



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

**ROADMAPPING COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN DE
TECNOLOGÍAS KOMATSU Y SU POTENCIAL APLICABILIDAD EN CODELCO
DIVISIÓN EL TENIENTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

RODRIGO ANDRÉS CARVAJAL ACOSTA

PROFESOR GUÍA:

ROBERTO URZÚA SAAVEDRA

PROFESOR CO-GUÍA:

FERNANDO SILVA CALONGE

COMISIÓN:

JULIO MORALES OLIVARES

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: RODRIGO ANDRÉS CARVAJAL ACOSTA
FECHA: DICIEMBRE 2020
PROFESOR GUÍA: ROBERTO URZÚA SAAVEDRA**

Resumen

La Minería de la actualidad y del futuro presenta un sin fin de desafíos y oportunidades, donde se puede destacar el rol fundamental de la seguridad en las operaciones mineras, la disminución de los costos de producción, el mejorar los niveles de productividad, la sustentabilidad mirada desde el negocio, el cuidado y protección del medio ambiente y las comunidades involucradas. En este contexto, la innovación tecnológica puede ser una importante aliada con tal de cumplir los objetivos planteados por cada organización dentro del mercado de la minería.

El objetivo de este estudio fue diseñar un Roadmap tecnológico basado en la herramienta de planificación estratégica de tecnología Roadmapping, en minería subterránea, considerando una visión de la industria y los desafíos de ésta al año 2030, con potencial de aplicación en Codelco División El Teniente y con posibles desarrollos en la empresa Komatsu. Se utilizó el modelo de los tres horizontes tecnológicos.

La revisión bibliográfica y las entrevistas a expertos permitieron visualizar la dirección que tomará la industria minera en los próximos 10 años, considerando el segmento de minería subterránea de roca dura. Los principales procesos y/o actividades promovidas por el mercado son la minería subterránea masiva, la automatización de equipos y robotización, la implementación de equipos eléctricos, la transformación digital, la interoperabilidad, la sensorización y monitoreo avanzado en tiempo real y la gestión del cambio.

Las actividades realizadas determinaron posibles respuestas de Komatsu a los desafíos de la industria, considerando los distintos enfoques de desarrollo (Market pull y Technology push), el estado del mercado de equipos en extracción/acarreo de material y desarrollo de túneles, a nivel latinoamericano y chileno. Se determinaron las principales brechas, tanto positivas como negativas de los equipos y/o tecnología que utiliza Komatsu frente a sus principales competidores, contribuyendo a favorecer el desarrollo de la empresa con tal de obtener ventajas competitivas. Se analizó el Plan de negocios y Roadmaps de División El Teniente, dando una bajada práctica a las principales tendencias y prioridades de la faena minera.

De esta manera, se puede disponer de información pertinente para aplicar mejores prácticas en Komatsu, que permitan proyectar resultados favorables o desfavorables para la compañía; y de esta forma, definir estrategias con miras de mejorar el negocio tanto para Komatsu como para División El Teniente de Codelco.

Abstract

Mining today and in the future presents endless challenges and opportunities, where it is possible to highlight the fundamental role of safety in mining operations, the reduction of production costs, the improvement of productivity levels, the sustainability of the eyes from the business, the care and protection of the environment and the communities involved. In this context, technological innovation can be an important ally to meet the objectives set by each organization within the mining market.

The objective of this study was to design a technological Roadmap based on the Roadmapping technology strategic planning tool, in underground mining, considering a vision of the industry and its challenges to the year 2030, with a potential of application in Codelco Division El Teniente and with possible developments in the Komatsu company. The model of the three technological horizons was used.

The bibliographic review and interviews with experts allowed us to visualize the direction that the mining industry will take in the next 10 years, considering the segment of underground hard rock mining. The main processes and/or activities promoted by the market are massive underground mining, automation of equipment and robotization, implementation of electrical equipment, digital transformation, interoperability, sensorization, and advanced real-time monitoring and change management.

The activities carried out determined possible Komatsu responses to the challenges of the industry, considering the different development approaches (Market pull and Technology push), the state of the market for equipment in extraction/hauling of material, and tunnel development, at the Latin American level and Chilean. The main gaps, both positive and negative, of the equipment and/or technology used by Komatsu compared to its main competitors were determined, helping to favor the development of the company to obtain competitive advantages. The Business Plan and Roadmaps of the El Teniente Division were analyzed, giving a practical overview of the main trends and priorities of the mining site.

In this way, the relevant information is available to apply best practices in Komatsu, which project favorable or unfavorable results for the company; define strategies to improve business for both Komatsu and Codelco División El Teniente.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos y todas quienes me hayan apoyado durante mi proceso de formación académica, profesional y como persona.

En primera instancia quiero agradecer a mis padres, quienes siempre, me inculcaron el valor y la trascendencia que tiene la educación y el conocimiento por sobre muchas otras cosas, en especial a mi viejita quien siempre ha estado, en las buenas y en las malas y siempre lo estará con su cariño y dedicación. A mi hermano Mauricio y mi hermana Claudia, para quienes siempre estaré para apoyarlos, para compartir y quererlos. A mis tías(os) y abuelas(os) que me tienen mucho cariño.

Quiero agradecer a Julio Morales y a mi Profesor Guía Roberto Urzúa, por brindarme la oportunidad de ingresar a una de las empresas más importantes para la minería mundial como lo es Komatsu y la confianza que depositaron en mi desde el primer día de memoria. Agradezco la dedicación, la simpatía, el apoyo y entrega de importantes lineamientos tanto en el plano profesional técnico como en lo personal, muchas gracias. Agradezco a Fernando Silva, por la confianza y el apoyo brindado desde que nos conocimos el 2019, cuando fui Presidente del Centro de Alumnos de Minería, cuyo apoyo fue indispensable para nuestras gestiones y para todo el trabajo realizado.

A los entrevistados Juan Jara, Carlos Carmona, Javier Ruiz del Solar, Patricio Rojas y Sebastián Carmona por su aporte al desarrollo del trabajo.

Agradecer al Programa Académico de Bachillerato, a la Escuela de Ingeniería y al Departamento de Minas de la Universidad de Chile, quienes me han entregado importantes conocimientos, me han reafirmado la importancia del rigor, la perseverancia y la relevancia de las buenas relaciones con todas las personas. A Gloria Jiménez, Javier Gutiérrez y Lilian Salinas, por su constante apoyo como funcionarios, gracias.

A las personas que me orientaron con valiosos consejos y recomendaciones tanto para enfrentar mi carrera, como para mi futuro como profesional, entre ellos al profesor Edgar Rihm, profesor Freddy Rojas, profesor Aldo Casali, a Mauricio Méndez, a Carlos Pedraza, Eduardo Ojeda, Nicolás Montecino, Alexis Hinojosa y mi padrino Hernán Carvajal.

A mis BachiAmigos Chico, Mariela, Dani, Joyce, Mauri, Feña, Javi, Pipe, Diego, con quienes viajamos y después de tanto tiempo seguimos en contacto. A los Pedarles Joti y Bastián por uno de los mejores viajes en bicicleta por la carretera Austral, gracias. A mi mejor amigo Pato que siempre ha estado ahí, muchas gracias.

A los mineros de la "TheRial", Panchote, Mati, Lucas, Fabi, Carlos, Jano, Perroni, Michael, Nico, con quienes compartimos muchos momentos de la carrera, nos apoyamos en las buenas y malas, siendo Centro de Estudiantes, jugando baby futbol con el mejor equipo campeón "Diamantinos/ Abre Zanjas FC" y las numerosas jornadas de camaradería.

A Ingrid, quien desde el primer momento me ha apoyado y amado incondicionalmente, muchas gracias.

***“Por las subidas y bajadas de la vida,
siempre Darle Darle”***

Tabla de Contenido

Resumen	ii
Abstract.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1 Generalidades del trabajo de título	1
1.2 Objetivos del estudio.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcances principales	2
1.4 Metodología general del estudio	3
1.5 Generalidades de Roadmapping y Roadmap tecnológico	5
1.5.1 Estructuración de un RoadMap	7
1.6 Conceptualización de Innovación y Tecnología.....	9
1.6.1 Innovación.....	10
1.6.2 Tecnología	12
1.6.3 Niveles de innovación	13
1.6.3.1 Innovación incremental.....	14
1.6.3.2 Innovación disruptiva	14
1.6.4 Modelo de horizontes tecnológicos	15
1.6.5 Conceptos de Market pull & Technology push	18
1.6.5.1 Market pull.....	18
1.6.5.2 Technology push	19
1.7 Antecedentes de Komatsu.....	21
1.7.1 Antecedentes históricos de Komatsu	21
1.7.2 Perfil corporativo de Komatsu	22
1.7.3 Declaración de Valores “Principios K- Way” y “Productos Dantotsu”	25

1.8 Auge Minería Subterránea en el mundo	26
1.8.1 Explotación de Macro Bloques y Columnas de explotación de gran altura en Block/Panel caving	27
1.9 Antecedentes generales de Codelco División El Teniente.....	29
1.9.1 Ubicación geográfica.....	29
1.9.2 Descripción general período actual (2017-2022)	30
CAPÍTULO II: PROPUESTA METODOLÓGICA	34
2.1 Primera Etapa: Contexto.....	34
2.1.1 Revisión bibliográfica	34
2.1.2 Entrevistas a expertos.....	34
2.2 Segunda etapa : Respuestas de Komatsu a los desafíos de la industria (Mercado de equipos, Análisis de brechas y necesidades de desarrollo para Komatsu)	35
2.3 Tercera etapa: Caracterización del cliente, levantamiento del Plan de negocios y RoadMaps de División El Teniente.....	37
2.4 Cuarta etapa: Construcción de Roadmap y Análisis estratégico	37
CAPÍTULO III: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ENTREVISTAS CON EXPERTOS	42
3.1 Visiones de minería actual y futura	42
3.1.1 Centro de Excelencia en Innovación Minera (CEMI, Canadá)	42
3.1.2 Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC, Chile)	43
3.1.3 Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E, Chile).....	46
3.1.4 Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO, Australia)	47
3.1.5 Mining 3-CRC Mining (Australia).....	48
3.1.6 Fundación Chile-Corporación Alta Ley.....	50
3.1.6.1 Desde el cobre a la innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035.....	51
3.1.6.2 Hoja de Ruta 2.0 de la Minería Chilena: Actualización y consensos para una mirada renovada	54

3.1.6.3 Roadmap: Innovación Tecnológica para la Minería 4.0	59
3.1.7 Centro de estudios del cobre y la minería (CESCO)	67
3.1.7.1 Hacia una minería 4.0: Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente	67
3.1.8 Codelco	71
3.1.8.1 Innovación y tecnología en Codelco.....	72
3.1.9 Komatsu	76
3.2 Tecnologías y procesos aplicables en minería subterránea	78
3.2.1 Electromovilidad.....	78
3.2.1.1 Tecnología híbrida.....	81
3.2.1.1.1 LHD Híbrido de Komatsu	81
3.2.1.2 Tecnología de baterías	82
3.2.1.2.1 Tipos de batería.....	83
3.2.1.2.2 Cargadores eléctricos.....	85
3.2.1.2.3 Desafíos y consideraciones en desarrollo de baterías	87
3.2.2 Tecnología a Hidrógeno	88
3.2.3 Interoperabilidad.....	90
3.2.4 TICAR	94
3.2.4.1 Centros Integrados de Operaciones (CIO).....	94
3.2.4.2 Tecnologías de la información y Comunicación (TIC).....	97
3.2.4.2.1 Minería Inteligente, Internet de las cosas (IoT) y redes de comunicación ...	97
3.2.4.2.2 Gestión de datos	103
3.2.4.2.3 Sistemas de localización.....	105
3.2.4.3 Automatización y robotización	106
3.2.4.3.1 Principales desafíos de aplicación de tecnología autónoma en minería subterránea	108
3.2.4.3.2 Estado de operaciones automatizadas en minería	110
3.2.5 Covid 19 como acelerante de la digitalización en minería.....	112
3.3 Resumen capítulo: Dirección de la industria minera en el segmento de minería subterránea de roca dura.....	113
3.3.1 Automatización de equipos y robotización (Proceso Market pull)	113

3.3.2 Equipos eléctricos (Proceso Market pull)	114
3.3.3 Transformación digital (Proceso Market pull)	114
3.3.4 Minería continua (Proceso Technology push)	115
3.3.5 Estándares de interoperabilidad (Proceso Market pull)	115
3.3.6 Monitoreo y sensorización (Proceso Market pull)	116
3.3.7 Minería subterránea masiva (Proceso Market pull)	117
3.3.8 Gestión del Cambio (Proceso Market pull)	117
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE BRECHAS Y NECESIDADES DE DESARROLLO PARA KOMATSU	119
4.1 Definición caso base equipos Komatsu	119
4.1.1 Equipos LHD	119
4.1.2 Camiones UG	120
4.1.3 Equipos de perforación	121
4.1.3.1 Martillos perforadores Montabert y Timberock	122
4.2 Iniciativas enfoque Market pull	124
4.2.1 Equipos mineros a baterías presentes en el mercado	124
4.2.1.1 LHD y camiones UG	124
4.2.1.2 Equipos de perforación	125
4.2.1.3 Estrategias de desarrollo de Komatsu en electromovilidad	126
4.2.1.3.1 LHD y camiones UG a baterías o híbridos	127
4.2.1.3.2 Jumbos de avance y empernadores a baterías	128
4.2.2 Equipos mineros automatizados en el mercado	130
4.2.2.1 Automatización en Epiroc	130
4.2.2.2 Automatización en Sandvik	131
4.2.2.3 Automatización en Komatsu	133
4.3 Análisis de brechas y desarrollos para Komatsu	134
4.3.1 Mercado equipos LHD	135
4.3.1.1 Resumen brechas y necesidad de desarrollos para Komatsu en equipos LHD	145

4.3.2 Camiones UG	147
4.3.2.1 Resumen brechas y necesidad de desarrollos para Komatsu en camiones UG	157
4.3.3 Equipos de perforación	158
4.3.3.1 Jumbos de avance	161
4.3.3.1.1 Elementos principales de tiempo improductivo en jumbos de avance y consideraciones de compra	164
4.3.3.2 Empernadores	166
4.3.3.3 Resumen brechas y necesidad de desarrollos para Komatsu en equipos de perforación	168
4.4 Iniciativas Technology push	170
4.4.1 DynaMiner	170
4.4.2 Tuneleras (Tunneling Boring Machine, TBM)	171
CAPÍTULO V: LEVANTAMIENTO DE PLAN DE NEGOCIOS Y ROADMAPS DE DIVISIÓN EL TENIENTE	175
5.1 Proyectos e inversiones	175
5.1.1 Proyecto Andesita	175
5.1.2 Proyecto Diamante	175
5.1.3 Proyecto Recursos Norte	175
5.1.4 Proyecto Andes Norte- Nuevo Nivel Mina	176
5.1.5 Túnel de acceso ADIT 77	176
5.2 Diseño Minero	178
5.2.1 Nivel de Hundimiento	178
5.2.2 Nivel de producción	179
5.2.3 Nivel de transporte intermedio	181
5.3 Planificación Minera	182
5.3.1 Plan minero	182
5.3.2 Flotas de equipos	184
5.3.2.1 Equipos LHD	184
5.3.2.2 Camiones UG	186

5.3.2.3 Equipos de perforación	187
5.4 Modelo de negocios.....	190
5.5 Roadmaps de Electromovilidad	194
5.6 Roadmaps Automatización	199
5.7 Resumen Plan de Negocios y Roadmaps El Teniente	203
CAPÍTULO VI: CONSTRUCCIÓN DE ROADMAP TECNOLÓGICO DE KOMATSU Y ANÁLISIS DE ESTRATÉGICO	206
6.1 Diseño del RoadMap tecnológico de Komatsu	206
6.1.1 Estructura principal del Roadmap	206
6.1.2 Roadmap tecnológico Komatsu de minería subterránea de roca dura con potencial aplicabilidad en Codelco División El Teniente (2020-2030)	208
6.1.2.1 Horizonte 1 (2020-2022), innovaciones incrementales: Monitoreo en tiempo real, electrificación de equipos y masificación de procesos teleoperados y semi-autónomos.	214
6.1.2.2 Horizonte 2 (2023-2025), estado medio: Hacia la integración de los procesos mina y masificación de procesos autónomos.	216
6.1.2.3 Horizonte 3 (2026-2030), estado Final: Minería full conectada e inteligente, electrificada y automatizada.	218
6.2 Análisis estratégico	220
6.2.1 Matriz de esfuerzo/impacto	220
6.2.2 Fuerzas de Porter.....	227
6.2.2.1 Poder de negociación de los clientes (Moderado).....	227
6.2.2.2 Poder de negociación de los proveedores (Moderado).....	228
6.2.2.3 Amenaza de los nuevos competidores entrantes (Baja).....	229
6.2.2.4 Amenaza de productos sustitutos (Baja)	231
6.2.2.5 Rivalidad entre empresas (Alta)	231
6.2.3 Análisis FODA	233
6.2.3.1 Fortalezas	233
6.2.3.2 Oportunidades	235
6.2.3.3 Debilidades.....	236
6.2.3.4 Amenazas	237
6.2.3.5 Matriz de confrontación.....	239

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	243
CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA.....	247
ANEXO A: RESULTADOS ENTREVISTAS A EXPERTOS	256
1.1 Expertos relacionados con la Industria Minera	256
1.1.1 Principales resultados entrevistas	256
1.1.2 Interoperabilidad y tecnología de empresas proveedoras.....	257
1.1.3 Automatización y robótica en Minería Subterránea.....	263
1.1.4 Aplicación de tecnologías en Minería Subterránea	267
1.2 Expertos de Codelco	273
1.2.1 Principales resultados entrevistas	273
1.2.2 Principales desafíos de Codelco en Innovación y Tecnología	274
1.2.3 Principales desafíos de Codelco mirados desde la perspectiva Inversional	276
ANEXO B: PROYECTOS DE ORGANIZACIONES ESTUDIADAS	280
1.1 CEMI.....	280
1.2 AMTC.....	280
1.3 AC3E	282
1.4 Mining 3-CRC Mining.....	283
ANEXO C: VIABILIDAD DE TECNOLOGÍAS EN OPERACIONES MINERAS	284
1.1 Electromovilidad	284
1.1.1 Parámetros baterías y tiempos de carga.....	284
1.1.2 Proveedores de baterías industriales.....	285
1.2 Interoperabilidad	286
1.2.1 Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad en Minería	
.....	286
1.3 TICAR	287
1.3.1 Automatización.....	287

1.3.1.1 Clasificaciones de automatización	287
1.3.1.2 Esquemas de automatización de Sandvik	289
1.4 Sistemas control antifatiga y somnolencia	289

ANEXO D: MATRIZ ESFUERZO/IMPACTO 293

Índice de Figuras

Figura 1 Etapas metodológicas.....	3
Figura 2 Pirámide de planificación.	7
Figura 3 Ejemplos esquemáticos RoadMaps personalizadas.	8
Figura 4 Estructura típica de un Roadmap.....	9
Figura 5 Definición tecnología.....	13
Figura 6 Estructura de mina futura escalonada.....	16
Figura 7 Tres horizontes de crecimiento.	17
Figura 8 Ubicación de operaciones globales.....	24
Figura 9 Ventas a clientes externos (por departamentos operativos).	24
Figura 10 Ventas de equipos de construcción, minería y servicios por región.....	25
Figura 11 Auge minería subterránea.....	27
Figura 12 Explotación en configuración Macrobloques.	28
Figura 13 Ubicación Codelco División El Teniente.....	30
Figura 14 Esquema mina El Teniente operativa.....	31
Figura 15 Producción de cobre fino en Codelco.....	33
Figura 16 Metodología estándar T-Plan Universidad de Cambridge.....	38
Figura 17 Las 5 Fuerzas de Porter.....	39
Figura 18 Metodología análisis FODA.....	40
Figura 19 Nivel de madurez tecnológica (TRL) proyectos automatización AMTC.....	44
Figura 20 Visión de minería futura de Mining 3.	49
Figura 21 Diagrama del concepto de Minería Verde.	55
Figura 22 Tecnologías de extracción consideradas por Cesco.	68
Figura 23 Tecnologías de servicios consideradas por Cesco.	69
Figura 24 Estrategia de Innovación de Codelco.....	72
Figura 25 Visión Global de minería del futuro para Codelco.	76

Figura 26 Esquema sistemas LHD híbrido de Komatsu.....	82
Figura 27 Comparación de baterías ion-litio.....	84
Figura 28 A) Precios de baterías ion-litio; B) Demanda estimada de baterías ion-Li en EV.	85
Figura 29 Modelo de Conceptual para la interoperabilidad en Minería de Interop.	92
Figura 30 Arquitectura lógica del CIO&G PMCHS.	96
Figura 31 Esquema Minería Inteligente.....	98
Figura 32 Futura evolución de la industria minera.....	101
Figura 33 Comparación de clasificación por forma de operar equipos.....	107
Figura 34 Evolución competencias necesarias en procesos mineros.	110
Figura 35 Evolución de productividad por efecto del cambio tecnológico.	111
Figura 36 Martillos perforadores hidráulicos de Komatsu.	123
Figura 37 Panorama competitivo equipos LHD y camiones UG a batería.	124
Figura 38 Roadmap de minería subterránea de roca dura de Komatsu.....	127
Figura 39 Roadmap electromovilidad de Komatsu en minería subterránea.....	128
Figura 40 Roadmap electromovilidad de Jumbos de avance y emperadores de Komatsu.	129
Figura 41 Resumen actualización y electrificación equipos Komatsu.	129
Figura 42 Tecnología de Camiones autónomos alrededor del mundo.	130
Figura 43 Visualización digitalización del ambiente de Sandvik.....	132
Figura 44 Automatización subterránea para camiones y LHD de Sandvik.....	132
Figura 45 Roadmap automatización de productos Komatsu.....	133
Figura 46 Dimensión del mercado latinoamericano y chileno en equipos de minería subterránea.	135
Figura 47 Mercado equipos LHD en Latinoamérica.	136
Figura 48 Mercado equipos LHD en Chile.....	137
Figura 49 Mercado equipos LHD a nivel de Chile y el mundo.....	137
Figura 50 Mercado LHD en Chile por modelos y capacidades entre 10 y +20 toneladas.	139
Figura 51 Mercado LHD en Chile por modelos y capacidades entre 1 y 7 toneladas. .	139
Figura 52 Resumen mercado equipos LHD.	140
Figura 53 Mercado camiones subterráneos en Latinoamérica.....	147

