (V5 hacia V1). Este túnel tiene una extensión total de 8530 [m] y está planificada su construcción para un total de 874 días (2.43 años). La TBM por si sola tiene una excavación pronosticada de 696 días (1,93 años) equivalentes a 7.03 [km] de túnel a partir de su inicio, no obstante se destacan los siguientes supuestos de construcción en la planificación del contratista:

- En base a las condiciones de partida, en particular la curva de aprendizaje el avance de los primeros 400m será de 8 [m/d]; el del tramo siguiente de 400 a 1000m será de 18.18 [m/d]; y por sobre los 1000m será de 17.8 [m/d]
- El Inicio de la TBM en el sector El Yeso el 14 de Junio de 2015, en vez del 30 de Abril 2015, lo cual origina da como resultado una prolongación de 46 días aprox. (1.5 meses, 270m de túnel perdidos)
- El primer tramo de túnel que comprende 133 días corresponde a excavación con metodología mecanizada (40.12 m en suelo) y D&B (118.92) equivalentes a un total de 159.04 m previos al inicio del método mecanizado

4.1.2 Demoras programadas

Se contemplan los siguientes hitos de logística (rendimiento = 0 [m/d]):

- 60 días de montaje de TBM luego de tener los primeros 160m de túnel construidos con esta metodología (57 días de montaje efectivos tras alcanzar los 159.04m efectivos)
- Un periodo de invierno de 30 días debido a la predicción de un clima desfavorable para trabajar (en la práctica el clima no ha producido mayores inconvenientes y este periodo se flexibiliza en post excavación)
- Montaje de correa de 15 días en tras alcanzar aprox. los 270 m excavados con TBM (430m de túnel en total)

En resumen

Demoras programadas	Tiempo [días]
Invierno	60
Montaje TBM	60
Montaje correa	15
Desmontaje TBM	45
Total	180

Tabla 9: Demoras programadas, túnel V5

Se debe considerar el hecho de que el invierno ocurre dos veces durante el transcurso de la excavación dado los 2 años estipulados para V5. Además de tabla 9 se aprecia que en total se tiene medio año de avances nulos planificados, en particular para el intervalo de tiempo en que efectúa la evaluación ocurren tanto el montaje y el primer invierno, lo cual da lugar a un total de 90 días de avances nulos en la muestra de datos.

4.1.3 Demoras no programadas

Además de los tiempos de demora programados, existen sucesos importantes a destacar en lo que respecta al avance efectivo de la máquina y que son causal de avances nulos por lo que se consideran en las pérdidas no planificadas. Estos se detallan a continuación en orden cronológico:

- 3 Jul- 15 Jul (13 días): PHAM paraliza avances hasta ejecutar la fortificación de forma correcta, el último día se levanta la restricción y se reanuda el avance (1 m)
- 18 Jul: Corte de energía eléctrica impide lograr avances
- 19 Jul: A las 3:25 am ocurre desprendimiento de rocas que producen caída de altura de trabajador, se suspenden los trabajos
- 20 Jul- 27 Jul (8 días): Trabajos suspendidos a falta de investigación
- 28 Jul- 31 Jul (4 días): Safety Stand Down
- 1 Ago- 21 Ago (21 días): La razón principal son la falta de procedimientos, pero existen dentro de este periodo otras circunstancias adversas
 - 10 Ago- 13Ago (3 días): Corte de camino que llevo a reparar un camino alternativo
 - 5 Ago- 12 Ago (8 días): Frentes evacuados por mal tiempo
- 28 Ago: Fortificación y difusión de procedimientos
- 29 Ago: Housekeeping en segmento L1 e instalación de primer marco TH29
- 6 Sept: Ajuste de dovelas y rieles para ajustarse a radio de curvatura. Housekeeping
- 10 Sept: Housekeeping
- 24 Sept: Instalación de manga de ventilación
- 27 Sept: Problemas de coordinación y de proyección de *Shotcrete*
- 28 Sept: Por corte de energía y problemas de proyección de *Shotcrete*

4.1.4 Estadística básica

De acuerdo a la información recopilada en los puntos anteriores de este capítulo se procede al cálculo de estadística básica a partir de la muestra empírica de donde se obtiene lo siguiente.

Avances Túnel el Yeso (V5 a V1)									
Muestra	Avances nulos	Días de avance	Avance [m/d]	Maximo	Media	Desv. Estandar	Varianza	Media (I=0)	Media hasta el PK actual (430 m)
166	112	54	Parcial	15.58	1.65	3.28	10.77	5.07	2.51
			Programado	18.18	9.66	8.04	64.62	18.00	7.97

Tabla 10: Resultados de estadística básica, túnel V5

De la tabla 10 se aprecia una comparación entre los datos programados con respecto a lo parcial a partir del inicio de la excavación con TBM y con ello cabe destacar las siguientes aseveraciones:

- En ningún punto del periodo de estudio se ha logrado el rendimiento máximo programado y previsto por el fabricante, no obstante, se debe tener en cuenta el proceso de aprendizaje de la excavación con TBM, es decir, aquel tiempo que le toma al proceso en llegar a su rendimiento máximo
- Con respecto al punto anterior es importante profundizar en la curva de aprendizaje de la excavación, dado que en forma preliminar se puede afirmar que está atrasada con respecto a lo normal, puesto que se debiera alcanzar el rendimiento máximo con un periodo de 3 meses, y el periodo de estudio excede este último en medio mes
- Atendiendo al promedio con respecto al mismo, pero sin considerar las muestras que son cero se tiene que existe una disminución del 67.5% para el avance real al no considerarlos, mientras que para el avance planificado es de tan solo 45.3%, lo cual habla de un total de 22 días de avances nulos del avance real por sobre los nulos en el avance planificado, sin embargo, pese a ello se tiene en consecuencia que el avance real se logra en tan solo 54 en vez de los 76 días disponibles en forma efectiva para el propósito
- En relación al punto anterior se destaca que el promedio de avance planificado sobrepasa en un 597% al promedio de avance real y en un 355% al no considerar los ceros (penúltima columna) para el total de días transcurridos, sin embargo, considerando el promedio de avance planificado sólo hasta el PK en que se encuentra el avance real (última columna), se tiene que de igual forma que el avance real es sobrepasado, pero solo en un 320% aprox. Esto es que el avance real ha sido 3 veces menor de lo que debería

Por otra parte, visualizando un histograma de la muestra se obtiene lo siguiente.

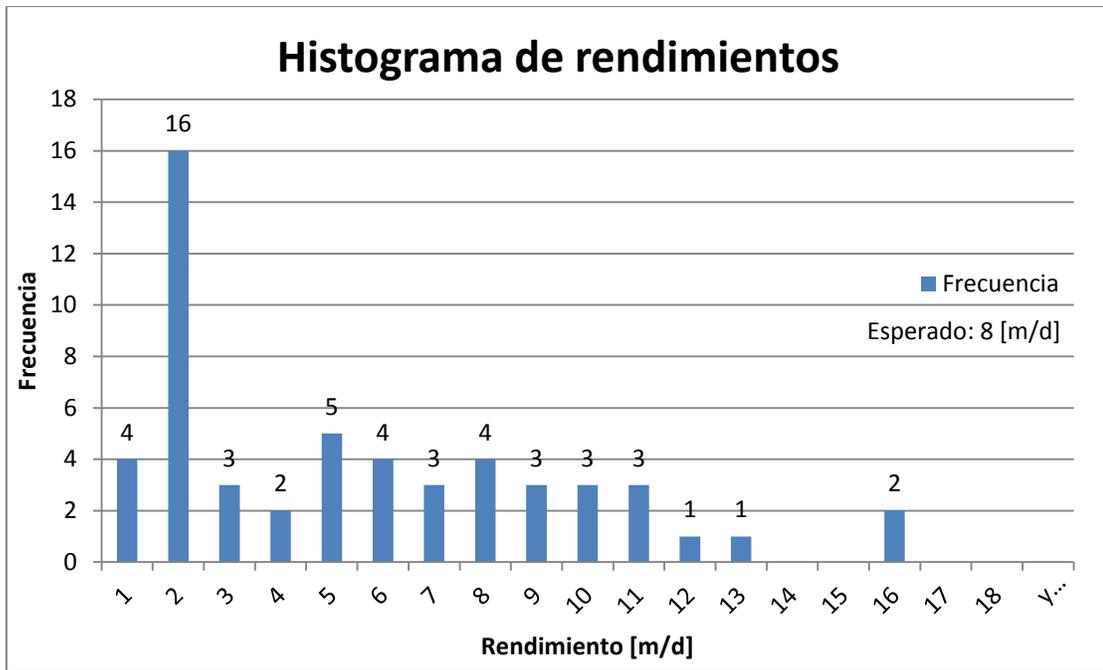


Gráfico 9: Histograma de datos, túnel V5

Se puede observar que la mayoría de los avances que efectuados se agrupan en promedio alrededor de los 2.5 [m/d], lo cual está por debajo de los rendimientos estipulados por el contratista. Ningún día se logra el rendimiento óptimo, sin embargo, tomando en consideración que para el primer tramo de túnel se estipula un rendimiento de avance de 8 [m/d] (en los primeros 400m), entonces existen 13 días en los cuales el rendimiento es mejor de lo esperado (24%), pero a la vez hay 37 días en los cuales se está por debajo de lo aceptable (68.5%) más aún existe una gran cantidad de días donde el rendimiento está alrededor del promedio (30%).

Cabe notar además que el histograma no considera los datos de avance nulo para lograr una visión más clara de los días en los que efectivamente ocurre un avance, no obstante, el 67.5% de la muestra bajo análisis alude días sin avance.

4.1.5 Geología

En cuanto a la geología, en particular los tipos de roca a los que se ha visto enfrentada la excavación del túnel y tomando solo en cuenta aquellos datos dentro la muestra de este trabajo, se tiene el siguiente gráfico al respecto.

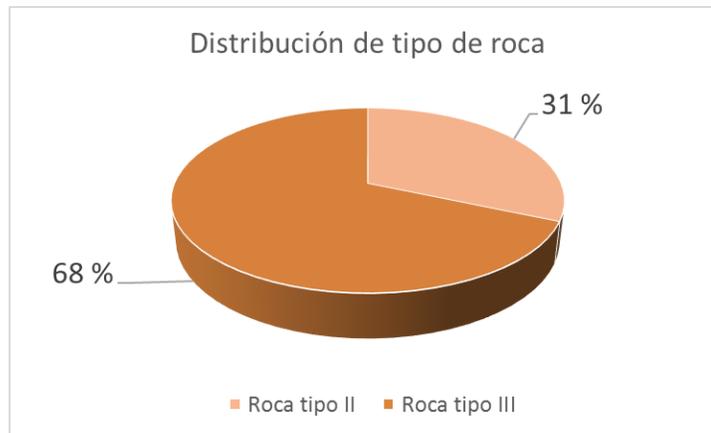


Gráfico 10: Distribución según tipo de roca, túnel V5

Se aprecia un mayor porcentaje de roca tipo III, sin embargo, la construcción del túnel parte con la presencia de roca tipo II los primeros 86m para luego cambiar a roca tipo III y mantenerse de esta manera hasta los 122.5 m de túnel excavado (tramo de 36.5 m). Luego se vuelve a presentar roca tipo II (tramo de 149m), la cual cambia finalmente a roca III tras los 271.5 m excavados (tramo de 1.97m).

En forma más detallada se tienen los siguientes resultados según el tipo de roca

Variable	Total	Roca tipo II	Roca tipo III
Días de operación	109	34.5	74.5
Avance [m]	274	230.8	42.9
Utilización [%]	100	89.7	31.8

Tabla 11: Resultados según tipo de roca, túnel V5

De la tabla 11 se aprecia que pese a que el tipo de roca III es predominante con muchos más días en operación, el avance ha sido mucho más favorable para la roca tipo II menos abundante, pero con mayor productividad dada, lo cual se refleja en la utilización y los metros de avance logrando hasta 5.4 veces más avance en circunstancias de roca más competente. Este comportamiento se ajusta a la literatura, ya que de acuerdo a esta y a la TBM Gripper seleccionada para la excavación el mejor rendimiento se logra en roca de mayor resistencia. A partir de lo anterior se desprende que el mayor número de contratiempos técnicos han ocurrido en roca tipo III además de algunos eventos inoportunos como en el caso del accidente detallado anteriormente en las demoras no planificadas.

4.2 Resultados y discusión

4.2.1 Situación final

Se presenta el siguiente cuadro de resumen desde el inicio de excavación hasta el 30 de septiembre respecto al avance del túnel.

Contrato: AM-CO620B - "El Yeso"						
Túnel el Volcán						
Frente	Tramo	Método de Excavación	Tipo de Roca	Fecha Inicio	Días excavados	Avance Acumul. [m]
frente de avance	V5-V1	Mecanizado	Suelo	17-12-2014	70	40.12
		D&B	IV	01-03-2015	102	159.04
		TBM	III	14-06-2015	109	432.76

Tabla 12: Situación final hacia 30 de Sept. 2015, túnel V5

Se aprecia de la tabla 12 que pese a que el avance con TBM está en pleno periodo de ascenso hacia su rendimiento máximo una excavación de 102 días con D&B tan solo logra en promedio un rendimiento de 1.17 [m/d], lo cual es tan solo la mitad de lo que se alcanza con TBM en las condiciones descritas, no obstante, esto es insuficiente con respecto a la regla de dedo (triplicar rendimiento) para las TBM en comparación a D&B.

Gráficamente la situación expuesta se aprecia a continuación.

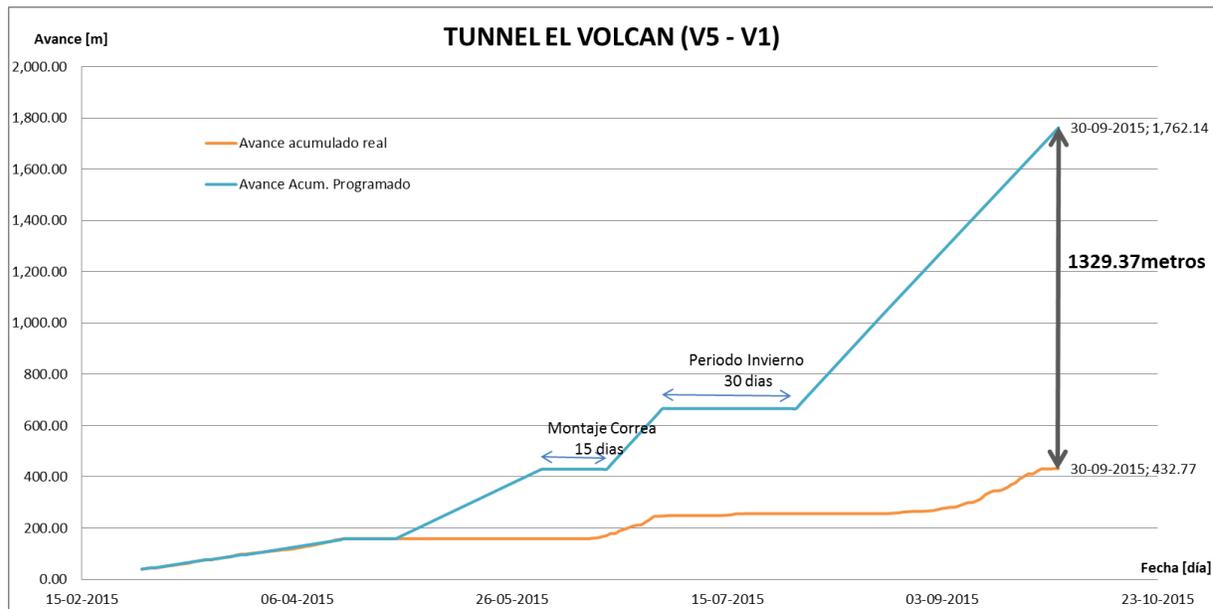


Gráfico 11: Situación final Avance planificado v/s Avance real en V5 hacia el 30/09/15

Del gráfico 11 se observa la curva planificada (celeste) con sus respectivos rendimientos crecientes y las demoras establecidas en 4.1.2. Por otro lado la curva de rendimientos reales (naranja)

contempla las demoras programadas expuestas en 4.1.3 y la flecha en color negro muestra la diferencia en metros entre ambos escenarios. La diferencia entre ambas curvas se incrementa dado que la curva de rendimientos reales tan solo al finalizar el periodo de estudio comienza a tomar valores cercanos e incluso superiores a los planificados por lo que el régimen real presentaría rendimientos mayores solo a partir de esta fecha. En relación a lo anterior es cabe destacar que el avance actual del túnel estaría en condiciones para montar la correa, lo cual indica que luego de esta demora programada se debiera comenzar a excavar a máximo rendimiento, es decir, aproximadamente 18.18 [m/d]. Es por esto último que el avance planificado castiga al avance real, ya que la muestra para el avance planificado toma datos de lo que debiera ser el régimen de la construcción. Además, la prolongación de la construcción con respecto a la fecha de inicio viene a raíz de que se tenía presupuestado un avance con D&B que fuera en conjunto al proceso de montaje de la TBM, lo cual en la práctica ocurrió en forma concatenada, pero jamás simultánea, por lo que esto es otro factor relevante que castiga el rendimiento de la TBM al compararlo con la planificación ideal de construcción.

Cuando se contrasta la situación actual con lo planificado por el contratista se tiene entonces estadísticas relevantes para evaluar el futuro del proyecto V5, las cuales están resumidas en la siguiente tabla.

Longitud Total TBM [m]	Longitud Acumulada [m]	Porcentaje completado [%]	Tiempo restante proyectado [días]	Eficiencia [%]	Demora [días]	Demora [m]
6871	273.72	3.98	416	22.1	105	1329.40

Tabla 13: Alcances en túnel V5

Cabe destacar que los días proyectados para finalizar la excavación son calculados a partir de una situación hipotética en donde se comienza a seguir la planificación de forma ideal. Por otro lado el atraso en metros de avance está calculado por la diferencia entre lo que se debiera llevar (1762.14 m) y lo que realmente se ha alcanzado mientras que el atraso en días se calcula con la diferencia entre el día en que debía llegarse a los 273.72 bajo la planificación del contratista (02-06-2015) con la fecha de término para la muestra que es donde verdaderamente se alcanza dicha extensión de túnel con TBM. El porcentaje de túnel completado es deficiente con respecto al 25% aprox. que debiera llevar según lo planificado. Esto se vislumbra al observar la eficiencia de construcción en la tabla 13.

Se realiza un *Forecast* del avance real versus el avance planificado, el cual contempla un avance regular donde se presupone que la máquina comienza a rendir de manera ideal bajo la planificación de CNM tal como se muestra a continuación.

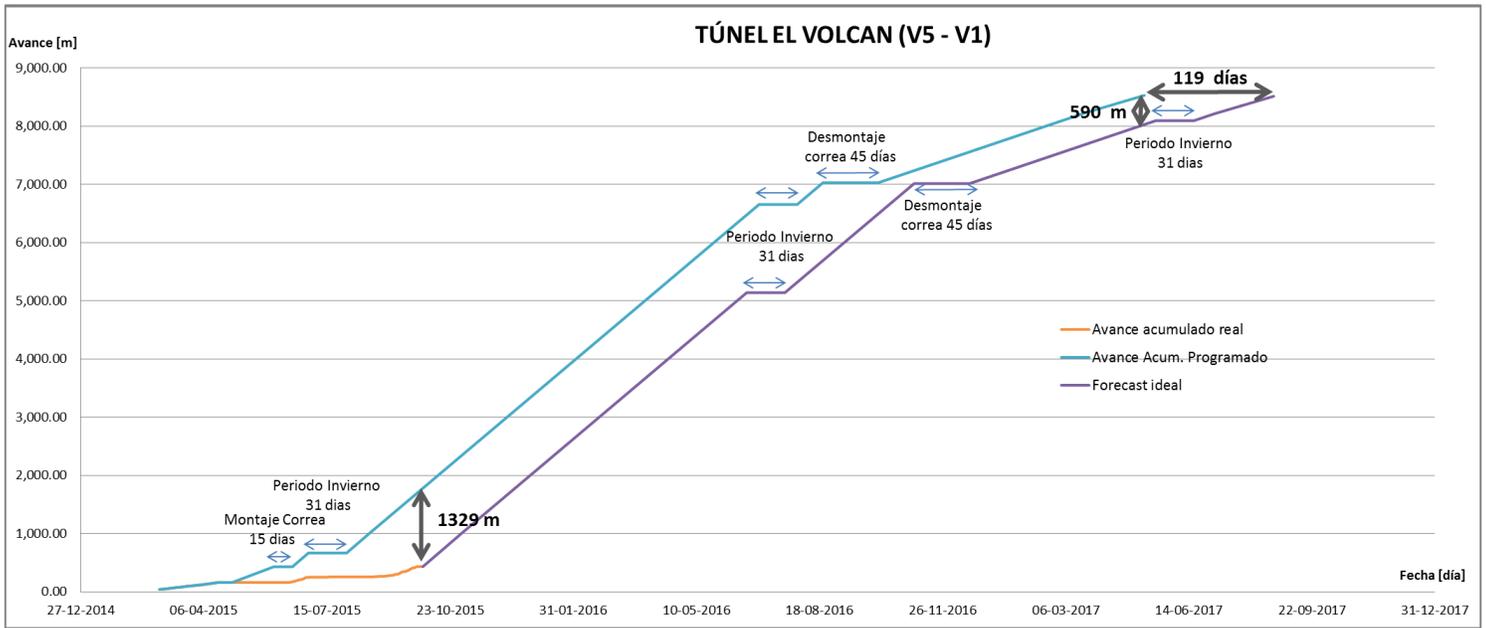


Gráfico 12: Forecast caso ideal a partir de Sept 2015, túnel V5

Cabe destacar del gráfico 12 que en un principio se pretendía partir el túnel en Agosto de 2014 y finalizarlo en Marzo de 2017, sin embargo, la partida real ocurre en Diciembre de 2014 y se estima terminar la obra hacia Septiembre de 2017.

Se aprecia del gráfico 12 en color morado el *Forecast*, el cual presenta los mismos comportamientos que el escenario planificado aplicándose desde el 30 de Septiembre hasta su término. Esto daría como resultado una prolongación de 590.09 m lo cual se traduce en 119 días (0.3 años). Cabe destacar que el *Forecast* ideal contiene 31 días de demora extras, ya que alcanza a incorporar el mes de Junio de 2017, el cual por planificación está contemplado como demora programada de invierno.

4.2.2 Análisis mensual

A partir de la base de datos se recurre a un análisis mensual para visualizar las causas de demoras no planificadas y profundizar hacia el objetivo primordial. Se tiene en forma tabulada los siguientes resultados para la excavación del total del túnel en cuestión.