Figura 54 Mercado camiones UG en Chile.	148
Figura 55 Mercado de camiones UG a nivel de Chile y el mundo.	149
Figura 56 Mercado camiones UG en Chile por modelos y capacidades entre 18-35 y mayores a 55 toneladas.	150
Figura 57 Resumen mercado de camiones UG con equipos más comunes en Chile. .	156
Figura 58 Mercado jumbos mineros en Latinoamérica.	159
Figura 59 Mercado de jumbos en Chile.	159
Figura 60 Mercado de jumbos a nivel de Chile y el mundo.	160
Figura 61 Mercado jumbos de avance en Chile por tamaños y modelos principales. .	162
Figura 62 Decisiones de compra en jumbos de avance.	165
Figura 63 Modelos de empernadores en Chile.	166
Figura 64 DynaMiner de Komatsu.	171
Figura 65 Flujos de caja libre de acuerdo Real, PND 2017 y PND 2020.	177
Figura 66 Ubicación espacial de proyectos El Teniente.	177
Figura 67 Perfiles Esquemáticos de Distribución de Niveles.	178
Figura 68 Nivel de Hundimiento Proyecto Nuevo Nivel Mina (1,880 y 1,862 [msnm.]	179
Figura 69 Malla de Extracción Tipo Teniente 16 [m] x 20 [m].	179
Figura 70 Nivel de Producción Proyecto Nuevo Nivel Mina.	180
Figura 71 Nivel de Transporte Intermedio Proyecto Nuevo Nivel Mina.	181
Figura 72 Plan Minero División El Teniente en base a PND 2019.	182
Figura 73 Plan Minero Nuevo Nivel Mina en base a PND 2019.	183
Figura 74 Flota operativa de equipos LHD por capacidad.	184
Figura 75 Plan de adquisiciones equipos LHD División El Teniente.	185
Figura 76 Flota operativa de camiones UG División El Teniente.	186
Figura 77 Flota equipos de perforación propios División El Teniente.	188
Figura 78 Flota de martillos rompe rocas División El Teniente.	189
Figura 79 Modelo de negocios División El Teniente.	191
Figura 80 Estructura de costos modelo de negocios División El Teniente.	194
Figura 81 Roadmap procesos generales de electromovilidad División El Teniente.	195
Figura 82 Estatus de proyectos de electromovilidad en División El Teniente.	196
Figura 83 Roadmap electromovilidad equipos de desarrollo y producción en El Teniente.	197

Figura 84 Roadmap automatización equipos de desarrollo y producción en El Teniente.	202
Figura 85 Roadmap tecnológico de Komatsu con potencial aplicabilidad en División El Teniente (2020-2030).	208
Figura 86 Matrices impacto y esfuerzo de Seguridad y Productividad.	222
Figura 87 Matrices impacto y esfuerzo de capex y opex.	223
Figura 88 Matrices impacto y esfuerzo de Sustentabilidad y Continuidad Operacional.	224
Figura 89 Komatsu como líder de equipos Caex y Palas de carguío en Chile (2005-2018).	230
Figura 90 Cinco fuerzas de Porter del estudio.	233
Figura 91 Autonomía en equipos LHD proyecto AMTC.	281
Figura 92 Tiempos de carga.	285
Figura 93 Automatización en faena minera UVA de CEMIN.	289
Figura 94 Esquemas de automatización con Optimine de Sandvik: A) Loop Camión mina UVA; B) 3 LHD en Diablo Regimiento, El Teniente.	289
Figura 95 Modelo causal de accidentes en obras de construcción, Jerarquía de influencias.	291
Figura 96 Diagrama básico de Sistema de monitoreo de fatiga.	292

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación entre innovación incremental y disruptiva.	15
Tabla 2 Comparación entre Market pull y Technology push.	20
Tabla 3 Comparación parámetros generales Gerencia de Mina DET 2017 y 2019.	32
Tabla 4 Valorización a utilizar en relación de factores internos y externos.	41
Tabla 5 Desafíos y necesidades en minería subterránea según CEMI.	42
Tabla 6 Desafíos y necesidades en minería subterránea según AMTC.	44
Tabla 7 Desafíos y necesidades en minería subterránea según AC3E.	47
Tabla 8 Desafíos y necesidades en minería subterránea según CSIRO.	48
Tabla 9 Desafíos y necesidades en minería subterránea según Mining 3.	50
Tabla 10 Desafíos y necesidades minería subterránea según Alta Ley-FCh al 2016. ...	53

Tabla 11 Recursos habilitantes en operación y planificación minera para Alta Ley.	54
Tabla 12 Desafíos y necesidades núcleo Usos del cobre según Alta ley al 2019.	55
Tabla 13 Desafíos y necesidades núcleo Minería verde según Alta ley parte I al 2019.	56
Tabla 14 Desafíos y necesidades núcleo Minería verde según Alta ley parte II al 2019.	57
Tabla 15 Actualización desafíos y necesidades minería subterránea según Alta Ley parte I al 2019.....	58
Tabla 16 Actualización desafíos y necesidades minería subterránea según Alta Ley parte II al 2019.....	59
Tabla 17 Núcleos Traccionantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 1.	60
Tabla 18 Núcleos Traccionantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 2.	61
Tabla 19 Núcleos Habilitantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 1.	64
Tabla 20 Núcleos Habilitantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 2.....	65
Tabla 21 Probabilidad de implementación tecnologías de extracción.	70
Tabla 22 Probabilidad de implementación tecnologías de servicio.	71
Tabla 23 Desafíos y necesidades minería subterránea según Codelco.....	73
Tabla 24 Desafíos y necesidades minería subterránea según Komatsu.....	77
Tabla 25 Resumen comparación entre LHD diésel y LHD eléctricos a cables.....	79
Tabla 26 Comparación LHD de 14 toneladas diésel y eléctricos a cables Sandvik.	80
Tabla 27 Principales tipos de batería utilizadas en vehículos automotores.	83
Tabla 28 Desafíos y consideraciones para el desarrollo de baterías.	88
Tabla 29 Anchos de banda disponible de transporte de alta velocidad en Codelco.....	101
Tabla 30 Estimación de demanda de anchos de banda en Codelco.....	102
Tabla 31 Nivel de maduración tecnológica de automatización en principales operaciones de minería subterránea.	111
Tabla 32 Resumen desafíos y necesidades principales de la industria minera.....	118
Tabla 33 Características físicas principales de equipos LHD de Komatsu.....	119
Tabla 34 Características mecánicas principales de equipos LHD de Komatsu.....	120
Tabla 35 Características físicas principales de camiones UG de Komatsu.....	120
Tabla 36 Características mecánicas principales de camiones UG de Komatsu.....	121
Tabla 37 Características físicas principales de Jumbos de avance de Komatsu.	121
Tabla 38 Características mecánicas principales de Jumbos de avance de Komatsu. .	122

Tabla 39 Comparación LHD y camiones a baterías presentes en mercado.	125
Tabla 40 Perforadoras a baterías disponibles en mercado al 2020.	126
Tabla 41 Comparación equipos LHD 10 toneladas.	141
Tabla 42 Comparación equipos LHD 14 toneladas.	142
Tabla 43 Comparación equipos LHD 17-18 toneladas.	143
Tabla 44 Comparación equipos LHD 6-7 toneladas.	144
Tabla 45 Comparación camiones UG de capacidades mayores a 55 toneladas.	151
Tabla 46 Comparación camiones UG de 25-35 toneladas.	152
Tabla 47 Comparación camiones UG de 18-25 toneladas.	154
Tabla 48 Comparación camiones UG de 10-18 toneladas.	155
Tabla 49 Comparación camiones UG de 45-55 toneladas.	156
Tabla 50 Mercado global jumbos de avance.	161
Tabla 51 Comparación jumbos de avance de tamaño mediano de 1 brazos.	163
Tabla 52 Comparación jumbos de avance de tamaño mediano de 2 brazos.	164
Tabla 53 Comparación de emperadores medianos.	167
Tabla 54 Comparación de emperadores pequeños.	168
Tabla 55 Utilización de TBM en proyectos mineros al 2014.	172
Tabla 56 Tasas históricas de avance con TBM.	173
Tabla 57 Medidas relevantes del diseño minero del NNM.	182
Tabla 58 Adquisición de equipos LHD de acuerdo con horizontes en estudio.	185
Tabla 59 Posibilidad de arriendos de camiones UG de acuerdo con horizontes en estudio.	187
Tabla 60 Equipos de perforación de acuerdo con horizontes en estudio.	189
Tabla 61 Martillos rompe roca de acuerdo con horizontes en estudio.	190
Tabla 62 Brechas y focos de trabajo en electromovilidad El Teniente.	196
Tabla 63 Comparación diésel y eléctrico a baterías Onaping Depth (Glencore).	198
Tabla 64 Principales equipos a considerar por Komatsu para El Teniente.	199
Tabla 65 Proyectos de Automatización en División El Teniente.	201
Tabla 66 Principales niveles de automatización a considerar por Komatsu para El Teniente.	203
Tabla 67 Resumen análisis fuerzas de Porter.	232
Tabla 68 Matriz de confrontación de análisis FODA.	240

Tabla 69 Parámetros de principales baterías presentes en el mercado de automóviles.	284
Tabla 70 Principales tecnologías o procesos traccionantes para Komatsu en Matriz Esfuerzo/Impacto.	293
Tabla 71 Principales tecnologías o procesos habilitadores para Komatsu en Matriz Esfuerzo/Impacto.	294

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Generalidades del trabajo de título

La Minería de la actualidad y del futuro presenta un sin fin de desafíos y oportunidades, donde se puede destacar el rol fundamental de la seguridad en las operaciones mineras, la disminución de los costos de producción, el mejorar los niveles de productividad, la sustentabilidad mirada desde el negocio, el cuidado y protección del medio ambiente y las comunidades involucradas.

En este contexto, la innovación tecnológica puede ser una importante aliada con tal de cumplir los objetivos planteados por cada organización dentro del mercado de la minería.

La principal razón por la cual se escoge el tema de construcción de un Roadmap de equipos y tecnologías Komatsu para minería subterránea, es el poder disponer de una herramienta de planificación estratégica, que apoye el análisis de brechas y necesidades de desarrollo para la empresa Komatsu dentro de los próximos 10 años en el escenario del auge de la minería subterránea a nivel mundial.

El Roadmap final reflejará la incorporación de tecnologías que debe seguir la empresa desde el lugar donde se encuentra posicionada el día de hoy, hasta la visión de futuro a largo plazo que se quiere construir (Gipuzkoa Berritzen- Innobasque,2011).

El Roadmapping es un proceso importante que se ha convertido en parte integral para crear y brindar estrategia e innovación a las organizaciones. Su impacto visual y la naturaleza colaborativa de los Roadmap, apoya la alineación estratégica y el diálogo entre distintas secciones internas de una empresa y las partes interesadas del mercado (Alipour P. *et al.*,2019).

Un caso relevante a nivel mundial donde se destaca la utilización de Roadmaps, y que ha tenido impacto en la industria minera, tanto en las compañías mineras como en los proveedores mineros, es el caso de Australia, donde las grandes compañías australianas como BHP, Río Tinto y la agencia nacional de investigación científica de Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), desarrollan Roadmaps en común, con el objetivo de resolver los mayores desafíos visualizados en la industria utilizando ciencia y tecnologías innovadoras (CSIRO,2017).

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un Roadmap tecnológico basado en la herramienta de planificación estratégica de tecnología Roadmapping, en minería subterránea, considerando una visión de la industria y los desafíos de ésta al año 2030, con potencial de aplicación en Codelco División El Teniente y con posibles desarrollos en la empresa Komatsu.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del estudio son:

- Determinar los principales lineamientos del roadmap en base a las visiones de minería actual y futura documentadas.
- Determinar necesidades y desafíos de División El Teniente teniendo como base su Plan de negocios y Roadmaps de la División.
- Establecer cuáles son las tecnologías habilitadoras clave para enfrentar los desafíos en la industria minera, teniendo en consideración el portafolio de equipos Komatsu.
- Generar valor al negocio de Komatsu mediante el análisis de brechas y necesidades de desarrollo de la empresa dentro de los próximos 10 años.
- Evaluar la posición de mercado y el posicionamiento de Komatsu en el contexto de la minería subterránea de roca dura.

1.3 Alcances principales

Los alcances del estudio son los siguientes:

- Se considera un horizonte temporal de 10 años para el estudio, el cual se subdivide en 3: Corto plazo (H1:2020-2022), Mediano plazo (H2:2023-2025) y Largo plazo (H3:2026-2030).
- Se consideran los equipos disponibles en Komatsu: Desarrollo de túneles (Jumbos de avance+ Baterías); Extracción: (LHD Híbridos + Baterías); Acarreo (Camiones + Baterías).
- Los Key Performance indicators (KPI's) a considerar en el estudio son: seguridad, productividad, costos, sustentabilidad y continuidad operacional.
- Para el RoadMap tecnológico se consideran 2 tipos de núcleos(focos), un núcleo traccionante (Desafíos Técnicos), donde se tiene en cuenta principalmente los

equipos y otro núcleo habilitador (implementación de sistemas), donde se destaca el rol de las TICAR (tecnologías de la información, comunicaciones, automatización y robótica), los procesos mineros, gestión de personas, entre otros. Se consideran de relevancia los conceptos de Technology push y Market pull.

- Las principales referencias consideradas provienen de entrevistas a expertos y las siguientes empresas y organizaciones: Komatsu, Codelco, Fundación Chile-Corporación Alta ley, Advanced Mining Technology Center (AMTC, U. de Chile), Mining 3 – Cooperative Research Centre for Mining (CRC Mining, Australia), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO, Australia), Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering (AC3E, UTFSM), Centre for Excellence in Mining Innovation (CEMI, Canadá) y Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO).

1.4 Metodología general del estudio

La metodología general del estudio considera cuatro etapas metodológicas, las que se pueden visualizar en la Figura 1, las cuales se plantean para desarrollar un trabajo estructurado, sistemático y acorde a los tiempos disponibles, con tal de cumplir a cabalidad los objetivos propuestos. El trabajo se estructura en una serie de capítulos, cada uno con su respectivo resumen, para facilitar la lectura.

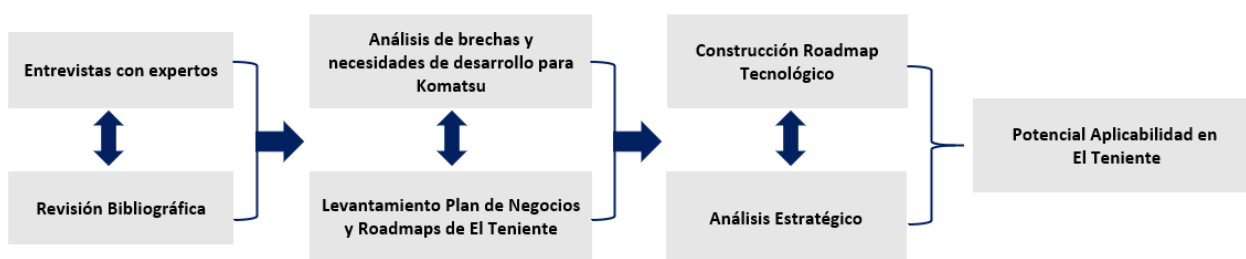


Figura 1 Etapas metodológicas.

Elaboración propia.

A continuación, se comenta el resumen de cada etapa:

- Revisión Bibliográfica y entrevista con expertos:** El estudio del arte y las reuniones con expertos en innovación tecnológica en minería tienen como objetivo identificar las distintas visiones de minería que se tienen en la actualidad y que se

desarrollarán en el futuro, dando especial énfasis en los desafíos y necesidades de la industria minera, analizando la factibilidad y el impacto que pueden tener la aplicación de ciertas tecnologías en el funcionamiento de las operaciones y su gestión.

El énfasis se concentrará en las visiones de futuro y los desarrollos tecnológicos de las principales empresas mineras y centros de investigación mineros.

- **Análisis de brechas y necesidades de desarrollo para Komatsu:** Esta etapa tiene como objetivo determinar las principales brechas, tanto positivas como negativas, de los equipos y/o tecnología que utiliza Komatsu frente a sus principales competidores, considerando a los clientes en minería subterránea. De esta forma, se puede llegar a un diagnóstico para dar respuesta a las principales necesidades de Komatsu, contribuyendo, de esta manera, a favorecer el desarrollo de la empresa con el objetivo de obtener ventajas competitivas con respecto a otros proveedores de maquinarias y tecnologías utilizadas en la industria minera.
- **Levantamiento Plan de negocios y Roadmaps de El Teniente:** Esta etapa tiene como objetivo recopilar información de División El Teniente con respecto a su Plan de negocios y a los diferentes Roadmaps que pueda tener, para visualizar las principales tendencias y prioridades de la faena minera. Se considera recursividad entre el análisis de brechas y necesidades de desarrollo para Komatsu y el Levantamiento de esta información.
- **Construcción de RoadMap tecnológico y Análisis estratégico:** Etapa en que se materializa la construcción del Roadmap tecnológico, el cual es considerado como una estrategia de desarrollo de Komatsu, donde se da cuenta de la tecnología, los equipos, los procesos y los estados esperados que se desarrollen en los horizontes temporales descritos para el estudio en cuestión, teniendo en consideración la realidad del caso de estudio de Codelco División El Teniente en miras de apoyar y sustentar los planes de negocio de Codelco. Se considera una variante de la metodología de Technology Plan (T-Plan) de la Universidad de Cambridge en la construcción del RoadMap tecnológico lo que se detalla en el capítulo de propuesta metodológica respectivo.

Con el análisis estratégico, se busca entregar robustez a la estrategia diseñada en el Roadmap tecnológico. Se considera recursividad entre la construcción del Roadmap

y el análisis estratégico. Para el análisis se considera aplicar matriz de esfuerzo/impacto, fuerzas de Porter y un análisis FODA respectivamente. De esta manera, se puede disponer de información para aplicar mejores prácticas en Komatsu, proyectar resultados favorables o desfavorables, definiendo de esta forma estrategias con miras de mejorar el negocio tanto para Komatsu como para División El Teniente de Codelco.

1.5 Generalidades de Roadmapping y Roadmap tecnológico

La producción y el desarrollo de “Hojas de ruta” o “Roadmaps Tecnológicos”¹ no es considerada una herramienta de gestión de la tecnología e innovación que se haya generado recientemente. En la década de los 70, la empresa Motorola, con motivo de disponer de una herramienta para la planificación de asuntos tecnológicos al interior de la empresa, cuyo objetivo fuera alinear el desarrollo de productos con el de sus necesidades de tecnología de apoyo, determinando de esta manera, los mejores caminos para abordar mercados futuros, fue creado el Roadmapping y el Roadmap en cuestión (Fundación Chile,2016).

Un Roadmap es el resultado de procesos de Roadmapping, y trata de reflejar los caminos que guiarán a la empresa desde una posición actual a un destino deseado. Cuando se habla de Roadmap, se toma generalmente la forma de una representación gráfica simplificada (Visual) que proporciona una visión estratégica de alto nivel sobre el tema o foco de interés que está analizando, soportado por una adecuada documentación. Dicho de otra manera, un Roadmap representa la plasmación de la estrategia de innovación reflejando los hitos u objetivos de todas las perspectivas de análisis que se consideran en dicha estrategia (Gipuzkoa Berritzen- Innobasque,2011).

Con Roadmapping, se está mencionando el proceso de reflexión o diseño que se sigue para establecer un Roadmap, reflejando de esta manera, la arquitectura del Roadmap. El proceso de Roadmapping, según la aproximación de la metodología “T-Plan”, está compuesta por cuatro sesiones de trabajo. Las tres primeras abordan las capas principales de un Roadmap: 1) mercado y negocio; 2) productos y servicios;3) tecnología

¹ A lo largo del estudio se utilizará indistintamente los vocablos Hoja de ruta o Roadmap. Por simplicidad, se acota la palabra Roadmap Tecnológico a Roadmap respectivamente.

y 4) recursos. La jornada final integra los resultados de las tres anteriores y produce la hoja de ruta o “Roadmap”. (Gipuzkoa Berritzen- Innobasque,2011).

Según McKinsey & Company (2017), un Roadmap efectivo vincula estrechamente la estrategia corporativa con la gestión del portafolio y la ejecución de los proyectos (Ver Figura 2). Además, un Roadmap pueden generar ventajas vitales a las empresas, generando los siguientes beneficios:

- Desarrollar correctamente las tecnologías, capacidades y estructuras organizacionales en el momento adecuado, para satisfacer a los clientes en sus cambios de necesidades y preferencias.
- Aumentar los retornos de las inversiones en tecnología, por el mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, los cuales son orientados principalmente en las tecnologías que tienen una mayor probabilidad de ser desarrolladas.
- Mejorar la transparencia del negocio, ya que se identifica la dirección (dónde van) y en qué se destinan las inversiones.
- Crear consensos en los planes de innovación y fomentar el aprendizaje teniendo en cuenta experiencias innovadoras ocurridas a través de las diferentes partes de la organización empresarial.
- Coordinar actividades de desarrollo de productos entre la empresa productora y sus clientes, alineando los recursos y capacidades de las partes involucradas en la innovación de largo plazo y los planes de proyectos.
- Fomentar una comunicación clara y precisa sobre los proyectos tecnológicos entre los stakeholders.



Figura 2 Pirámide de planificación.

Fuente: McKinsey & Company (2017).

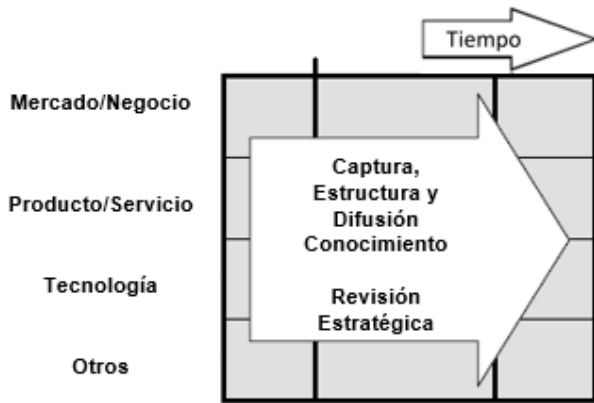
De la Figura 2, se puede destacar que un Roadmap tiene el objetivo de conectar el estrato alto de la pirámide de planificación con la realidad de la empresa, por lo que su correcto desarrollo puede ser clave, para obtener los beneficios mencionados anteriormente.

1.5.1 Estructuración de un RoadMap

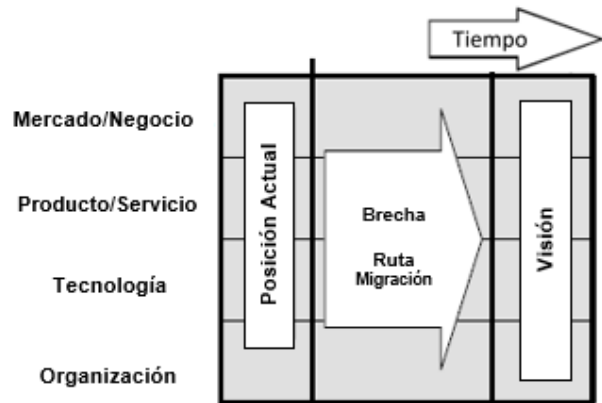
La estructura de un Roadmap depende del objetivo y la necesidad particular para la cual fue creado. Existen Roadmaps con motivos de valorización estratégica, reconfiguración de negocios, planificación de productos tecnológicos, procesos de desarrollos, desarrollo de redes de investigación y perspectivas de un sector particular (ver Figura 3).

En cuanto a la estructura típica de un Roadmap, se considera que el marco más flexible comprende un gráfico de dos ejes: un eje vertical que recoge en forma de capas y subcapas las diversas perspectivas de análisis (3 capas estándar: Mercado, Producto-servicio y Tecnología) , y el eje horizontal refleja la variable tiempo, donde se generan los distintos tramos que representan, generalmente, el corto, mediano y largo plazo (en el

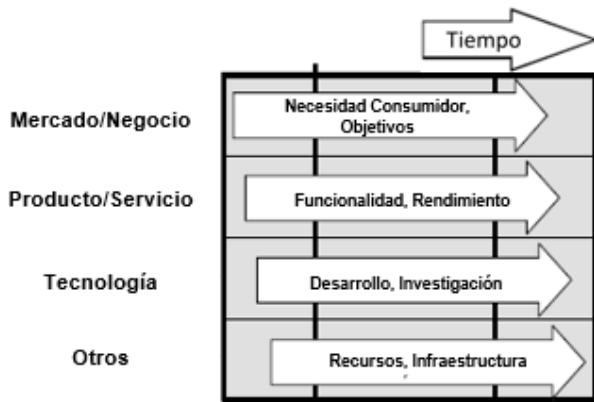
caso de estudio H1:2020-2022;H2:2023-2025) y H3:2026-2030 respectivamente) (Gipuzkoa Berritzen- Innobasque,2011).



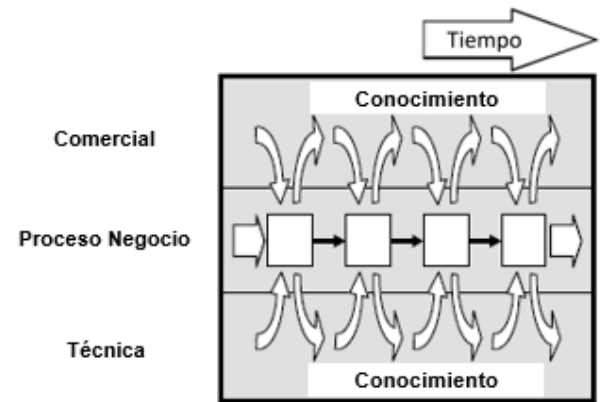
a) Valorización estratégica.



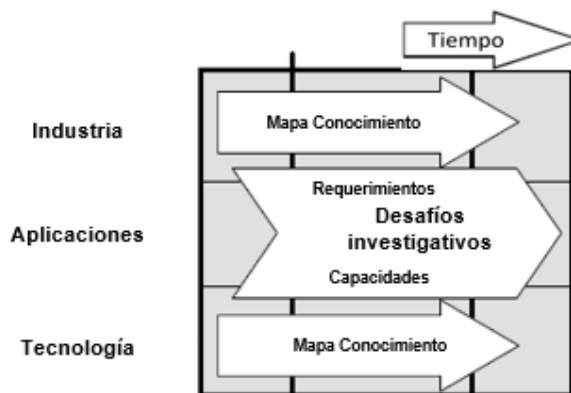
b) Reconfiguración de negocios.



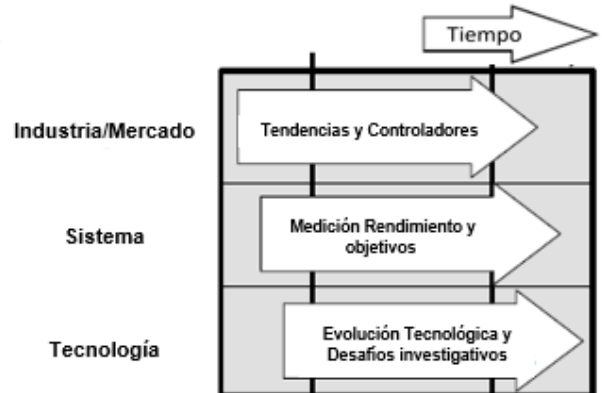
c) Planificación de productos tecnológicos.



d) Proceso de desarrollos.



e) Desarrollo de redes de investigación.



f) Perspectivas de un sector particular.

Figura 3 Ejemplos esquemáticos RoadMaps personalizadas.

Fuente: Probert *et al.* (2003).

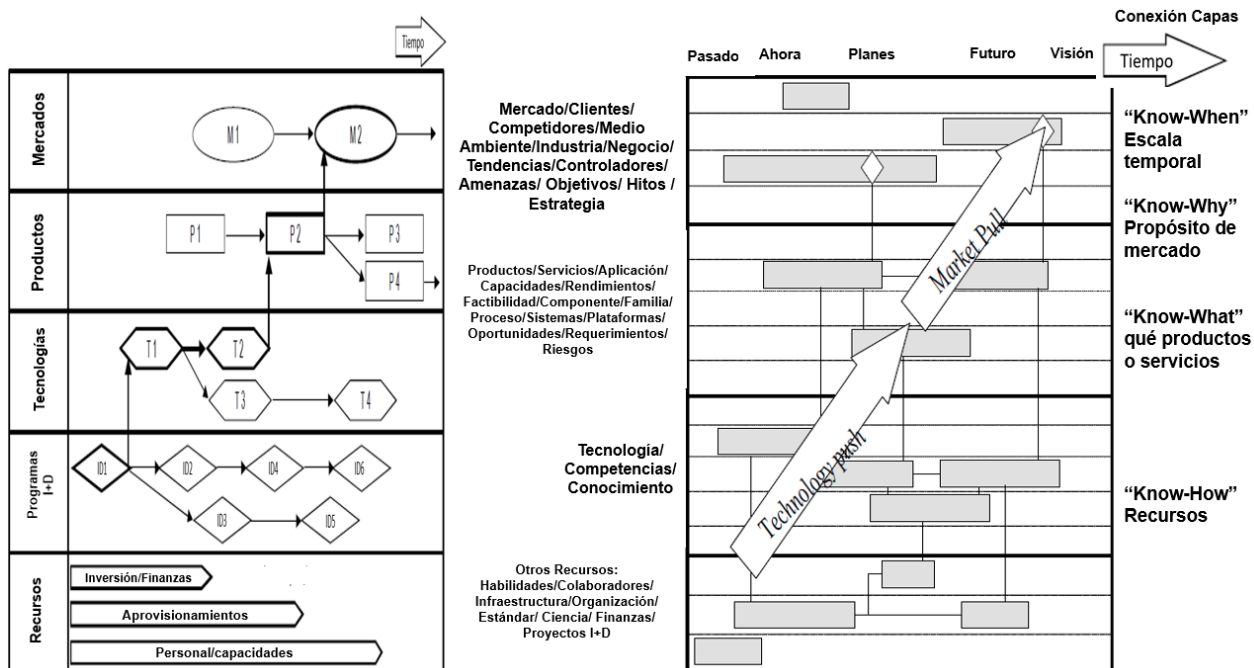


Figura 4 Estructura típica de un Roadmap.

Fuente: Probert *et al.* (2003).

De la Figura 4, se puede destacar que un Roadmap típico puede contener una cantidad importante de información, por lo que la síntesis y la pertinencia de lo expuesto en su estructura es clave para obtener la efectividad deseada. Las relaciones entre los productos, la tecnología, programas I+D y recursos deben estar claramente señaladas teniendo en cuenta la escala temporal, los propósitos del mercado, que productos o servicios están involucrados, el capital de inversión disponible, el modo de aprovisionar las distintas actividades y el personal con sus respectivas capacidades. Los conceptos de “Technology push” y “Market pull” serán desarrollados en la sección 1.6.5 Conceptos de Market pull & Technology pus.

1.6 Conceptualización de Innovación y Tecnología

Dentro de la literatura y la industria minera en general, los conceptos de innovación y tecnología poseen definiciones diferentes, son confundidos frecuentemente o tratados de la misma manera, por lo que, para el presente estudio, se hace necesario precisar que se entiende con estos conceptos.

1.6.1 Innovación

Una innovación es la introducción de un nuevo, o significativamente mejorado, bien o servicio (producto), de un proceso, de un nuevo método de comercialización o de un nuevo método organizativo, en las prácticas internas de la empresa, la organización del lugar de trabajo o las relaciones exteriores. Las actividades innovadoras se corresponden con todas las operaciones científicas, tecnológicas, organizativas, financieras y comerciales que conducen efectivamente, o tienen por objeto conducir, a la introducción de innovaciones.

Las actividades de innovación incluyen también las de I+D² que no están directamente vinculadas a la introducción de una innovación particular. Una característica común a todos los tipos de innovación es que deben haber sido introducidas. Se dice que un nuevo producto (o mejorado) se ha introducido cuando ha sido lanzado al mercado (OECD and European Communities, 2005).

Según la OECD and European Communities (2005), existen distintos tipos de innovación si se analiza desde el punto de vista del resultado:

- **Innovación de producto:** Corresponde a la introducción de un bien o de un servicio nuevo, o significativamente mejorado, en cuanto a sus características o en cuanto al uso al que se destina. Esta definición incluye la mejora significativa de las características técnicas, de los componentes y los materiales, de la informática integrada, de la facilidad de uso u otras características funcionales. Los nuevos productos son bienes y servicios que difieren significativamente, desde el punto de vista de sus características o el uso al cual se destinan, de los productos preexistentes en la empresa. Las mejoras significativas de productos existentes se producen cuando se introducen cambios en los materiales, componentes u otras características que hacen que estos productos tengan un mejor rendimiento (caso LHD híbrido que se expone en secciones posteriores).
- **Innovación en procesos:** Corresponde a la implementación de un nuevo o significativamente mejorado proceso de producción, método de distribución o

² Según MINECON (2017), I+D comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones. Si se agrega la innovación (I+D+i), se considera la actividad en la que la ciencia y la tecnología trabajan juntas para la consecución de un objetivo común.

actividad de soporte para los bienes o servicios. Ello implica cambios significativos en las técnicas, los materiales y/o los programas informáticos. Las innovaciones de proceso incluyen también las nuevas o mejoradas técnicas, los equipos y los programas informáticos utilizados en las actividades auxiliares de apoyo tales como las compras, la contabilidad, el cálculo o el mantenimiento, tecnologías de la información y la comunicación (TIC) que pueden estar destinadas a mejorar la eficiencia y/o la calidad de una actividad en específico.

- **Innovación en gestión organizativa:** Corresponde a la introducción de una nueva metodología en la práctica del negocio (incluyendo administración del conocimiento), la organización del lugar de trabajo o las relaciones externas que no han sido usadas en la empresa anteriormente.

Este tipo de innovaciones pueden tener el objetivo de mejorar los resultados de la empresa reduciendo los costos administrativos o de transacción, mejorando el nivel de satisfacción en el trabajo (aumentando así la productividad), facilitando el acceso a bienes no comercializados (como el conocimiento externo no catalogado) o reduciendo los costes de los suministros.

- **Innovación en marketing:** Corresponde a la implementación de un nuevo concepto de marketing o estrategia que difiere significativamente del método de marketing existente en la empresa y el cual no ha sido utilizado antes. Las innovaciones de empaque o embalaje, las innovaciones de diseño y las mejoras sustanciales en los métodos de distribución forman parte de las innovaciones de marketing. Este tipo de innovaciones tratan de satisfacer de mejor manera las necesidades de los consumidores, de abrir nuevos mercados o de posicionar en el mercado de una nueva manera un producto de la empresa con el fin de aumentar las ventas.

Con respecto a los tipos de innovación, se quiere mencionar que, para el desarrollo de este estudio, los dos tipos de innovación más importantes son la innovación en productos y la innovación en procesos, considerando relevante la distinción entre ellas.

Nuevamente según la OCDE and European Communities (2005), refiriéndose netamente a lo que son bienes, la distinción entre productos y procesos no plantea problema. En cambio, cuando se trata de servicios, la distinción no queda necesariamente clara, ya que

la producción, el suministro y el consumo de numerosos servicios pueden producirse simultáneamente. De este modo, se consideran las siguientes directrices:

- Si la innovación implica características nuevas, o significativamente mejoradas, del servicio propuesto a los clientes, es una innovación de producto.
- Si la innovación implica la utilización de métodos, de equipos y/o de unos conocimientos nuevos o significativamente mejorados para prestar el servicio, es una innovación de proceso.
- Si la innovación implica mejoras significativas, a la vez, de las características del servicio prestado y los métodos, equipos y/o conocimientos utilizados para esta prestación, es una innovación de producto y de proceso.

1.6.2 Tecnología

La tecnología tiene un rol fundamental en desarrollo de las operaciones mineras actuales y del futuro, ejemplo de ello son los avances en temas referentes a la automatización y electromovilidad, que apuntan principalmente a incrementar los niveles de seguridad en las operaciones, reduciendo la exposición de los trabajadores a labores peligrosas, la reducción de costos operacionales por la disminución de requerimientos de ventilación y el menor consumo de combustible del tipo diésel y aumentos en productividad por mejoras tecnológicas, que permiten disponer de equipos más eficientes y con mayores disponibilidades.

Por otro parte, cada vez es más frecuente la incorporación de digitalización y programas computacionales para apoyar los procesos mineros. Centros de innovación y centros integrados de operaciones protagonizan nuevas oportunidades que se abren paso en la industria (Revista Minería Chilena, 2020).

El término tecnología viene del griego τεχνολογία (technología), compuesta de dos partes, τεχνο (techne)=arte, oficio o técnica, y λογος (logos)=discurso, conocimiento o ciencia, podríamos decir que significaría el arte o la técnica de hacer las cosas o de los oficios. De esta manera, se define Tecnología como la “aplicación coordinada del conjunto de conocimientos (ciencia) y habilidades (técnica) para crear un producto tecnológico artificial (creado por la humanidad) o desarrollar una idea; con el fin de resolver un problema técnico o satisfacer necesidades del ser humano” (Vicioli R., 2020).

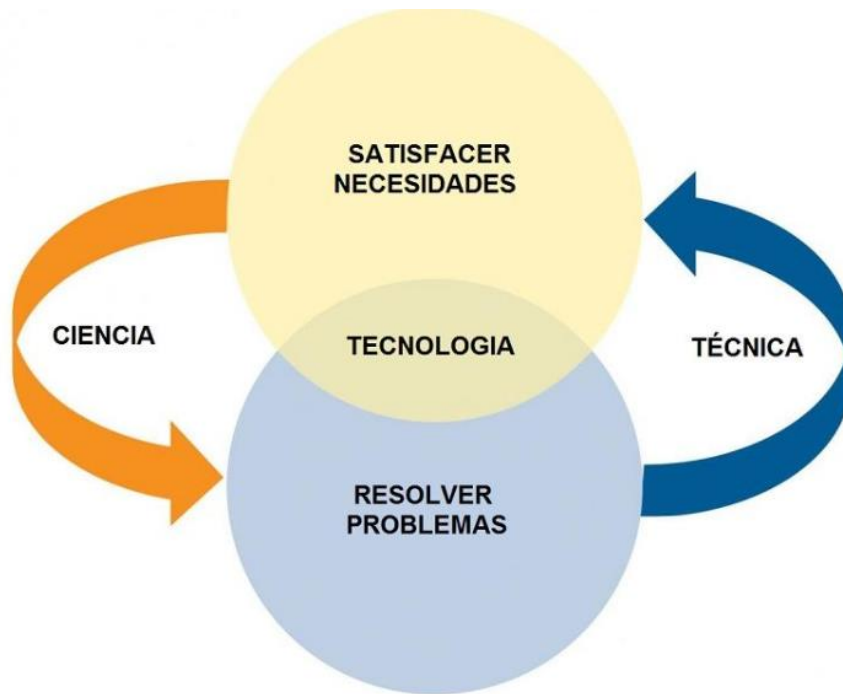


Figura 5 Definición tecnología.

Fuente: Vicioli R. (2020).

De la Figura 5 y de la definición enunciada, se puede mencionar que una persona asociada a tecnología debe tener conocimientos de ciencia³ y de técnica⁴ para entregar soluciones a los problemas tecnológicos. De esta manera, cuando se está hablando de soluciones tecnológicas, se está mencionando a todas aquellas soluciones que tienen como misión producir objetos y desarrollar sistemas que resuelvan los problemas y necesidades del hombre.

1.6.3 Niveles de innovación

En la literatura se utilizan términos variados como los son innovación radical, incremental, realmente nueva, continua, discontinua, evolutiva, imitativa, disruptiva, técnica, mejorada, arquitectónica, revolucionaria, generacional, entre otras (García R. & Calantone R., 2002).

³ La ciencia es el conjunto de conocimientos adquiridos como resultado de la observación, el razonamiento y la experimentación de hechos concretos.

⁴ La técnica se consigue cuando se encuentra la solución a un problema, es producto de una experiencia empírica.

En esta sección se quiere atender el grado de originalidad, novedad e impacto del proceso de innovación, por lo que el foco se tiene en las innovaciones del tipo incremental y disruptiva.

1.6.3.1 Innovación incremental

La innovación incremental es considerada como los servicios o productos que proporcionan nuevas características, beneficios o mejoras en las tecnologías existentes en el mercado, representan mejoras graduales en la eficiencia, seguridad y aspecto de los procesos involucrados. Implica cambios restringidos en la industria en que está inmersa. Este tipo de innovación puede generar avances tecnológicos desarrollados en un mediano plazo, y cuyos riesgos de investigación y desarrollo (I+D) y aplicación tienden a ser bajos o medios. El tipo de soluciones no implica un cambio significativo en los procesos de producción, pero sí puede tener un mediano-alto impacto en los procesos administrativos (MEIT,2016).

De acuerdo con Markides C. y Geroski P. (2004), tener éxito en mercados establecidos exige una ejecución más acelerada basada en ciclos de innovación incremental, incluso en los mercados en proceso de crecimiento, el vencedor final es la compañía que tiene la mayor capacidad ejecutiva.

1.6.3.2 Innovación disruptiva

Las innovaciones disruptivas son las que implican necesariamente un cambio definitivo de paradigma. Representan cambios radicales de la forma en que se desarrollan los distintos procesos productivos y administrativos. Se desarrollan soluciones complejas con el fin de superar los significativos desafíos técnicos que la industria requiere. Este tipo de innovación tiene lugar en horizontes de tiempo mucho más largos que las innovaciones incrementales (se desarrollan en el mediano-largo plazo), requieren inversiones relevantes, con altos niveles de riesgo (MEIT,2016).

La innovación incremental consiste en utilizar la creatividad dentro de las estrategias existentes y las estructuras de una industria, mientras que la innovación disruptiva consiste en emplear la creatividad para descubrir estrategias, industrias y sociedades nuevas.

Tabla 1 Comparación entre innovación incremental y disruptiva.

Criterio	Innovación Incremental	Innovación Disruptiva
Cambio generado	Mejora incremental	Ruptura radical
Posibilidad de éxito	Mayor	Menor
Rentabilidad	Menor	Mayor
Modo de impulso	Por ejecución	Por descubrimiento
Demanda mercado	Conocida o predecible	Potencialmente elevada pero poco predecible
Riesgo	Bajo	Alto
Posición Competitiva	Mantenión	Creación o cambio de una industria
Recurrencia	Común	Escaza
Adopción en la empresa	Fácil	Difícil
Reconocimiento y aceptación del mercado	Rápido	Lenta, pero rápida reacción de imitación de competidores
Financiación	Basada en presupuestos	Por fases
Tipo evaluación	Análisis financiero	Evaluación cualitativa

Elaboración propia basada en FCA (2012) y Velasco B. (2010).

En relación con lo expuesto en la Tabla 1, se destaca que, si bien la innovación disruptiva presenta menor probabilidad de éxito, posee mayores niveles de incertidumbre, son escasas en su recurrencia, pueden generar cambios trascendentales en una industria y generar una mayor rentabilidad en comparación con la innovación incremental.

Sin embargo, para el desarrollo del presente estudio, la innovación incremental será el eje central dado el mayor volumen de información disponible y el enfoque práctico que se quiere entregar al Roadmap por construir.

1.6.4 Modelo de horizontes tecnológicos

La vinculación de la innovación con la estrategia de la empresa puede ser un factor clave para el éxito.

Según Virtual Consulting International (2013), uno de los métodos que posee mayor efectividad para lograr materializar el éxito es tener una visión de “Mina del futuro” que genere la conexión entre la aspiración comercial y los objetivos estratégicos, para luego utilizar esta estructura para gestionar los programas de innovación. Cada visión de futuro proporciona un abanico de tecnologías, sistemas, recursos humanos y Roadmaps de cambio que trascienden al corto plazo.

Cuando se estructura de esta manera, la visión genera 3 niveles que permiten que el negocio sea visualizado de distintos modos: uno considerando la minería de la próxima generación y otro enfocado a las mejoras de las operaciones en la actualidad (Ver Figura 6).

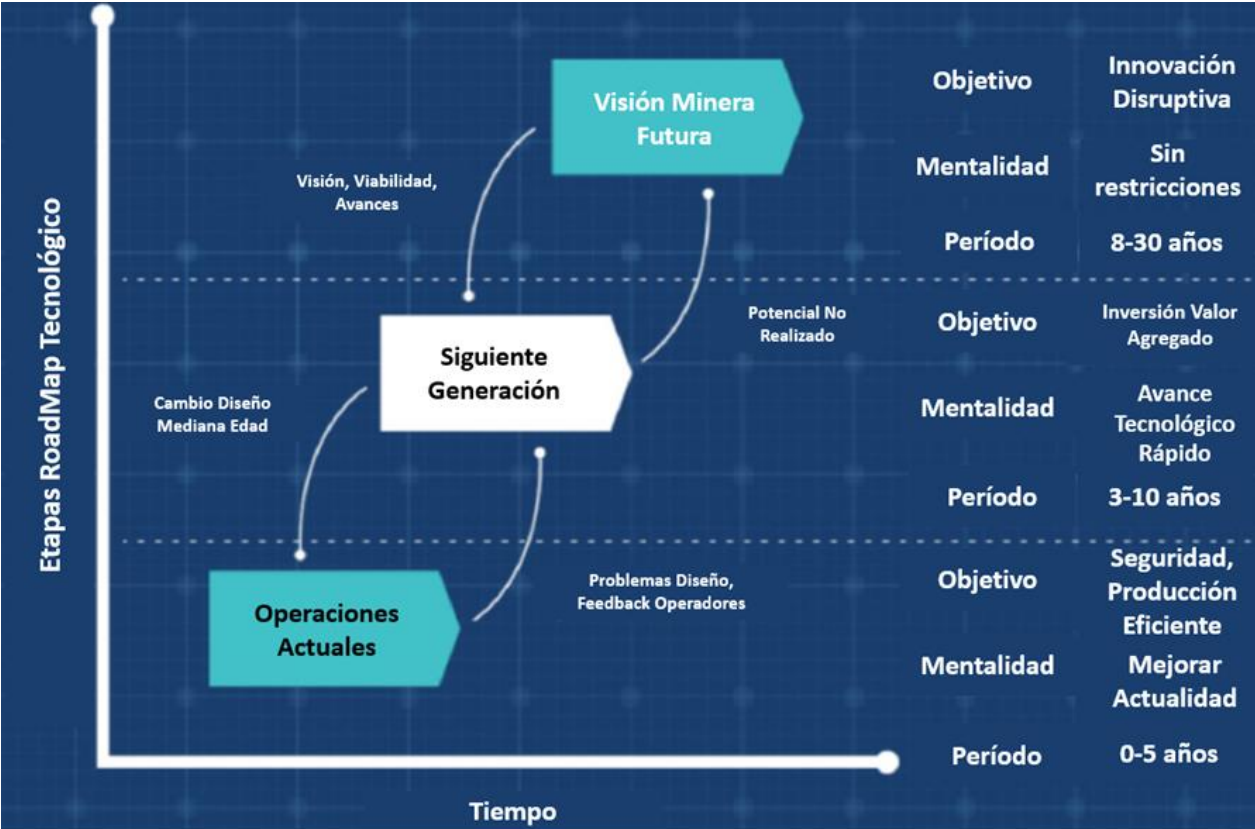


Figura 6 Estructura de mina futura escalonada.