Tunel El volcan V5 a V1 (desde El Yeso)								
Año	Mes	Días con progreso [día]	Progreso parcial mensual [m]	Progreso Acumulado [m]	Avance promedio mensual [m/d]	Avance mensual/Avance planificado	Avance promedio acumulado [m/d]	Utilización [%]
2014	Diciembre	8	7.00	7.00	0.88	-	0.88	27
2015	Enero	3	3.00	10.00	1.00	-	0.91	10
	Febrero	21	30.12	40.12	1.43	-	1.25	70
	Marzo	27	69.72	109.84	2.58	-	1.86	90
	Abril	17	49.20	159.04	2.89	-	2.09	57
	Mayo	0	0.00	159.04	0.00	0.00	2.09	0
	Junio	16	88.47	247.51	5.53	0.69	2.69	53
	Julio	6	8.96	256.47	1.49	-	2.62	20
	Agosto	8	10.86	267.33	1.36	0.07	2.52	27
	Septiembre	24	165.44	432.77	6.89	0.39	5.07	80

Tabla 14: Resultados globales de rendimiento por mes, V5

De la tabla 14 se observa en negrita los meses que han sido excavados con TBM. Los meses con mayor avance son Septiembre y Junio, donde en este último hay que considerar que la mitad de ese mes se utilizó para el montaje de la TBM (fecha de inicio TBM: 14-06-2015). También hay que considerar que los rendimientos de TBM deben ser contrastados con 8[m/d] según el avance y lo planificado por el contratista en periodo de *Ramp-up*. Pese a esto todos los meses están por debajo de lo presupuestado con las condiciones más críticas en Julio y Agosto donde los avances caen hasta 4 veces bajo lo estipulado siendo inclusive menores que los rendimientos obtenidos por D&B. En cuanto a la Utilización se aprecia que es la más alta para el mes de Septiembre dado el mayor avance, sin embargo, el último periodo de Septiembre obtienen avances decrecientes que tienen relación con el comienzo del montaje de correa transportadora. En Junio pese al buen avance se tiene que la utilización es baja debido al montaje de la TBM misma.

4.3.2 Modelo de ajuste

Visualizando los resultados de la tabla 14 en forma gráfica se aprecian más claramente los análisis descritos y además se incorpora el *modelo Ajustado*.

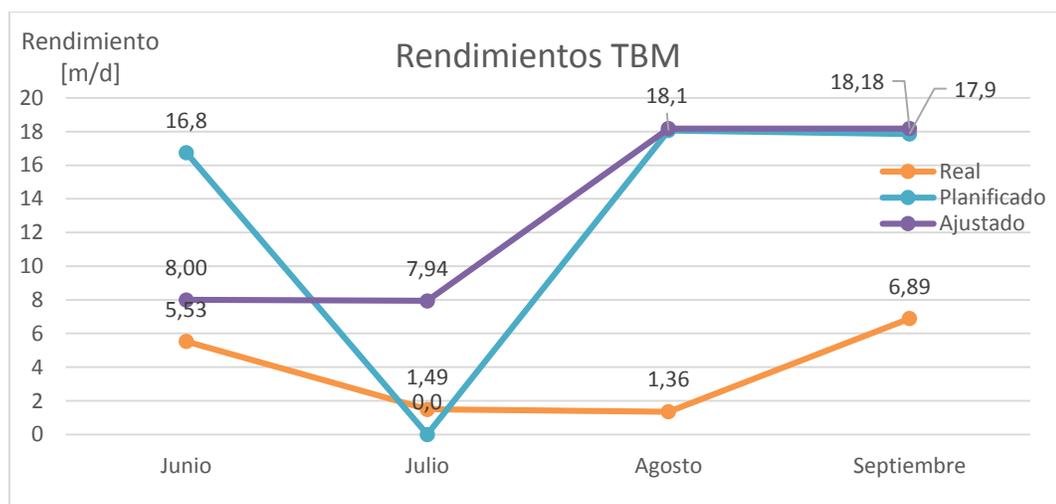


Gráfico 13: Rendimientos TBM por mes real v/s planificado, túnel V5

Se puede apreciar como la curva de rendimientos reales está en su mayoría por debajo de la curva de rendimientos planificados con excepción del mes de Julio que estaba previsto para un avance nulo acorde a las demoras planificadas por invierno. La curva de nombre Ajustado se refiere a una comparación entre lo real y planificado omitiendo el atraso de partida de excavación, es decir, se asume que el tiempo de inicio para el escenario real y planificado es el 14/06/15. Considerando este tercer escenario se aprecia que existe una menor diferencia entre lo real y lo planificado Ajustado (curva morada), pese a esto en ningún periodo se logra la meta. Por último cabe destacar que el ajuste logra representar en forma mucho más clara el *Ramp-up* previsto para el proyecto del túnel V5 recordando que en ningún caso se promedian los valores nulos por lo que se distingue como el rendimiento sigue la planificación descrita en 4.1.1.

Este comportamiento se ve reflejado en los días de progreso que se prevén en cada caso tal como se muestra en el siguiente gráfico.

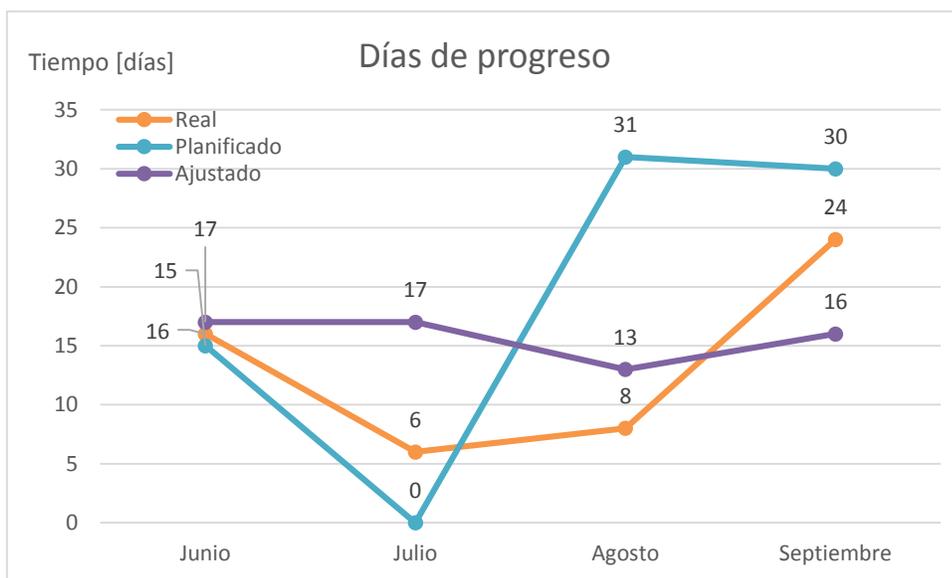


Gráfico 14: Días de progreso por mes, túnel V5

Se explica el hecho de que la curva Ajustada en Julio supere a la real dado que posee mayores días de avance contemplados según la planificación, no obstante, en el mes de Septiembre la planificación contendría días sin avance acorde al periodo de invierno, pero en la realidad el periodo de invierno se da solo en el mes de Agosto y no perdura los 60 días estipulados en pos de no prolongar el atraso y aprovechando el buen clima.

Pese a lo anterior y a que en el mes de Septiembre se tienen los mayores avances de todo el periodo de estudio los metros de avance no serían suficientes para cumplir la meta planificada tal como se muestra a continuación.

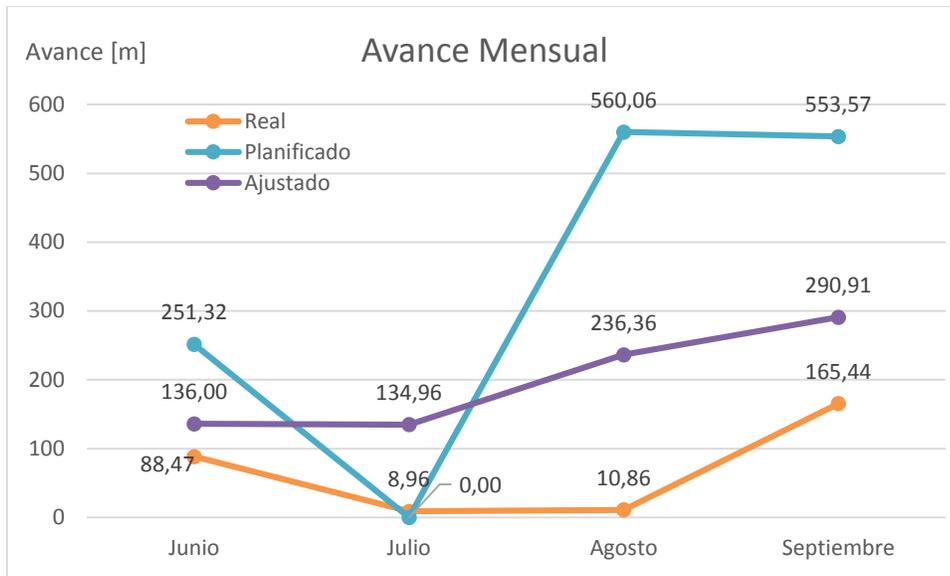


Gráfico 15: Avances mensual, túnel V5

Del análisis anterior se concluye que los meses con mayores complicaciones son los de Julio y Agosto y para comprender la razón de esto se presenta el detalle mes a mes para cada tipo de demora no programada.

4.3.3 Desviaciones

Se discretiza el tiempo en bloques de 15 minutos a lo largo de los turnos analizados a fin de simplificar cálculos.

Se identifican todo tipo de contingencias y problemas que afectan el avance como un único término llamado desviaciones en donde se realiza un desglose que las clasifica según las siguientes categorías.

Sigla	TBE	CPR	MATP	MAQ	EME	MO	DSÑ	PDV	CSU	PRQ	INC	CLM	SC
Descripción	Trabajo Estandar	Cambio en el programa	Materiales propios	Maquinaria	Equipo menor	Mano de obra	Diseño/Especificaciones técnicas	Problemas de Ventilación	Corte de suministros	sin Pre-requisito admin.	Incidente	Clima	Sin clasificación

Tabla 15: Clasificación de desviaciones

Esta clasificación se aplica para determinar tanto las fallas que si detienen el avance en la frente como aquellas que no lo hacen, pero que si se repiten prolongadamente tienen potencial de hacerlo.

Junio

A continuación se grafican los resultados para el mes de junio:

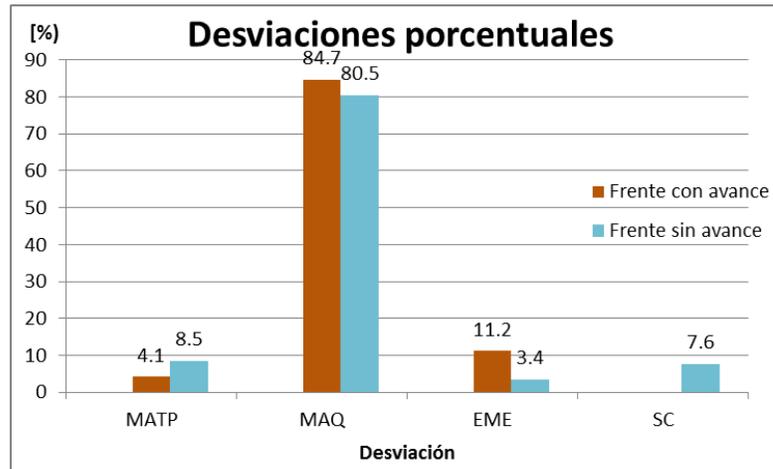


Gráfico 16: Desviaciones porcentuales mes de Junio, túnel V5

Se aprecia que tanto para las desviaciones que detienen el avance como aquellas que no lo hacen, ambas están mayormente influidas por fallas de maquinaria (MAQ) alcanzando un valor entorno al 80% del total del tiempo consumido por estas. En particular las horas con detención para este mes (29.5 hrs.) solo representan el 7.9 % del total. (372 hrs.)

Por último el tiempo de falla asociado a cada una se determina según el cociente entre su duración y frecuencia de lo cual se obtiene que para aquellas que detienen el avance los resultados son

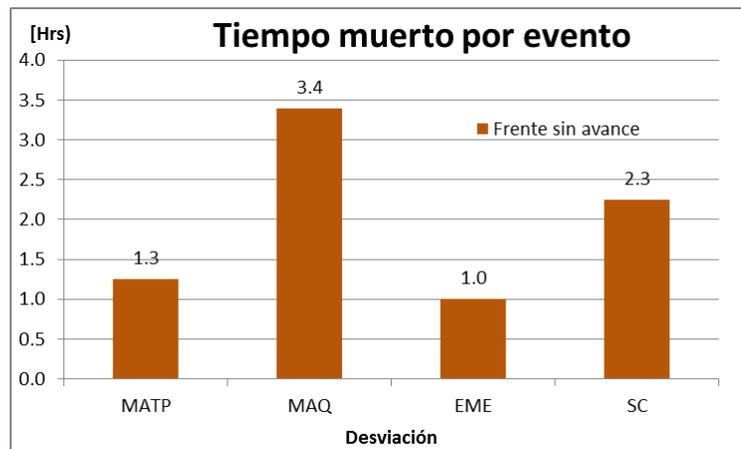


Gráfico 17: Tiempo muerto por desviación mes de Junio, túnel V5

De donde se aprecia que las fallas de maquinaria (MAQ) son las más prolongadas mientras que las de equipo menor son las más cortas. Un detalle acabado de las frecuencias y el tiempo por desviación puede encontrarse en los anexos de esta memoria.

Julio

A continuación se grafican los resultados para el mes de julio:

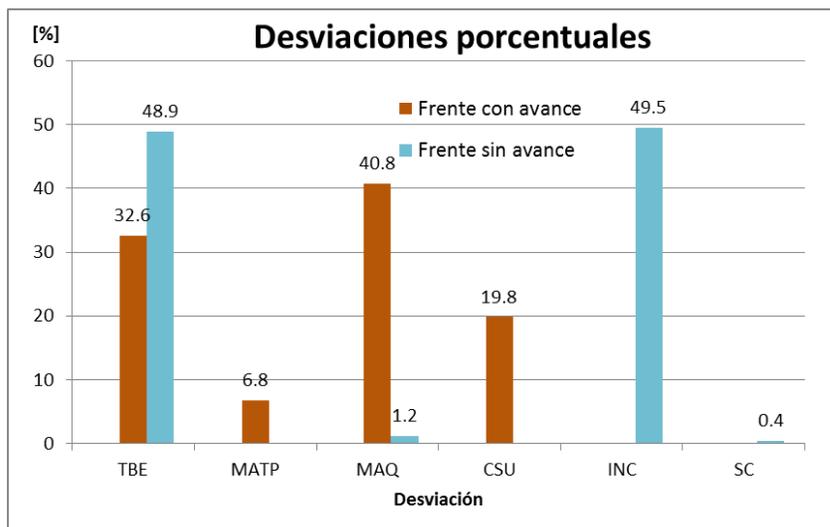


Gráfico 18: Desviaciones porcentuales mes de Julio, túnel V5

Analizando la gráfica se tiene que las mayores desviaciones que no detienen el avance aluden a la maquinaria (MAQ) con un total de 35 horas de las 85,8 horas registradas bajo esta categoría. Por otro lado, los Incidentes (INC) (292,5 hrs.) junto con los trabajos bajo estándar (TBE) (289 hrs.) representan casi la totalidad del tiempo abarcado por los eventos que detienen el avance. (98.4%)

Esto muestra como un incidente que no logra pasar a grado mayor es completamente capaz de parar toda una obra al tener que buscarse de manera exhaustiva las causas y la restauración del bienestar de los trabajadores. Además juega un rol importante la calidad del trabajo realizado por los operarios de la maquina TBM dado que casi con igual peso, el hecho de tener una deficiente instalación de pernos amerita inexorablemente la necesidad de reponer estos por parte del contratista con el fin último de la seguridad en el túnel. En particular la fortificación que da cuenta de errores que requieren ser repasadas corresponden a lo solicitado por los planos en roca tipo III incluso alcanzando en algunos sectores el uso de fortificación para roca tipo IV, la cual implica el uso de marcos de acero TH 29 que aumentan el tiempo de fortificación y por ende el ciclo de excavación TBM.

Las horas perdidas en el mes de Julio dada las causas mencionadas anteriormente alcanzan las 590.8 equivalentes a un 79.4% del total del tiempo disponible en Julio.

Por último el tiempo de falla asociado a cada una se determina según el cociente entre su duración y frecuencia de lo cual se obtiene que para aquellas que detienen el avance los resultados son:

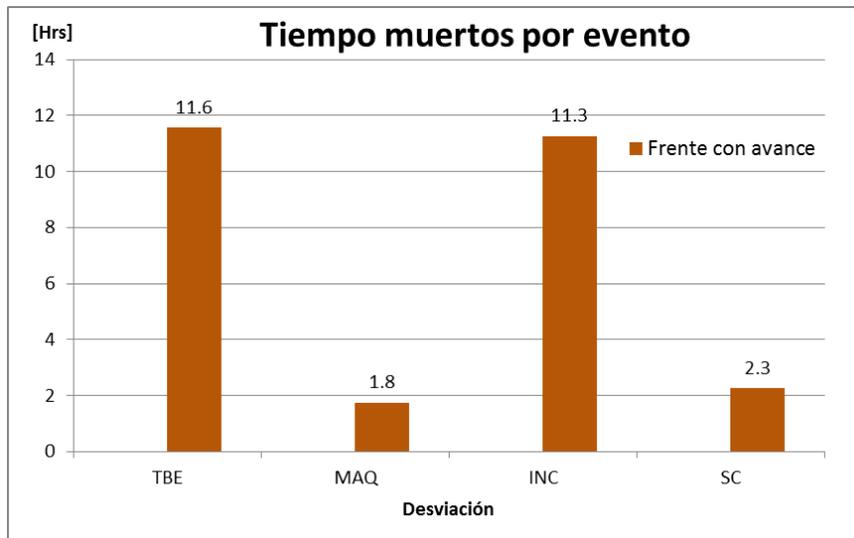


Gráfico 19: Tiempo muerto por desviación mes de julio, túnel V5

Donde nuevamente se aprecia el potencial de pérdida de tener un incidente así como también tener fortificación mal instalada, recordando además que el mes de julio es el más crítico en cuanto a producción de túnel. Un detalle acabado de las frecuencias y el tiempo por desviación puede encontrarse en los anexos de esta memoria.

Agosto

A continuación se grafican los resultados para el mes de Agosto:

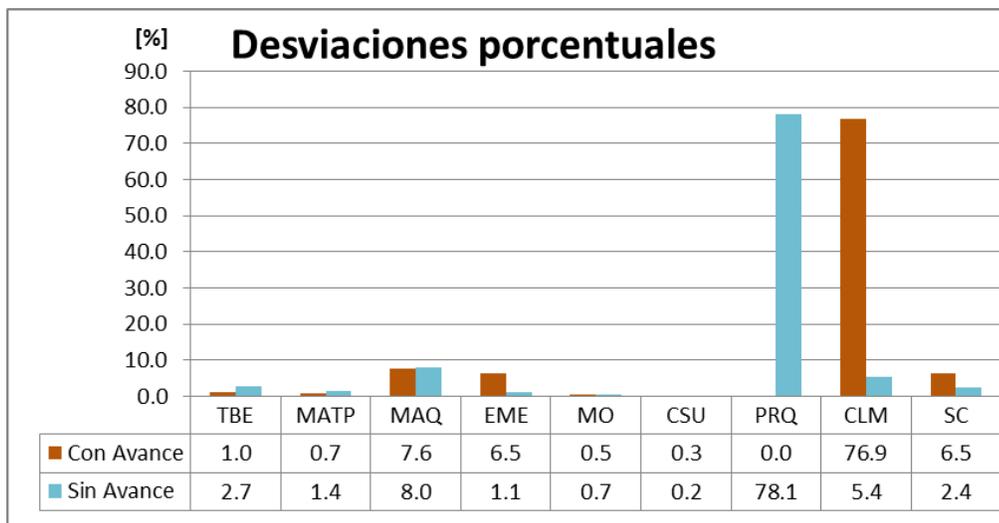


Gráfico 20: Desviaciones porcentuales mes de Agosto, túnel V5

Al analizar el gráfico lo primero es notar la diversidad de desviaciones presentes en este mes donde se alcanzan 8 en total de las 13 existentes. En cuanto a las que no detienen el avance, luego del clima está la maquinaria con un total de 13 hrs. perdidas de un total de 40 hrs. Dentro de las que si detienen el avance la que influye en mayor medida deteniendo el avance es la falta de elaboración de procedimientos (PRQ) nuevos (346 hrs.) a partir del incidente ocurrido en el mes anterior, lo cual nuevamente da a entender el gran impacto que este tipo de eventos puede tener.

Del total de tiempo disponible las 418,9 horas sin avance en la frente corresponden a un 72,7% respecto a las 576,0 horas trabajadas durante el mes de agosto en V5. Esto último considerando que se descuentan las horas que no fue posible acceder al frente de trabajo por condiciones climáticas o despeje de caminos, ya que son parte de los 60 días de demoras programadas de invierno que no han sido agotadas hasta este punto.

Por último el tiempo de falla asociado a cada una se determina según el cociente entre su duración y frecuencia de lo cual se obtiene que para aquellas que detienen el avance los resultados son:

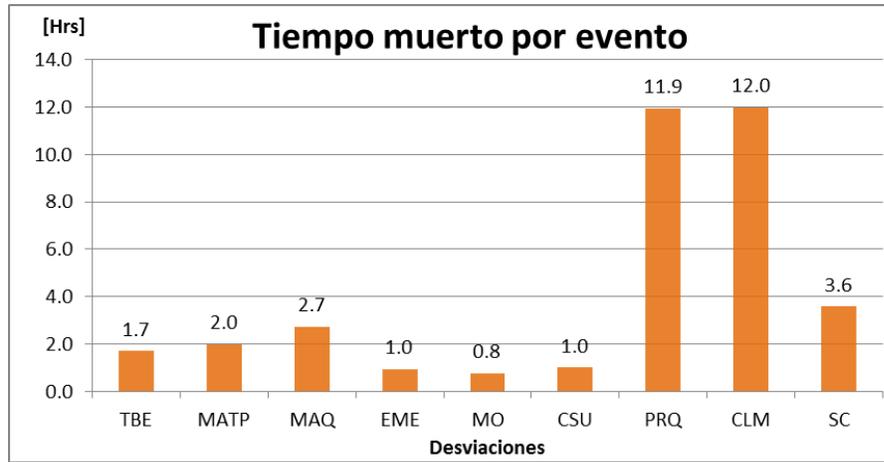


Gráfico 21: Tiempo muerto por desviación mes de Agosto, túnel V5

Sin tomar en cuenta el clima las demoras más prolongadas se obtienen para la elaboración de nuevos procedimientos (PRQ) dado el incidente, seguido de las colaciones y limpiezas fuera de los horarios programados (SC). Un detalle acabado de las frecuencias y el tiempo por desviación puede encontrarse en los anexos de esta memoria.

Septiembre

A continuación se grafican los resultados para el mes de Septiembre:

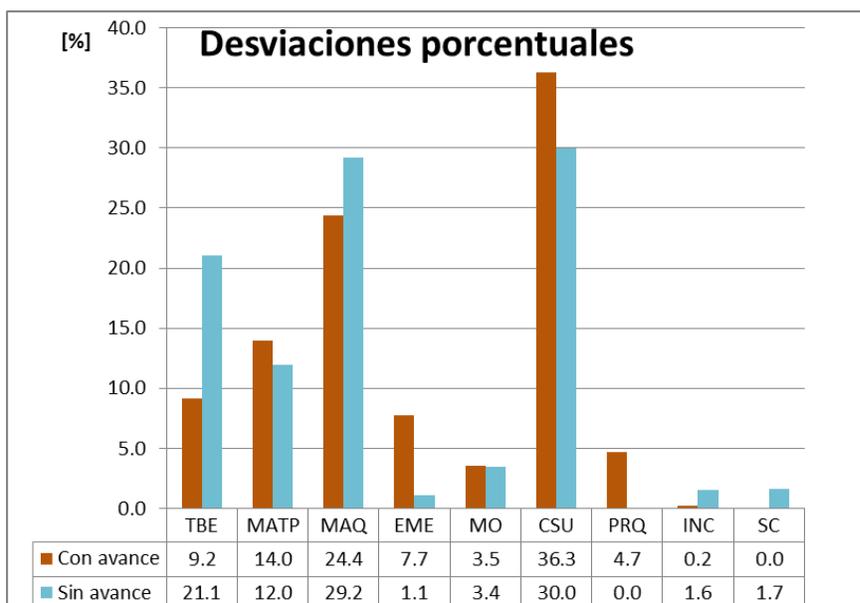


Gráfico 22: Desviaciones porcentuales mes de Septiembre, túnel V5

Las mayores desviaciones que no detienen el avance dependen del corte de suministros (CSU) con 56,5 horas (36%) de las 155,5 horas registradas para esta categoría, de igual forma, pero deteniendo el avance esta desviación es causa de 67,5 horas perdidas siendo la que genera mayores tiempos de paralización (30,0%) de las 225,3 horas en que la frente se encuentra sin avance. Lo anterior se ocasiona principalmente debido a los constantes cortes de suministro de agua para producción y la falta de energía eléctrica para una correcta operación. Con un valor muy cercano a las desviaciones por corte de suministro están las fallas de maquinaria (MAQ) que representan 65,8 horas de paralización de la frente. (29,2%)

Las 225,3 horas sin avance en la frente corresponden a un 31,9% respecto a las 706,8 horas trabajadas durante el mes de septiembre en V5 considerando que se descuentan las horas en las que no fue posible acceder al frente de trabajo por condiciones climáticas o despeje de caminos (13,3 horas) por estar dentro de las demoras programadas.