Adaptado de Virtual Consulting International (2013) y MEIT (2016).

El elemento clave es tener conocimientos e innovaciones implementables en cascada en los niveles inferiores. Simultáneamente, los aprendizajes y desafíos clave de la parte baja, se pueden ver reflejados en los niveles superiores traducidos en desafíos de innovación. Una vez establecida la visión minera de futuro, ésta se puede traducir fácilmente en fases y etapas reflejadas en un Roadmap, donde se destacan los proyectos de toda la empresa. El Roadmap puede ser crítico para tener éxito en la gestión e implementación de programas de innovación, ya que proporciona un "plan maestro" o una visión sistémica de proyectos clave para cumplir con la estrategia empresarial, permitiendo así una mejor financiación y una gestión más focalizada.

Desde la perspectiva de McKinsey & Company (2009), el enfoque de los tres horizontes ilustra el cómo gestionar el rendimiento actual al tiempo que maximiza las oportunidades futuras de crecimiento para el negocio. Los tres horizontes se pueden visualizar en la siguiente figura:



Figura 7 Tres horizontes de crecimiento.

Adaptado de McKinsey & Company (2009) y MEIT (2016).

A partir de la Figura 7, se puede destacar la existencia de distintos horizontes que se definen a continuación:

- **Horizonte 1 o de innovaciones incrementales(H1):** Da cuenta del negocio central (Core business) de la empresa, el cual se busca extender y defender, con tecnologías que entregan mayores ganancias y flujo de caja con bajos niveles de riesgo. En este horizonte el objetivo es mejorar el rendimiento para maximizar el valor restante. Se conceptualizan los desarrollos claves en I+D y se determinan los recursos para

abordar los desafíos conocidos utilizando tecnologías y equipos existentes y probados. El horizonte tiene su inicio en el estado actual de la empresa y finaliza en los denominados “cambios incrementales”.

- **Horizonte 2 o de mejoras importantes de los procesos existentes y de nuevas tecnologías (H2):** Este horizonte abarca oportunidades emergentes, que incluyen el aumento de emprendimientos empresariales con bajo a mediano riesgo y que tienen el potencial de generar ganancias sustanciales en el futuro, pero que podrían requerir una inversión considerable. Se requiere modelos colaborativos de investigación e de investigación y desarrollo. Este horizonte comienza con el estado de "Cambios incrementales" y finaliza en el denominado "Estado medio".
- **Horizonte 3 o cambio de dirección (H3):** Este horizonte contiene ideas para un crecimiento rentable en el futuro, considerando la formación de pequeñas empresas filiales como proyectos de investigación, programas piloto o participaciones minoritarias en nuevos negocios. También se considera la mayor participación de investigadores, tanto de universidades seleccionadas como de proveedores de I+D. El horizonte comienza en el "Estado Medio" y finaliza en el denominado "Estado Final".

El modelo de horizontes es una metodología relevante para la construcción del Roadmap para Komatsu.

1.6.5 Conceptos de Market pull & Technology push

Los conceptos Technology push y Market pull tienen relación con los enfoques de desarrollo que producen los respectivos avances tecnológicos o la ejecución de un proceso cualquiera en relación con la economía. El tener claridad frente a cuál de los dos conceptos se está formulando la estrategia de la empresa, permite asignar de manera eficiente los recursos disponibles, determinar los riesgos asociados a los desafíos tecnológicos, el nivel de las inversiones necesarias, entre otros factores.

1.6.5.1 Market pull

También denominado “Demand pull” o “Need pull” el concepto hace referencia a un escenario donde el mercado promueve y exige un determinado tipo de producto o servicio, definiendo un problema, mientras los productores generan las posibles alternativas para satisfacer la necesidad de ese producto (o servicio). Las aspiraciones y

deseos del mercado se encuentran bien delimitadas, por lo que es posible calcular con mayores certezas, tanto la oferta como la demanda del producto. Los productores centran su negocio en entregar el producto demandado por el mercado. Este enfoque de desarrollo se caracteriza principalmente por centrarse en la percepción de qué productos o servicios quiere el cliente. El cliente posee un importante poder de mercado, ya que define la solución y educa al productor (Dixon J., 2001).

Cabe mencionar que el concepto Market pull se relaciona directamente con las innovaciones del tipo incremental que buscan generar mejoras graduales en la eficiencia, seguridad y aspecto de los procesos involucrados, enfocadas en el Core business de los clientes.

1.6.5.2 Technology push

El concepto hace referencia al estímulo de generar nuevos productos, servicios o procesos que provienen de la investigación y desarrollo (interna o externa), producción y ventas, donde el objetivo es hacer uso comercial de nuevos conocimientos. Este enfoque no se centra necesariamente en necesidades de los consumidores presentes en el mercado. Su horizonte se basa en “crear una necesidad no identificada” por el mercado y que puede redefinir y en algunos casos revolucionar completamente una industria o crear una nueva (Brem A. and Voigt K., 2009).

Cabe mencionar que el concepto Technology push se relaciona directamente con las innovaciones del tipo disruptivas que buscan generar un cambio de paradigma definitivo.

A modo de comparación entre los dos conceptos, se muestra la siguiente tabla:

Tabla 2 Comparación entre Market pull y Technology push.

Parámetro	Market pull	Technology push
Decisión de negocio	Segura	Riesgosa
Riesgo	Bajo a moderado	Moderado a alto
Inversiones	Bajo a moderado	Moderado a alto
Esfuerzos	Bajo a moderado	Moderado a alto
Costos en I+D	Bajo a moderado	Moderado a alto
Retornos de Inversión	Más seguro	Menos seguro
Mercado consolidado	Si	Creíble, pero con incerteza
Marketing	Fácil a moderado	Remodelar el mercado
Crecimiento del producto	Pequeñas chances	Grandes chances
Zona de Confort	En el centro	Fuera de vista
Competencias centrales	Si	Desarrollo nuevas competencias
Visión	Mejorar lo existente	Crear nuevos paradigmas
Foco	Productos	Solución de funciones
Innovación	Incremental	Disruptiva

Adaptado de Dixon J. (2001).

De la Tabla 2, se puede destacar que el modelo de Market pull representa ser una opción de mayor factibilidad de aplicación que el Technology push, ya que presenta menores incertezas, sus niveles de riesgo son menores, los costos de desarrolla también lo son y las inversiones necesarias requieren recursos de baja a moderada magnitud, por lo que se puede ajustar de mejor manera a las innovaciones del tipo incrementales en el corto-mediano plazo. Sin embargo, el modelo Technology push de ser materializado, puede entregar mayores utilidades a las empresas y dejar obsoletas las tecnologías actuales, por lo que el monitorio constante de las macrotendencias, los principales desafíos al largo plazo y la inversión selectiva en nuevas tecnologías, puede ser un factor determinante para una empresa en particular, por lo que se puede destacar que el Technology push se ajusta de mejor manera a las innovaciones del tipo disruptiva en el largo plazo.

En el contexto de este estudio, se utilizan ambos conceptos, Market pull para las innovaciones incrementales desarrolladas en el corto-mediano plazo principalmente en los horizontes H1 y H2 (2020-2025) y el concepto Technology push para las innovaciones disruptivas concentradas en el largo plazo, en el horizonte H3 (2025-2030).

1.7 Antecedentes de Komatsu

1.7.1 Antecedentes históricos de Komatsu

Komatsu fue fundada en 1921 por Meitaro Takeuchi, a partir de la empresa Takeuchi Mining Industry, con motivo de especializar la fabricación de maquinarias para la minería. El origen del nombre de la compañía proviene de la ciudad del mismo nombre ubicada en la Prefectura de Ishikawa, región de Hokuriku en Japón. Komatsu se traduce al español como “pequeño árbol de pino” y, según la leyenda, se remonta a mediados del período Heian (794-1192). En ese momento, el monje-emperador Kazan plantó un pino joven durante una gira por la región de Hokuriku, y el área donde creció llegó a ser llamado “sono sin Komatsubara” (“campo de pequeños pinos con jardines”) (Komatsu Latinoamérica, 2014).

Komatsu está establecida en Chile desde el año 1999 como resultado de la alianza comercial estratégica entre Komatsu Limited (fabricación de maquinaria pesada) y Cummins Inc. (empresa dedicada al rubro de los motores y generadores diésel), formando así el grupo Komatsu Cumming, con el propósito de ser los primeros en el mercado, incorporando experiencia, tecnología de vanguardia, soporte, eficiencia e innovación en la industria chilena. (Komatsu Cummins,2018).

En 2017, Komatsu concreta la compra de la compañía norteamericana Joy Global, de esta forma la compañía pasa a llamarse Komatsu Mining Corp. Con esta adquisición, Komatsu integra como parte de sus líneas de negocio la minería subterránea y se transforma en uno de los principales proveedores de la minería mundial, contando en su portafolio con equipos para todas las principales operaciones unitarias en minería.

El Grupo Komatsu está formado por Komatsu Ltd. y otras 257 empresas. Dentro de la historia de adquisiciones de empresas que ha tenido Komatsu a lo largo de su historia se destacan los siguientes hitos:

- En 1994, Harnischfeger Industries (posteriormente conocida como P&H Mining Equipment) adquiere Joy Mining Machinery. Las dos compañías continúan operando independientemente. P&H Mining Equipment es una empresa que diseña, construye y respalda líneas de maquinaria de perforación y manejo de materiales, aplicada a

minería a cielo abierto y energía. Por su parte Joy Mining Machinery, fue una empresa especializada en operaciones de minería subterránea.

- **Adquisición Continental Global Inc.:** En 2008, se adquiere esta empresa, la cual se enfocaba en el desarrollo de sistemas de cintas transportadoras para el transporte de material a granel orientado a aplicaciones mineras e industriales. Los sistemas de cintas transportadoras de esta empresa se especializan en transportar carbón, mineral de hierro, yeso, materiales inertes, y otros materiales a granel, como cemento, cal, productos alimenticios y desechos industriales. Sus productos fueron utilizados en aplicaciones mineras en trabajos subterráneos en general, sobre superficie, en túneles, curvas, para trabajo pesado, minas a cielo abierto. La compañía también ofrece servicios directos y tecnologías, como software de simulación para cintas transportadoras.
- **Fusión P&H Mining Equipment y Joy Mining Machinery:** En 2012 estas 2 grandes marcas se fusionan y se convierten en Joy Global.
- **Adquisición de Montabert por Joy Global Inc.:** Esta empresa es adquirida por Joy Global en 2015. Montabert se caracteriza por fabricar equipos hidráulicos de demolición, rompedores de rocas para trabajo liviano, medio y pesado, herramientas para triturado de rocas, martillos perforadores hidráulicos y accesorios de perforación.
- **Adquisición de Joy Global Inc. por Komatsu:** En 2017, Komatsu America Corp., una subsidiaria de Komatsu Ltd., completa la adquisición de Joy Global Inc., incorporando las soluciones de P&H, Joy y Montabert a la oferta de Komatsu.

La importancia de esta adquisición radica en que, en la actualidad, Komatsu tiene a disposición de sus clientes una gama completa de soluciones tecnológicas tanto para minería de superficie como subterránea de los más altos niveles presentes en el mercado.

1.7.2 Perfil corporativo de Komatsu⁵

Komatsu es considerado uno de los mayores proveedores de equipos mineros en el mundo. Según la información oficial de Komatsu Ltd. (2019), se tiene el siguiente perfil corporativo:

⁵ En el desarrollo del estudio la coma (",") representa separación de miles y el punto (".") representa separación decimal, de acuerdo con la nomenclatura de Estados Unidos.

- **Nombre de la Compañía:**
 - Komatsu Ltd.
- **Presidente ejecutivo:**
 - Hiroyuki Ogawa.
- **Negocios principales:**
 - Fabricación y venta de equipos de construcción y minería, servicios, maquinaria industrial y forestal.
- **Número de trabajadores:**
 - Consolidados: 61,908 personas.
 - No-consolidados: 11,537 personas.
- **Acciones comunes:**
 - Consolidadas: 635.087367 [MUSD].
 - No Consolidadas: 656.005617 [MUSD].
 - Número total de acciones emitidas y pendientes: 72,252,460 compartidas.
 - Número de accionistas: 193,434.
- **Grupo Komatsu consiste en Komatsu Ltda. y otras 257 compañías:**
 - 215 Compañías consolidadas subsidiarias.
 - 42 Empresas contabilizadas por el método de participación.
 - 1 Komatsu Ltda.
- **Número de operaciones:**
 - 84 Operaciones de fabricación de equipos de construcción, minería y servicios públicos.
 - 57 Operaciones de venta de equipos de construcción, minería y servicios públicos.
- **Distribución operaciones de Komatsu:**

Se destaca que Komatsu es una empresa que tiene una importante presencia en todos los continentes, lo que ratifica su rol de proveedor de clase mundial. Se destaca que la mayor cantidad de operaciones se ubican en América, a excepción de los centros de entrenamiento y centros de Reman⁶ y Reconstrucción. En particular en

⁶ Reman es una abreviación de la palabra remanufacturing que en español significa remanufactura.

Chile, la concentración de las operaciones se tiene en las ciudades de Santiago y Antofagasta:

- Santiago: 3 Centros de Ventas (Komatsu Holdings South America Ltda., Komatsu Cummins Chile Ltda., y Komatsu Cummins Chile Arrienda S.A.), 1 Centro de Entrenamiento y 1 Centro de Piezas.
- Antofagasta: 1 Centro de Fabricación (Komatsu Mining Corp.), 1 Centro de Piezas y 1 Centro Reman y Reconstrucción.



Figura 8 Ubicación de operaciones globales.

Elaboración propia basado en Komatsu Ltd. (2019).

- Ventas netas año fiscal 2018: 25,344.36 [MUSD].

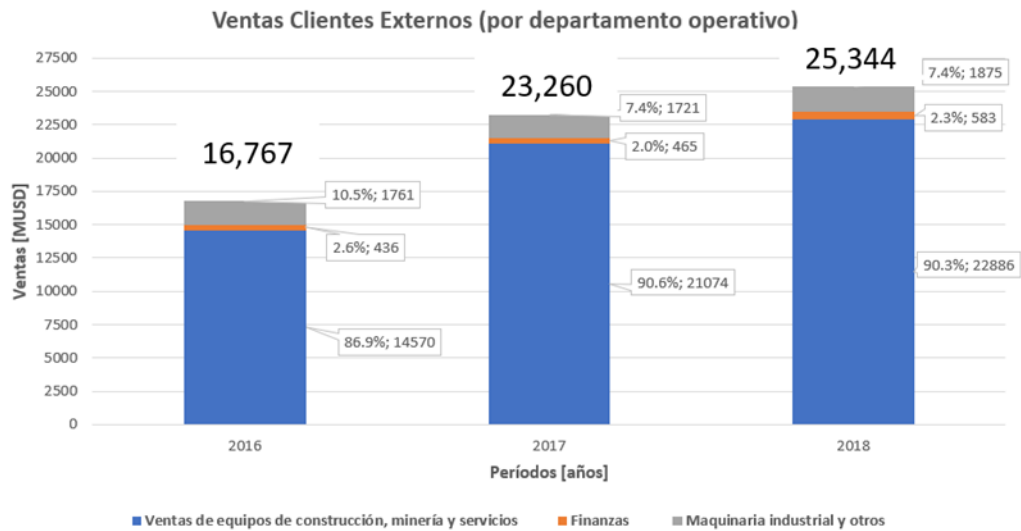


Figura 9 Ventas a clientes externos (por departamentos operativos).

Elaboración propia basada en Komatsu Ltd. (2019).

A partir de la Figura 9, se puede destacar que el mayor porcentaje de las ventas de Komatsu corresponde al departamento operativo de ventas de equipos de construcción, minería y servicios y las ventas netas han aumentado entre el 2016 al 2018 (de 16,767 [MUSD] a 25,344 [MUSD]).

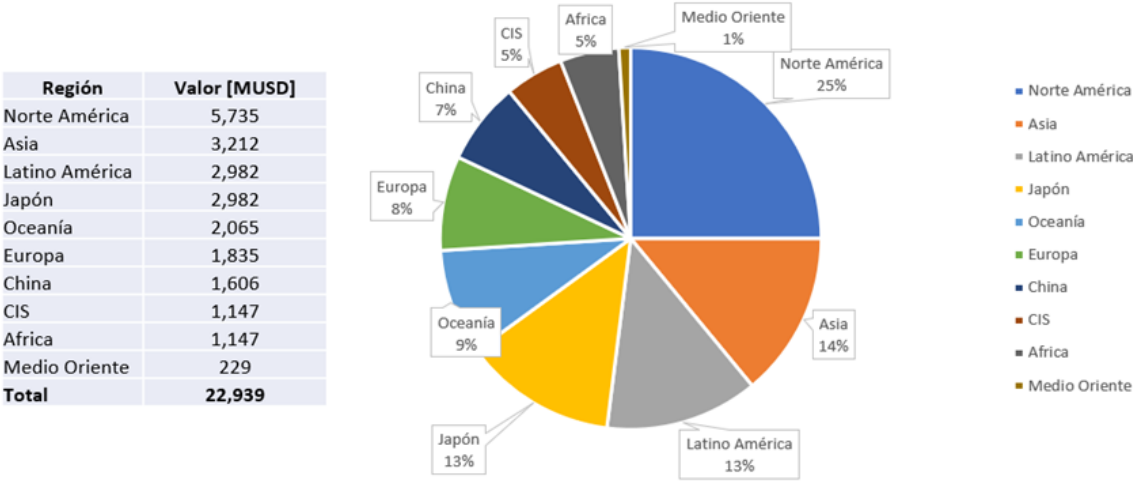


Figura 10 Ventas de equipos de construcción, minería y servicios por región.

Elaboración propia basado en Komatsu Ltd. (2019).

A partir de la Figura 10, se puede destacar que el mercado más importante para Komatsu es Norte América, con el 25% de sus ventas en equipos de construcción, minería y servicios. Por otra parte, el caso latinoamericano, que involucra a Chile, representa un porcentaje del 13%, lo que indica la relevancia que tiene el mercado latinoamericano para Komatsu con aproximadamente 3 mil millones de dólares en ventas.

1.7.3 Declaración de Valores “Principios K- Way” y “Productos Dantotsu”

Los principales principios que movilizan a la empresa Komatsu son:

- Compromiso con la calidad y la confiabilidad: La calidad de los productos y servicios es la principal prioridad, no se hace concesiones en temas de calidad.
- Orientación al cliente: Se valora el trabajo en conjunto y la opinión de los clientes, para satisfacer de esta manera sus necesidades mejorando su negocio.
- Definición de la causa raíz: Foco en identificación del génesis de los problemas, para determinar con confianza el origen y evitar su repetición.

- Filosofía del lugar de trabajo (GEMBA): El lugar donde suceden las cosas, es en términos operativos donde se crea o entrega valor a los productos o servicios, permitiendo la mejora continua de la empresa.
- Implementación de políticas: Rapidez y eficiencia en la implementación.
- Colaboración con socios comerciales: Ser un socio estratégico que permita solucionar problemas en común y mejorar prácticas operacionales, mejorando así el negocio.
- Desarrollo de recursos humanos: Las personas son lo más valioso de la empresa, mientras ellas más crezcan o aprendan, la empresa se beneficia de mejor forma.

Como visión para el desarrollo de productos, Komatsu utiliza la expresión japonesa “Dantotsu”, que significa “único y sin rival”. De esta forma, la empresa busca generar una ventaja competitiva en el mercado de equipos mineros de unos 3 a 4 años, considerando los requerimientos de la industria, focalizando los recursos en soluciones integrales. Ejemplo de estos son el LHD híbrido en minería subterránea, el camión minero autónomo sin cabina en minería a cielo abierto y el DynaMiner para llegar a concretar una minería continua.

1.8 Auge Minería Subterránea en el mundo

Una de las Macrotendencias presentes en la industria minera es el auge la minería subterránea masiva, principalmente, porque muchas de las operaciones que tenían su método de explotación por minería a cielo abierto han dejado de ser rentables por la profundización de la operación que conduce al aumento de los costos operacionales. De esta manera, muchas de las operaciones a cielo abierto están migrando a operaciones subterráneas masivas (MEIT, 2013).



Figura 11 Auge minería subterránea.

Adaptado de MEIT (2013).

A partir de la Figura 11 se puede destacar que entre los años 2020 y 2032 la proporción de la producción de la minería subterránea se aproxima fuertemente a la minería a cielo abierto.

1.8.1 Explotación de Macro Bloques y Columnas de explotación de gran altura en Block/Panel caving

Los métodos de explotación de minería masiva por Block/Panel caving han sufrido una constante evolución a lo largo del tiempo.

El concepto de Macrobloques fue desarrollado como una extensión del método de Block caving, incorporando experiencias actuales de Codelco en la explotación de Block/Panel caving, especialmente en la gestión de operaciones mineras, geomecánica y temas que se relacionan con la geometría del cuerpo mineralizado. Cada Macrobloque es un área productiva independiente, donde la explotación se lleva a cabo de manera discreta e independiente a través de grandes áreas productivas (24,000-39,000 [m²]) dejando un pilar entre cada Macrobloque para evitar problemas geotécnicos (Gómez R. y Labbé E., 2019).

La nueva configuración por Macrobloques inició su aplicación en la Mina Chuquicamata Subterránea, la cual considera una alta tasa de producción de 140,000 [t/d], teniendo que preparar un área inicial de 102,000 [m²] (400 puntos de extracción) para el primer año productivo y un promedio de 70,000 [m² /año], para el resto de la producción horizonte (Fuentes S. and Villegas F., 2014).

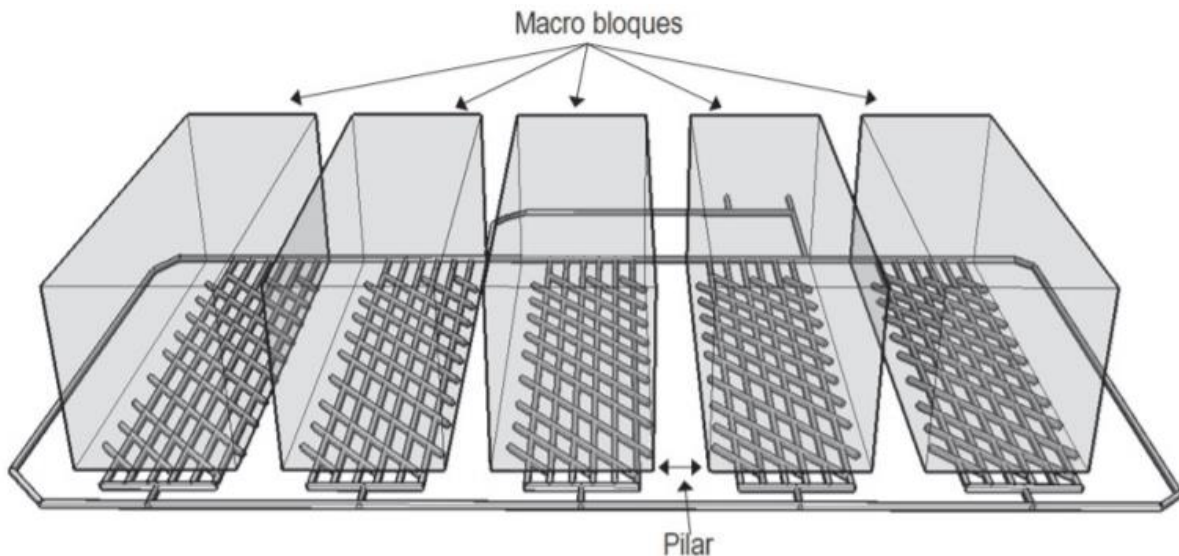


Figura 12 Explotación en configuración Macrobloques.

Fuente: Gómez R. y Labbé (2019).

De acuerdo con Gómez R. y Labbé E. (2019), algunas de las oportunidades que el hundimiento por Macrobloques ofrece a la explotación de una mina subterránea son:

- La posibilidad de concentrar actividades similares en áreas limitadas.
- Entregar a producción áreas no expuestas a interferencias de las faenas de socavación y preparación.
- Flexibilidad para adaptar la operación frente a contingencias como colapsos u otros.
- Permite incorporar cambios de diseño desde un bloque a otro (aplicación de nuevas tecnologías, entre otros).

Con respecto a las alturas de columnas, está se relaciona directamente con la obtención de la máxima capacidad productiva en el largo plazo, de ahí surge la necesidad de definir los factores que incentivan o desincentivan el uso de columnas de mayor altitud (Vergara Y., 2014).

De acuerdo con Vergara Y. (2014), los principales incentivos para utilizar mayores alturas de columnas son:

- Reducción de costos de preparación mineral.
- Reducción de costos de reparación de infraestructura y por dilución.
- Poseer mayores máximas capacidades productivas en el largo plazo (manteniendo la velocidad de preparación constante, por ejemplo, la capacidad aumenta en un 100% si se considera una altura de columna de 1,000 [m] en comparación con una de 500 [m]).

De acuerdo con Vergara Y. (2014), las principales limitantes para utilizar mayores alturas de columnas son:

- Aumento de esfuerzos durante la etapa de socavación pudiendo duplicar o incluso triplicar el nivel de esfuerzos original.
- Desvíos de la dirección de propagación del hundimiento.
- Aumenta la probabilidad de estallidos de roca y air blast.

1.9 Antecedentes generales de Codelco División El Teniente

1.9.1 Ubicación geográfica

La faena minera El Teniente, se encuentra ubicada en la cordillera de los Andes en Chile Central, en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Provincia del Cachapoal, aproximadamente a 50 [km] de la ciudad de Rancagua y 73 [km] al sur de la ciudad de Santiago. Sus coordenadas geográficas son 70°21' longitud oeste y 34°14' latitud sur, entre las cotas 2000 y 3200 [m.s.n.m.] (Figura 13).



Figura 13 Ubicación Codelco División El Teniente.

Fuente: Codelco (2011).

1.9.2 Descripción general período actual (2017-2022)

División El Teniente es una faena minera que posee recursos y reservas minerales consideradas mayores a 4,000 [Mt] de mineral con ley de cobre total de 0.96%, lo cual corresponde a más de 35 [Mt] de cobre fino de producción estipulado para el año 2087. Se tiene una producción de 464 mil toneladas anuales de cobre fino, aportando 25 % de la producción total de Codelco. El método de explotación utilizado es del tipo hundimiento por Block/Panel caving, el cual está en operación desde la década del ochenta y también de un rajo que opera desde el año 2013. La producción mina es de 140,000 toneladas por día. La operación comprende las unidades de producción subterránea Pipa Norte, Pacífico Sur, Diablo Regimiento, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pilar Norte y el

depósito a cielo abierto Rajo Sur, así como las plantas concentradoras Colón y Sewell y la fundición Caletones (Codelco-a,2019).

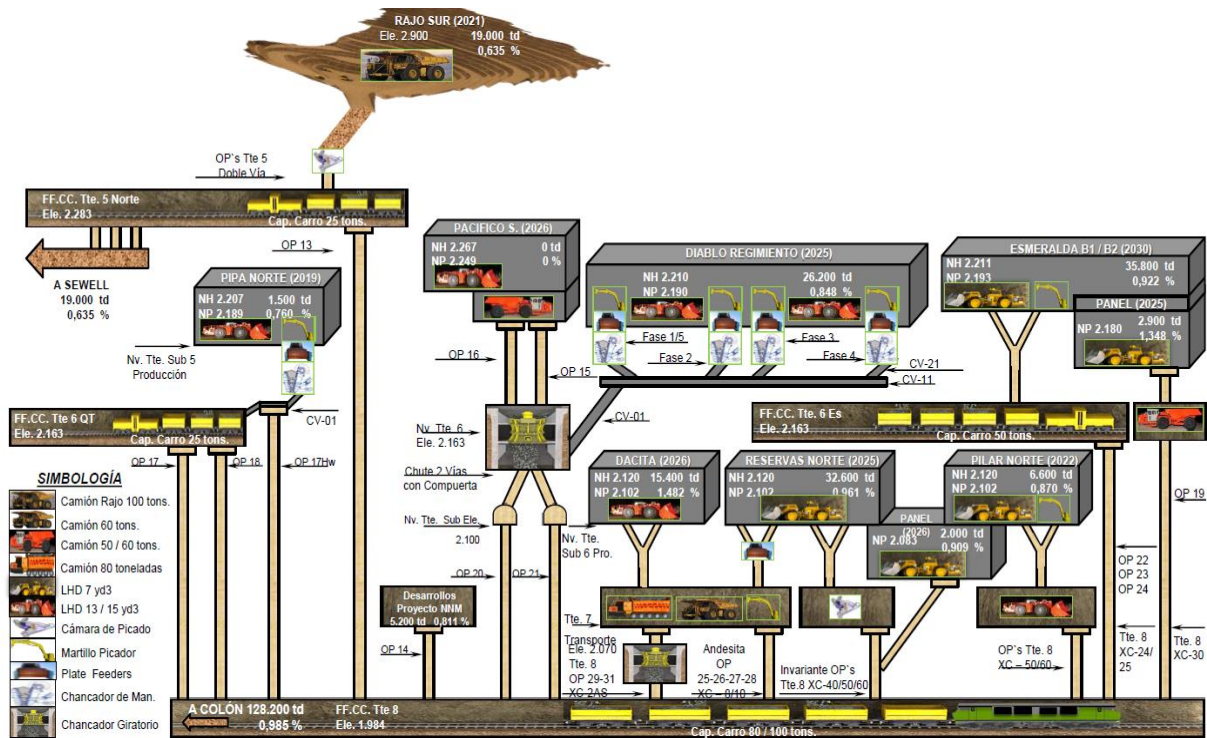


Figura 14 Esquema mina El Teniente operativa.

Fuente: Gerencia de Minas División El Teniente (2019).

A partir de la Figura 14, se puede destacar que El Teniente es un sistema integrado complejo, donde intervienen distintas minas que entregan diferentes tonelajes. Se tiene minería a cielo abierto y minería subterránea. En las minas subterráneas, el transporte de mineral en el nivel de producción de cada mina se hace a través de equipos mecanizados Load Haul Dump (LHD), cuya capacidad varía entre 7 [yd³] y 15 [yd³] (en Diablo Regimiento, Pacífico Sur, Dacita y Pipa Norte se utilizan LHD de 13/15 [yd³], mientras que, en Esmeralda, Reservas Norte y Pilar Norte se utilizan LHD de 7 [yd³]).

Dependiendo de la mina en particular, los equipos LHD transportan el material hasta chancadores que están ubicados en cabecera (caso Diablo Regimiento), carguío directo en camiones (Pacífico Sur) o piques en calle que se comunican con un nivel de transporte intermedio donde el mineral es trasladado en camiones (Esmeralda, Dacita). Finalmente,

el mineral es transportado en ferrocarriles hasta las plantas procesadoras de Colón y de Sewell, para posteriormente ser transportado hasta la fundición Caletones.

En resumen, si se quiere visualizar la faena minera El Teniente en una mirada, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 3 Comparación parámetros generales Gerencia de Mina DET 2017 y 2019.

Parámetro	Año 2017	Año 2019
Mineral Extraído [Mt]	45.10	47.70
Ley de Mineral [%]	1.02	0.99
Producción cobre fino [ktmf]	464.00	465.00
Rendimiento LHD [t/hora]	185.00	197.00
Trabajador propio [N°]	4,535.00	4,248.00
Trabajador colaborador en operación [N°]	3,905.00	3,555.00
Incidentes ambientales [N°]	2.00	0.00
Costo unitario [USD/t]	6.50	6.60
Productividad total [t/hora]	41.00	45.90

Fuente: Gerencia de Minas División El Teniente (2019).

De la Tabla 3, se puede destacar la comparación entre los años 2017 y 2019, donde se puede mencionar que se ha extraído una mayor cantidad de mineral, el rendimiento de los equipos LHD ha mejorado al igual que la productividad global, no ocurrieron incidentes ambientales y las dotaciones de personal disminuyeron. Por otra parte, los costos unitarios aumentaron en el período descrito y las leyes del mineral disminuyeron, lo que impacta negativamente el negocio minero.

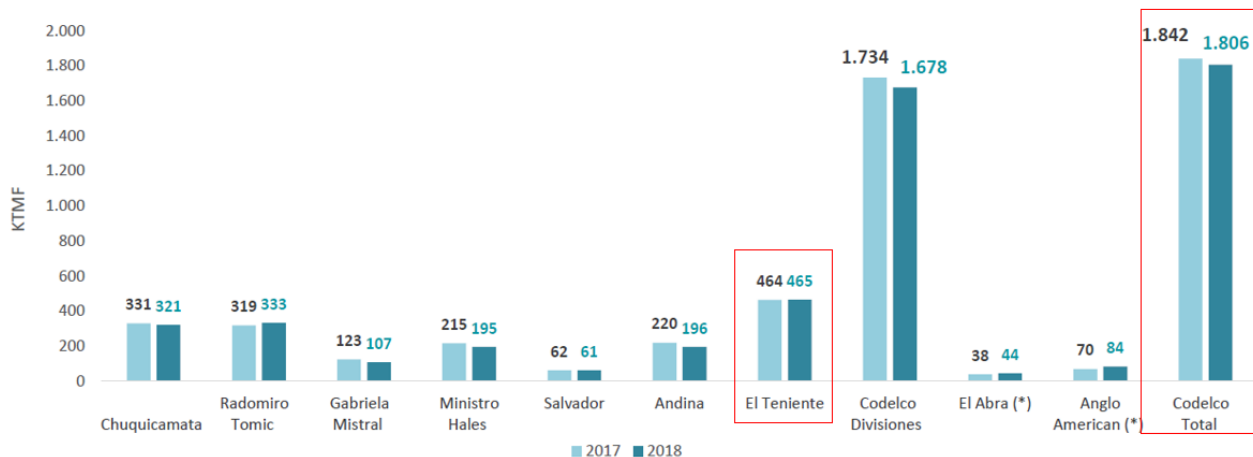


Figura 15 Producción de cobre fino en Codelco.

Fuente: Codelco (2018).

De acuerdo a la Figura 15, Codelco entre los años 2017 y 2018 produce en promedio 1,824 kilotoneladas métricas de cobre fino al año, mientras que El Teniente produce cerca del 25 % de este total (465 [ktmf]), por lo que se puede destacar que División el Teniente es la división más importante de Codelco por concepto de producción de cobre fino.

Otro punto relevante a considerar para la descripción del período 2017 al 2022 es que El Teniente se encuentra en una etapa intensiva en inversiones, donde el monto asciende a 5 mil millones de dólares, lo que permitirá habilitar la mina para los próximos 50 años.

CAPÍTULO II: PROPUESTA METODOLÓGICA

2.1 Primera Etapa: Contexto

El objetivo de esta primera etapa es identificar las distintas visiones de minería que se tienen en la actualidad y que se proyectan en el futuro, focalizando la atención en los desafíos y necesidades de la industria minera, analizando la factibilidad y el impacto de ciertas tecnologías en el funcionamiento de las operaciones mineras y su gestión. De esta manera, se busca explicar claramente hacia dónde se movilizará la industria minera en el segmento de minería subterránea de roca dura, considerando los respectivos impactos en seguridad, productividad, costos, sustentabilidad y continuidad operacional.

2.1.1 Revisión bibliográfica

Para el desarrollo de la revisión bibliográfica, se consideran las visiones, los desafíos y las necesidades observadas tanto por centros de innovación en minería como de empresas mineras y proveedoras de equipos y tecnología. Se consideran las siguientes organizaciones por su relevancia a nivel internacional o nacional: CEMI, AMTC, AC3E, Fundación Chile, Corporación Alta ley, CSIRO, Mining 3-CRC Mining, CESCO, Codelco y Komatsu.

2.1.2 Entrevistas a expertos

Para complementar el proceso de revisión bibliográfica y entregar un mayor respaldo a la información que se levanta en esta primera etapa de contexto, se realizan distintas entrevistas a expertos relacionados con los principales temas de interés. Se considera a las siguientes personas:

- **Juan Jara Rosas**, Director Ejecutivo en Fundación Chile, Líder Programa Interoperabilidad. Tema de entrevista: “Interoperabilidad y tecnología de empresas proveedoras”
- **Carlos Carmona Acosta**, Gerente General, Hexagon Mining. Tema de entrevista: “Aplicación de tecnologías en Minería Subterránea”
- **Javier Ruiz del Solar**, Director Ejecutivo, AMTC. Tema de entrevista: “Automatización y robótica en Minería Subterránea”.
- **Patricio Rojas**, Consultor Corporativo de Inversiones, Codelco. Tema entrevista: “Principales desafíos de Codelco mirados desde la perspectiva Inversional”.

- **Sebastián Carmona**, Gerente Corporativo de Innovación, Codelco. Tema entrevista; “Principales desafíos de Codelco en Innovación y Tecnología”.

Las respectivas entrevistas, por motivos de la contingencia del Covid-19, se hacen individualmente con los expertos vía remota, a través de la plataforma virtual “Zoom”.

El investigador elabora un breve cuestionario (considerando los antecedentes y la información recavada en la revisión bibliográfica), que es dialogado con el entrevistado, para luego archivar las respuestas globales a las preguntas planteadas (los cuestionarios y algunas de sus respuestas se pueden visualizar en la sección Anexos A desde la página 256).

De esta manera, el contexto queda definido de acuerdo a lo que se puede concluir de la revisión bibliográfica y las entrevistas a expertos.

2.2 Segunda etapa : Respuestas de Komatsu a los desafíos de la industria (Mercado de equipos, Análisis de brechas y necesidades de desarrollo para Komatsu)

El objetivo de esta segunda etapa es identificar las posibles respuestas que Komatsu pueda entregar a los desafíos de la industria minera considerando los distintos enfoques de desarrollo (Market pull y Technology push).

Determinar las principales brechas, tanto positivas como negativas, de los equipos y/o tecnología que utiliza Komatsu frente a sus principales competidores es el foco de esta etapa, para de esta manera, determinar un diagnóstico que permita dar respuestas a las principales necesidades de Komatsu, contribuyendo a favorecer el desarrollo de la empresa con tal de obtener ventajas competitivas con respecto a sus principales competidores.

Como principales insumos para esta etapa se consideran los resultados de la etapa anterior, los distintos catálogos de los equipos de las principales empresas involucradas en el mercado de minería subterránea de roca dura disponibles en los sitios web oficiales y bases de datos suministradas por Komatsu.

Esta etapa tiene la siguiente estructura:

- **Definición caso base equipos Komatsu:** Se muestran los principales equipos mineros que la empresa posee actualmente disponibles en el mercado, con sus respectivos datos técnicos e información relevante para el estudio.
- **Iniciativas enfoque Market pull:** Se desarrollan las principales tendencias donde el mercado promueve y exige un determinado producto, caracterizando el estado actual del mercado, considerando las principales empresas y los desarrollos que espera realizar Komatsu considerando sus respectivos RoadMaps.
- **Análisis de brechas y desarrollos para Komatsu:** El análisis se realiza por categoría de equipos, LHD, camiones UG y equipos Jumbo (principalmente jumbos de avance y empernadores) respectivamente. Por categoría de equipo, se dimensiona el mercado latinoamericano a modo general, considerando cantidad de unidades adquiridas por año⁷, su demanda por país, la cuota de mercado de cada marca y la presencia de los equipos Komatsu. Una vez dimensionado el mercado latinoamericano, se procede al caso particular del mercado chileno dimensionando por cantidad de unidades adquiridas por año, por marca y por capacidad y/o tamaños de los equipos.

De esta manera, se determina cuáles son los modelos de equipos más comunes en Chile por capacidad y se procede a comparar con los equipos del portafolio de Komatsu. Si Komatsu no presenta equipos en determinadas categorías, se comparan los 2 modelos principales del mercado en esa categoría y se entregan lineamientos para el posible desarrollo.

Cabe mencionar que también se compara el mercado chileno con el mercado global por categoría de equipo (considerando capacidad y/o tamaño).

- **Iniciativas enfoque Technology push:** Se desarrolla brevemente el enfoque impulsado por Komatsu como proveedor de equipos mineros que buscará generar un quiebre tecnológico, considerando su filosofía Dantotsu.

⁷ Para equipos LHD y camiones UG los mercados se analizan entre los años 2013-2019 (primer semestre 2019), mientras que para jumbos se considera desde el 2016 al primer semestre del 2019 por disponibilidad de datos.

2.3 Tercera etapa: Caracterización del cliente, levantamiento del Plan de negocios y RoadMaps de División El Teniente

Esta etapa tiene como objetivo recopilar información de División El Teniente con respecto a su Plan de negocios y a los diferentes Roadmaps que pueda tener, para visualizar las principales tendencias y prioridades de la faena minera. De esta manera, se busca dar una bajada práctica a la integración de los desafíos y los respectivos RoadMaps que pueda tener un cliente en particular y un OEM como es Komatsu, considerando adecuadamente horizontes temporales y pertinencia de utilización de tecnologías.

2.4 Cuarta etapa: Construcción de Roadmap y Análisis estratégico

En esta etapa, se materializa la construcción del Roadmap tecnológico, el cual es considerado como una estrategia de desarrollo de Komatsu, donde se da cuenta de la tecnología, los equipos, los procesos y los estados esperados que se desarrollen en los horizontes temporales descritos para el estudio en cuestión, teniendo en consideración la realidad del caso de estudio de Codelco División El Teniente en miras de apoyar y sustentar los planes de negocio de Codelco.

Como propuesta metodológica se considera realizar una variante de la metodología de Technology Plan (T-Plan) de la Universidad de Cambridge.

De acuerdo con Phaal R. (2004), el proceso estandar de Roadmapping comprende el desarrollo de cuatro Workshop que facilitan el diseño del RoadMap. Los 3 primeros se focalizan en las 3 capas principales del RoadMap (mercado / negocio, producto / servicio y tecnología), mientras que el último se encarga de reunir los temas abordados anteriormente (Ver Figura 16).

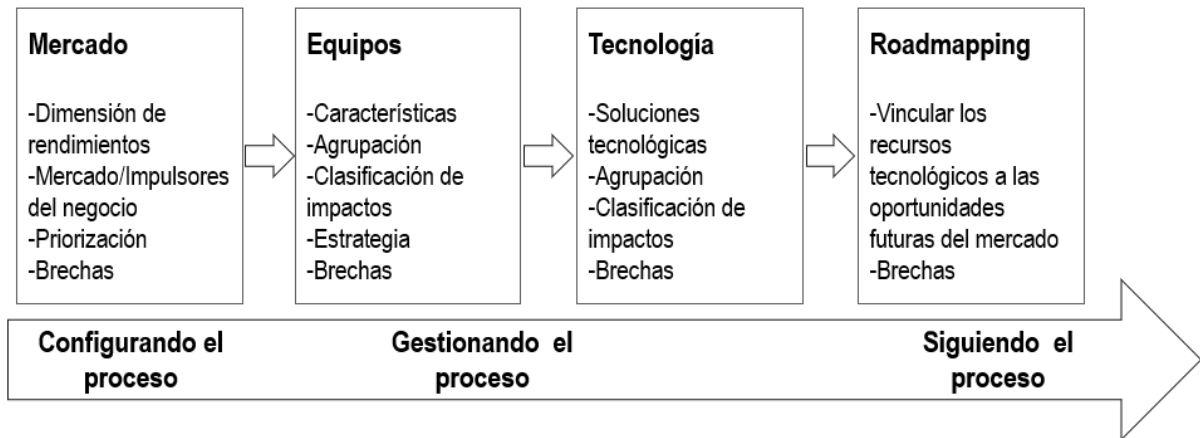


Figura 16 Metodología estándar T-Plan Universidad de Cambridge.

Adaptado de Phaal R. (2004).

El enfoque es de utilidad para el caso de estudio, ya que la metodología está impulsada directamente por los requisitos comerciales y del mercado, que se utilizan para identificar y priorizar opciones de productos y tecnología. Por otra parte, también permite dar lugar a nuevos productos y oportunidades de mercado, impulsadas por OEM como Komatsu (está metodología tiene la característica de adaptarse fácilmente al contexto de cada empresa en particular).

En el presente estudio, se considera una variante del T-Plan, ya que las instancias de Workshop no son realizadas, pero son reemplazadas por el trabajo del investigador a cargo, de la dirección de los miembros de la comisión involucrados en el trabajo de título y las respectivas entrevistas a expertos que dan cuenta del Mercado, los equipos, las tecnologías y su respectiva conexión en el RoadMap. La respectiva estructura, se basa en el modelo de los tres horizontes tecnológicos enunciado en el 1.6.4 Modelo de horizontes tecnológicos.