Por último el tiempo de falla asociado a cada una se determina según el cociente entre su duración y frecuencia de lo cual se obtiene que para aquellas que detienen el avance los resultados son:

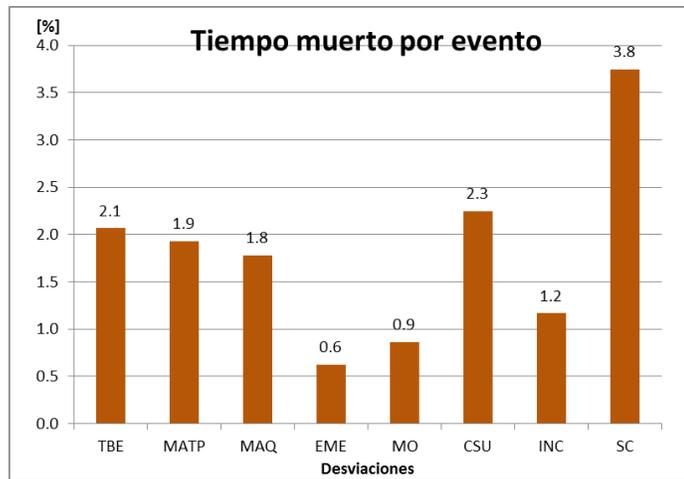


Gráfico 23: Tiempo muerto por desviación mes de Septiembre, túnel V5

Pese a que las fallas por maquinaria y cortes de suministros son las que juegan mayoritariamente en contra del avance para este mes se destaca que la falla más prolongada viene siendo la de tipo sin categoría (SC) relacionadas con las fiestas patrias. Un detalle acabado de las frecuencias y el tiempo por desviación puede encontrarse en los anexos de esta memoria.

4.3 Medidas correctivas

Tomando los resultados de la sección 4.3.3 se puede obtener un escenario global para cada desviación, lo cual permite realizar un enfoque sobre las medidas correctivas adecuadas otorgando prioridad sobre aquellas que fueron más influyentes en el periodo de *Ramp-up*. Esto se muestra a continuación para la situación en que las desviaciones no detienen el avance y luego para aquellas que si lo hacen entregando en este último caso propuestas sobre medidas de control que ayudarían a mitigar el impacto sobre los rendimientos de excavación.

4.3.1 Demoras que no detienen el avance

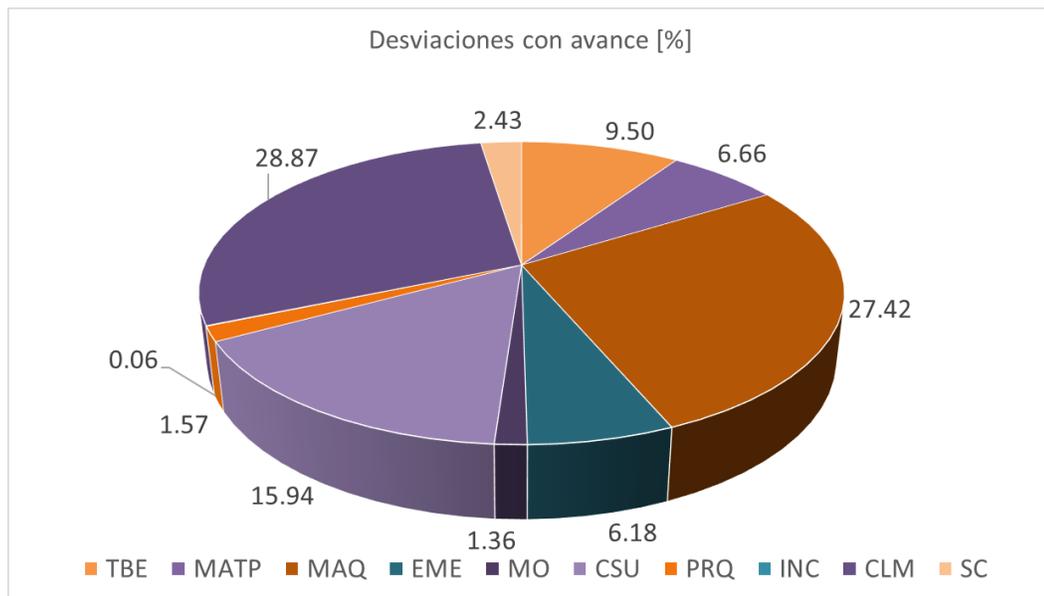


Gráfico 24: Peso de desviaciones que no detienen el avance

Dentro de las desviaciones que no detienen el avance se encuentra que el total de horas implicadas en esta categoría alcanzan un total de 464.2 en el periodo de estudio en *Ramp-up*, lo cual comprende 3.5 meses de estudio, es decir, en suma 2520 hrs. disponibles.

Clima (CLM): La mayor parte de las desviaciones apuntan al clima tomando un 28.87%, no obstante, esto es positivo, ya que significa que pese a las condiciones adversas que presenta el complejo la Engorda en V5 se determinó apto el turno para poder trabajar. Esto es ganancia en tiempo al considerar que el único incidente ocurrido no tiene relación alguna con este tipo de desviación y además la construcción de V5 tiene contemplado parar hasta 31 días por periodo de invierno, pero el total de tiempo bajo este ítem solo alcanza las 134hrs (5.6 días) y no detienen el avance.

Maquinaria (MAQ): En segundo lugar se tiene a la maquinaria ocupando el 27.42% del total de desviaciones, lo que equivale a 127 hrs. En general este tipo de desviaciones dan indicio a la

ocurrencia de una falla que eventualmente si detiene el avance en caso de extenderse por un tiempo prolongado y que tal como se describirá en la sección siguiente, va de la mano con la irregularidad en las mantenciones. Más que demoras altamente prolongadas este indicador es negativo por el hecho de vislumbrar una alta frecuencia con la que ocurre este tipo de desviación.

Corte de suministros (CSU): Por último en tercer lugar están las desviaciones relacionadas al corte de suministros utilizando el 15.94% del total, lo cual equivale a 74hrs. en donde se tiene que de manera análoga a lo que ocurre con las desviaciones de maquinaria (MAQ) existe mucha relación entre las mantenciones y este tipo de fallas.

4.3.2 Demoras que detienen el avance

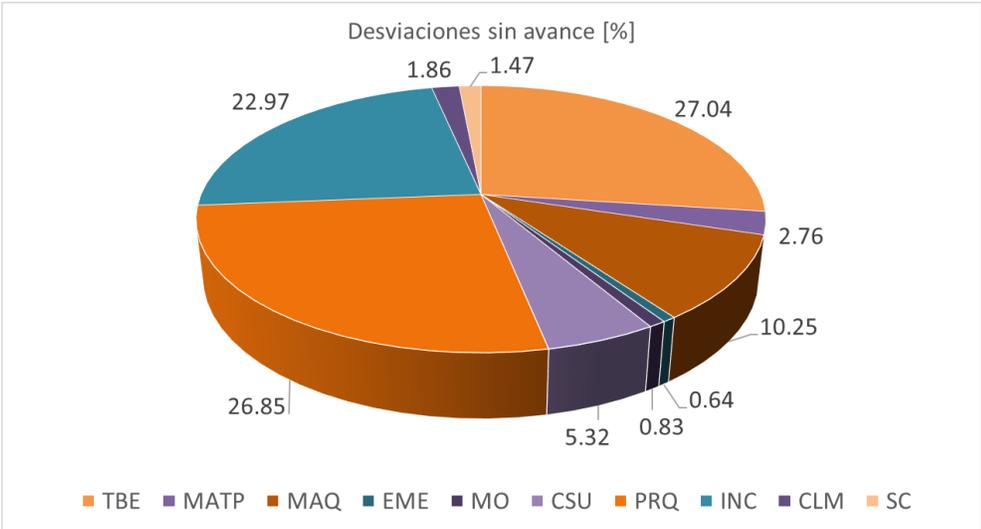


Gráfico 25: Peso de desviaciones que si detienen el avance

Dentro de las desviaciones que si detienen el avance se encuentra que el total de horas implicadas en esta categoría alcanzan un total de 1288.4 en el periodo de estudio en *Ramp-up* lo cual comprende 3.5 meses de estudio, es decir, en suma 2520 hrs. disponibles.

Trabajos estándar (TBE): La mayor incidencia entre las desviaciones que detienen el avance apuntan a los trabajos estándar tomando un 27.04% equivalente, sobrepasando incluso lo que respecta al incidente ocurrido. Esta desviación casi transversal al periodo de estudio, es decir, que está presente en todos los meses con excepción de Junio. Este aspecto va ligado fuertemente con la curva de aprendizaje presentada por la flota en V5 dado que en esta clasificación caen los “errores humanos” destacando por ejemplo el hecho de que la flota no fue capaz de afrontar de manera adecuada el cambio de tipo de roca desde II a III. Esto último se sustenta en el hecho de que existen 288 de un total de 348 hrs. (16 días) asociadas a re-fortificación y reinstalación de pernos en el mes de Julio, periodo en el cual la máquina se topa por primera vez con roca III. Para corregir este comportamiento se propone realizar una *Evaluación de conocimientos sistemática* a lo que respecta

al protocolo de excavación con TBM documento que si bien está aprobado por ingeniería y difundido hacia la flota solo se consta de una única instancia para su difusión al inicio de la obra. Tomando en cuenta que la flota está conformada por 12 integrantes en el turno A donde solo un tercio tiene trabajos previos en TBM significa que el resto de la flota no puede depender de la adquisición de experiencia al menos en el corto plazo por lo que conocimientos sólidos sobre la labor que desempeñan en faena es primordial para no cometer desviaciones TBE. La idea se concretaría efectuando una evaluación de desempeño de los trabajadores que incluya un test con frecuencia mensual o trimestral a la flota de V5 de tal forma que se entreguen incentivos para su aprobación y con ello se mantengan frescos los conocimientos en pos de una curva de aprendizaje de menor extensión. Cabe recordar que para este estudio existió una prolongación en la curva de aprendizaje para llegar al rendimiento en régimen de 70 días.

Otra causa importante en las desviaciones TBE es la limpieza del sector de trabajo, ya que frecuentemente se busca despejar el área cuando los escombros impedian la realización de otros trabajos, lo cual habla de una ocupación sobre el tema más que una preocupación. Las limpiezas en los equipos de *Shotcrete*, líneas de transmisión y marina son las más demandantes y en particular la marina es el mayor causante del desorden que se provoca en el túnel dado que la correa transportadora arroja material por los bordes que se va acumulando y va entorpeciendo el paso de los trabajadores hacia la frente a medida que esto ocurre. Este aspecto tiene riesgos asociados al el desnivel alterando la línea de gradiente y puede llegar a causar accidentes de caídas en mismo nivel con mayores probabilidades en personas de visita al túnel como lo son las inspecciones del mandante por ejemplo. Por otra parte una mala limpieza en los equipos de *Shotcrete* y líneas de transmisión crean potencial riesgo de *pannes* a futuro pudiendo detener el avance y por tanto bajar el rendimiento de excavación. Para enfrentar esta desviación se propone la realización de *Housekeeping* de modo que este forme parte del itinerario del “tiempo de mantenciones programadas” (las cuatro primeras horas del turno A del día) tomando aproximadamente una hora y media diaria para esta tarea. Actualmente es muy común ver la carencia de sistematicidad en este tipo de tareas y solo hacerlo cuando se trata de auditorías medioambientales o cuando es apremiante por lo que esta pequeña medida de control puede otorgar beneficios significativos a largo plazo.

Por último a modo de seguir generando la periodicidad de actividades que enfrenten las desviaciones TBE se propone la confección de un *Plan de mantenciones preventivas* que se anticipe a la labor de inspección de calidad. Actualmente la calidad es medida por la Inspección técnica a cargo de R&Q y se tiene un Plan de Inspección de Ensayos (PIE) para evaluar los distintos aspectos involucrados en el ciclo TBM. Gracias a lo anterior se pudo vislumbrar a través de ensayos la deficiencia en la puesta de pernos que terminó en la re-fortificación del sector con roca III, lo cual es positivo para la excavación, pero la capacidad de respuesta al tratar con la roca menos competente se ve afectada por fallas de tipo MAQ (10.25% equivalente a 132hrs.) en forma indirecta, ya que al tener problemas con el equipo aumentan las probabilidades de cometer errores al momento de ejecutar una tarea por lo que la brecha de la clasificación entre TBE y MAQ es bastante estrecha en algunos casos como por ejemplo las limpiezas de equipos de *Shotcrete*. De forma similar ocurre este comportamiento con las desviaciones CSU (5.31% equivalente a 68.5 hrs.) donde la mayoría de este tipo de desviaciones vienen a raíz de una falla MAQ o de los tratamientos en las líneas de servicios básicos, las cuales podrían ser cubiertas satisfactoriamente por un *Plan de mantenciones preventivas* para ciclo de excavación TBM. Este debiera encajar en

el tiempo dedicado a mantenencias en el turno A del día pudiéndose efectuar en forma paralela al *Housekeeping*. Los aspectos básicos que debiera abarcar esta medida de control son:

- **Maquinaria:** Ajustándose a las necesidades de cada componente de maquinaria en la TBM. Para ello se debe conocer en detalle la frecuencia de fallas de cada uno así como las especificaciones técnicas tal que el plan pueda jerarquizar las mantenencias de manera técnica y económica entregando un ciclo de actividades a seguir
- **Servicios básicos:** Debiera existir una mantención programada que tenga la misma frecuencia con la que se renuevan las líneas de servicios de agua energía y ventilación. El tiempo entre cada mantención quedara sujeto a los estándares de seguridad y operación que son condiciones fijas, en suma al rendimiento de excavación que es variable por lo que se requeriría capacidad de respuesta acorde a los avances

Pre-requisito administrativo no cumplido (PRQ): En segundo lugar se tienen los PRQ ocupando el 26.85% del total, lo que equivale a un total de 346 hrs. Es particular este tipo de desviación dado que solo se presenta en el mes de Agosto, se da en forma seguida durante 8 turnos siendo causal es única y consecuencia directa del cambio de roca. Si bien se detectó el error con el control de calidad y se tienen planos para construir bajo diversas condiciones y en particular para las que se presentaron al cambiar de roca II a tipo III todo lo anterior no surte efecto alguno si no existen procedimientos para realizar las tareas, los cuales son responsabilidad del personal de ingeniería y construcción hasta poder ser difundidos a la flota V5. Dicho lo anterior la falencia requiere de un *control de gestión* orientado hacia la agilidad de información y revisión de procedimientos nuevos entre mandante, inspección técnica y contratista, lo cual es clave para mitigar este tipo de desviaciones y mejorar la capacidad de respuesta ante eventos inesperados como en este caso la incertidumbre geológica.

Incidente (INC): Este evento ocupa el tercer lugar en cuanto a las desviaciones tomando el 22.97% del tiempo total, lo cual equivale a 296 hrs. Avalando la confidencialidad de lo ocurrido, el incidente consistió en la caída con nivel de un trabajador desde la plataforma ubicada en el cabezal de corte y el suelo semi-curvo del túnel distanciados por 1.8 metros. La caída se ocasiona fundamentalmente por el riesgo de un potencial planchón mientras se realizaba la puesta de pernos en la frente, lo cual impulsa al escape del operador saltando para evitar la caída de roca, sin embargo, la caída se convierte en la causal de los daños. El planchón es causado exclusivamente porque la excavación enfrentaba una falla geológica y el perno que se estaba colocando estaba inmerso en esta. Las consecuencias de este evento son en primera instancia la investigación de lo ocurrido que demoraron 8 días y como resultado se obtiene lo descrito anteriormente junto a la aprobación de la SEREMI para continuar labores cuando el mandante estime conveniente. Sin embargo, no se reanudó excavación y en vez de eso se realizó un *Safety Stand Down*, el cual consiste básicamente de talleres de reflexión donde se incluyen obras teatrales de capacitación con psicólogos a cargo. Este proceso se prolonga durante 5 días y luego viene la tercera consecuencia del evento que tiene relación con las desviaciones PRQ descritas en el punto anterior. Esta es la desviación más crítica de todas, pues como se puede apreciar en todas las consecuencias que acarrea este evento, el avance queda detenido por tiempo equivalente a 1 mes de trabajo bajando los rendimientos de excavación de forma estrepitosa. Además es el único tipo de desviación que atenta contra la misión del mandante, la cual es velar por la seguridad de sus trabajadores y su entorno como primera prioridad. Si bien el incidente afortunadamente no conllevó mayores

lesiones, podría haber terminado en accidente dado el peligro al que estaba expuesto el trabajador. En base a todo lo anterior es que la medida de control básica es la generación de *cultura de autocuidado*, la cual en parte se ha desarrollado a través de las charlas de seguridad y el *Safety Stand Down* mencionado, no obstante, es muy importante que la campaña sobre esta medida sea llevada a cabo con mayor fuerza y énfasis al punto en que, estando un trabajador en las condiciones de peligro descritas, este sea capaz de evitar los riesgos mediante su propio criterio. Esto último en suma al cumplimiento de todas las medidas de control anteriormente propuestas mitigarían las probabilidades de ocurrencia para este tipo de desviación.

4.4 Predicciones a través de *Forecast*

Se plantea ver finalmente como es que los factores de desviación y geología inciden de manera cuantitativa en el rendimiento de excavación esperado para la TBM Robbins en V5 y con ello poder estimar un tiempo de finalización de la obra.

Para lo anterior se confeccionan modelos analíticos de rendimientos de excavación capaces de mostrar sus resultados en forma gráfica a través de *Forecast*. Esto se realiza para dos casos principales *Best/Worst Case* y *Ajustes personalizados*, los cuales se describen con detalle en breve.

Consideraciones importantes en la confección de *Forecast* son las siguientes:

- La excavación en V5 culmina a los 7030 metros y se estipula para el 5 de Octubre de 2016
- El tiempo de montaje de correa, pese a que no está contemplado en el periodo de estudio, se conoce que a partir de los datos de Inspección técnica dura 26 días en vez de los 15 presupuestados razón por la cual se proyectan los datos reales en pos de una aproximación más cercana a la realidad
- De acuerdo a lo contemplado en la planificación del contratista se respetan los periodos de invierno de 31 días para todos los casos en que se atravesase por Julio
- Dado que se realiza el ajuste de partir el *Forecast* Ideal al mismo tiempo que la excavación real para realizar una comparación más equitativa de rendimientos, entonces los metros de diferencia hacia el final del estudio disminuyen desde 1329 a 524 metros

4.4.1 *Best Case* y *Worst Case*

Una primera aproximación simple hacia lo que podría ocurrir es tomando el mejor y el peor escenario en relación a la muestra de estudio buscando que esta sea lo más limpia posible, es decir, conteniendo solo avances regulares. Los filtros principales son:

- Eliminación de los valores nulos asociadas a desviaciones CLM, INC, TBE
- Eliminación de valores afectados por desviaciones que no detienen el avance CSU, TBE, MAQ

Cabe destacar que se libera a la muestra de avances regulares en roca tipo III con un pequeño análisis estadístico, ya que al observar los datos concernientes a esta roca se detecta con un nivel de confianza del 95% que los datos están afectados por desviaciones en su avance y por tanto no son regulares. Lo anterior genera una nueva muestra, la cual presenta la siguiente estadística básica que se muestra a continuación.

Avances Túnel el Yeso (V5 a V1) (Avance Regular)						
Muestra	Maximo	Min	Media (!=0)	Mediana	Desv. Estandar	Varianza
28	15.58	4.12	8.21	7.94	3.01	9.09

Tabla 16: Estadística básica, muestra filtrada para avances regulares, V5

Se encuentra que dentro de la nueva muestra la media alcanza los 8.21 [m/d], lo cual habla de un rendimiento que supera incluso lo esperado. Esto es normal dado que la roca II es la que conforma los 28 datos existentes y en ella los avances son de acuerdo a la literatura y a lo planificado con una TBM Gripper abierta. Por otro lado se aprecia que al comparar con la muestra original se tiene una desviación estándar disminuida tras haber modificado la muestra y por ende el mismo comportamiento en la varianza. Para el análisis que sigue se toman el mínimo el máximo y la mediana en vez del promedio, ya que esta representa mejor en el valor central de la muestra en este caso.

Lo primero es identificar el comportamiento de la muestra original para visualizar las variables de interés en la confección de un *Forecast*. Se parte con una regresión lineal simple tal como se observa a continuación.

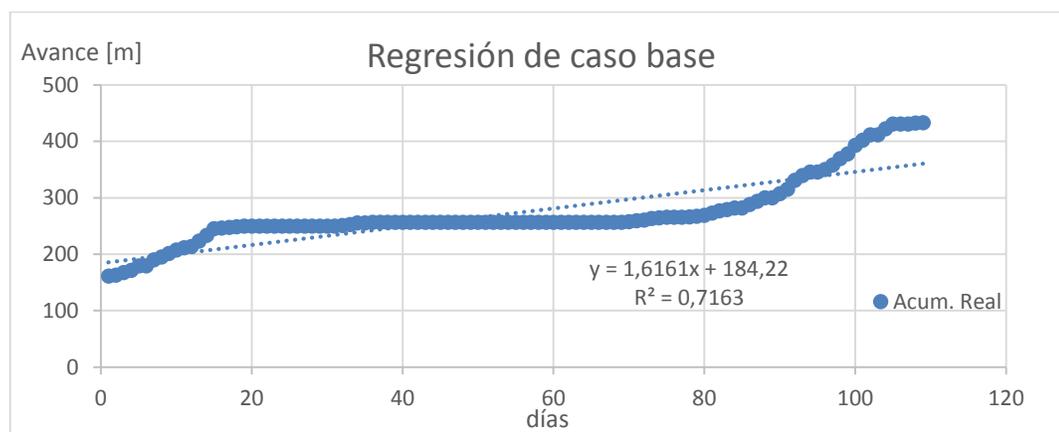


Gráfico 26: Regresión caso base, muestra original V5

Con esta regresión es fácil notar que la pendiente de la curva ajustada es aproximadamente (dado $R=0.7163$) el rendimiento obtenido en *Ramp-up* durante el periodo de estudio, lo cual corroboran los resultados de la tabla 10. Luego, se busca obtener cuanto variaría el rendimiento en función de las diferencias porcentuales entre el mínimo y máximo en relación a la mediana para replicar este tipo de curva. Los rendimientos proyectados se muestran a continuación.