Dentro del análisis estratégico se consideran lo siguiente:

- **Matriz de esfuerzo/impacto:** Con motivo de priorizar y focalizar recursos de Komatsu y apoyar la estrategia reflejada en el RoadMap tecnológico, se construyen matrices esfuerzo/impacto, donde el impacto es considerado como el nivel de beneficio que puede llegar a brindar cierto proceso o producto teniendo en consideración

parámetros de seguridad, productividad, costos, sustentabilidad y continuidad operacional (nivel de impacto bajo, medio o alto).

Por otra parte, el esfuerzo da cuenta de la dificultad técnica que radica la implementación, los recursos necesarios o la habilitación de cierto proceso o tecnología, considerándose 3 niveles (nivel bajo, medio y alto).

La determinación de los niveles de esfuerzo/impacto se hace en base a las referencias bibliográficas y las entrevistas realizadas a expertos principalmente.

- **Análisis externo:** Se caracteriza mediante el análisis de las 5 fuerzas de Porter, que conforman la estructura de una industria (Ver Figura 17).

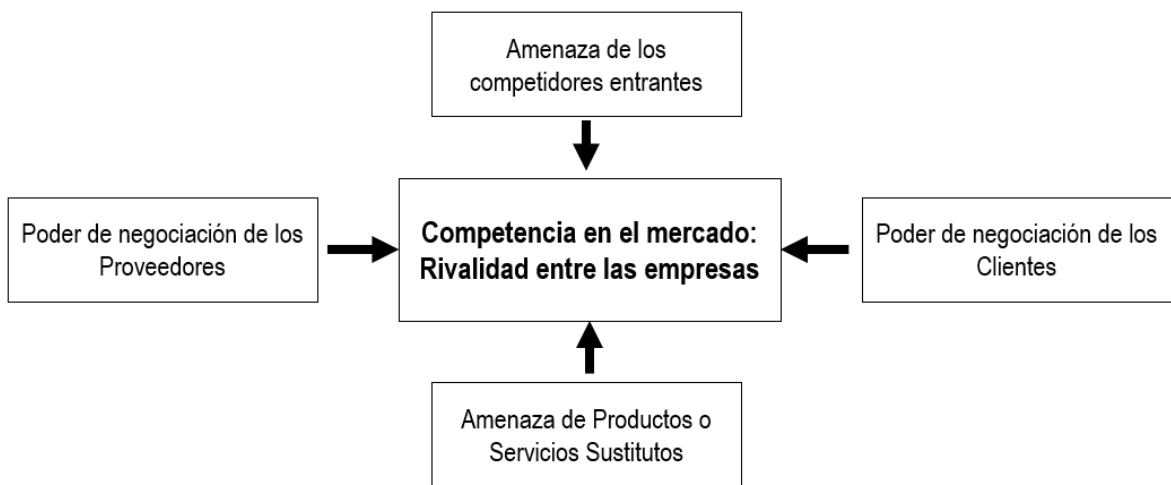


Figura 17 Las 5 Fuerzas de Porter.

Elaboración propia basada en Durán D. (2015).

- Poder de negociación de los clientes:** Demuestra el poder que tienen los clientes, que son los demandantes de bienes o servicios producidos por una industria.
- Poder de negociación de los proveedores:** Da cuenta del nivel de poder de los proveedores por ser los encargados de entregar los insumos necesarios para la producción y que condicionan directamente los costos de una industria.
- Amenaza de los nuevos competidores entrantes:** Se refiere a la probabilidad de ingreso de nuevas empresas que ingresan a una determinada industria. Es relevante visualizar la magnitud de las barreras de entrada

- d) **Amenaza de productos sustitutos:** Considera a las empresas que ofrecen productos sustitutos, que pueden reemplazar los productos o servicios por ofrecer una alternativa diferente que satisface la necesidad del cliente.
- e) **Rivalidad entre empresas:** Da cuenta de la lucha por participación de mercado dentro de una industria y suele ser la fuerza más determinante del atractivo de la industria.
- **Análisis FODA:** Se considera una herramienta sencilla, pero que bien utiliza puede entregar importantes lineamientos para ponderar las fortalezas y debilidades de los recursos de una empresa, las oportunidades comerciales y las amenazas externas a su bienestar futuro (Thomson *et al.*,2012).

En la siguiente figura se muestra la principal metodología para utilizar el análisis FODA:

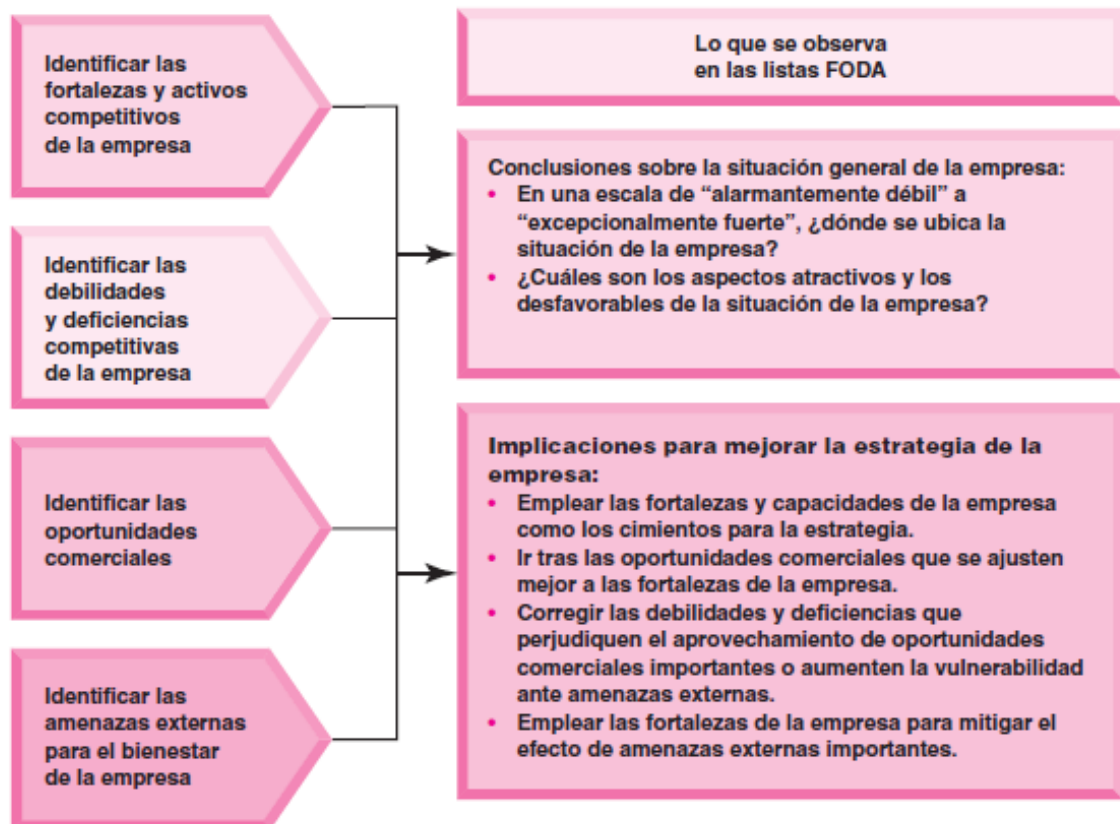


Figura 18 Metodología análisis FODA.

Fuente: Thomson *et al.* (2012).

Para complementar lo descrito en la Figura 18, una vez observadas las listas FODA, antes de dirigirse a las respectivas conclusiones e implicancias para la estrategia, se considera desarrollar una matriz de confrontación de los factores internos y externos que tiene como objetivo valorizar las respectivas relaciones. Se utiliza la siguiente escala:

Tabla 4 Valorización a utilizar en relación de factores internos y externos.

Relación	Valor
Alta	10
Media	5
Baja	1
Sin relación	0

Elaboración propia basada en Chang R. (2020).

De acuerdo con Chang R. (2020), la matriz de confrontación obtiene:

- Cuadrante más valorado (Fortaleza-Oportunidad, Fortaleza-Amenaza, Debilidad-Oportunidad o Debilidad-Amenaza).
- El aspecto interno o externo más importante.
- Que aspecto se debe trabajar para que se potencie a más oportunidades, se neutralice más amenazas, aprovechar las fortalezas y detener las debilidades.

Determinado el cuadrante se pueden analizar las respectivas estrategias a plantear de acuerdo con las relaciones.

CAPÍTULO III: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ENTREVISTAS CON EXPERTOS

3.1 Visiones de minería actual y futura

Esta sección da cuenta de las visiones de minería actual y futura, tanto de centros de innovación en minería como de empresas mineras y proveedoras, con especial énfasis en los desafíos y necesidades de la industria. Se consideran las siguientes organizaciones: CEMI, AMTC, AC3E, Fundación Chile, Corporación Alta ley, CSIRO, Mining 3-CRC Mining, CESCO, Codelco y Komatsu.

En la sección Anexos B desde la página 280, se muestran los principales proyectos de las organizaciones atingentes al presente estudio.

3.1.1 Centro de Excelencia en Innovación Minera (CEMI, Canadá)

El Centre for Excellence in Mining Innovation es un centro dedicado a las innovaciones comerciales canadiense, creado el 2007 con tal de cumplir un rol de liderazgo en el establecimiento de la innovación en la industria minera de Canadá, mediante la introducción de nuevas prácticas, procedimientos, herramientas, técnicas y tecnologías que ayuden a mejorar los rendimientos dentro de la industria minera, apoyando el proceso de integración de las innovaciones en las distintas operaciones.

Tabla 5 Desafíos y necesidades en minería subterránea según CEMI.

Oportunidad/Desafíos	Características del sistema deseable/Necesidad
Estabilidad geotécnica altamente cambiante	Acceso permanente para evaluar y / o corregir
Condiciones de operación altamente cambiables	Acceso permanente para evaluar y / o corregir
Alto costo de ventilación	Sistemas eléctricos y reducción de la demanda total de energía
Condición de altas temperaturas	Enfriamiento activo, dirigido a componentes críticos del sistema
Alta capacidad de producción	Flujo continuo de mineral, sin transporte batch.
Producción de alto valor	Modernizar: Clasificación de minerales (Sorting) y reciclaje de rocas
Capacidad de elevación de material	Aumentar la capacidad de transporte vertical
Requisito de cero daños	Proporcionar protección y eliminación del peligro
Alto costo laboral y altos niveles de inseguridad	Equipos automatizados o autónomos
Equipos automatizados y autónomos	Alta confiabilidad y reemplazos modulares
Enfoque de integración de la innovación	Gradual, reemplazando uno a la vez, reversible
Minería masiva subterránea	Reducción de los riesgos por esfuerzos del macizo rocoso

Adaptado de CEMI (2020).

A partir de la Tabla 5, se puede destacar que existen una serie de desafíos en minería subterránea a los cuales se les tiene identificado su posible solución, pero sólo de manera conceptual o solucionados sólo de manera parcial por las tecnologías disponibles en la actualidad.

Para el caso de las minas profundas, se tienen mayores costos en la construcción y la logística, por lo que necesariamente los ingresos generados por la operación futura deben ser obtenidos con mejores rendimientos de los equipos, infraestructura y el personal involucrado, teniendo niveles de productividad superiores a una operación subterránea más cercana de la superficie. El disponer de un sistema de flujo de mineral continuo y autónomo, con mayores recuperaciones de mineral desde la mina hasta la planta concentradora pueden llegar a contribuir positivamente al negocio minero.

Otro punto relevante para considerar es que la aplicación de sistemas operativos autónomos requiere una menor cantidad de personal en las labores subterráneas, por lo que mejora los niveles de seguridad en general.

3.1.2 Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC, Chile)

El Advanced Mining Technology Center es un centro que pertenece a la Universidad de Chile, fue creado el año 2009 al ser seleccionado como iniciativa por el Programa de Investigación Asociativa de CONICYT, en el marco del Programa de Financiamiento Basal para centros científicos y tecnológicos de excelencia (AMTC,2020).

A partir de la Tabla 6, se puede destacar que la minería del futuro para el AMTC estará fuertemente influenciada por la innovación en productos y procesos, traducidos en tecnologías que permitan abordar desafíos como el trabajo colaborativo efectivo, la toma de decisiones en tiempo real, el aumento de la productividad y el aumento en los niveles de seguridad en las operaciones subterráneas. Para el AMTC, la automatización en minería es uno de los principales ejes de investigación y desarrollo.

Tabla 6 Desafíos y necesidades en minería subterránea según AMTC.

Oportunidad/Desafíos	Características del sistema deseable/Necesidad
Trabajo conjunto entre protagonistas de la industria minera	Estándares de interoperabilidad
Eventos de estallidos de roca y condiciones de agua-barro	Equipos tele-operados, automatizados y/o robotizados robustos
Permanente sismicidad en excavaciones	Monitoreo y desarrollo de sensores de alta confiabilidad
Interacción 100% segura en ambiente que no es totalmente observable	Sensorización distribuido de alta confiabilidad
Colgadura de puntos de extracción en BC/PC	Equipos robotizados que permitan descolgar los puntos
Integración secuencia constructiva subterránea con operación minería a cielo abierto	Softwares que permitan la integración
Aumento de la productividad	Minería continúa automatizada
Toma de decisiones en tiempo real	Transformación digital
Manipulación de explosivos en tronadura	Robotización proceso de carguío de explosivos
Electromovilidad	Nuevos métodos de procesamiento para el Litio, más sustentables
Minería masiva subterránea	Megas Block/Panel caving donde se caracterice con mayor certeza el flujo gravitacional y las condiciones de esfuerzo en el macizo rocoso

Elaboración propia basada en AMTC (2020).

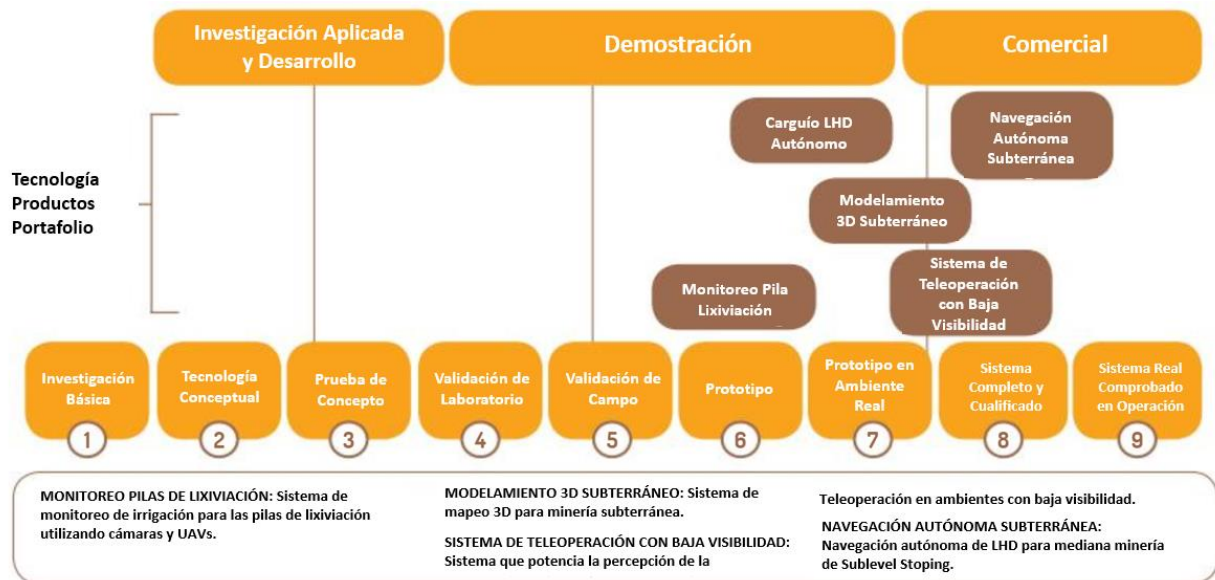


Figura 19 Nivel de madurez tecnológica (TRL) proyectos automatización AMTC.

Adaptado de AMTC (2017).

En la Figura 19, se pueden visualizar los distintos proyectos que tiene el AMTC en su línea de investigación de automatización en minería, donde se puede destacar el nivel de madurez tecnológica de cada uno de los proyectos.

Otro punto relevante para considerar es la visión dada por Javier Ruiz del Solar en la entrevista realizada.

De acuerdo con Ruiz del Solar (2020), la sustentabilidad ambiental será relevante en el contexto global de la minería, pero si el análisis se quiere focalizar en procesos mina, las principales necesidades, desafíos y consideraciones que se deben tener en cuenta en la minería subterránea del futuro son:

- Aumento de la automatización/ teleoperación de las operaciones mina, principalmente por tema operacional de aumento de productividad y reducir costos, la seguridad, para hacer la operación más segura (En un horizonte de 10 años, el nivel de automatización dependerá de la operación, si es de producción o preparación. El caso de equipos LHD en producción lo más común será la operación semi autónoma, los camiones en modo full autónomo y la perforación telecomandada). La sensibilidad de las personas para ejecutar las labores mineras difícilmente podrá ser reemplazada.
- Tendencia de las salas CIO en las ciudades (El Teniente lo tiene en Millán, Rancagua y ha crecido poco a poco) para reducir los tiempos de traslados y la comodidad de los operadores.
- El covid acelera el uso de tecnologías del trabajo a distancia y las empresas emplearán mano de obra local en mayor proporción.
- El principal quiebre tecnológico serán las redes de datos, se empieza a usar redes inalámbricas de mayores anchos de banda (redes LTE) y en pocos años más se estará usado 5G en minería subterránea (en la actualidad se usa Wifi, pero existen pilotos de LTE o 5G). Se espera que de aquí a 5 años se esté operando con LTE o 5G en gran parte de las faenas mineras de gran minería.
- La sensorización en las faenas mineras está en aumento, para la detección temprana de situaciones riesgosas. Las minas del futuro deben ser más sensorizadas porque la operación es más segura y además se puede modelar mejor lo que sucede en la mina, lo que permite planificar y gestionar de mejor manera.

- Con respecto a la variación de los KPI's por efecto de la transformación digital y la automatización de equipos y procesos, es difícil cuantificar las implicancias económicas de ellos, por eso es clave desarrollar el caso a caso, pero un orden de magnitud puede ser el 10% de aumento de las eficiencias (10% mayor producción, 10% menos consumo de combustible, entre otros)

3.1.3 Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E, Chile)

El Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering es un centro que pertenece a Universidad Técnica Federico Santa María, que se especializa en materias de eléctrica y electrónica. Fue creado el año 2014 al ser seleccionado como iniciativa por el Programa de Investigación Asociativa de CONICYT, en el marco del Programa de Financiamiento Basal para centros científicos y tecnológicos de excelencia (AC3E,2018).

A partir de la Tabla 7, se puede destacar que la disciplina eléctrica y la electrónica pueden tener un rol clave en habilitar sistemas aplicables en minería subterránea. La implementación de la electromovilidad a gran escala en las operaciones subterráneas tiene como consecuencia directa la disminución de las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, lo que impacta directamente los costos de ventilación de la operación, por menores requerimientos de ventilación, el entregar mayores confiabilidades en los rendimientos de los hardware en tiempo real, permite hacer posible la utilización de equipos autónomos con mayores estándares de seguridad y control, mientras que la integración de la robótica y de la inteligencia artificial en las operaciones mineras, podría aumentar los niveles de productividad.

Tabla 7 Desafíos y necesidades en minería subterránea según AC3E.

Oportunidad/Desafíos	Características del sistema deseable/Necesidad
Emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero	Implementación de Electromovilidad
Autonomía en equipos eléctricos	Sistemas de carga rápida y mejor almacenamiento de energía a un menor costo
Aumentos en productividad y la sostenibilidad de los procesos industriales	Integración de robótica, control y automatización e inteligencia artificial
Variabilidad en ERNC	Conversión, control y operación eficiente de sistemas de potencia y energía
Rendimiento eficiente de hardware en tiempo real en equipos de alto rendimiento o sistemas integrados	Conocimientos y aplicación de redes neuronales
Vulnerabilidad de redes eléctricas por caídas de tensión y falta de energía	Implementación de Smart Grid equipos y redes protegidas
Optimización de equipos y procesos	Transformación digital
Conectividad verdadera y trabajo colaborativo	Estándares de interoperabilidad

Elaboración propia basada en AC3E (2020).

3.1.4 Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO, Australia)

La Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) es la agencia nacional de investigación científica de Australia y uno de los organismos de investigación más diversos y de mayor magnitud en el mundo. Fue creada el año 1916 y a la fecha ha sido un importante catalizador de innovación, colaborando en las mejoras de rendimiento de distintas tecnologías en Australia (CSIRO, 2019).

Tabla 8 Desafíos y necesidades en minería subterránea según CSIRO.

Oportunidad/Desafío	Características del sistema deseable/Necesidad
Energía y agua	Mejorar eficiencia de energía
	Aumentar la producción de ERNC
	Mejorar eficiencia del agua
Capital humano	Mejorar programas de capacitación educacional y vocacional para la minería
	Mayor atracción de trabajadores calificados
	Aumentar el tamaño de la fuerza laboral
Productividad	Automatización y uso de otras tecnologías avanzadas para reducir costos de producción
	Tecnología permite explotación más profunda
	Minería in-situ baja costos
	Estándares de interoperabilidad
	Toma de decisiones en tiempo real (transformación digital)
	Digital twins para anticipar problemas operacionales
Sustentabilidad medio ambiental	Aumentar transparencia e información de las empresas
	Reducir emisiones y subproductos
	Aumentar supervisión y regulación
	Equipos eléctricos (a baterías, hidrógeno verde)
Diversificación económica	Aumentar servicios mineros
	Aumentar servicios medioambientales
	Menor dependencia de exportaciones de cobre
Beneficio a comunidades	Mayor inversión en desarrollo regional
	Mayor licencia social y mejorar percepciones comunitarias

Elaboración propia basada en CSIRO (2014).

3.1.5 Mining 3-CRC Mining (Australia)

Mining3 es una organización de investigación australiana, la cual surge de la asociación entre CRCMining (Cooperative Research Centre for Mining) y el grupo de recursos minerales de CSIRO en julio de 2016, que incluye todas las actividades de CRCMining y la capacidad de investigación de minería de roca dura de CSIRO. Tiene como principal objetivo desarrollar y entregar tecnología transformadora, con tal de mejorar la productividad, la sostenibilidad y la seguridad en la industria minera (Mining 3, 2020).

En referencia a la Figura 20, se puede mencionar que las principales herramientas de la minería del futuro para Mining 3 son la automatización (mayores niveles de seguridad y productividad), la electrificación/ electromovilidad (por mayores eficiencias), optimización de operaciones unitarias, el Data Analytics, internet of thing (IoT), el monitoreo para el control operacional, la robótica, la tendencia a una minería continua y relevancia de la minería de caving.

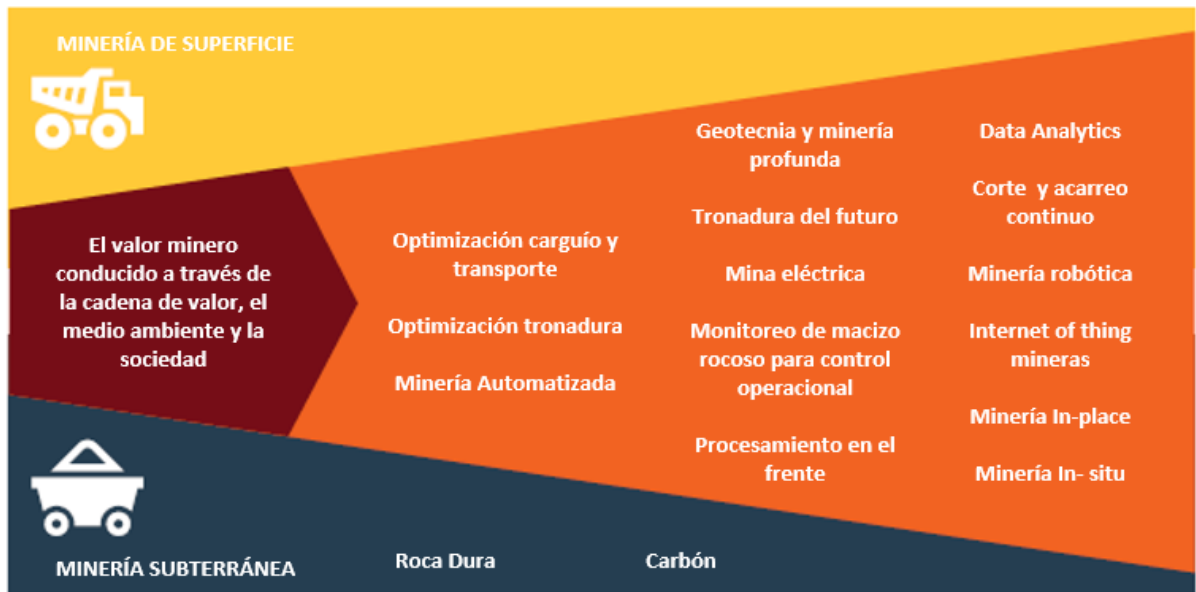


Figura 20 Visión de minería futura de Mining 3.

Adaptado de Mining 3 (2020).

El tema de la interoperabilidad, el monitoreo y la sensorización se consideran relevantes para habilitar el control y la optimización de la cadena de valor minera y la implementación de la automatización de los distintos equipos y procesos mineros.

En referencia a la minería subterránea masiva, Mining 3 tiene un programa de investigación denominado “Cave Mining 2040”, el cual considera la minería de caving como el futuro de los actuales yacimientos a cielo abierto. Este proyecto tiene como principales objetivos generar investigación para disminuir los costos de los métodos y aumentar los niveles de productividad, considerando nuevos diseños para las tecnologías emergentes, optimización de las secuencias de extracción y el monitoreo y prevención de eventos que comprometan la operación (monitoreo de sismicidad en ambientes de esfuerzos elevados) (Mining 3, 2020).

Tabla 9 Desafíos y necesidades en minería subterránea según Mining 3.

Área desafío	Necesidad	Herramientas
Minería subterránea selectiva	Incrementar la producción en un 25 %	-Nuevos o modificados métodos y procesos mineros -Nuevo equipamiento minero -Altos niveles de control operacional en la cadena de valor minera -Capital humano con altos niveles de adaptabilidad a las nuevas tecnologías
	Incrementar productividad	
	Incrementar la recuperación, disminuir dilución	
	Maximizar la ley de cabeza	
Minería subterránea masiva	Reducir el costo mina un 25 %	
	Incrementar la producción en un 25 %	
	Incrementar niveles de productividad	
	Incrementar la recuperación, disminuir dilución	
	Reducción de consumo de energía	
	Sistemas de transporte de alta capacidad	
Desarrollo mina	Incrementar la tasa de avance en 50%, reducir su costo un 25 %, mejorar rendimientos	
	Excavación de alta productividad y optimización de logística	
Minería en ambientes cambiantes	Minería profunda, altas/bajas °T, lugares lluviosos, submarinos	

Elaboración propia basada en Mining 3 (2020).

Con respecto a la Tabla 9, se puede destacar la fuerte necesidad de incrementar la producción, disminuir los costos y aumentar la productividad en las operaciones mineras. La implementación de nuevos equipos, nuevos procesos o métodos modificados, acompañados de personal calificado, permitirán cumplir con estos requerimientos.

3.1.6 Fundación Chile-Corporación Alta Ley

Fundación Chile es una organización público-privada enfocada en impulsar la transformación de Chile hacia el desarrollo sostenible, considerando como desafíos clave las habilidades del futuro, uso sustentable de recursos, transformación de industrias y emprender para innovar. Fue creada en 1976 través de un acuerdo conjunto entre el gobierno chileno y la Corporación ITT (International Telephone & Telegraph) y en la actualidad se considera un actor relevante dentro de la minería chilena (Fundación Chile, 2020).

La Corporación Alta ley es una organización público-privada, creada a partir de la institucionalización del Programa Nacional de Minería Alta Ley, una iniciativa público-privada creada el 2015 como Programa Estratégico de Especialización Inteligente de Corfo, encargada de articular capacidades entre entidades y organismos públicos y

privados de la industria minera, con el objetivo de promover y propiciar el desarrollo del sector, a través de iniciativas, programas, y proyectos que permitan resolver los desafíos clave de la minería chilena a través de desarrollos y de innovaciones, considerando transferencia de tecnologías y trabajo colaborativo, entre todas las entidades del ecosistema, para mejorar la competitividad y sostenibilidad del negocio minero.

3.1.6.1 Desde el cobre a la innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035

Las iniciativas mineras de Fundación Chile y de la Corporación Alta ley se enmarcan en el programa estratégico que se muestra en su Roadmap Tecnológico 2015-2035, con foco en el largo plazo, teniendo el objetivo de identificar los desafíos clave que enfrentará la producción de cobre en Chile en un intervalo de 20 años. En este Roadmap participaron más de 150 expertos del sector minero donde destacan compañías mineras (Codelco, BHP, AMSA, Anglo American, Doña Inés de Collahuasi, entre otras), asociaciones gremiales (Sonami, Consejo Minero, entre otros), proveedores, universidades, centros I +D y entidades estatales (ministerio de minería, Cochilco, entre otros) (Fundación Chile, 2016).

El Roadmap se divide en núcleos traccionantes⁸ y habilitadores⁹ respectivamente:

- **Traccionantes:** Relaves; Fundición y refinación; Operaciones y planificación minera; Concentración de minerales; Hidrometalurgia.
- **Habilitantes:** Capital humano; Proveedores e Innovación; Minería inteligente (redes y protocolos).

De acuerdo con el trabajo de Roadmap (Fundación Chile, 2016), factores relevantes a considerar para determinar los desafíos y brechas son:

- Disminución de la calidad de las reservas (leyes de cobre cada vez más bajas, mayor profundidad del mineral lo que implica trabajar con rocas de mayor dureza. Lo anterior se traduce en un mayor consumo de energía por libra de cobre fino producida.

⁸ Se utiliza este término para denotar todos aquellos ámbitos que, en el centro del proceso minero, constituyen los desafíos tecnológicos más cruciales para la evolución de la industria.

⁹ Dimensiones que, sin ser exclusivas del proceso minero, condicionan la capacidad de la industria para poner en marcha su plan de desarrollo futuro.

- Escasez de agua continental que conlleva la desalación de agua, aumentando los costos por mayor consumo de energía producto del impulso del agua a las faenas mineras.
- Los precios de la electricidad impactan de forma relevante en los costos de producción.
- En Chile, la productividad ha disminuido por factores que exceden la disminución de la calidad del recurso geológico, medido a través de la ley de mineral de cobre y la razón estéril mineral, por lo cual las principales características de la industria minera son recogidas, dejando la explicación de la caída de productividad a aquellas asociadas a la gestión empresarial, uso tecnológico o diferenciación del recurso humano”.

Según Cochilco (2014), la gestión empresarial, el uso tecnológico y la diferenciación del recurso humano, son los aspectos donde la industria debería poner énfasis para revertir la pérdida de productividad.

Los principales desafíos son:

- Aumento de la productividad.
- Incremento de los recursos y reservas minerales.
- Más cuidado del medio ambiente y responsabilidad social.
- Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo.

Con respecto a la Tabla 10, se puede destacar las líneas de I + D + i que se escogieron por el estudio se basaron en el nivel de impacto en el negocio, transversalidad y oportunidad de implementación en la industria. El aumento de la productividad se considera el desafío clave para la minería subterránea, la cual se mejorará desarrollando una minería profunda a gran escala y la mejor gestión de los activos mineros. Temas relacionados al cuidado del medio ambiente, la responsabilidad social y la seguridad de los operadores en los ambientes de trabajo, determinarán la viabilidad de las operaciones. El modelo de desarrollo más repetitivo es el Co- desarrollo, por lo que los esfuerzos deben concentrarse en la generación de un modelo de trabajo en conjunto que tenga como objetivo superar los objetivos propuestos.

Tabla 10 Desafíos y necesidades minería subterránea según Alta Ley-FCh al 2016.

Desafío	Solución/Necesidad	Líneas de I + D + i	Modelo de desarrollo
Aumento de productividad	Desarrollo de una minería profunda a gran escala	Minería continua	Co- desarrollo
		Caracterización	Co- desarrollo
		Flujo gravitacional	Externo
		Medición de leyes en línea	Externo
		Soporte y fortificación	Co- desarrollo
		Fragmentación/Tronadura	Externo
		Automatización y operación autónoma	Co- desarrollo
	Operación bajo altos esfuerzos geotécnicos	Co- desarrollo	
	Gestión de activos	Mantenibilidad: sintomatización de equipos principales	Co- desarrollo
Mayor cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	Manejo de residuos e impacto	Tecnología limpia	Co- desarrollo
Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo.	Disminuir la intervención directa de los operadores mejorando tanto la seguridad y auditabilidad	Automatización/ Teleoperación/operación centralizada	Co-desarrollo

Fuente: Fundación Chile (2016).

En cuanto a los recursos habilitantes, se considera que cuatro de ellos son los principales, Capacidad, Proveedores, Alianzas e Infraestructura de telecomunicaciones.

De la Tabla 11, se puede destacar la relevancia de todos los involucrados en el desarrollo de la industria minera. Para cumplir con los desafíos, es necesario forjar alianzas, generar conocimiento base, de desarrollo y aplicado con el objetivo de aumentar la productividad. El rol de los proveedores junto con las compañías mineras en el desarrollo de estándares de interoperabilidad y el potenciamiento de tecnologías como el control experto, la automatización y la robótica serán clave para la minería del futuro.

Tabla 11 Recursos habilitantes en operación y planificación minera para Alta Ley.

Capacidad	Proveedores	Alianzas	Infraestructura de telecomunicaciones
Investigación en ciencia básica	Potenciar desarrollo de proveedores locales, control experto, mecanización, automatización, robotización, gestión de la información, transmisión de datos, servicios de apoyo especializado.	Entre Universidades nacionales, extranjeras y centros de excelencia.	Redes de fibra óptica para telecomunicaciones
Contribución Universidades en investigación de instrumentación y control.	Sistema estructurado de acompañamiento de empresas locales con capacidad tecnológica.	Entre Industria y CFT para formación de operadores	
Capital humano avanzado con especialización: modelamiento de procesos, gestión de activos, mecatrónica, robótica, caracterización y modelamiento de variables y medio ambiente.	Desarrollar estándares de interoperabilidad	Entre centros de investigación/ Universidades/ Industria /Estado /Proveedores	
Centro de pensamiento tecnológico minero.			
Organización para transferencia de conocimiento.			

Fuente: Fundación Chile (2016).

3.1.6.2 Hoja de Ruta 2.0 de la Minería Chilena: Actualización y consensos para una mirada renovada

El Roadmap de la Minería 2015-2035 ha sido una referente para la realización de proyectos colaborativos de innovación y emprendimiento en la minería chilena (Corporación Alta ley, 2019).

Considerando la naturaleza del desarrollo de un Roadmap, donde el Roadmapping se considera un proceso vivo, una actualización transcurridos 3 años se considera pertinente. Bajo esta premisa, se desarrolla la Hoja de Ruta 2.0 de la minería chilena, la cual agrega tres núcleos traccionantes a los ya existentes (Exploraciones, Minería verde y Usos del cobre).

A partir de la Tabla 12, se puede destacar la utilización del cobre en distintas industrias, las cuales se encuentran asociadas a la minería y que en el futuro se espera un

crecimiento relevante, como lo es el caso de la aplicación de ERNC, electromovilidad y aplicaciones en salud e higiene.

Tabla 12 Desafíos y necesidades núcleo Usos del cobre según Alta ley al 2019.

Desafío	Solución/Necesidad	Líneas de desarrollo
Producción de cobre con mayor valor agregado	Productos con mayor valor agregado	Manufactura de copper foil ¹⁰
I+D Industrias tradicionales	Intensidad de uso en industrias tradicionales	Aplicaciones en ERNC
		Electromovilidad
		Calefacción y ventilación
		Aire acondicionado
I + D industrias no tradicionales	Intensidad de uso en industrias no tradicionales	Aplicaciones en salud e higiene

Fuente: Corporación Alta ley (2019).

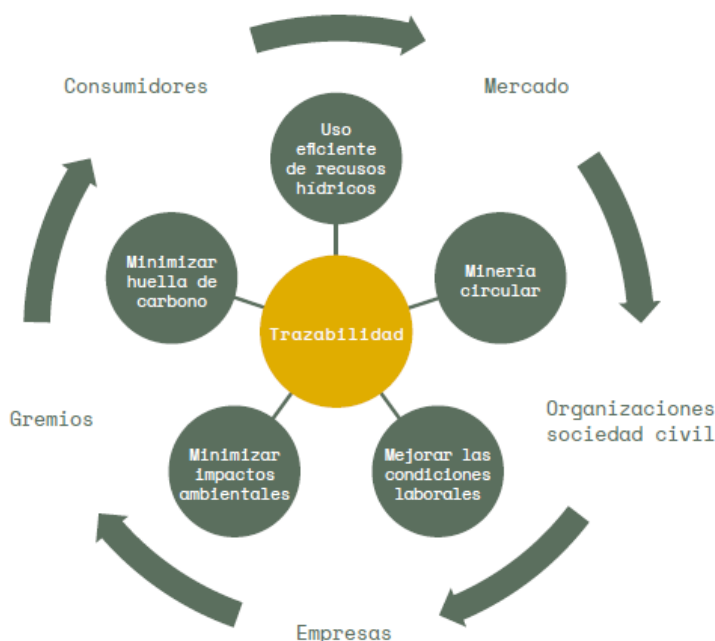


Figura 21 Diagrama del concepto de Minería Verde.

Fuente: Corporación Alta ley (2019).

¹⁰ Copper foil: Hoja muy delgada compuesta por metales maleables, comúnmente de aluminio, estaño y cobre utilizada como conductor eléctrico, térmico y en diferentes aleaciones. Principales aplicaciones actuales son las placas de circuitos impresos (PCB o Printed Circuit Board) y baterías de litio (Li-ion).

La Figura 21 muestra los conceptos relacionados al concepto de “Minería Verde”, donde la trazabilidad es el eje central de la producción del mineral de interés, dado que los mercados de metales están estableciendo un marco conceptual de suministro responsable de minerales y metales, que busca que las compañías mineras entreguen al mercado productos que se hayan elaborado en espacios libres de conflictos con las comunidades y/o medio ambiente, haciendo uso de mejores prácticas y estándares asociados a la responsabilidad empresarial.

Tabla 13 Desafíos y necesidades núcleo Minería verde según Alta ley parte I al 2019.

Desafío	Solución/Necesidad	Líneas de desarrollo
Sustentabilidad energética, hídrica y huella de carbono	Eficiencia en la producción de cobre y subproductos con mínimo de huella de carbono ¹¹ y agua	Perfeccionamiento de tecnologías control de emisiones de GEI
		Eficiencia energética y sustitución de combustibles, enfocadas en transporte de mineral (camiones y correas).
	Eficiencia energética y sustitución de combustibles fósiles	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la generación de energía, aumento de la capacidad de almacenamiento
		Desarrollo de tecnología para autogenerar energía a partir de las correas transportadoras de mineral u otras potenciales fuentes.
Reducción de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas	Reducción de emisiones gaseosas a la atmósfera, particularmente la disminución de azufre, arsénico y CO2 (FURE)	Desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías para el manejo de emisiones gaseosas en minería subterránea.
		Optimización de transporte de materiales.
		Optimización de los procesos de captación y tratamiento de los gases generados.
Economía Circular (Minería Circular)	Responsabilidad extendida del productor	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de baterías.
		Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de neumáticos mineros.
		Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de aceites.
		Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de aparatos eléctricos.

Fuente: Corporación Alta ley (2019).

De la Tabla 13, se puede destacar que en Minería Verde los desafíos principales son desarrollar una minería Sustentable, que disminuya su huella de carbono, reduzca la generación de desechos de todo tipo y que piense el negocio en base a una economía

¹¹ La huella de carbono se define como la cantidad total de GEIs causados directa o indirectamente por una organización, un producto o un servicio. Es por tanto un inventario de GEIs, que se mide en toneladas de CO2 equivalente y que tiene en cuenta los seis tipos de gases considerados en el Protocolo de Kioto (CO2, CH4, N2O, PFCs, HFCs y SF6). (Ihobe, 2012).

circular. Las principales líneas estudio y de desarrollo, donde se deben focalizar los recursos y que es de interés para una empresa proveedora como Komatsu es el perfeccionamiento de tecnologías de control de emisiones de gases de efecto invernadero, mayor eficiencia energética y reemplazo de combustibles fósiles, nuevamente la disminución de las emisiones es un tema central.

Tabla 14 Desafíos y necesidades núcleo Minería verde según Alta ley parte II al 2019.

Desafío	Solución/Necesidad	Líneas de desarrollo
Trazabilidad e indicadores de sustentabilidad	Uniformar metodologías de medición y variables críticas	Definir los criterios técnicos de medición y reportabilidad y de regulación de cómo, cuándo y qué medir en temática de sustentabilidad a nivel país en línea con el contexto internacional.
	Fijación de indicadores y metas	Definir los criterios técnicos y regulatorios de cuáles serán los indicadores y metas de sustentabilidad a nivel país.
	Seguimiento reporte, verificación y certificación	Definir los criterios técnicos y regulatorios de cómo auditar y certificar la sustentabilidad del sector minero a nivel país.
Seguridad e higiene ambiental	Reducción de exposición a riesgos críticos	Sustitución de los productos de alta toxicidad.
		Sofisticación en equipos de protección personal.
		Mecanismos de humectación en zonas de riesgo.
	Disminución de enfermedades profesionales	Optimizar procesos productivos o cambiar los métodos de operación para disminuir/eliminar el riesgo.
		Desarrollo de implementación de infraestructura y elementos adecuados para el trabajo tanto en oficina como en terreno.
	Reducción de exposición a gases de espacios confinados	Desarrollo de medios mecánicos adecuados para el levantamiento de cargas pesadas.
Desarrollo de mecanismos de ventilación general y local.		
		Optimizar medidas de dilución y evacuación de agentes contaminantes.

Fuente: Corporación Alta ley (2019).

En la Tabla 14 se menciona el desafío de generar estándares de sustentabilidad y trazabilidad a lo largo de toda la cadena de valor de la industria minera, con tal de determinar y unificar las metodologías de medición y control de variables críticas que impactan en las operaciones. Con respecto a la “Seguridad e higiene ambiental” se destaca la necesidad de reducir la exposición a riesgos críticos de los operadores, donde la optimización de procesos productivos o el cambio de los métodos de operación para disminuir/eliminar el riesgo puede mejorar sustancialmente este parámetro.

Con respecto al núcleo de “Operaciones y planificación minera”, se ratificaron los desafíos descritos en “Desde el cobre a la innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035” y

desarrolló un trabajo de redefinición para soluciones y nuevas líneas I+D+i, las cuales se mencionan a continuación:

Tabla 15 Actualización desafíos y necesidades minería subterránea según Alta Ley parte I al 2019.

Desafío	Solución/Necesidad	Líneas de desarrollo
Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	Mejor control en la emisión de contaminantes y reducción de su impacto ambiental	Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en puntos de carguío/vaciado/chancado. Desarrollo y validación de vehículos/equipos de producción eléctricos, para eliminación de gases.

Fuente: Corporación Alta ley (2019).

De la Tabla 15 se destaca nuevamente la necesidad de mejorar el control de las emisiones contaminantes generando la respectiva reducción de impacto ambiental, donde las líneas de desarrollo fundamental será el control del polvo y el desarrollo y validación de producción de equipos eléctricos que disminuya la emisión de gases.

Con respecto a la Tabla 16, se destaca nuevamente, al igual que en la versión anterior del Roadmap de Alta ley, que los aumentos de productividad tienen que derivar de mejor eficiencia de las operaciones unitarias, de la integración de los respectivos procesos y la gestión del cambio y de los activos. Las líneas de desarrollo principales son la automatización/ teleoperación de operaciones, con el desarrollo de sistemas que permitan la coordinación y la interacción entre los equipos autónomos, teleoperados y de operación manual, permitiendo monitorear y tomar decisiones en tiempo real.

Tabla 16 Actualización desafíos y necesidades minería subterránea según Alta Ley parte II al 2019.

Desafío	Solución/Necesidad	Líneas de desarrollo
Aumento de productividad	Mayor eficiencia en perforación y tronadura	Automatización/teleoperación de manejo de explosivos en el proceso de tronadura.
		Tecnología para equipos autónomos o teleoperados en operaciones unitarias en preparación/desarrollo y construcción
	Desarrollo minería profunda a gran escala: preparación, desarrollo y preacondicionamiento	Automatización integrada de flota equipos de transporte y carguío sin dependencia de GPS.
	Mejor manejo de grandes volúmenes de material a través de largas distancias: carguío y transporte	Tecnología para la automatización o teleoperación de equipos para operaciones unitarias de apoyo como reducción secundaria, limpieza, descuelgue de puntos, manejo de materiales contaminados con alta humedad (agua, barro), etc.
		Sistemas de coordinación para la interacción sinérgica entre equipos autónomos, teleoperados y operados manualmente, permitiendo la interacción a través de interfaces estándares entre ellos y con otros sistemas (interoperabilidad).
		Desarrollo visión sintética/3D en interfaces hápticas que faciliten la operación remota de los procesos y la teleoperación inmersiva de equipos.
		Desarrollo de sistemas híbridos de manejo de grandes volúmenes de materiales en rajo y subterráneo.
	Integración y caracterización de operaciones mina-planta	Desarrollo de aplicaciones con información en línea para la toma de decisiones integrada del proceso mina-planta, con inferencia de resultados y modelamiento de escenarios posibles.
		Sistema de monitoreo y caracterización en tiempo real.
		Diseño e instalación de centros integrados de operación para control y operación a distancia.
	Nuevas metodologías de gestión de activos, mantenimiento y automatización de equipos principales	Mantenimiento predictivo totalmente automatizado.
		Automatización/remotización de procesos de mantenibilidad disminuyendo el tiempo de mantenimiento de equipos críticos.
		Mantenimiento inmersivo online.
		Desarrollo de sistemas utilizando big data/IoT para manejo de grandes volúmenes de datos, que permitan inferir comportamientos de la flota, equipos, sistemas o procesos.
	Gestión del cambio	Desarrollo de herramientas que aseguren las transformaciones definidas (Transformación digital).