Caso	Incidencia [%]	Ponderador	Avance proyectado [m/d]	Esperado [m/d]
Best	196	1.96	35.05	17.85
Worst	52	0.52	9.27	

Tabla 17: Resultados de proyección, Best/Worst case

La incidencia se obtiene entre el cociente del rendimiento máximo y mínimo contra la mediana respectivamente, lo cual entrega el ponderador observado en la segunda columna. Se tiene entonces que en este caso el rendimiento de avance proyectado es de tipo estático y se ajusta según los ponderadores aplicados al rendimiento esperado en régimen (17.85 m/d) obteniéndose los resultados de la tercera columna. Las diferencias son extremas de acuerdo a los ponderadores en donde para el mejor de los casos prácticamente se duplica el rendimiento mientras que en el peor de los casos se está próximo a una disminución del 50%. Gráficamente al extender un *Forecast* se obtiene lo siguiente.

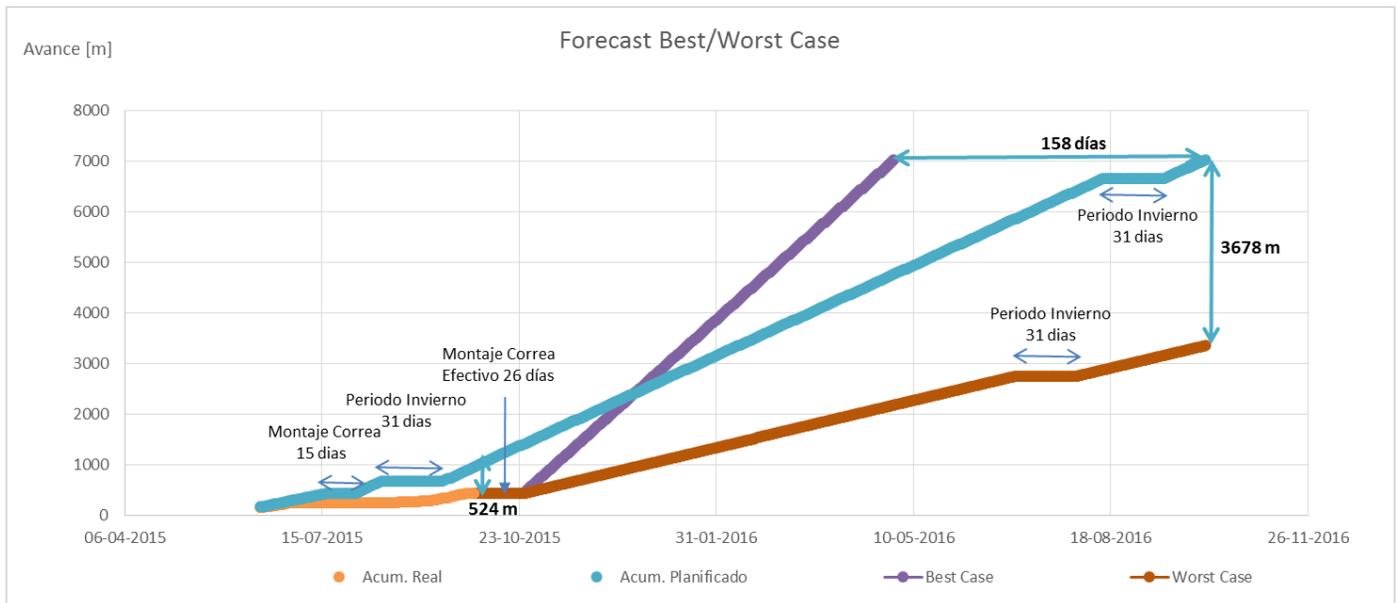


Gráfico 27: Forecast Best/Worst Case, V5

Resultados importantes del gráfico muestran ante todo un escenario muy favorable para el *Best case* (curva morada), dado que estima una pendiente equivalente a un avance de 35 m/d, lo cual implica que el túnel V5 terminaría sus labores de construcción 158 días antes de lo estimado por el *Forecast Ideal* (Acum. Planificado, curva celeste) esto considerando que además en este caso se termina antes del próximo invierno por lo que se ganan 31 días.

Por otro lado se puede notar que el *Worst Case* (curva café) queda con un rendimiento estimado de tan solo 9.27 [m/d] en régimen, lo cual genera que al momento en que el *Forecast ideal* culmina el *Worst case* queda debiendo 4858 metros de longitud excavada equivalentes a 428 días de excavación que necesitaría para terminar el túnel al ritmo mencionado. En este caso si se atraviesa por un segundo periodo de invierno tal como se aprecia en el gráfico, lo cual incluye el castigo de 31 días de avances nulos pero a diferencia de los otros escenarios la fecha de término sería el 7 de Diciembre de 2017.

4.4.1 Modelos de ajuste personalizados

Dado que los casos anteriores son aproximaciones simples se emplea a la confección de un modelo de base empírica que utiliza además los componentes geológicos y de desviaciones exclusivos del túnel V5 contemplados en la muestra de estudio bajo *Ramp-up*. El modelo utilizado se presenta a continuación.

Ecuación 1: Modelo de ajuste empírico, túnel V5

$$ARA_a = ARA_t * F_{desv} * F_{geo} * F_a * F_d * F_e$$

Donde:

ARA_t : Rendimiento teórico

ARA_a : Rendimiento estimado ajustado

F_d : Factor de ajuste de diámetro

F_{desv} : Factor de ajuste por desviaciones

F_e : Factor de ajuste por experiencia

F_a : Factor de ajuste por adaptación

F_{geo} : Factor de ajuste por geología

Se detalla a continuación como se obtiene cada variable de la ecuación 1.

Rendimiento teórico: Este es el rendimiento que viene a partir de una muestra donde el avance con TBM no se ha visto afectado por problemas mecánicos y, por lo tanto, en ellos el avance sólo puede depender de las características del terreno. Para su determinación puede utilizarse el índice RME basado en conceptos geomecánicos y relacionarlo con el rendimiento a través de curvas empíricas (Bienawski, R., 2006), no obstante, para el caso particular de V5 ya existe un rendimiento teórico proveniente de la planificación mostrada en la sección 4.1.1 (17.85 m/d), el cual se aproxima de mejor forma usando la muestra de V5 y considerando el valor de la mediana (7.97 m/d) como el rendimiento teórico esperado según la tabla 19. Aludiendo a lo anterior el rendimiento teórico esperado es el 99.18% del rendimiento planificado, entonces para el régimen se esperarían un avance de 17.71 [m/d].

Factor de ajuste por experiencia: Este factor es exclusivo a la curva de aprendizaje de la flota en V5 y se define bajo la siguiente ecuación

Ecuación 2: Factor de ajuste por experiencia

$$F_e = F_{e1} + F_{e2} + F_{e3} + 0.7$$

El valor mínimo para este factor es 0.7 y el máximo es 1.2. Por otro lado los factores F_{e1} , F_{e2} , F_{e3} evalúan cuantitativamente aspectos de la flota de acuerdo a criterios de experiencia cualitativos mostrados en la siguiente tabla (Bienawski Z.T., Celada B., Galera J.M., Tardáguila I., 2008)

Experiencia del Contratista	Sin Experiencia	1 a 5 Túneles Construidos con Tuneladora	6 a 10 Túneles Construidos con Tuneladora	11 a 20 Túneles Construidos con Tuneladora	>21 Túneles Construidos con Tuneladora
Valor de F_{E1}	0.00	0.05	0.10	0.15	0.2
Calificación del Personal de la Tuneladora	Poco Entrenado y Sin Experiencia en Tuneladoras	Entrenado; Pero Sin Experiencia en Tuneladoras	Entrenado y Con Experiencia en Tuneladora		
Valor de F_{E2}	0.0	0.10	0.15		
Suministro de Repuestos	Existencia de Representante Local del Fabricante de la Tuneladora		Tiempo Necesario Para Recibir Repuestos		
	Si	No	≤ 1 Mes	> 1 Mes	
Valor de F_{E3}	0.075	0.0	0.075	0.0	

Tabla 18: Criterios de evaluación para factor de ajuste por experiencia (Bienawski Z.T., Celada B., Galera J.M., Tardáguila I., 2008)

De acuerdo a la entrevista en terreno realizada a los trabajadores de la flota en V5 en el turno A (día) se obtiene que F_{e1} es 0.05 mientras que F_{e2} y F_{e3} valen 0.15 generando así un F_e resultante de 1.05.

Factor de ajuste por adaptación: Este ajuste toma en cuenta el incremento del rendimiento que se produce a medida que la flota de la tuneladora se familiariza con la máquina misma y las peculiaridades específicas del terreno a excavar (Bienawski R., Celada B., 2007), como lo son las de V5. De acuerdo a lo anterior se tiene la siguiente curva para el cálculo de F_a .

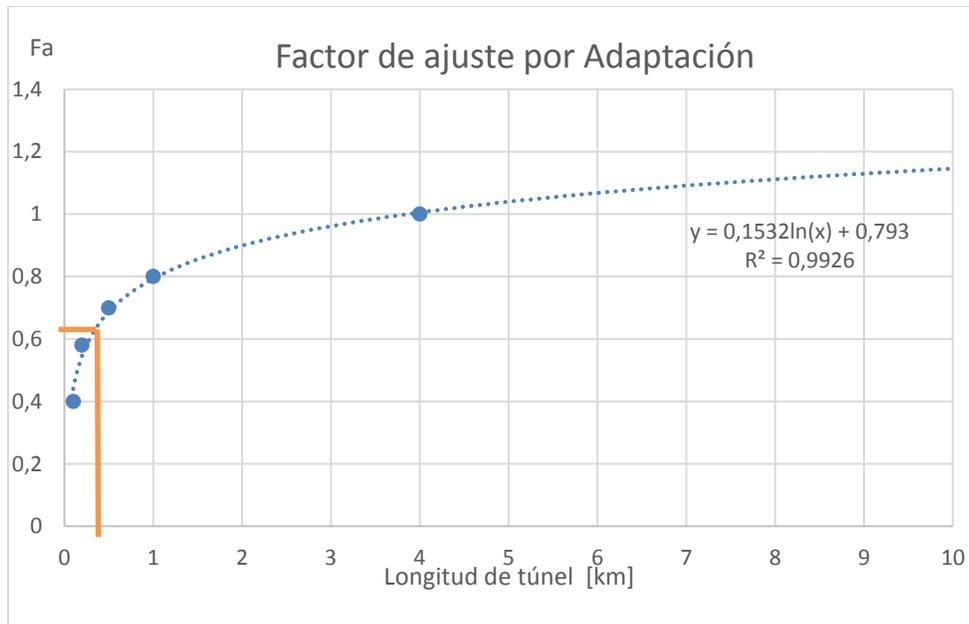


Gráfico 28: Curva empírica de cálculo para factor de adaptación (Bienawski R., Celada B., 2007)

Se aprecia que el factor de ajuste por adaptación sigue una tendencia logarítmica con una meseta en el valor 1.2. La intersección indicada en naranja sugiere que para un valor de 432 [m] de túnel excavados en base a los datos de la muestra, entonces se obtiene un F_a igual a 0.664. Cabe notar que para modelar el avance del túnel mediante un *Forecast* este factor es el único que presenta la particularidad de ser dinámico, pues crece conforme se desarrolla V5 y por lo tanto la curva de ajuste logarítmica ($R=0.99$) adjunta en el gráfico 29 se utiliza para extrapolar F_a hasta el final del túnel.

Factor de ajuste por diámetro: Si se mira un registro histórico de literatura en TBM entonces es clara la relación inversa entre el diámetro de la máquina y su rendimiento de excavación, en particular el modelo empírico utilizado tiene estandarizado que para un diámetro igual a 10 [m] F_d alcanza un valor igual a la unidad. En detalle la función que representa a este factor es la siguiente.

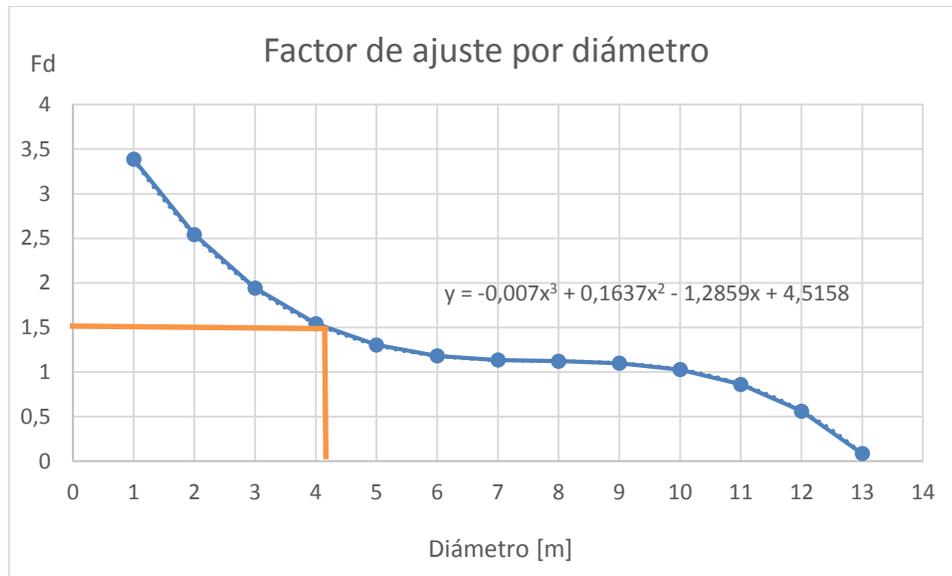


Gráfico 29: Curva empírica para cálculo de factor ajuste por diámetro (Bienawski R., Celada B. , 2007)

El ajuste de esta curva es polinómico de grado tres y para la TBM Robbins MB139-396 de diámetro 4.13 [m] se tiene que F_d es igual a 1.504, el cual es un valor favorable dado que, dentro de las TBM en el mercado, la utilizada en V5 es de pequeño diámetro, lo cual teóricamente aumenta el rendimiento de excavación.

Factor de ajuste por geología y desviaciones: Dentro de las demoras no programadas que se vieron involucradas en el desempeño de la TBM en el periodo *Ramp-up* las más importantes fueron las concernientes al cambio de roca desde tipo II a III y las desviaciones obtenidas como resultado en la sección 4.3.3. Dado lo anterior se manipula la muestra de tal forma de obtener sub-muestras que discriminen por separado estos dos tipos de eventos pudiendo con ello cuantificar el impacto que generan de forma excluyente.

En lo que respecta a las desviaciones la media para los datos con filtro está expuesta en la estadística básica de la tabla 10 (Media sin ceros) donde se tiene que la media de un rendimiento que sólo se ve afectado por la geología es de 5.07 [m/d]. De forma similar se realiza un filtro en los datos tal que se visualice el efecto de lo que son exclusivamente las desviaciones. Para ello se quita la roca III de la muestra obteniéndose la siguiente estadística.

Avances Túnel el Yeso (V5 a V1) (filtro RIII)						
Muestra	Avances nulos	Max	Media (!=0)	Mediana	Desv. Estandar	Varianza
86	55	15.58	2.74	0.00	4.20	17.64

Tabla 19: Estadística básica para filtro en roca tipo III, V5

De la tabla 19 se aprecia que la muestra disminuye a 86 datos al eliminar los avances que pese a no ser nulos si son afectados por el cambio de roca (de II a III). Además existe mediana nula, pues la muestra conserva valores cero de avance dada las desviaciones que lo detienen por completo y es la razón por la cual no se utiliza este estadístico en este análisis. Luego la media del rendimiento de excavación para la muestra en el caso en que solo fuese afectada por desviaciones sería de 2.74 [m/d]. Sin embargo este factor se modelará como un *on/off*, es decir, que los eventos que detienen el avance por completo son discretos y asociados a una distribución normal acorde a la experiencia en el *Ramp-up*. Dicho lo anterior F_{desv} se encarga de ponderar el rendimiento por cero en un total de 55 días por cada 109 días operacionales libres del efecto geológico. Los eventos considerados en el total de días sin avance mostrados en la tabla 19 contemplan el incidente, la re-fortificación de sectores dañados y aquellas contingencias clasificadas en la tabla 15, sección 4.3.3 de este documento. Modelados como una distribución normal con los datos de la tabla 10 se obtiene una probabilidad igual a un 75.6% de tener avances sin desviaciones.

Por otra parte para modelar el evento geológico se puede calcular un ponderador que modifica el rendimiento atendiendo exclusivamente a los hechos ocurridos en el periodo de estudio. Los resultados del cálculo para F_{geo} se muestran a continuación.

Media sin desv., con roca III [m/d]	5.07
Media sin desv. y sin roca III [m/d]	8.21
Factor asociado a geología	0.62

Tabla 20: Resultados de factores de ajuste por geología

De la tabla 20 se observa que con los datos anteriormente mencionados se puede extraer la incidencia de incertidumbre geológica al realizar una relación cruzada simple con respecto a la muestra limpia (caso óptimo) y con ello obtener finalmente el factor de desviaciones por geología.

Es importante tener en consideración que al ser empírico el modelo, estos factores hacen referencia a cómo podría verse afectado el ARA_t en el caso en que las condiciones del *Ramp-up* se replicasen en forma idéntica a lo largo del resto de la excavación, es decir, que se ve reflejado como sería el rendimiento (al ponderarlo por 0.62) en el caso en que la TBM se viera afectada por un cambio de tipo de roca desde II a III, pero en el caso en que apareciera otro nuevo tipo de roca no previsto en el perfil geológico o en caso de presentarse un evento geomecánico como un *rockburst*, entonces la diferencia entre lo que predice el modelo y lo que realmente se obtiene sería el efecto de estos nuevos eventos. Por otra parte el factor de desviación

Con todo lo anterior es posible realizar la extrapolación utilizando el modelo descrito y aplicándolo al rendimiento teórico (17.85 m/d) sobre 3 casos distintos:

- Ajustado óptimo $\rightarrow ARA_a = ARA_t * F_a * F_d * F_e$ (26.1m/d)
- Ajustado con geología $\rightarrow ARA_a = ARA_t * F_{geo} * F_a * F_d * F_e$ (16.12 m/d)
- Ajustado con geología + desv. $\rightarrow ARA_a = ARA_t * F_{desv} * F_{geo} * F_a * F_d * F_e$ (8.05 m/d)

Estos resultados conforman el siguiente *Forecast*.

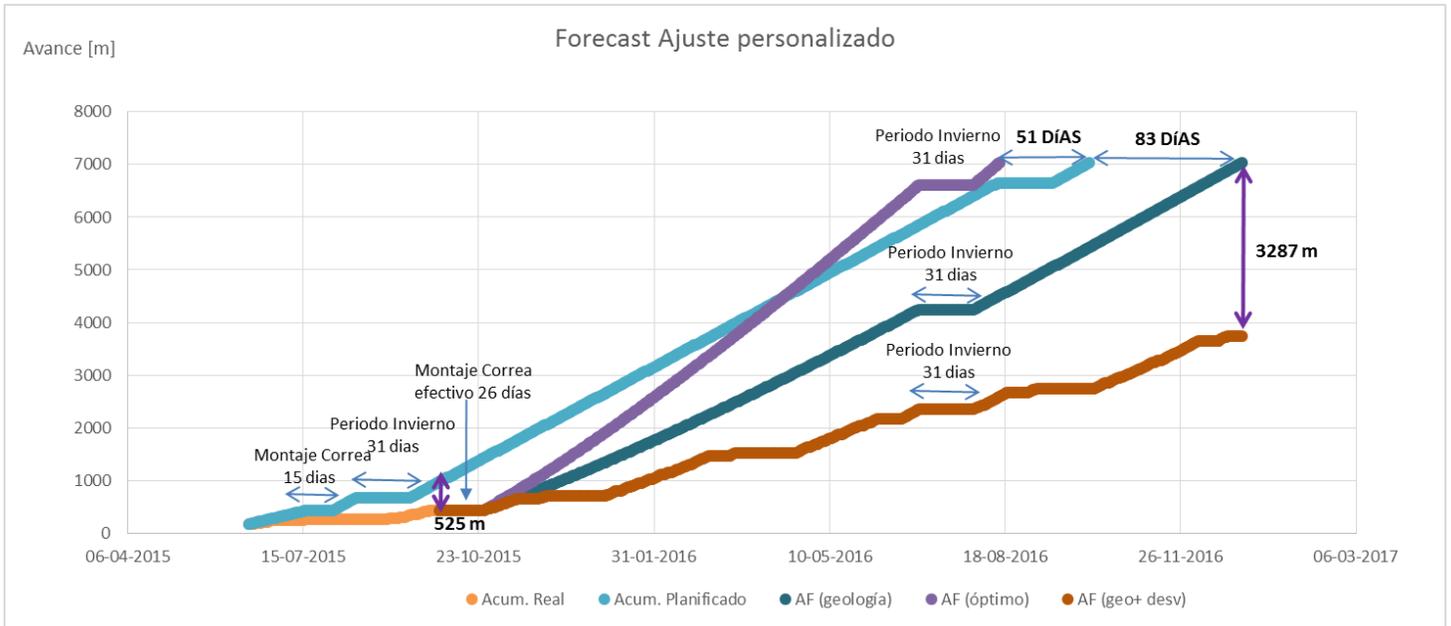


Tabla 21: Forecast de ajustes personalizados, V5

Para el caso óptimo (curva morada) donde se asume que no existen desviaciones ni tampoco cambios en el tipo de roca, es decir, en donde no afectan F_{desv} , F_{geo} , se tiene entonces que el rendimiento esperado alcanza los 26.1 [m/d], resultado favorable que culminaría la excavación en 320 días a partir del 01/10/15. Esto es antes de lo previsto por el *Forecast* ideal adelantándose en 51 días a lo presupuestado. En caso de que los eventos geológicos fuesen los únicos en afectar la excavación (curva azul) entonces la excavación se prolonga en 83 días más allá de lo que dicta el *Forecast* ideal, lo cual sugiere que restan 458 días para finalizar V5. Este caso se considera el más cercano a la realidad, puesto que la incertidumbre geológica en la actualidad del proyecto ha demandado un nuevo perfil geológico, no obstante, esto no mitiga completamente la probabilidad de este tipo de eventos. Por último en el peor de los casos (curva café) con desviaciones y eventos geológicos el túnel quedaría atrasado en 3287 [m] con respecto al caso anterior. En este último caso el se prolongaría la construcción a 825 días desde 01/10/15. En resumen se tiene la tabla 22.

Resultados por caso	Geo. + Desv.	Geología	Óptimo
Rendimiento [m/d]	8.05	16.11	26.09
Desv. Estándar [m/d]	9.10	5.93	9.61

Tabla 22: Resultados de Forecast personalizados

4.5 Extrapolación de resultados a túnel minero

Dado el trabajo para realizar proyecciones *Forecast* expuesto en la sección 4.5 es posible aplicar el modelo de ajuste personalizado a un proyecto minero para probar la factibilidad técnica del uso de TBM en este. En particular se trabaja con el Nuevo Nivel Mina (NNM) de Teniente, el cual en la actualidad presenta mucha ingeniería que se encuentra precisamente optimizando los procesos de construcción del proyecto. Dicho lo anterior es de interés conocer que es lo que pasaría en NNM si se decidiera optar por el uso de una tuneladora. Para esto se utilizan los resultados que ha obtenido el proyecto PHAM con el desempeño logrado en V5.

4.5.1 Adit, 74 NNM

El túnel a evaluar es el Adit 74 de extracción de NNM y sus principales características en contraste con las de PHAM están tabuladas a continuación:

Túnel	Adit 74, NNM	V5, PHAM
Sección [m ²]	49	13
Longitud [m]	2166	7030
Diámetro [m]	7.90	4.13
F _d	1.12	1.50
F _e	1.05	1.05
F _a (promedio)	0.78	-

Tabla 23: Adit 74 v/s V5, características principales

Se tiene que la sección del Adit 74 es mucho más amplia, lo cual repercute en el diámetro de la TBM requerido y por ende en el factor de Ajuste F_d , el cual disminuye según la curva empírica de ajuste. En cuando al factor F_e se asumirá que este no cambia bajo el supuesto en que la flota es idéntica. Por otro lado el túnel de PHAM es 3.3 veces más largo que en NNM por lo que el factor F_a hace más favorable el escenario de V5 dado que a mayor longitud mejor adaptación. Para el caso de esta extrapolación se utilizó un factor de ajuste por adaptación promedio a modo de simplificar su valor dejándolo estático.

Por otra parte el perfil geológico longitudinal de la obra puede encontrarse en los anexos de este trabajo. A partir de este último documento se extrae que los tipos de roca y su distribución a lo largo del túnel son:

Q	Q>10	10>Q>1	1>Q>0.1	0.1>Q>0.05	0.05>Q>0.01	Q<0.01
calidad	Buena	Mala	Mala a	Mala b	M. Mala	E. Mala
Longitud	100	1012	434	383	101	136

Tabla 24: Clasificación geomecánica según NGI-Q, Adit 74

Se aprecia que dada la precisión del mapeo geológico a través de sondajes existen todos los tipos de roca a lo largo del túnel, lo cual presenta un desafío para la flota, sin embargo, se utiliza el supuesto de que la construcción del Adit 74 está fuera de la influencia del factor por desviaciones, lo cual apunta a realizar una extrapolación del caso más realista descrito en el análisis de *Forecast* personalizados en 4.5.1 donde solo afecta el cambio de geología.

4.5.2 Extrapolación de rendimientos TBM

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta memoria existe un factor de ajuste para el rendimiento cuando se tiene roca II (0.99) o III (0.67), sin embargo, esto no es suficiente para modelar todos los tipos de roca presentes en el Adit 74 razón por la cual se acude a la curva empírica encontrada en el proyecto hidroeléctrico Yuncán (PHY) (Giraldo, E., 2009) dado que tiene la bondad de tener todos los tipos de roca como en NNM y además presenta condiciones similares de excavación con TBM en relación a PHAM. Luego, haciendo uso del gráfico 1 se puede calcular un factor de ajuste por geología que se extiende para todos los tipos de roca y así poder aplicarlo sobre ARA_t de PHAM tanto para el *Ramp-up* como para el rendimiento en régimen. Finalmente se puede obtener el ARA_r ajustando según los valores de la tabla 25 para NNM. Los resultados del proceso anterior se presentan a continuación.

Tipo roca	Clasificación	Rendimiento [m/d]	Factor de ajuste por geología	ARA _t en ramp up [m/d]	ARAr en ramp-up [m/d]	ARA _t en régimen [m/d]	ARAr en régimen [m/d]
I	A	29.60	1.49	11.94	10.93	26.63	24.39
	B	23.83					
II	B-CH	19.84	0.99	7.93	7.27	17.70	16.21
	C	14.74					
III	CH-CM	12.00	0.67	5.36	4.91	11.96	10.95
	CM	8.83					
IV	CM-CL	5.44	0.27	2.19	2.01	4.89	4.48
	CL	2.81	0.14	1.13	1.04	2.53	2.32
V	CL-D	1.03	0.05	0.42	0.38	0.93	0.85
	D	0.31					

Tabla 25: Resultados de extrapolación de rendimientos para NNM

Se tiene que los factores de ajuste complementarios a partir del modelo de Giraldo. E vienen dados por una curva que ajusta con un coeficiente de correlación cercano a la unidad (0.998) y por lo tanto los ajustes son confiables, como un ejemplo de esto, se corrobora que tan solo existe un margen de error igual a un 10% al comparar entre $F_{geo,PHAm}$ con $F_{geo,PHY}$ en roca III.

4.5.3 Tiempo de construcción empleados

Con el fin de utilizar los rendimientos calculados en la sección anterior es necesario definir el proceso constructivo del Adit 74 así como también identificar particularidades que podrían afectar la factibilidad del uso de TBM.

Las consideraciones y supuestos utilizados son los siguientes:

- El túnel se construiría desde la superficie hacia la mina, lo cual involucra de inmediato que el avance va contra una pendiente de -9%. Esto es un tema muy importante, ya que la TBM podría tener mayores probabilidades de desviaciones al considerar el retiro de marina por correa transportadora en condiciones de subida, no obstante, esta extrapolación como se dijo anteriormente asume un F_{desv} igual a cero
- Se presume que los primeros 300 [m] de excavación son realizados vía D&B. Esto último se debe a que, fuera de necesitar 240 [m] de túnel solo para dar el espacio suficiente al montaje de TBM, se debe además considerar que existe una curva en el diseño del Adit que abarca un radio de giro de 300 [m] para cambiar en 90° la dirección del túnel. Dicho esto es conveniente atravesar la curva totalmente con D&B asumiendo un avance conservador de literatura para este método equivalente 6 [m/d] de avance
- El montaje de TBM se da en forma paralela a la excavación con D&B, y la única demora programada a considerar consta del montaje de correa para pasar desde *Ramp-up* a régimen
- Se considera que el periodo de *Ramp-up* emplea 100 [m] de avance (desde los 300 m en D&B hasta llegar a 400 m con TBM) de acuerdo a la literatura y aludiendo a un caso similar a lo planificado en PHAM. Dicho esto la correa se monta en 15 días luego de llegar a la longitud mencionada y comienza el régimen a partir de este punto

Teniendo en cuenta los supuestos y consideraciones, los rendimientos de extrapolación calculados de la sección 4.6.2 y el perfil geológico del Adit 74, se puede entonces calcular el tiempo que se tarda la excavación en las distintas fases de construcción tal como lo muestra la siguiente tabla.

Tipo de roca	I	II	III	IV		V	Totales
Longitud total [m]	100	1012	434	383	101	136	2166
Longitud en D&B [m]	0	80	20	90	50	60	300
Tiempo en D&B [días]	0	13	3	15	8	10	50
Longitud en ramp-up [m]	0	50	30	5	10	5	100
Tiempo en ramp-up [días]	0	6.9	6.1	2.5	9.6	13.1	38
Longitud en regimen [m]	100	882	384	288	41	71	1766
Tiempo en régimen [días]	4.1	54.4	35.1	64.3	17.7	83.7	259

Tabla 26: Tiempos de construcción por fases, Adit 74 NNM

En negro se aprecian los tiempos totales en días para cada fase a lo que hay que agregar el tiempo de demoras programadas y así obtener el tiempo total de construcción. El resultado final se muestra a continuación.

Etapa	Tiempo de Construcción [meses]
D&B	1.67
Montaje de correa	0.50
TBM	9.92
Total	12.08

Tabla 27: Tiempo de construcción total, Adit 74 NNM

Del resultado final en la tabla 28 se aprecia que los 12.08 meses de construcción están marginalmente por debajo del tiempo que se necesitaría para construir el túnel sólo utilizando D&B (12.03 meses). Esto presentaría un escenario indiferente entre D&B vs TBM al mirarlo en forma simple, no obstante, pese a que se podría comparar contra un caso muy desfavorable en D&B, al considerar el tiempo previo a la puesta en marcha que requiere la TBM para su funcionamiento, es decir, fabricación (9 meses) y envío (3 meses), entonces aumenta el tiempo total involucrado con TBM considerablemente. En suma a lo anterior el aumento del factor F_{desv} que podría surgir a causa de la pendiente utilizada en el diseño del túnel en cuestión podría elevar los tiempos de construcción en la fase TBM si es que no se logran mitigar por completo las desviaciones. En base a todo lo anterior se presume que la opción de construir el Adit 74 utilizando TBM no es técnicamente factible.

Capítulo 5: Conclusiones

Tomando en cuenta el avance tecnológico en materia de construcción de túneles que se desarrolla actualmente en el mercado, todo el análisis realizado en esta memoria es de carácter técnico y sirve para evaluar el desempeño de una máquina TBM por medio de indicadores prácticos que permiten al mandante tomar decisiones de construcción ante distintos eventos no deseados tales como condiciones climáticas adversas, incidentes, cambios en la geología y análisis de la curva de aprendizaje.

El trabajo realizado en esta memoria determina que al analizar y evaluar el desempeño de la TBM Robbins MB139-396 en su periodo de *Ramp-up* equivalente a 3.5 meses desde el inicio de su excavación operando en la obra Túnel el Volcán (V5), esta posee un tercio del rendimiento de avance esperado.

En cuanto al rendimiento de construcción particular de V5, la diferencia entre utilizar D&B con TBM es una relación 2:1, es decir, que la TBM tiene el doble de rendimiento que el método convencional, no obstante, la comparación está hecha contra la muestra de estudio que solo contiene el *Ramp-up*. Esto explica porque no se cumple el comportamiento clásico de literatura donde la relación esperada es 3:1.

De los resultados del análisis sobre la muestra de estudio se encuentra que de las causas que disminuyen el desempeño de la TBM Gripper Abierta presentadas en forma jerárquica en cuanto a su impacto en el rendimiento de avance son las siguientes: En primer lugar están las desviaciones que particularmente son las que engloban dificultades asociadas a la curva de aprendizaje de la flota (TBE) y por otro lado los impases como el incidente (INC, PRQ) ocurrido en suma a los eventos climáticos adversos que proporcionó el ambiente de V5.

En segundo lugar están los eventos concernientes a la incertidumbre geológica de construir un túnel donde la capacidad de respuesta ante cambios de roca es lo primordial para mantener un avance relativamente constante. Estas dos causales contribuyeron fuertemente al descenso del rendimiento disminuyendo los días operativos hasta la mitad del total disponible, lo cual muestra claramente en donde se debe poner el énfasis para optimizar el proceso. En este caso, si bien no se puede evitar la climatología, si es posible hacerlo con los incidentes, lo cual va de la mano con la eficiencia en la instauración de *cultura de seguridad*, medida clave para la prevención de riesgos y bienestar de los trabajadores.

Se detecta que las mayores falencias relacionadas con la curva de aprendizaje, es decir, con la capacidad de internalizar las labores del ciclo de excavación, se encuentran en los trabajos estándar (TBE) y las fallas de maquinaria (MAQ). Estas se pueden contrarrestar con las medidas de control propuestas: *Evaluación de conocimientos sistemática*, *Housekeeping* y un *Plan de mantenciones*

preventivas. Si bien cada una involucra un aspecto distinto, todas se logran llevar a cabo por medio de gestión de control de procesos.

El impacto cuantitativo de las dos variables más influyentes en el desempeño de la TBM según el modelo de ajuste personalizado son los factores F_{desv} (0.33) y F_{geo} (0.62) para las desviaciones y la geología respectivamente. Aplicando estos en un *Forecast* sobre V5 y asumiendo un escenario en donde el buen uso de las medidas de control entregadas permite un F_{desv} suficientemente cercano a la unidad, entonces el túnel finalizaría su excavación dentro de 458 días prolongándose 83 días por sobre lo predicho en el *Forecast* Ideal.

De los resultados de la extrapolación hacia un túnel minero se tiene que la construcción del Adit 74 con TBM tardaría 12.08 meses, lo cual supera marginalmente el tiempo que se necesitaría para construir el túnel sólo utilizando D&B (12.03 meses). Esto presentaría un escenario indiferente entre D&B vs TBM al mirarlo de esta forma, no obstante, pese a que se podría comparar contra un caso muy desfavorable de D&B, al considerar el tiempo previo a la puesta en marcha que requiere la TBM para su funcionamiento, es decir, fabricación (9 meses) y envío (3 meses), entonces aumenta el tiempo total involucrado con TBM considerablemente. En suma a lo anterior el aumento del factor F_{desv} que podría surgir a causa de la pendiente utilizada en el diseño del túnel minero podría elevar los tiempos de construcción en la fase TBM si es que no se logran mitigar por completo las desviaciones. Dado lo anterior se presume que la opción de construir el Adit 74 utilizando TBM no es técnicamente factible.

Capítulo 6: Futuras líneas de Investigación y Recomendaciones

Dada las características de la evaluación realizada en esta memoria, la cual es netamente técnica, se deja entonces propuesto evaluar si las medidas de control entregadas son económicamente factibles. Esto es de suma importancia atendiendo al hecho de que el proyecto es realizado por una empresa privada por lo cual el aspecto técnico debe ir siempre de la mano con el beneficio neto que una medida de control sea capaz de generar. En particular se recomienda la asistencia de un Ingeniero mecánico para la confección del *Plan de mantenciones programadas*.

Algo interesante para seguir las predicciones a partir de *Forecast* sería utilizar el índice RME *Rock Mass Excavability*, la cual es una herramienta que ha ido desarrollando literatura al respecto en esta última década. La ventaja de este índice radica en el hecho de que está creado exclusivamente para excavaciones con TBM y toma en cuenta aspectos geomecánicos tales como la resistencia a la compresión uniaxial, la perforabilidad, autoestabilidad, entre otros. Este índice en conjunto con curvas empíricas ajustadas para un determinado tipo de TBM, como lo es la Gripper abierta, es capaz de predecir el ARA_t con mayor precisión y con ello obtener un *Forecast* más confiable.

Por último, el presente estudio puede servir como base para el siguiente paso de ingeniería en donde globalizar la utilidad de los modelos ajustados expuestos puede ser benéfico para muchos otros proyectos, sin embargo, para ello es necesaria una validación a través de prueba y error en otras experiencias con TBM. En conjunto con lo anterior se podría llegar a modelar probabilidades de ocurrencia para los eventos más críticos en la excavación subterránea como aquellos mencionados en las conclusiones de esta memoria. Finalmente se podría llevar a cabo una programación vía software del modelo tal que se pueda estandarizar y difundir su uso en la industria.

Capítulo 7: Bibliografía

- The Robbins Company. (2014). Service Manual. Kent, Washington: Printed in the United States of America.
- American, A. (2011). Proyecto Los sulfatos: el nuevo resplandor de Los Bronces. Minería Chilena, 1-2.
- Beamish B., W. D. (2009). Anglo Base Metals- Copper. Unlocking value from a world-class deposit, (págs. 20-21).
- Belle B., F. A. (14 de February de 2015). Coal Operator´s Conference. Recuperado el 14 de August de 2015, de Explosion Prevention in Coal Mine TBM Drifts-an Operational Knowledge Share: <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2235&context=coal>
- Bienawski R., Celada B. . (2007). Revisión y nuevas aplicaciones del índice Rock Mass Excavability (RME). Barcelona: Geocontrol S.A.
- Bienawski Z.T., Celada B., Galera J.M., Tardáguila I. (2008). Nuevas aplicaciones del Índice RME para la selección del tipo de tuneladora. INGEOPRESS. n° 176.
- Bienawski, R. . (2006). El Índice de Excavabilidad del Macizo Rocoso (RME): Nueva metodología para escoger el método óptimo de construcción de túneles. Tunnelling and Underground Space Technology.
- Collazos, H. (Diciembre de 2009). Aspectos de propiedad intelectual y versionamiento. Bogotá, Colombia: SINUAD.
- Departamento de Geología Fcfm, U. (2015). Geological Model Revision and update Alto Maipo Hydroelectric project. Santiago.
- Forascepi R., C. A. (1991). Desarrollo túnel método excavación a sección completa mediante TBM. Santiago: CODELCO, División El Teniente.
- Galera, J. (2015). Design criteria and design bases- Tunel Volcán. Santiago.
- Giraldo M., O. O. (19 de Diciembre de 2008). Productividad de las máquinas tuneladoras tipo tbm vs tipo de roca. Revista de Instituto de Investigaciones FIGMMG, 5-6. Recuperado el 2 de Agosto de 2015, de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/viewFile/419/359>
- Giraldo, E. (2009). TBM como alternativa a la P&B en la excavación de túneles. Recuperado el 2015, de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v13_n26/pdf2/a04v13n26.pdf
- Gross, M. (16 de Septiembre de 2010). Pensamiento Imaginactivo. Recuperado el 27 de Agosto de 2015, de Conozca 3 tipos de investigación: Descriptiva, Exploratoria y Explicativa: <http://manuelgross.bligoo.com/conozca-3-tipos-de-investigacion-descriptiva-exploratoria-y-explicativa>

Hochtief-CMC. (3 de 9 de 2015). TUNNEL IN ROCK EL VOLCAN TUNNEL SYSTEM INITIAL SUPPORT CONSTRUCTION SEQUENCE. SISTEMA VOLCAN-YESO. Santiago, San José de Maipo, RM: PHAM Ingeniería de detalle.

J. Tarkoy, P. (Octubre de 1995). Recuperado el Agosto de 2015, de <http://www.geoconsol.com/publications/tbm-db-2.pdf>

Mallorca, P. (2010). Presentación Capítulo PMI Islas Baleares. Profesionalizando la Dirección de Proyectos (págs. 18-30). España: Avanza.

PacificHydro. (2012). PacificHydro. Recuperado el 2015, de Hidroeléctrica Chacayes: <http://pacifichydro.cl/spanish/proyectos/en-operacion/hidroelectrica-chacayes/?language=es>

Palma A., H. J. (2010). Contrucción de tuneladoras con TBM. SKR Consulting, 2-18.

Robinson D., B. R. (2004). A reappraisal of episodic burial metamorphism in the Andes of central Chile. Santiago.

Capítulo 8: Carta Gantt

Actividad/ Meses	Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Recopilación de antecedentes bibliográficos	■				■																															
Verificación de Objetivos													■																							
Identificación áreas del conocimiento: Gestión de alcance, cronograma, planificación de corto plazo																	■																			
Definición estructura de trabajo: sección, túnel, tiempo de toma de datos																	■																			
Desarrollo: Levantamiento de datos en terreno y obtención de KPI																					■															
Análisis de Resultados: Evaluación técnica de desempeño y discusión																					■															
Conclusiones: Evaluación final y medidas de control																									■											
Revisión y alineamiento																													■							

Capítulo 9: Anexos

Detalle de desviaciones mensual: tabla de resultados y punteo con la frecuencia de desviaciones y detalle de causas. (cada separación por el operador “+” indica evento del mismo tipo, pero independiente del anterior)

Junio

Sigla	Desviación	Frente con avance				Frente sin avance			
		Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]	Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]
TBE	Trabajo Estandar	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CPR	Cambio en el programa	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
MATP	Materiales propios	1.0	2.0	4.1	2.0	2.0	2.5	8.5	1.3
MAQ	Maquinaria	11.0	41.0	84.7	3.7	7.0	23.8	80.5	3.4
EME	Equipo menor	3.0	5.4	11.2	1.8	1.0	1.0	3.4	1.0
MO	Mano de obra	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
DSÑ	Diseño/Especificaciones técnicas	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
PDV	Problemas de Ventilación	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CSU	Corte de suministro (agua, aire, electricidad)	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
PRQ	Pre-requisito admin. No cumplido	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
INC	Incidente	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CLM	Clima	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
SC	Sin clasificación	0.0	0.0	0.0		1.0	2.3	7.6	2.3
	Totales	15	48	100		11	30	100	

De la tabla se aprecia que para este mes existen tres tipos de desviaciones que detienen el avance de excavación. Estos en detalle están asociados a:

1. Materiales propios (MATP)
 - Traslado de materiales a la frente (60 min)
 - Espera de *Shotcrete* (90 min)
2. Maquinaria (MAQ)
 - Problemas con cinta transportadora (360 min)
 - Falla eléctrica en cabezal de corte (60 min)

- Ensayos de Roof Drill - L1 (420 + 135 min)
 - Puesta a punto de equipo de *Shotcrete* (210 min)
 - Panne de *grippers* (180 min)
 - Problemas para bombeo de *Shotcrete* (60 min)
3. Equipo menor (EME)
- Bomba de *Shotcrete* en panne (60 min)
4. Sin categoría (SC)
- Semifinal Copa America Chile vs Perú (135 min)

Julio

Sigla	Desviación	Frente con avance				Frente sin avance			
		Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]	Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]
TBE	Trabajo Estandar	5	28	32.6	5.6	25.0	289.0	48.9	11.6
CPR	Cambio en el programa	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
MATP	Materiales propios	2	6	6.8	2.9	0.0	0.0	0.0	
MAQ	Maquinaria	8	35	40.8	4.4	4.0	7.0	1.2	1.8
EME	Equipo menor	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
MO	Mano de obra	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
DSÑ	Diseño/Especificaciones técnicas	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
PDV	Problemas de Ventilación	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CSU	Corte de suministro (agua, aire, electricidad)	3	17	19.8	5.7	0.0	0.0	0.0	
PRQ	Pre-requisito admin. No cumplido	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
INC	Incidente	0.0	0.0	0.0		26.0	292.5	49.5	11.3
CLM	Clima	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
SC	Sin clasificación	0.0	0.0	0.0		1.0	2.3	0.4	2.3
Totales		18	86	100		56	590.8	100	

Las desviaciones que detienen en avance para este mes son:

1. Trabajo Estándar (TBE)
 - Re-Instalación de pernos por problemas con resina (720min x 24 turnos)
 - Limpieza de rocas caídas por mala calidad de la roca (60 min)
2. Maquinaria (MAQ)
 - Limpieza y retiro de culebrón tapado (45+60 min)
 - Tren para retiro de marina en panne (195 min)
 - Correa transportadora bloqueada (120 min)
3. Incidente (INC)
 - Trabajos detenidos para investigación de accidente (270+ 720x14 turnos+ 600 min)
 - *Safety Stand Down* (120 + 720x9 turnos min)
4. Sin categoría

Por congestión en ruta, turno B llega a las 22:15 hrs (135 min)

Agosto

Sigla	Desviación	Frente con avance				Frente sin avance			
		Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]	Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]
TBE	Trabajo Estandar	2.0	1.8	1.0	0.9	7.0	11.9	2.7	1.7
CPR	Cambio en el programa	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
MATP	Materiales propios	1.0	1.3	0.7	1.3	3.0	6.0	1.4	2.0
MAQ	Maquinaria	6.0	13.3	7.6	2.2	13.0	35.5	8.0	2.7
EME	Equipo menor	1.0	11.3	6.5	11.3	5.0	4.8	1.1	1.0
MO	Mano de obra	2.0	0.8	0.5	0.4	4.0	3.0	0.7	0.8
DSÑ	Diseño/Especificaciones técnicas	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
PDV	Problemas de Ventilación	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CSU	Corte de suministro (agua, aire, electricidad)	1.0	0.5	0.3	0.5	1.0	1.0	0.2	1.0
PRQ	Pre-requisito admin. No cumplido	0.0	0.0	0.0		29.0	346.0	78.1	11.9
INC	Incidente	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CLM	Clima	12.0	134.0	76.9	11.2	2.0	24.0	5.4	12.0
SC	Sin clasificación	5.0	11.3	6.5	2.3	3.0	10.8	2.4	3.6
	Totales	30	174	100		67	442.9	100	

Las desviaciones que detienen en avance para este mes son:

1. Trabajo Estándar (TBE)

- Retiro de malla (100 min)
- Envió erróneo de *Shotcrete* sin fibra (360 + 105 min)
- Repaso de torque en pernos (60 min)
- Reposición de pernos (45 min)
- Ensayo de toma de cono interior túnel (15 min)
- Corte de pernos de sujeción (30 min)

2. Maquinaria (MAQ)

- Falla de software de excavación (60 min)
- Revisión de red de *Shotcrete* e instalación de unión (30 min)
- Cambio de o´rings (45 min)
- Correa transportadora en panne (300 min)
- Limpieza de red de *Shotcrete* obstruida (480+105 min)
- Problemas en planta Meka (falta de agua) (285+105 min)
- Red de *Shotcrete* tapada (30 +225 min)
- Falla en sistema de grasas y aceites de TBM (330 min)

- Falla en Profibus (60 min)
3. Materiales propios (MATP)
 - Espera de *Shotcrete* (75+60 min)
 - Preparación de *Shotcrete* (225 min)
 4. Pre-requisito administrativo no cumplido (PRQ)
 - falta de elaboración de nuevos procedimientos (720x8 turnos)
 5. Corte de suministro (CSU)
 - Falta de agua en estanque de TBM (60 min)
 6. Sin categoría (SC)
 - Colación fuera de horario (75+30 min)
 - Limpieza de material en sector de L1 (540 min)
 7. Equipo menor (EME)
 - Lechadora en panne (60+75 min)
 - Pruebas de huinche (30 min)
 - Probe drill atascada (60 min)
 8. Mano de obra (MO)
 - Espera de personal de Robbins (75 min)
 - Espera de topografía (45+30 min)
 - Espera de soldador (30 min)

Septiembre

Sigla	Desviación	Frente con avance				Frente sin avance			
		Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]	Frecuencia	Tiempo [Hrs]	Porcentaje de tiempo [%]	Promedio [Hrs/evento]
TBE	Trabajo Estandar	19.0	14.3	9.2	0.8	23.0	47.5	21.1	2.1
CPR	Cambio en el programa	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
MATP	Materiales propios	12.0	21.8	14.0	1.8	14.0	27.0	12.0	1.9
MAQ	Maquinaria	29.0	38.0	24.4	1.3	37.0	65.8	29.2	1.8
EME	Equipo menor	3.0	12.0	7.7	4.0	4.0	2.5	1.1	0.6
MO	Mano de obra	8.0	5.5	3.5	0.7	9.0	7.8	3.4	0.9
DSÑ	Diseño/Especificaciones técnicas	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
PDV	Problemas de Ventilación	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
CSU	Corte de suministro (agua, aire, electricidad)	36.0	56.5	36.3	1.6	30.0	67.5	30.0	2.3
PRQ	Pre-requisito admin. No cumplido	2.0	7.3	4.7	3.7	0.0	0.0	0.0	
INC	Incidente	1.0	0.3	0.2	0.3	3.0	3.5	1.6	1.2
CLM	Clima	0.0	0.0	0.0		2.0	0.0	0.0	
SC	Sin clasificación	0.0	0.0	0.0		1.0	3.8	1.7	3.8
Totales		110	156	100		123	225	100	

Las desviaciones que detienen en avance para este mes son:

1. Trabajo Estándar (TBE)

- Anillos no pasan alrededor de perforadora (105+60 min)
- Limpieza de plataforma L2 (30 min)
- Tapado de red de *Shotcrete* (15+15 min)
- Desmontaje de deck 0 (60 min)
- Ajuste de deck 0 (720 min)
- Limpieza de rieles (180 min)
- Cinta transportadora para trasvasije de *Shotcrete* tapada (45+90 min)
- Red de *Shotcrete* tapada (45+15+60+60 min)
- Limpieza de accesorios (*Shotcrete*) (15+60 min)
- Centrado de carros en rieles (165 min)
- Reparación de vías (75 min)
- Revisión de líneas de *Shotcrete* (120 min)
- Desconexión de líneas de retorno de agua (45 min)
- Reparación de unión entre decks 18 y 19 (630 min)
- Proyección de *Shotcrete* fallida (cono muy bajo) (180+60 min)

- Limpieza de cañerías (30 min)
2. Maquinaria (MAQ)
- Revisión de presiones en perforadora (15 min)
 - Panne de locomotora (45+45+30 min)
 - Panne eléctrica en TBM (135+15+300 min)
 - Cambio de culatin a probe drill (45 min)
 - Señal de consola caída (105 min)
 - Sin señal de Profibus (15 min)
 - Falta de tensión en correa transportadora (15 min)
 - Espera de locomotora (30+45+30 min)
 - Bloqueo de locomotora (120 min)
 - Se traba piedra en cinta transportadora (180 min)
 - Cinta transportadora bloqueada (15 min)
 - Falla en profibus (405 min)
 - Se quema bobina de transformador 23KV_a (315 min)
 - Bobina de transformador de 23KV_a defectuosa (660+720 min)
 - Puesta a punto de sistema de energía de deck 8 (45 min)
 - Falla en carro de locomotora (15+30 min)
 - Falla eléctrica en TBM (30 min)
 - Reparación de sistema eléctrico de TBM (60 min)
 - Falla de perforadora izquierda (45 min)
 - Falla hidráulica en cabezal (60 min)
 - Falla en variador de frecuencia (15+60 min)
 - Falla en correa transportadora (30 min)
 - Locomotora atascada (15 min)
 - Se descarrila tren (30+30 min)
3. Corte de suministros (CSU)
- Corte de servicios (105 min)
 - Espera para enfriamiento de agua en L1 (150 min)
 - Corte de suministro eléctrico (90+45+150+210+30+45 min)
 - Falla de ventiladores (195 min)
 - Falta presión de agua (60+150+30+75 min)
 - Cambio de circuito de agua de TBM (180+60 min)
 - Corte de suministro de agua (225+45 min)
 - Extensión de red de agua y drenaje (90+15+60 min)
 - Bomba de agua principal en panne (60+285 min)
 - Corte general de energía (15+120 min)
 - Caída de tensión (195 min)
 - Reparación de manga de ventilación (225 min)
 - Espera de suministro de agua (240 min)
 - Modificación de ducto de ventilación (120 min)
 - Reparación de ducto de ventilación (60 min)

- Instalación de manga de ventilación (690 min)
4. Materiales propios (MATP)
 - Espera de *Shotcrete* (60+90+120+120+60+105+105+180+135+120+75+360 min)
 - Desacople de culebrón de *Shotcrete* (30 min)
 - Traslado de materiales para marcos (60 min)
 5. Sin categoría (SC)
 - Actividad de fiestas patrias (225 min)
 6. Incidente (INC)
 - Evacuación de seguridad por alta concentración de gases (60+75 min)
 - Inspección de túnel (75 min)
 7. Equipo menor (EME)
 - Falla de huinche (30+60 min)
 - Equipo topográfico apagado (15 min)
 - Estación topográfica no entrega información (45 min)
 8. Mano de obra (MO)
 - Falta de operador de perforadora (15 min)
 - Coordinación de nuevas instrucciones (45 min)
 - Espera de equipo pull test (30 min)
 - Espera de topógrafo (90 min)
 - Atraso de llegada de bus (45 min)
 - Entrega de dormitorios a personal CNM (75 min)
 - Colación (60 min)
 - Espera de aprobación para reanudar excavación (45 min)
 - Colación (60 min)

Parámetros de roca y set de orientaciones según formaciones en túnel el Volcán (Galera, J., 2015)

Class	Classification		E_m [GPa]	φ' [°]	c'_{TBM} [MPa]	c'_{DAB} [MPa]	k_h/k_v [-]
	GSI	RMR					
ALTERNATION OF TUFFS AND VOLCANIC BRECCIAS							
Very Good	76-95	80-100	31.0-54.0	45-50	7.3-17.3	5.3-16.0	0.95-2
Good	56-75	60-80	13.3-31.0	35-45	3.9-8.3	2.5-6.0	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	7.1-13.3	25-35	3.1-4.9	1.6-3.1	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	4.0-7.1	22-25	1.7-2.9	0.7-1.4	1.0

Class	Classification		E_m [GPa]	φ' [°]	c'_{TBM} [MPa]	c'_{DAB} [MPa]	k_h/k_v [-]
	GSI	RMR					
Very Poor	≤20	15-25	2.5-4.0	20	0.9-1.2	0.4-0.5	1.0
ALTERNATION OF TUFFS AND VOLCANIC BRECCIAS WITH HIGHER ALTERATION							
Very Good	76-95	80-100	14.9-26.0	45-50	4.2-8.7	3.1-8.0	0.95-2
Good	56-75	60-80	6.4-14.9	35-45	2.5-4.8	1.4-3.4	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	3.4-6.4	25-35	1.8-3.1	1.0-1.8	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	1.9-3.4	22-25	1.0-1.7	0.5-1.0	1.0
Very Poor	≤20	15-25	1.2-1.9	20	0.5-0.7	0.2-0.4	1.0
MEGABLOCKS (CERRO MESÓN ALTO)							
Very Good	76-95	80-100	20.7-36.0	45-50	5.3-11.8	4.0-10.9	0.95-2
Good	56-75	60-80	8.9-20.7	35-45	3.1-6.0	1.9-4.6	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	4.8-8.9	25-35	2.3-3.9	1.3-2.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	2.7-4.8	22-25	1.2-2.2	0.5-1.2	1.0
Very Poor	≤20	15-25	1.7-2.7	20	0.7-0.9	0.2-0.4	1.0
Values are representative for an overburden of 1,000m; $\gamma = 26-28$ [kN/m ³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]							

Table 3: Characteristic Rock Mass Parameters (Ref. [16]), Abanico East Formation, Overburden 1,000m

Classification			E_m	φ'	c'_{TBM}	$c'_{D\&B}$	k_h/k_v
Class	GSI	RMR	[GPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]
SANDSTONES / CONGLOMERATES							
Very Good	76-95	80-100	12.6-22.0	45-50	3.1-7.1	2.2-6.6	0.95-2
Good	56-75	60-80	5.4-12.6	35-45	1.7-3.5	1.0-2.5	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	2.9-5.4	25-35	1.3-2.1	0.8-1.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	1.6-2.9	22-25	0.7-1.2	0.2-0.7	1.0
Very Poor	≤20	15-25	1.0-1.6	20	0.4-0.5	0.2	1.0
LIMOLITES							
Very Good	76-95	80-100	6.0-10.5	45-50	1.6-3.8	1.1-3.5	0.95-2
Good	56-75	60-80	2.6-6.0	35-45	0.8-1.9	0.6-1.2	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	1.4-2.6	25-35	0.5-1.0	0.3-0.8	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.8-1.4	22-25	0.2-0.5	0.2-0.3	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.5-0.8	20	0.2	0.1-0.2	1.0

Values are representative for an overburden of 500m; $\gamma = 24-25$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Table 4: Characteristic Rock Mass Parameters, Rio Damas Formation (Ref. [16]), Overburden 500m

Classification			E_m	φ'	c'_{TBM}	$c'_{D\&B}$	k_h/k_v
Class	GSI	RMR	[GPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]
SANDSTONES / CONGLOMERATES							
Very Good	76-95	80-100	12.6-22.0	45-50	3.8-7.6	2.9-7.1	0.95-2
LIMOLITES							
Very Good	76-95	80-100	6.0-10.5	45-50	2.0-4.0	1.5-3.8	0.95-2
Good	56-75	60-80	2.6-6.0	35-45	1.0-2.3	0.6-1.7	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	1.4-2.6	25-35	0.8-1.3	0.5-0.8	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.8-1.4	22-25	0.5-0.7	0.2-0.5	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.5-0.8	20	0.2-0.4	0.2	1.0

Values are representative for an overburden of 1,000m; $\gamma = 24-25$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Table 5: Characteristic Rock Mass Parameters, Rio Damas Formation (Ref. [16]), Overburden 1,000m

Classification			E_m	φ'	c'_{TBM}	$c'_{D&S}$	k_h/k_v
Class	GSI	RMR	[GPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]
LIMESTONES							
Very Good	76-95	80-100	12.9-22.5	45-50	2.7-6.0	2.0-5.5	0.95-2
Good	56-75	60-80	5.6-12.9	35-45	1.4-3.1	1.0-2.3	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	3.0-5.6	25-35	1.8-1.3	0.5-1.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	1.7-3.0	22-25	1.2-0.7	0.2-0.5	1.0
MARLS							
Very Good	76-95	80-100	2.3-4.0	45-50	1.5-2.7	1.1-2.5	0.95-2
Good	56-75	60-80	1.0-2.3	35-45	0.8-1.7	0.4-1.2	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	0.5-1.0	25-35	0.5-1.0	0.3-0.5	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.3-0.5	22-25	0.2-0.5	0.2	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.2-0.3	20	0.2	0.1-0.2	1.0

Values are representative for an overburden of 1,000m; $\gamma = 24-26$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Table 7: Characteristic Rock Mass Parameters, Lo Valdés Formation (Ref. [16]), Overburden 1,000m

Classification			E_m	φ'	c'_{TBM}	$c'_{D&S}$	k_h/k_v
Class	GSI	RMR	[GPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]
ANDESITES, ANDESITIC BRECCIAS AND TUFFS							
Very Good	76-95	80-100	23.0-40.0	45-50	4.9-12.7	3.5-11.6	0.95-2
Good	56-75	60-80	9.9-23.0	35-45	2.5-5.6	1.7-3.9	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	5.3-9.9	25-35	3.1-1.8	1.0-2.1	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	3.0-5.3	22-25	1.0-1.7	0.5-1.0	1.0
Very Poor	≤20	15-25	1.9-3.0	20	0.5-0.7	0.2-0.4	1.0
LIMESTONES							
Very Good	76-95	80-100	11.5-20.0	45-50	2.0-5.1	1.5-4.7	0.95-2
Good	56-75	60-80	5.0-11.5	35-45	1.0-2.3	0.6-1.7	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	2.6-5.0	25-35	0.8-1.3	0.5-0.8	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	1.5-2.6	22-25	0.5-0.7	0.2-0.5	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.9-1.5	20	0.2-0.4	0.1-0.2	1.0
LUTITES							
Very Good	76-95	80-100	3.4-6.0	45-50	0.9-2.5	0.7-2.4	0.95-2
Good	56-75	60-80	1.5-3.4	35-45	0.4-1.0	0.2-0.8	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	0.8-1.5	25-35	0.3-0.5	0.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.5-0.8	22-25	0.2-0.3	0.1-0.2	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.3-0.5	20	0.1-0.2	0.0	1.0
SANDSTONES							
Very Good	76-95	80-100	7.2-12.5	45-50	2.9-6.6	2.2-6.0	0.95-2
Good	56-75	60-80	3.0-7.2	35-45	1.7-3.3	1.0-2.5	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	1.6-3.0	25-35	1.3-2.1	0.8-1.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.9-1.6	22-25	0.7-1.2	0.2-0.7	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.6-0.9	20	0.4-0.5	0.2	1.0

Values are representative for an overburden of 500m; $\gamma = 24-28$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Table 8: Characteristic Rock Mass Parameters, Colimapu Formation (Ref. [16]), Overburden 500m

Class	Classification		E_m [GPa]	ϕ' [°]	c'_{TM} [MPa]	c'_{DBS} [MPa]	k_h/k_v [-]
	GSI	RMR					
ANDESITES, ANDESITIC BRECCIAS AND TUFFS							
Very Good	76-95	80-100	23.0-40.0	45-50	6.0-13.1	4.4-12.2	0.95-2
Good	56-75	60-80	9.9-23.0	35-45	3.5-6.8	2.1-5.0	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	5.3-9.9	25-35	2.6-4.4	1.3-2.6	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	3.0-5.3	22-25	1.4-2.4	0.7-1.2	1.0
Very Poor	≤20	15-25	1.9-3.0	20	1.1-0.7	0.4-0.5	1.0
LIMESTONES							
Very Good	76-95	80-100	11.5-20.0	45-50	2.5-5.3	1.8-4.9	0.95-2
Good	56-75	60-80	5.0-11.5	35-45	1.4-2.9	0.8-2.1	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	2.6-5.0	25-35	1.0-1.8	0.5-1.0	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	1.5-2.6	22-25	0.5-1.0	0.2-0.5	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.9-1.5	20	0.4	0.2	1.0
LUTITES							
Very Good	76-95	80-100	3.4-6.0	45-50	1.1-2.5	0.9-2.4	0.95-2
Good	56-75	60-80	1.5-3.4	35-45	0.6-1.2	0.4-1.0	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	0.8-1.5	25-35	0.5-0.8	0.3-0.5	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.5-0.8	22-25	0.2-0.5	0.1-0.2	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.3-0.5	20	0.2	0.0-0.1	1.0
SANDSTONES							
Very Good	76-95	80-100	7.2-12.5	45-50	3.6-7.1	2.9-6.7	0.95-2
Good	56-75	60-80	3.0-7.2	35-45	2.3-4.1	1.4-3.3	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	1.6-3.0	25-35	1.8-2.9	1.0-1.8	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	0.9-1.6	22-25	1.0-1.7	0.5-1.0	1.0
Very Poor	≤20	15-25	0.6-0.9	20	0.5-0.7	0.2-0.4	1.0

Values are representative for an overburden of 1,000m; $\gamma = 24-28$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Table 9: Characteristic Rock Mass Parameters, Colimapu Formation (Ref. [16]), Overburden 1,000m

Class	Classification		E_m [GPa]	ϕ' [°]	c'_{TM} [MPa]	c'_{DBS} [MPa]	k_h/k_v [-]
	GSI	RMR					
INTRUSIVE / DIKES							
Very Good	76-95	80-100	21.5-37.5	45-50	5.3-12.7	3.8-11.8	0.95-2
Good	56-75	60-80	9.2-21.5	35-45	2.9-6.0	1.9-4.3	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	5.0-9.2	25-35	2.1-3.6	1.0-2.3	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	2.8-5.0	22-25	1.2-1.9	0.5-1.0	1.0
Very Poor	≤20	15-25	1.7-2.8	20	0.7-0.9	0.2-0.4	1.0

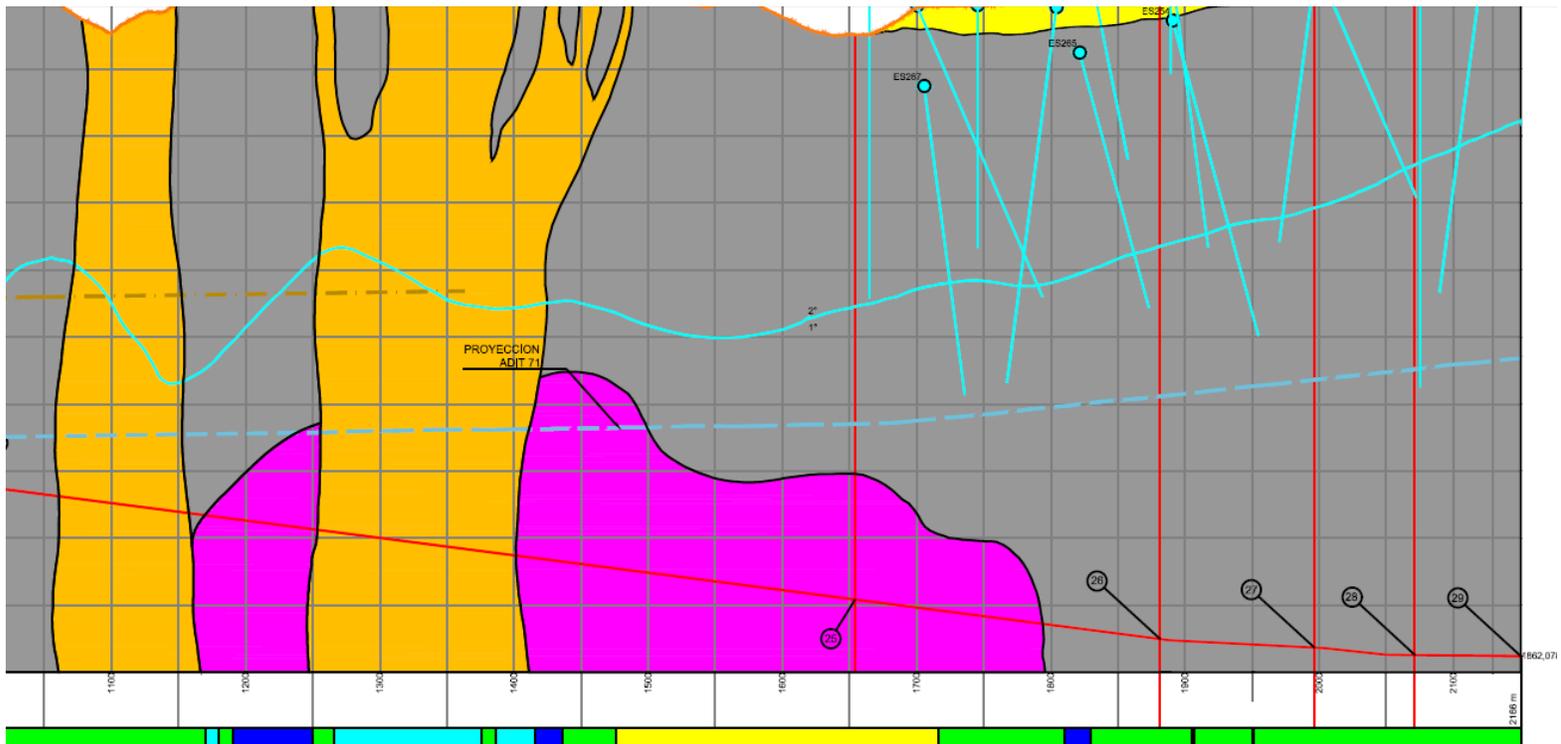
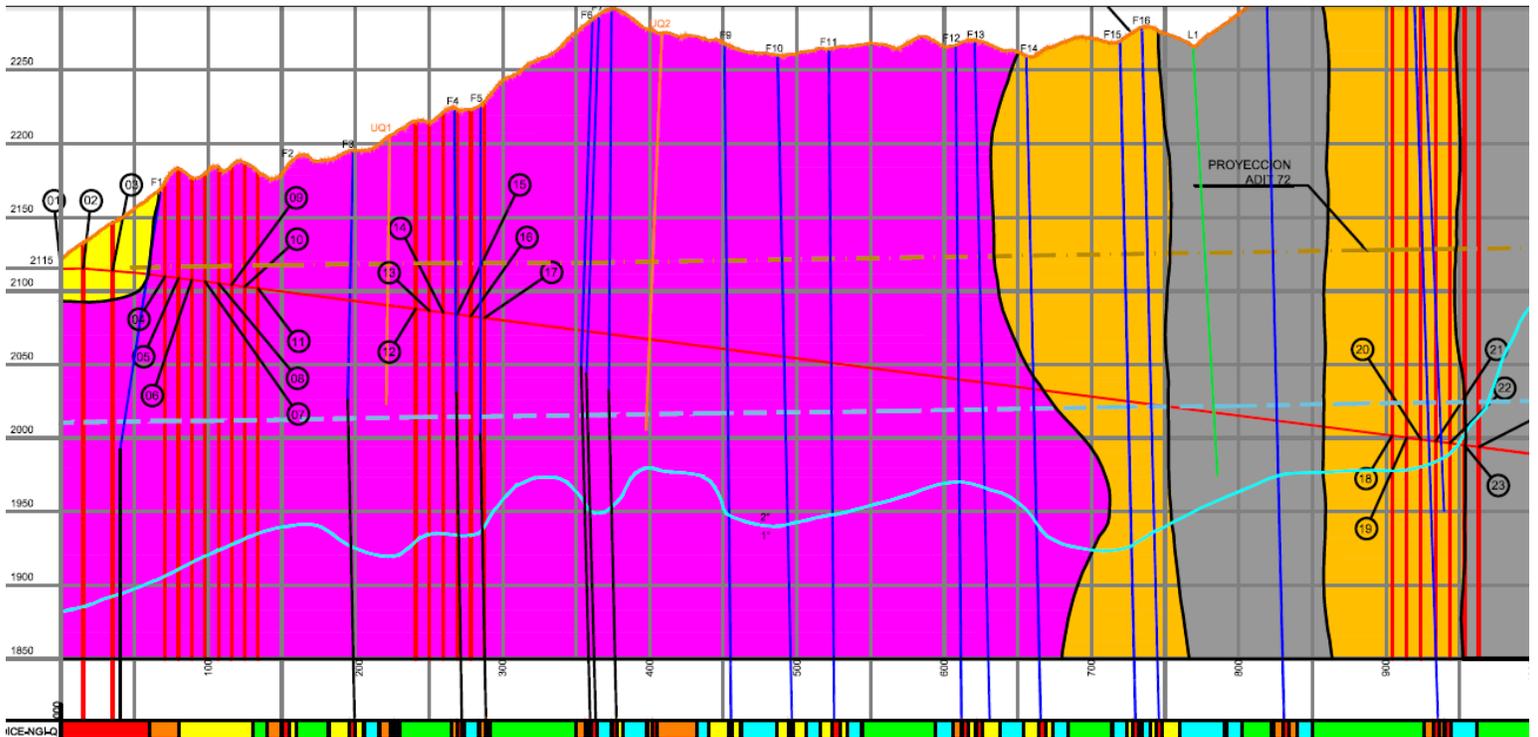
Values are representative for an overburden of 500m; $\gamma = 26-27$ [kN/m³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]

Table 10: Characteristic Rock Mass Parameters, Intrusive / Dikes (Ref. [16]), Overburden 500m

Classification			E_m [GPa]	ϕ' [°]	c'_{TBM} [MPa]	c'_{DAB} [MPa]	k_h/k_v [-]
Class	GSI	RMR					
INTRUSIVE / DIKES							
Very Good	76-95	80-100	21.5-37.5	45-50	6.6-13.5	4.9-12.6	0.95-2
Good	56-75	60-80	9.2-21.5	35-45	3.9-7.5	2.5-5.6	0.95-1.8
Fair	35-55	40-60	5.0-9.2	25-35	3.1-4.9	1.6-3.1	0.95-1.6
Poor	21-35	25-40	2.8-5.0	22-25	1.7-2.9	0.7-1.4	1.0
Very Poor	≤ 20	15-25	1.7-2.8	20	0.9-1.2	0.4-0.5	1.0
Values are representative for an overburden of 1,000m; $\gamma = 26-27$ [kN/m ³]; $\nu = 0.20-0.30$ [-]							

Table 11: Characteristic Rock Mass Parameters, Intrusive / Dikes (Ref. [16]), Overburden 1,000m

Perfil geológico Adit 74



Descripciones técnicas adicionales:

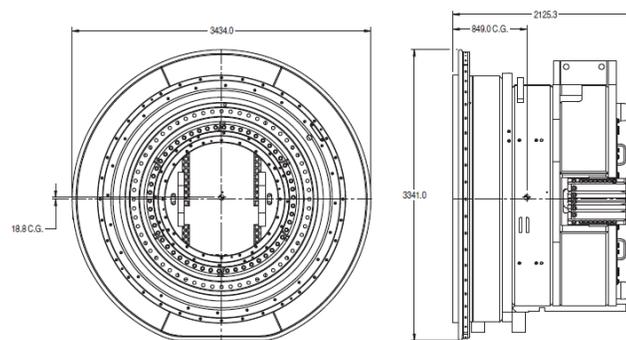
Conjunto del cojinete principal y sello: consiste del cojinete de empuje principal, el engrane anular de la transmisión principal y los conjuntos del sello interior y exterior.

El conjunto de cojinetes utilizado en esta máquina es un cojinete de rodillos de triple-eje que acepta cargas radiales y de empuje de la cabeza de corte. El cojinete es un diseño de una sola pieza que se atornilla directamente al soporte de la cabeza de corte y carga la cabeza por medio del adaptador de cabeza de corte. Su fijación se hace con pernos tensados hidráulicamente.

El engrane principal (engrane maestro) de la máquina es un engrane principal de 93 dientes (externos). Este engrane principal va montado en el adaptador de la cabeza de corte, el cual a su vez se monta sobre el conjunto de la cabeza de corte. El engrane principal se fija al adaptador por medio de 54 pernos tensados hidráulicamente. Hay cuatro orificios para gatos para facilitar el retiro del engrane principal. Su diseño simétrico permite invertirlo, cuando un lado del engrane principal se daña o desgasta.

El conjunto del sello consiste de varios elementos ensamblados e instalados para proporcionar un sello adecuado del cojinete principal y la cavidad del engrane. La instalación en realidad consiste de un sello interno y un sello externo. Los sellos externos van montados a la cubierta del sello exterior y los bordes de los sellos sellan los elementos en rotación, mientras que los sellos interiores van montados al adaptador de la cabeza de corte, sellando la banda de desgaste montada al soporte de la cabeza de corte.

Se instalan bandas de desgaste reemplazables para evitar contacto directo de los bordes de sello con el material metálico de la base de la estructura en rotación. Estas bandas de desgaste comúnmente llamadas bandas, se ajustan por contracción a la estructura base. Los anillos de sello son algo más pequeños en diámetro que las estructuras sobre las cuales van montados y por lo tanto deben ser calentados para permitir la expansión necesaria para su ajuste.



TRC P/N 1071142 & 1073048
BEARING & CHS - W & D
WEIGHT: 31304.4 kg

Ilustración 12: Sistema de cojinete, engrane principal y sello, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Lubricación: La lubricación para el cojinete principal y el engrane principal la suministra el sistema de lubricación de la máquina. El aceite para el engrane es suministrado a través de orificios-puerto en los componentes estructurales. Se debe tener especial cuidado en el conjunto de los componentes estructurales para asegurar que los orificios de lubricación estén correctamente orientados.

Conjunto del soporte del cabezal: es la estructura primaria donde se monta el conjunto de la cabeza de corte. El soporte de la cabeza de corte es la base de montaje para siete conjuntos de la transmisión principal, una estructura maquinada y taladrada para el montaje del frente de la vigueta principal, así como superficies de montaje para el conjunto del cojinete principal. Adicionalmente, tiene un punto de montaje para el escudo de polvo, para el conjunto de la tolva, así como mecanismos para estabilizarlo contra movimientos laterales y verticales dentro del orificio del túnel. El soporte de la cabeza de corte también contiene orificios-puerto para dirigir el aceite al cojinete principal y a los sellos. Cerca de los conjuntos de impulso principales van montados engrasadores para conexiones, con las mangueras dirigidas a todas las boquillas de grasa y otros puntos que requieren lubricación por grasa.

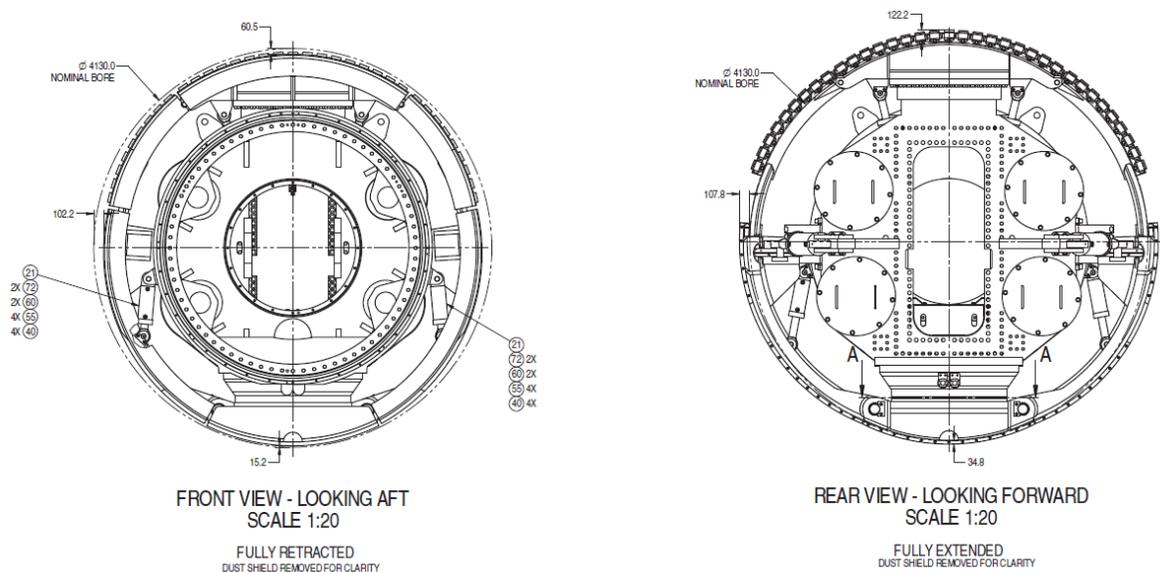


Ilustración 13: Soporte de cabezal, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Adicionalmente se cuenta con soportes laterales y de techo que cumplen la misma función, pero abarcando el área restante. Además se cuenta con un sistema de aire utilizado para presurizar la cavidad del cojinete principal hasta 0.21 Bar (3 PSI). Esta ligera presurización evita la entrada de material extraño a través de los sellos y hasta la cavidad del cojinete.

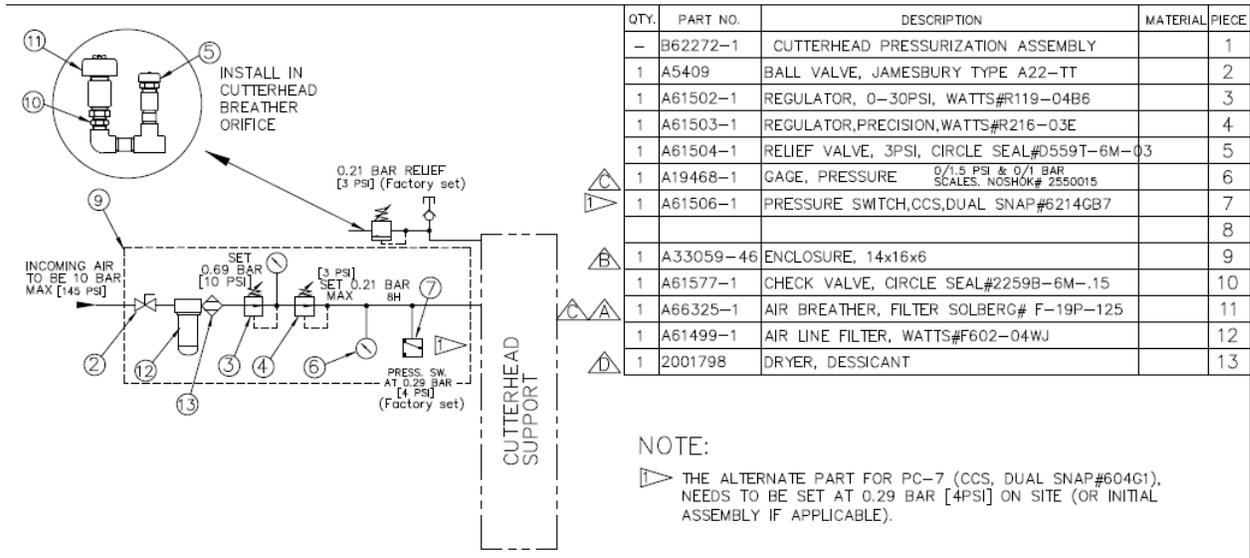


Ilustración 14: conjunto de presurización del cabezal de corte, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Conjunto transmisión general: Hay cuatro transmisiones principales que impelen el cabezal de corte, cada una es accionada por un motor eléctrico de frecuencia variable de 425 kW (569.7 HP) y controladas por una transmisión de frecuencia variable (VFD siglas en inglés).

Para fines de referencia, con respecto al esquemático del sistema eléctrico, el motor número 1 se instala en la posición superior derecha, mirando hacia adelante y la numeración es en el sentido del reloj alrededor del soporte del cabezal de corte.

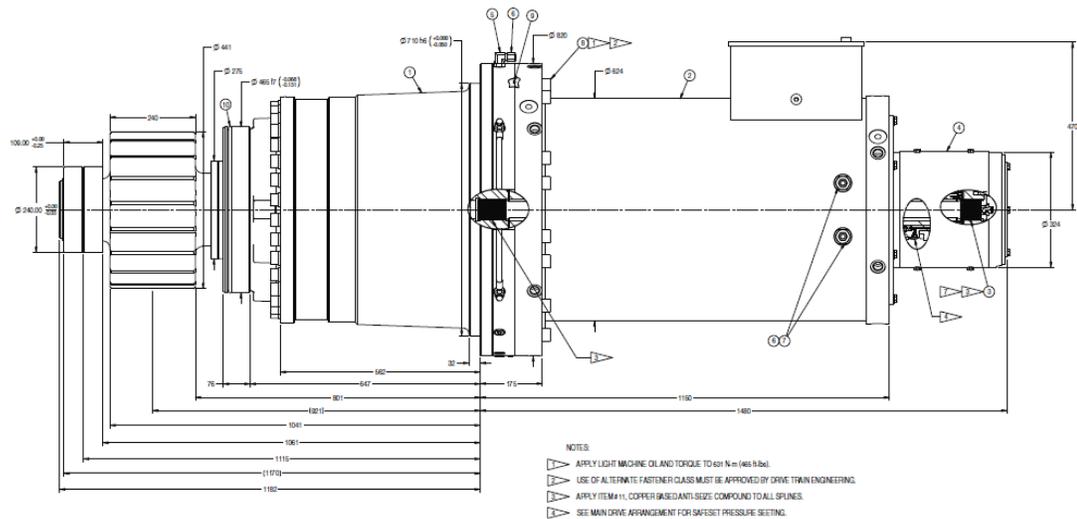


Ilustración 15: Ensamblaje "main drive", TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Los motores de impulso están conectados a los engranes reductores por medio de una flecha hueca y el par de torsión se transmite a un acoplamiento safe set que va montado en el extremo posterior de cada motor de impulso. En cada extremo del motor hay orificios (con tapón) para el drenaje de la condensación.

Los engranes reductores son engranes tipo planetario y tienen dos etapas de reducción y la velocidad de rotación de su motor impulsor es de 1490 RPM. Los piñones de potencia del engrane reductor impelen un engrane principal compartido para producir una velocidad al cabezal de corte de 0 a 16.7 RPM. Cada engrane reductor es ventilado por medio de un pequeño respirador localizado en la parte superior y la lubricación interna se facilita por el método de baño de aceite (inmersión). El nivel normal de aceite en los engranes está en el centro-línea. Un tubo flexible transparente brinda una indicación visual del nivel de aceite del engrane reductor.

Con respecto a los acoplamientos de los motores

- Tres de los cuatro motores de la máquina están equipados con un acoplamiento limitante de par, mientras que el cuarto motor tiene un acoplamiento limitante de par provisto de un freno hidráulico. El acoplamiento brinda una conexión sólida entre la flecha del rotor y la flecha de torsión del motor eléctrico, siempre y cuando el par transferido no exceda cierto valor predeterminado
- Al trabajar sobre el cabezal de corte o cuando el personal o materiales están pasando a través del cabezal de corte, hay que asegurarse que el cabezal de corte no pueda rotar por accidente. Normalmente la cabeza de corte está balanceada estadísticamente, pero si se quitan uno o más cortadores, particularmente del área perimetral, se presentará un desequilibrio que podría hacer que la cabeza de corte comenzara a rotar por sí misma. Hay un freno que evita que esto suceda y que va montado en el motor número tres del acoplamiento limitante de par del cabezal de corte
- El cabezal de corte se hace avanzar lentamente por medio de los motores de la transmisión principal. La llave que habilita los controles de la cabina del operador se desconecta, se retira, y se reinserta dentro del interruptor de control en la estación de avance lento. Cuando el modo de avance lento se habilita, todos los controles en la cabina del operador se deshabilitan, y el control del avance lento se hace desde la estación de avance lento. Dentro del túnel solo se permite que haya una llave en un momento dado. Esta velocidad brinda una rotación segura al cabezal de corte para fines de mantenimiento

Conjunto de las zapatas, de par y de impulso: Los dispositivos principales de este conjunto son la vigueta principal, el cilindro de sujeción, cuatro cilindros de empuje, cuatro cilindros de par, el cargador del sujetador, y dos juegos de zapatas sujetadoras. Cada una de estas unidades se describe por separado a continuación.

- La función primordial de la vigueta principal es transmitir cargas de torsión desde el cabezal de corte hacia las zapatas sujetadoras y la fuerza de empuje desde los cilindros de impulso al cabezal de corte. El par que se genera en el cabezal de corte se transfiere por medio del soporte del cabezal, por la vigueta principal, y de allí al cargador del sujetador a lo largo de las pistas del sujetador en cada lado. La vigueta principal también es un medio para transferir los movimientos de viraje vertical y de rotación al cabezal de corte, por medio de los cilindros de par, así como viraje horizontal, al cambiar el cilindro sujetador a uno u otro lado. También incorpora una estructura de soporte para el conjunto del transportador, y se usa como un ducto de aire para extraer el polvo
- El cilindro de sujeción es un cilindro de doble acción que posee un extremo común para el pistón y dos extremos de vástagos. El cilindro desarrolla la fuerza hidráulica necesaria para mantener las zapatas sujetadoras apretadas contra la pared del túnel para reaccionar las

fuerzas de par y de impulso necesarias para perforar. El diámetro de orificio del cilindro es 28" (711.2 mm) mientras que el diámetro del vástago es de 21" (533.4 mm). La cavidad del pistón es común para ambos pistones para permitir que el sistema de viraje lateral funcione mientras que al mismo tiempo mantiene la fuerza de sujeción contra las paredes del túnel

- El cargador del sujetador es la conexión entre el cilindro de sujeción y el conjunto de la vigueta principal. Se suministran puntos de fijación para el pistón de cada cilindro de torsión. La estructura permite usar el conjunto del muñón para montar el conjunto del sujetador. El conjunto del cargador del sujetador también está equipado con resortes amortiguadores que entran al cilindro del sujetador cuando las zapatas se retraen
- Los dos conjuntos de zapatas sujetadoras son la estructura para transmitir la fuerza hidráulica generada por los vástagos de los cilindros de sujeción que se extienden hacia la pared del túnel. Cada zapata sujetadora está equipada con 20 puntas de acero endurecido que se encajan en la pared del túnel para aumentar la fuerza de sujeción. Las zapatas se mantienen perpendiculares respecto a la máquina cuando están alejadas de la pared del túnel por medio de cuatro cilindros hidráulicos dentro de cada zapata sujetadora, conectados a un soporte articulado y colgante que presionan sobre el émbolo esférico. Estos cilindros están presurizados por medio del sistema hidráulico de la máquina
- Se han suministrado cuatro cilindros de avance para generar la fuerza de empuje hidráulica necesaria para el impulso de la máquina. Cada uno de estos cilindros de doble acción tiene un diámetro de 17.5" (444.5 mm) y un diámetro de vástago de 9.0" (228.6 mm). La fuerza total de empuje de 9415 kN se genera en el modo extendido a 4,300 PSI (296 Bar), suponiendo que no hay fricción. El viaje de estos cilindros es de 79" (2,006.6 mm)
- Se suministran cuatro cilindros de par, dos por cada lado del cargador del sujetador, para brindar la fuerza hidráulica requerida para mover verticalmente la parte posterior de la máquina. Cada cilindro tiene un diámetro de 8.5" (215.9 mm), un diámetro de vástago de 4.0" (101.6 mm) y una longitud de desplazamiento de 6.0" (152.4 mm). El extremo de vástago de cada cilindro está conectado al cilindro de sujeción, mientras que el barril del cilindro está conectado a una horquilla cercana a la parte superior del cargador del sujetador de cada lado. Las conexiones bushing esféricas se usan para permitir la rotación en cada unión

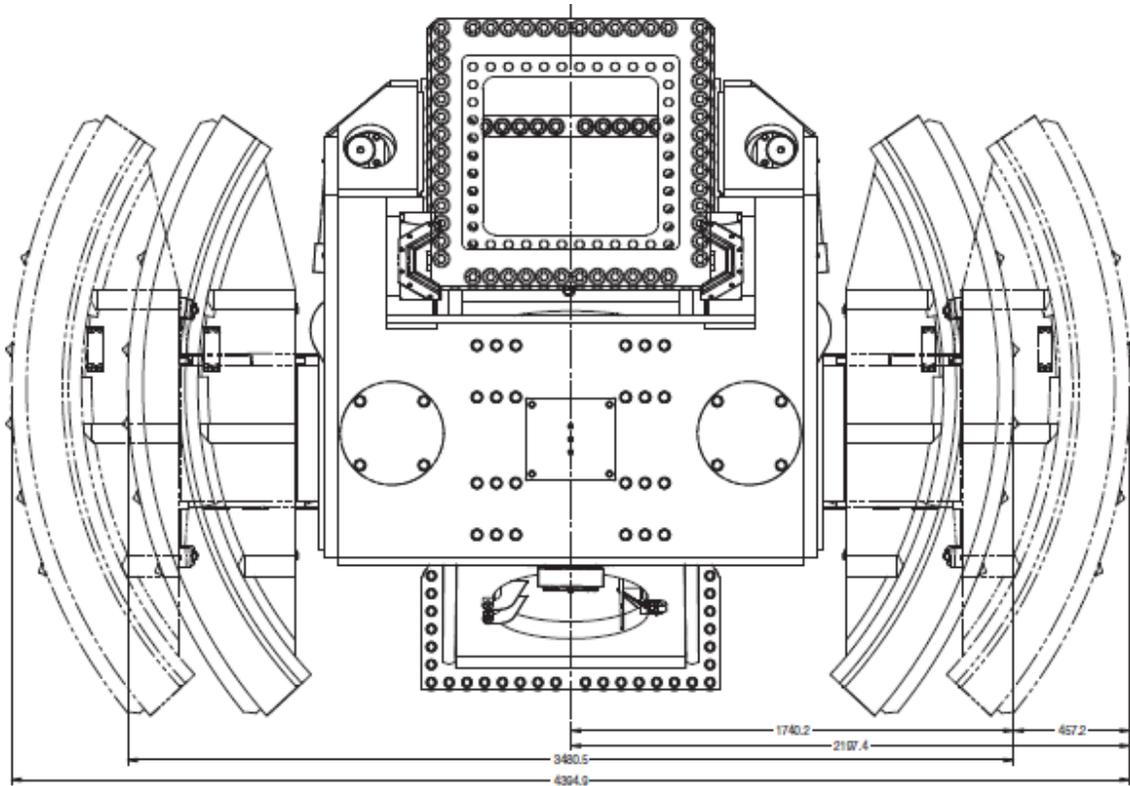


Ilustración 16: Conjunto de Zapatas, vista transversal, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

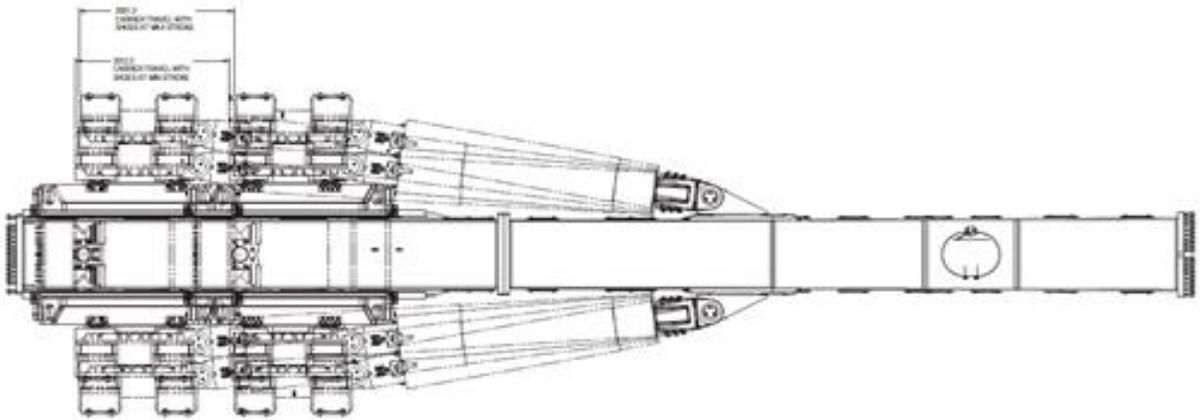


Ilustración 17: Conjunto de Zapatas, vista planta, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Conjunto de sección trasera: este conjunto va atornillado a la parte posterior de la vigueta principal. Sirve de estructura de montaje para los cilindros y patas posteriores de apoyo. Se usan dos cilindros hidráulicos de doble acción para actuar las patas posteriores de apoyo. Cada cilindro posee un diámetro de 7.0" (177.8 mm) con un vástago de 3.5" (88.9 mm) de diámetro y una longitud de desplazamiento de 34" (863.6 mm). La fuerza total de elevación a la presión máxima del circuito

de 3500 PSI (241.3 Bar) es de aproximadamente 503,965.5 lbf. (2241.75 kN). La sección trasera también sirve de superficie de montaje para el ducto de aire, para los cilindros de arrastre.

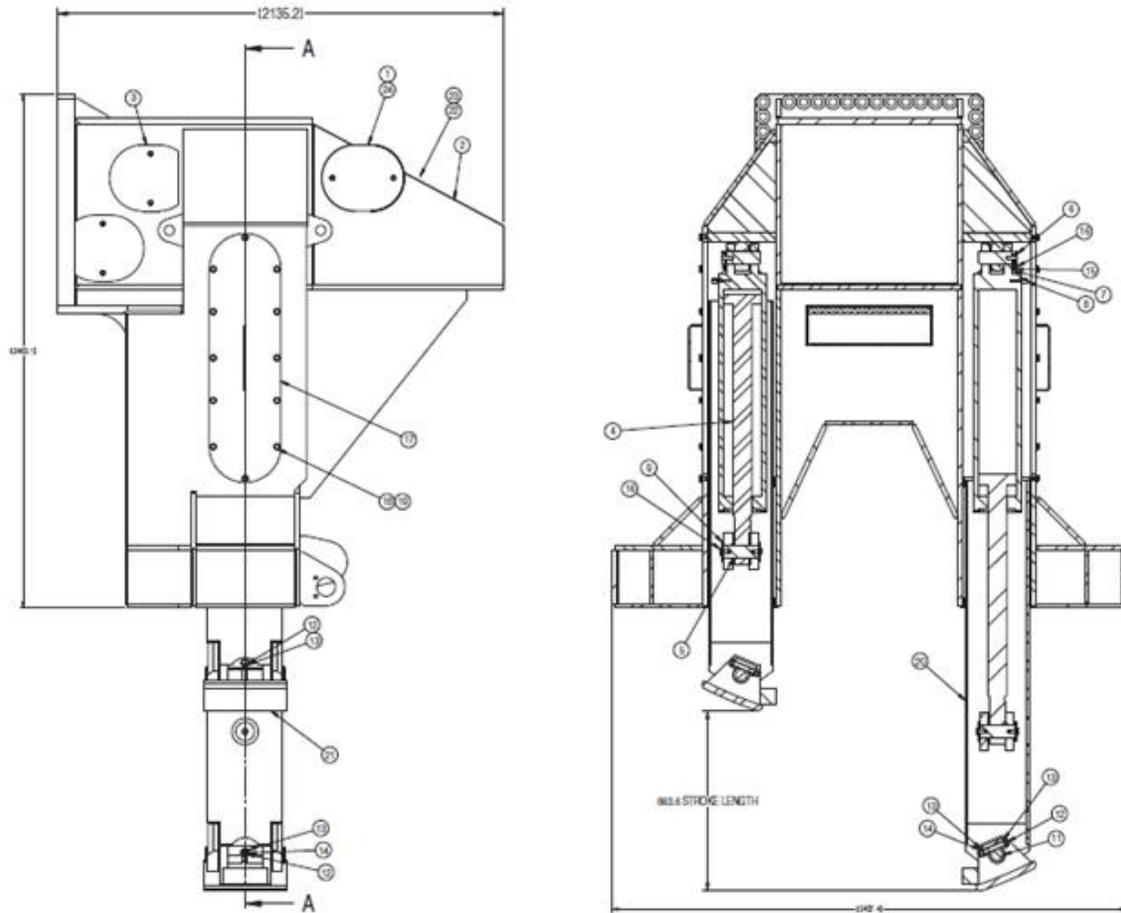


Ilustración 18: Conjunto de sección trasera, vista perfil/transversal, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Conjunto del transportador: La cinta transportadora acepta la roca desmenuzada del área de la tolva de dentro del soporte del cabezal de corte y entregarlas a la parte posterior de la máquina para que de ahí sean transferidas en ese punto al sistema transportador. La viga principal de la máquina se usa como estructura de apoyo cerrada para la banda transportadora. La estructura principal de la banda transportadora consiste de una armadura delantera fija a la viga principal, una sección media sin marco montada a la viga principal y una trasera soldada a la sección posterior. La armadura de la banda transportadora también es una base de montaje para el conjunto de las poleas de impulso, las poleas de cola, las poleas amortiguadoras, el conjunto de la tolva, para los cilindros de tensión, y para montar los juegos de hule guía y rascadores. Una breve descripción de cada uno se da a continuación:

- El conjunto transportador está equipado con dos cilindros de elevación, fijados de cada lado de la armadura delantera del transportador. Estos cilindros permiten acceso dentro de la viga principal y del soporte del cabezal de corte así como del conjunto del cabezal de corte
- Un conjunto de polea de impulso impele al transportador. La polea de impulso es accionada por un motor hidráulico de transmisión directa que va montado dentro del tambor del conjunto
- El juego de poleas de cola se localiza en el extremo delantero del transportador. Se facilitan ajustes para permitir la adecuada alineación para el tensado de la correa. La polea de cola está sellada y lubricada, igual que el cabezal de corte
- El interruptor de velocidad va instalado debajo del transportador (en contacto con la correa). Su propósito es detectar la velocidad baja de la correa durante la operación. El interruptor de velocidad envía una señal al Controlador de lógica programable (PLC, en inglés). Cuando la velocidad desciende aproximadamente al 80 por ciento de la velocidad total, el PLC desacopla los motores de la transmisión principal y despliega una advertencia en la consola del operador

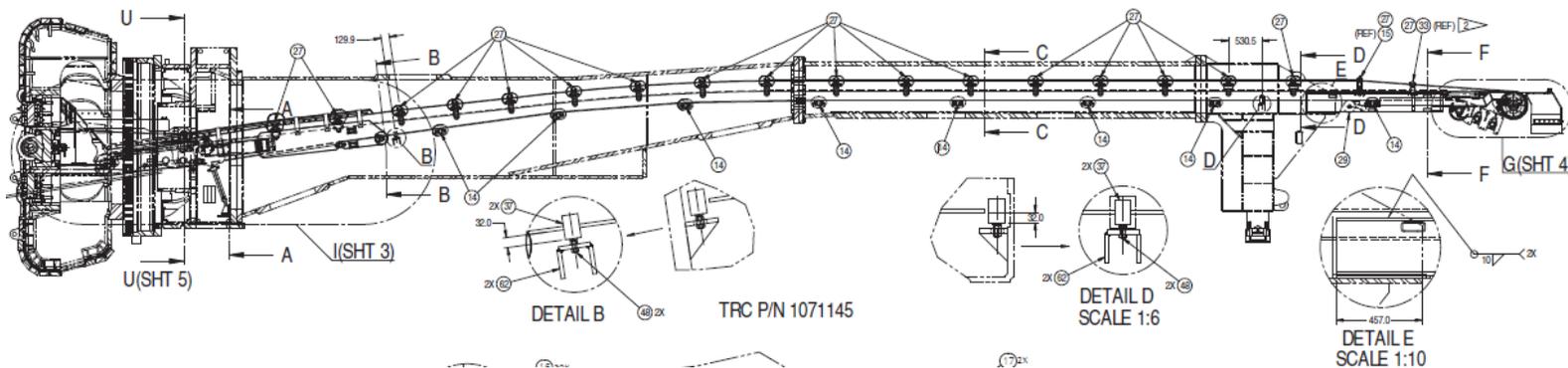


Ilustración 19: Conjunto de transporte, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Conjunto estación del operador: Los controles e indicadores principales disponibles para el operador para la selección y vigilancia de las funciones eléctricas e hidráulicas de la máquina se encuentran en la estación del operador, localizada sobre la plataforma 2.

La estación del operador en Sección 13 consiste de todos los controles e indicadores necesarios para operar y vigilar las diversas funciones eléctricas e hidráulicas de la máquina durante la perforación normal. Esto incluye todos los controles para los diversos actuadores hidráulicos y motores eléctricos, los controles para ajustar la velocidad y presión del impulsor, y calibradores de presión, amperímetros, luces indicadoras para monitorear los sistemas, y el panel de control.

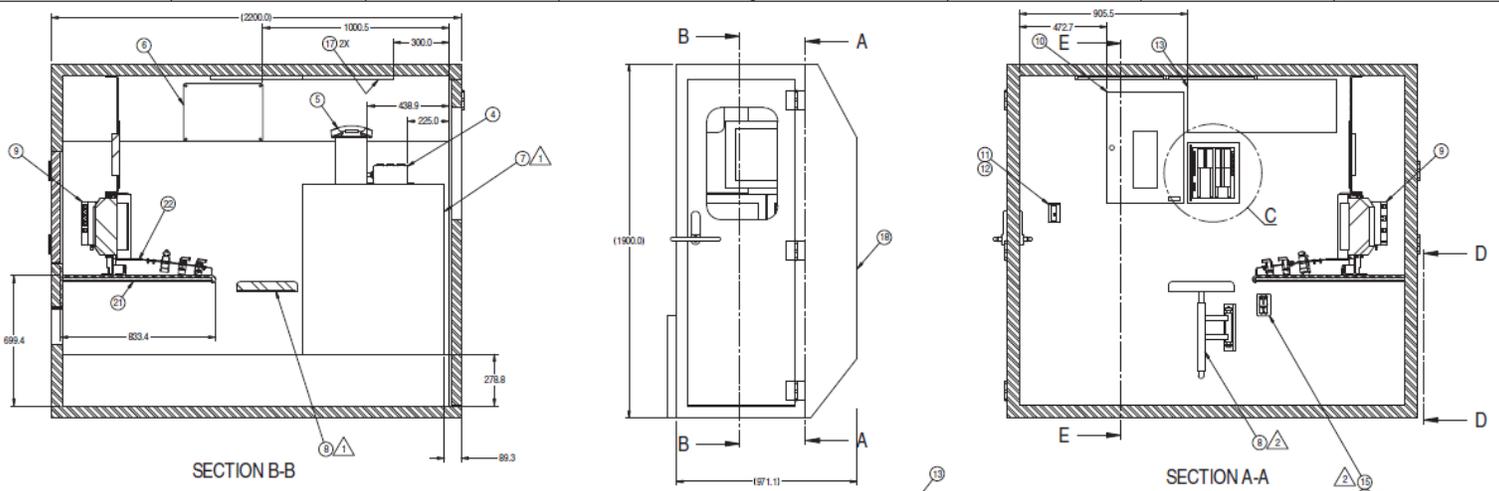


Ilustración 20: Conjunto de estación del operador, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Sistema de Lubricación: El sistema de lubricación facilita los medios de lubricación el cojinete principal y el engrane principal (maestro) de la máquina. El sistema también lubrica los sellos internos y externos. El sistema tiene equipo para el extraer el aceite que se acumula en las cavidades de los cojinetes y los engranes, y devolverlo a su depósito. Esto provee una recirculación constante de aceite de engranes.

Sistema de Hidráulico: El sistema hidráulico completo consiste de numerosos circuitos, del tanque hidráulico e interconexiones, así como los controles e indicadores usados por el operador para controlar y vigilar estas funciones hidráulicas. La mayoría de las válvulas de control direccional, válvulas de retención, válvulas reductoras de presión, válvulas de alivio y válvulas de control de flujo, van montadas en múltiples y en muchos casos comparten el mismo bloque de múltiple. El principal método de interconexión es por medio de mangueras de alta presión. Todas las válvulas de alivio, válvulas reductoras de presión, interruptores de presión, válvulas retenedoras, así como la mayoría de las válvulas de control de flujo tienen ajustes manuales y dispositivos de bloqueo para mantener su ajuste.

Sistema de Agua: Esta máquina está equipada con un sistema de agua para lo siguiente:

- enfriar la transmisión principal, el gabinete de la transmisión VFD, el aceite hidráulico, el aceite de lubricación y los compresores de aire
- supresión de polvo por aspersion de agua en la cara del túnel, cortadores, transportador
- suministrando agua a equipos auxiliares como la bomba de cemento grout, lavadores y a los barrenos de roca
- desagüe bombeando agua subterránea fuera del túnel

Equipo de ademes: Esta máquina está equipada con un componente de viga anular de soporte y con un componente de techo y un barreno de prueba.

- Para ayudar a controlar condiciones de suelo inestables, se ha suministrado un componente de viga anular de soporte. Este soporte se ubica en el extremo delantero de la vigueta principal de la máquina y va montado sobre su cargador. Los segmentos de acero se transportan bajo la vigueta principal hasta el área de soporte. Estos segmentos pueden ser ensamblados para formar anillos completos o usados solo como vigas corona. Esta operación se hace bajo la cubierta protectora del soporte de techo. La viga anular de soporte facilita los movimientos de rotación, axiales y de expansión
- Hay dos barrenos que van montados frente a los cilindros de impulso, de cada lado de la vigueta principal. Van montados sobre pistas deslizantes y tienen cilindros de posicionamiento que van fijados al carro de las zapatas y que controlan su posición. Esto significa que la posición del barreno está fija en relación con los apoyos de los sujetadores y que los barrenos pueden operarse mientras la máquina avanza. Se suministran cilindros de barreno y de rotación, que permiten inclinar los barrenos fuera de su posición vertical aproximadamente en 45°. Detrás de los barrenos de techo van montados dos barrenos sonda sobre un anillo atornillado a la vigueta principal. Cada barreno sonda puede girar 360° alrededor de su anillo por medio de un sistema de piñón de cremallera y un freno de estacionamiento. Los barrenos sonda pueden inclinarse hasta un ángulo de 5° con cilindros hidráulicos. A fin de dejar más espacio en el área de la TBM cuando no se requiere una perforación encofrada, se pueden quitar los dos ramos inferiores de 120° del anillo y uno de los dos barrenos

Sistema Eléctrico: La alimentación de potencia a la máquina es de 23 KV, trifásica, 50 Hz; hay n equipo de tablero de interconexiones que va en la parte trasera, o *Back-up*, que suministra la potencia. Se suministran tres transformadores. Dos de ellos de 1150 KVA, y uno de 1000 KVA. Estos son encofrados y enfriados con ventilador. La tensión fase por fase en las conexiones secundarias es de 690 voltios, 50 Hz para los transformadores de 1150 KVA, y 400 voltios, 50 Hz en el transformador de 1000 KVA. Se suministran tapones en el lado primario para permitir ajustes de tensiones por arriba o por abajo de la tensión nominal de alimentación de 20,000 voltios. Las conexiones de los devanados secundarios se encuentran en un gabinete eléctrico común a cada unidad.

La máquina TBM está controlada por medio de un Controlador de lógica programable (PLC). Excepto por algunas partidas de seguridad conectadas por cableado independiente, todos los dispositivos eléctricos de la TBM están conectados a través del PLC. Por ejemplo, el operador puede presionar un botón para arrancar una moto bomba hidráulica, pero el motor no estará conectado directamente con el motor. En vez de ello, el botón envía una señal al PLC avisando que el operador desea que la bomba arranque. El PLC examina el estado actual de la máquina y toma una decisión acerca de si es apropiado permitir el arranque de este motor. Si todo es correcto conforme a la lógica programable del PLC, el motor recibe la instrucción de arrancar del PLC. Esto comúnmente se conoce como la lógica de enclavamiento de la máquina. El PLC reside principalmente en el gabinete PLC, localizado en la cabina del operador. Consiste de un módulo de computadora (CPU), una cantidad de módulos de entrada y salida, y una cantidad de módulos de comunicaciones. El dispositivo electrónico más visible para el operador es la unidad de

despliegue gráfico, conocida por su marca como la consola del operador (QP). Esto no forma parte del PLC; más bien es un dispositivo de interfaz que que tan solo permite al operador comunicarse con el PLC.

El esquema del circuito eléctrico completo puede encontrarse en los anexos de este trabajo. (“Electrical Schematic Alto Maipo 1075446”)

Sistema Misceláneo: El equipo incluido para esta máquina, Conjunto del polipasto de servicio, Conjunto del sistema de aire y Conjunto de manejo de cortadores.

- El conjunto de manejo de cortadores consiste de las herramientas de manejo y la pista de cortadores utilizados para mover cortadores hacia y desde el frente de la máquina durante el mantenimiento de los cortadores
- El polipasto de dovelas transporta las dovelas del piso desde la extensión de la plataforma 1 al área de instalación de dovelas detrás de la tuneladora TBM. Consiste de un sistema de piñón y cremallera para que un malacate hidráulico viaje hacia adelante y hacia atrás
- El conjunto del sistema neumático consiste de dos compresores de aire y un tanque de recibo de 1,200 litros. Este sistema se utiliza en toda la máquina para operar diversos componentes

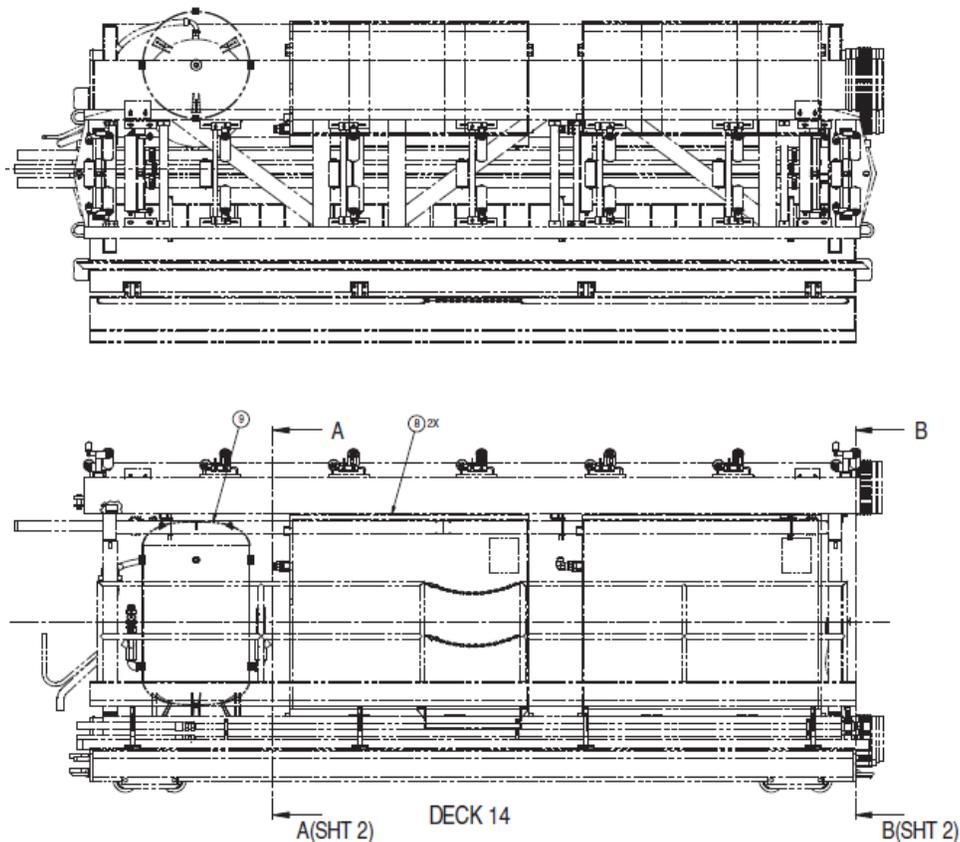


Ilustración 21: Sistema de aire comprimido, TBM Robbins MB139-396 (The Robbins Company, 2014)

Sistema de Ventilación: El aire fresco entrante es traído desde fuera del túnel por ductos flexibles. Estos ductos están conectados por medio de una sección de ductos que va plagada dentro de un casete localizado en la Plataforma 23; los ductos dentro del casete tienen un aspecto similar al de un acordeón. Conforme la máquina avanza, estos ductos gradualmente serán jalados del casete y fijados a la pared del túnel.

Una vez que esta sección ha sido extendida en toda su longitud, el casete vacío se retira y se trae un casete lleno para continuar el ducto. El casete vacío se saca del túnel y se recarga de ducto. Los ductos se suministran a todo lo largo del túnel para circular aire fresco hasta a parte frontal del equipo de *Back-up*. Se monta ducto adicional en la *Back-up* para extraer el aire cargado de polvo y transportarlo al filtro y de ahí a la parte posterior del equipo de *Back-up*.

Sistema Back-up: La mayoría de las plataformas están equipadas con miembros estructurales para apoyar las líneas de ventilación, cañerías de agua, cañerías neumáticas, charolas de cable y mangueras, dependiendo de la ubicación de la cadena. El sistema de *Back-up* es la base de transformadores, gabinetes eléctricos, carrete de manguera, generador, tanque de agua, compresor, sistema de grasa y el casete del ducto de ventilación.

Se describe a continuación cada plataforma desde la 1 a la siendo la primera aquella ubicada justo a tras de la frente.

Plataforma 1: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y conjunto de ventilación. El conjunto de la Bomba de grout va montado en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 2: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y conjunto de ventilación. El tanque de grasa y la bomba usada para el enjuague de grasa del sello del cabezal de corte y la cabina del operador van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 3: Esta plataforma sirve de estructura de soporte para el lavador en seco, el conjunto del transportador de transferencia y el conjunto de ventilación.

Plataforma 4: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El ventilador de lavado seco y la unidad de potencia del barreno hidráulico van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 5: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. La unidad de potencia hidráulica va montada en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 6: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. La unidad de potencia de lubricación y el depósito de aceite hidráulico van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 7: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El tablero de la transmisión VFD y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 8: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El transformador de 1150 kVA y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 9: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El transformador de 1150 kVA y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 10: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El tablero eléctrico principal y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 11: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El transformador de 1000 kVA y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 12 La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El enfriamiento de la transmisión VFD, el tanque de agua de enfriamiento y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 13 La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El intercambiador de calor principal, el tanque de agua residual y ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 14: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El receptor de aire, dos compresores de aire y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 15: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El carrete de cable eléctrico y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 16: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. El generador Genset de 1000 kVA, su tanque de combustible y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 17: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del transportador de transferencia y ducto de ventilación. La cámara de rescate (para 12 personas) y el ducto de ventilación van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 18: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del recolector de dovelas y transmisión del transportador y el ducto de ventilación. Hay una cámara de rescate opcional (para 12 personas) y ducto de ventilación que van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 19: La sección superior de esta plataforma sirve de estructura de soporte de la pieza de cola en movimiento del transportador del túnel. El ducto de ventilación y las plataformas para la instalación del transportador del túnel van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 20: El ducto de ventilación y las plataformas para la instalación del transportador del túnel van montados en la sección inferior de esta plataforma.

Plataforma 21: La sección inferior de esta plataforma sirve de estructura de soporte del carrete de manguera (de agua residual), del carrete de manguera (descarga de agua de enfriamiento) y el ducto de ventilación.

Plataforma 22: Esta plataforma sirve de estructura de soporte del ventilador de aire fresco.

Plataforma 23: Esta plataforma sirve de estructura de soporte para el casete de ventilación y la cortina de agua.