Fuente: Corporación Alta ley (2019).

3.1.6.3 Roadmap: Innovación Tecnológica para la Minería 4.0

El desarrollo de esta nueva hoja de ruta, la cual es liderada por el Consejo Minero, Fundación Chile y Corporación Alta ley, tiene como objetivo principal generar una visión compartida por la industria respecto a cómo abordar los desafíos de la digitalización para agregar valor al negocio minero en los próximos 15 años (Portal Minero, 2020).

La visión principal del Roadmap es “Transformar la manera en que hacemos minería en Chile y proyectar una industria sostenible a través de una incorporación proactiva de las oportunidades presentadas por la tecnología de la industria 4.0.” (Tercera sesión Roadmap minería 4.0, 2020).

Tabla 17 Núcleos Traccionantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 1.

Núcleo	Desafío	Necesidad/ Solución	A [años] consolidarse	Impacto/Esfuerzo
Minería integrada e inteligente	Procesos predecibles, estables y controlados, acotando y disminuyendo su variabilidad (Producción y mantenimiento)	Uso de telemetría y tecnologías de control avanzado integrado	5 a 10	Alto/Medio alto
		Planificación operativa de la cadena de valor en tiempo real, bajo metodología BIM		
		Procesos y equipos autónomos		
		Incorporar sensorización y control automático de procesos		
		Modelamiento y simulación de procesos y modelamiento 3D Mina		
	Modelo de negocios inteligente	Modelamiento de cadena de valor integrada	5 a 10	Medio alto/Medio alto
		Digital Twin		
		Operación centralizada en "CIO"		
Habilitación de Data science para toma de decisiones inteligentes				
Minería segura	Comunicación efectiva de los riesgos en tiempo real	Captura y transmisión en tiempo real de los parámetros de seguridad personales, del entorno y equipos	0 a 5	Alto/Bajo
		Implementación de estándares de transmisión (IoT) de datos que permitan la captura confiable y su trazabilidad		
	Controlar fuentes de emisión que producen enfermedades profesionales actuales y futuras	Monitoreo en línea de variables operacionales derivadas de modelos predictivos y simulaciones	5 a 10	Alto/Alto
		Habilitar sistema experto para direccionar solución		
	Integrar la gestión de seguridad a las plataformas 4.0	Datos de seguridad integrados en plataforma única	5 a 10	Medio alto/Bajo
		Interoperabilidad		
		Safety Cloud, incidentes-accidentes (medicina preventiva)		
	Simulación de riesgos en planes mineros	Digital twin	5 a 10	Alto/Alto
	Minimizar exposición al riesgo, manteniendo la productividad y costos	Robotización, automatización y teleoperación	0 a 5	Medio alto/Alto
		Epp con monitoreo continuo		
Data de predicción de riesgos / analítica predictiva integrada a los procesos				

Fuente: Tercera sesión Roadmap Minería 4.0 (2020).

Tabla 18 Núcleos Traccionantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 2.

Núcleo	Desafío	Necesidad/ Solución	A consolidarse [años]	Impacto/Esfuerzo
Minería Verde	Incluir eficiencia energética y de agua en los proyectos	Simulación de escenarios, Modelamiento predictivo y Data science	0 a 5	Alto/Medio bajo
	Eficiencia energética en la operación	Uso de inteligencia artificial, interoperabilidad (aljibes autónomos, sensores dispatch)	5 a 10	Alto/Medio bajo
		Captura de data, almacenamiento análisis y optimización		
	Control y monitoreo transparente de recursos y parámetros relevantes del cómo operamos (hídricos, aire, polución, contaminación y otros) y entrega a la comunidad	Plataforma abierta y pública para administrar y compartir información	0 a 5	Medio alto/Alto
		Tecnologías de captura y monitoreo de datos operacionales en tiempo real		
		Tecnología de almacenamiento de datos (Cloud)		
	Mejorar la trazabilidad en el consumo de energía a lo largo del proceso	Desarrollo de herramientas de monitoreo participativo (App)	5 a 10	Alto/Alto
		Plataforma para identificar fuente/origen de la energía		
		Definición de estándares de trazabilidad		
		Sensores de consumo en tiempo real		
Vincular KPI's sustentables - ambientales con productivos				
Generar plataforma de oferentes de energía limpia				
Implementación Blockchain para identificación de activos				
Medición de huella de carbono				

Fuente: Tercera sesión Roadmap Minería 4.0 (2020).

Con respecto a la Tabla 17 y Tabla 18, se puede destacar que los desafíos cruciales para la industria minera son Minería integrada e inteligente, Minería segura y Minería Verde. En el núcleo de Minería integrada e inteligente se puede mencionar que los principales desafíos mencionados podrían estar a completa operación o disponibilidad en el mediano plazo (5 a 10 años) y que el esfuerzo necesario y el impacto de ellos serán entre un nivel medio a alto. Como soluciones se pueden visualizar disponer de procesos y equipos autónomos, la Incorporación de sensorización y control automático de procesos, la habilitación de Data science para toma de decisiones inteligentes y el modelamiento de la cadena de valor integrada.

Para Jara J. (2020), la minería inteligente tiene como principal objetivo la disminución de la variabilidad de los procesos, una minería más automatizada, que utilice la analítica, que disponga de un digital twins para replicar los procesos y de robots que desarrollen operaciones riesgosas, irán dando forma a esta transición.

De acuerdo con Carmona C.-a (2020), el camino a la minería inteligente viene dado por la transformación digital, iniciando desde lo analógico hasta llegar a lo automatizado, en este contexto, la interoperabilidad es habilitante y el motor de la digitalización. El primer impacto serán los datos, digitalizar la información. La transformación digital cambiará definitivamente la industria minera. De esta manera, las compañías mineras coinciden que se está en la fase de “monitoreo en tiempo real”, lo cual se espera que dure 2 a 3 años, muchas licitaciones que se hacen hoy en día, esperan como capturar la información en tiempo real de los diferentes procesos y los llevo a una sala de control, antes se hacía con telemetría, pero ahora se espera desarrollar con otras tecnologías como LTE (tecnologías que permiten más tráfico de datos), para que de esta manera se pueda tener asociado videos, representación gráfica, KPI de operación/mantenición, la información proveniente de sensores (más completo e integrado). También partió la operación asistida, que significa que al operador se le está colocando tecnología de asistencia, sistema anticollisiones, sistemas de frenado automático, con el operador arriba del equipo.

Con respecto al núcleo de Minería segura, se tienen desafíos a corto y mediano plazo; en el corto plazo, se tiene el desarrollar una comunicación efectiva de los riesgos en tiempo real y el minimizar la exposición al riesgo, manteniendo la productividad y costos, desafíos que se verán superados con la implementación de estándares de transmisión IoT de datos que permitan la captura confiable , Epp con monitoreo continuo, con aplicación de teleoperación, automatización y robotización de los equipos y procesos en situaciones de riesgo. A desarrollarse en el mediano plazo (5 a 10 años), se considera controlar fuentes de emisión que producen enfermedades profesionales actuales/futuras (ejemplo silicosis) y la Integración de la gestión de seguridad a las plataformas 4.0, donde el monitoreo en línea de las variables operacionales, los estándares de interoperabilidad y el desarrollo de modelos predictivos y simulaciones son factores clave.

Según Jara J. (2020), en temas de seguridad, lo principal es el monitorio del entorno en tiempo real para evitar accidentes (importante la calidad del aire en minería subterránea), implementando sensores tanto en los equipos como en las personas, para de esta manera mejorar la salud ocupacional de los trabajadores. Para los expertos en riesgos,

también se destaca que es relevante la simulación de los riesgos, la analítica y el modelamiento predictivo.

En referencia al núcleo Minería verde, dentro de los desafíos se considera incluir la eficiencia energética y de agua, tanto en etapa de proyectos como en operación, la trazabilidad en el consumo de energía a lo largo del proceso y el control y monitoreo transparente que pueda ser constatado por la comunidad. Se destaca que es necesario disponer de tecnologías de captura y monitoreo de datos operacionales en tiempo real, hacer vinculación entre los KPI's sustentables ambientales con los netamente productivos y una mayor confiabilidad en la medición de huella de carbono de la operación.

Según Jara J. (2020), el tema de la minería verde viene con gran fuerza, principalmente por la necesidad de transparencia de los procesos, porque a nivel mundial se está exigiendo la trazabilidad de la producción y la Bolsa de Metales de Londres (principal medio de transacción a nivel mundial de cobre), al año 2025, no va a transar metales que no cumplan con una norma verde. De esta manera, se destaca relevante la implementación de tecnología Blockchain, que es una tecnología robusta, para hacer trazabilidad de las transacciones permitiendo entregar un sello al cobre producido (mencionar que fue con cero accidentes, 0 emisiones de carbono, entre otros).

Tabla 19 Núcleos Habilitantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 1

Núcleo	Desafío	Necesidad/ Solución	A consolidarse [años]	Impacto/Esfuerzo
Ciberseguridad	Proteger de ciberataques la información, tecnología, sistemas, desde internet, red corporativa y servicios de terceros	Sistema con registros de todos los dispositivos conectados a la red	0 a 5	Medio alto/Medio
		Planes de capacitación sobre protección de datos y sistemas		
		Sistemas de alerta por ataques, Hacking ético (equipo especializado de testeos de niveles de protección)		
		Servidores de respaldo para cada sistema OT		
		Incorporar al mundo de los proveedores en cadena de ciberseguridad		
		Encriptar información sensible		
	Proteger accesos a sistemas y dispositivos OT	Definir arquitectura de referencia (topología, control de accesos, segmentación por tipo de datos y flujos)	0 a 5	Medio alto/Medio
		Sistema único de control de acceso		
		Hacking ético		
	Mejorar la segmentación de zonas de redes OT	Definir arquitectura de referencia (topología, control de accesos, segmentación por tipo de datos y flujos)	0 a 5	Medio/Medio
		Segmentación orientada al consumo de la fuente del dato (aplicación)		
		Implementar sistema de monitoreo proactivo de flujos de datos en la red IT/OT		
Estándar de industria para el manejo y backup de datos	Definir arquitectura de referencia (topología, control de accesos, segmentación por tipo de datos y flujos)	5 a 10	Alto/Alto	
	Incorporarse a "Equipo ciberseguridad" del Estado			
	Implementar registro público que permita compartir información entre mineras			
	Desarrollo de un plan de CiberSeguridad en mineras			
	Contar con un estándar de ciberseguridad en minería			

Fuente: Tercera sesión Roadmap Minería 4.0 (2020).

Tabla 20 Núcleos Habilitantes: Desafíos y necesidad minería 4.0 parte 2.

Núcleo	Desafío	Necesidad/ Solución	A consolidarse [años]	Impacto/Esfuerzo
Desarrollo capital humano	Identificar impacto de la minería 4.0 en regulación laboral	Estudio marco legal en profundidad para proponer/influir actualización del Marco	0 a 5	Medio/ Alto
	Gestión del cambio cultural interno (adopción de tecnologías 4.0)	Guías mejores prácticas para gestión del cambio en la adopción de tecnologías 4.0	5 a 10	Medio alto/Medio Alto
		Desarrollo de aplicaciones (App) para la gestión de personas		
		Involucrar al sindicato en la estrategia de gestión del cambio		
		Competencias relacionales que ayudan a la gestión del cambio y minería 4.0		
	Atracción y retención de talentos para la industria 4.0	Beneficios flexibles	5 a 10	Medio alto/Medio alto
		Planes de desarrollo con transparencia y consecuencia en crecimiento profesional		
		Sistema gestión personas 4.0		
		Reverse mentoring		
	Desarrollo sustentable (personas por tecnologías)	Reconversión/reubicación, planes de retiro, programas de actualización (diplomados, cursos, entre otros)	5 a 10	Alto/ Medio alto
Estudio de impacto de tecnología 4.0 en la fuerza laboral				
Incluir sindicatos en estrategias de desarrollo sustentable				
Gestión del conocimiento	Sistema o plataforma de gestión en red más IA	5 a 10	Medio/Medio	
Definir los requerimientos y estándares (competencias 4.0) para la capacitación (desarrollo de la oferta)	Actualizar marco de cualificaciones (MCM) para minería 4.0	0 a 5	Medio alto/Medio bajo	
	Alinear malla curricular con requerimientos de la minería 4.0			
	Benchmarking sobre programas de formación en tecnologías 4.0 en otros países			
	Definición estándares/ perfiles para pequeña y mediana minería			
Digitalización	Asegurar la captura confiable de los datos con precisión y oportunidad para alimentar modelo de negocios	Implementación de estándares de transmisión IoT de datos que permita captura confiable y su trazabilidad	5 a 10	Alto/Medio
		Habilitar infraestructura de redes ad hoc		
		Sensorización de los parámetros de operación y mantenimiento de cada proceso de la cadena de valor		
	Gestión de datos para habilitar la incorporación de nuevas técnicas de Data science	Almacenar y gestionar grandes cantidades de información desde los distintos procesos (Big data)	5 a 10	Alto/Medio
		Capturar talento para nuevas disciplinas de la ciencia de datos (AI, Analytics, Machine/Deep learning)		
		Asegurar la calidad de los datos		
	Pasar de ecosistemas aislados a interoperables en la cadena de valor	Conectar horizontalmente los procesos de la cadena de valor	5 a 10	Alto/Alto
		Conectar los diferentes niveles jerárquicos de cada proceso de negocio		
		Definir estructura de traspaso de información de un proceso a otro que sea confiable, auditable y segura		
		Definir una estructura de referencia para la integración de procesos (arquitectura)		
Implementación de centros de operación remota				

Fuente: Tercera sesión Roadmap Minería 4.0 (2020).

Con respecto a la Tabla 19 y Tabla 20 , se puede destacar que los desafíos que condicionan la capacidad de la industria para desarrollar los planes futuros son el Desarrollo del capital humano, la Digitalización y la. En el núcleo de Desarrollo de capital humano se puede mencionar que los principales desafíos mencionados podrían estar a completa operación o disponibilidad en el mediano plazo (5 a 10 años) y que el esfuerzo necesario y el impacto de ellos serán entre un nivel medio a alto. Como soluciones se pueden visualizar desarrollar competencias relacionales que ayudan a la gestión del cambio, sistemas o plataformas de gestión en red del recurso humano considerando Inteligencia artificial y determinar de forma cualitativa y cuantitativa el real impacto de las tecnologías 4.0 en la industria minera.

De acuerdo con Jara J. (2020), el desarrollo del capital humano es una de las materias más relevantes a la hora de aplicar nueva tecnología. Los proveedores deben acompañar a las compañías mineras, indicar y ayudar como impacta en la mano de obra. La resistencia al cambio de las personas debe ser tratada oportunamente, se debe considerar desde un inicio a las personas. Cualquier Roadmap tecnológico debe resaltar el capital humano, ya que las transformaciones digitales no pasan sólo por temas de tecnologías, pasan por que la gente las use, si la gente no usa la tecnología no hay transformación digital.

De igual manera Carmona C.-a (2020), menciona que llegar a los procesos, convencer a los procesistas/operadores que tienen que cambiar la forma de hacer cosas, no es de la noche a la mañana. Los detalles de los procesos son importantes, si no se inicia el cambio de proceso con los operadores no se produce el cambio (información debe fluir de abajo hacia arriba, desde los procesos, los grados de complicación dados por los detalles de los procesos complican los cambios tecnológicos). Otro punto relevante es evitar la invisibilidad hacia los trabajadores, por esto es relevante la asistencia/ formación de los operadores (ejemplo medición de presión de las personas, puede generar “miedo” a que los despidan por problemas de salud (ante ese tipo de situaciones el cambio tecnológico se debe enfrentar). De esta manera, para un OEM como Komatsu, iniciar en la base del proceso es relevante y no puede dejar de asistir a los operadores (asistencia constante), para llegar, por ejemplo, a la automatización de los equipos, el factor humano, no se puede reemplazar, hay que enseñar a los operadores a ser un buen usuario tecnológico.

3.1.7 Centro de estudios del cobre y la minería (CESCO)

El Centro de Estudios del Cobre y la Minería es una organización sin fines de lucro independiente, ubicado en Santiago de Chile. Fue fundada el año 1984 con el objetivo de identificar y proponer soluciones alternativas a los problemas que enfrenta el desarrollo de la industria minera (Cesco, 2020).

3.1.7.1 *Hacia una minería 4.0: Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente*

Este informe intenta abordar de qué forma el Estado y los distintos entes no gubernamentales -universidades, centros de investigación, proveedores y las compañías mineras, pueden encontrar mecanismos para la incorporación de nuevas tecnologías en la denominada “Revolución Industrial 4.0”, con el objetivo de mejorar el desempeño de las faenas, tanto desde el punto de vista productivo, medioambiental y de seguridad principalmente.

El estudio de Cesco considera 4 niveles de innovación, pero en el presente estudio, se considera agrupar estos niveles en innovaciones incrementales (marginal e incremental) y disruptivas (sustantiva y transformacional). Para el presente estudio se tienen 2 focos de interés:

- **Extracción:** Se consideraron cuatro procesos principales: Perforación, Tronadura, Carguío y Transporte, donde se identificaron 17 tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial, las cuales se clasifican en 4 grupos principales (Ver Figura 22):
 - a) Grupo 1: Corresponde a las tecnologías que hoy recién se están implementándose en una faena, se consideran inmaduras desde el punto de vista de la implementación en la industria, pero son maduras desde el punto de vista tecnológico. Las tecnologías consideradas son la captura de información online (incremental) y equipos híbridos (incremental).
 - b) Grupo 2: Corresponde a las tecnologías consideradas maduras, que han comprobado su eficacia y han sido incorporadas a la industria minera de forma masiva. En este grupo se consideran las tecnologías de operación autónoma en transporte (incremental), equipos eléctricos en carguío (incremental), nuevos elementos de desgaste y nuevos materiales para las brocas (incrementales).
 - c) Grupo 3: Se refiere a tecnologías inmaduras a nivel global, pero tienen altas expectativas respecto a su uso en la industria minera. Para aumentar la efectividad

de estas tecnologías se considera necesario asociaciones entre la industria, centros de tecnología, la academia o proveedores que se encuentren desarrollando estas tecnologías para potenciar su uso. En el caso de este grupo se consideran sólo innovaciones incrementales, las tecnologías de operación autónoma (perforación), operación semiautónoma (carguío), captura de datos in-situ (carguío) y entrenamiento de operación.

- d) Grupo 4: Se refiere a tecnologías que son inmaduras, y que además no han sido implementadas en la minería. Se considera como innovaciones incrementales el modelamiento avanzado, carga inteligente de explosivos, fuel cells y el análisis de muestras insitu.



Figura 22 Tecnologías de extracción consideradas por Cesco.

Adaptado de Cesco (2020).

- **Servicios:** Se consideraron doce procesos donde se destaca la logística, evaluación económica, permisos, proyectos, mantención, servicios mina, seguridad, donde se identificaron 26 tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial (ver Figura 23).
 - a) Grupo 1: Las tecnologías consideradas los chalecos inteligentes en seguridad (incremental).
 - b) Grupo 2: En este grupo se consideran como innovaciones disruptivas el monitoreo sísmico (seguridad) y el resto son incrementales, entre ellas se destacan uso de

energías renovables y SAP/ERP (logística), simulación de Montecarlo en evaluación económica y Smartcap (seguridad).

c) Grupo 4: Se considera como innovaciones incrementales en la categoría de mantenimiento, el entrenamiento y la ejecución del mantenimiento, uso de drones para el envío de repuestos y la impresión metálica de repuestos. Como innovaciones disruptivas se considera en el mantenimiento los modelos de falla predictiva y el monitoreo de condición predictivo.

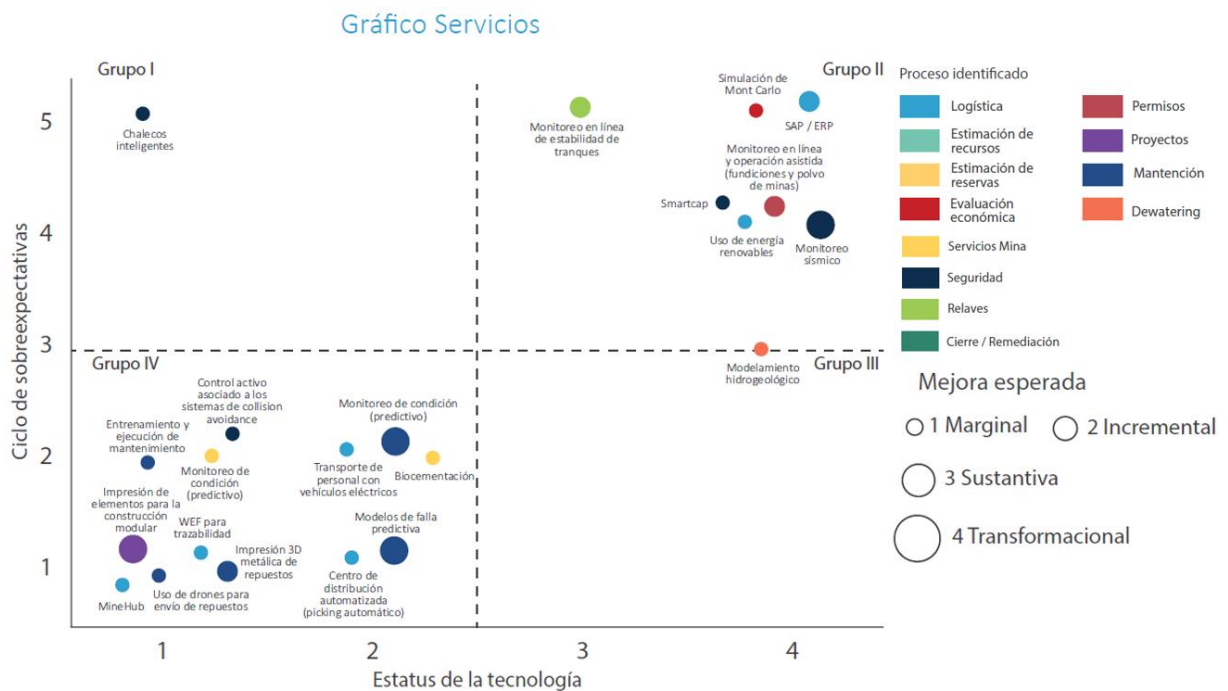


Figura 23 Tecnologías de servicios consideradas por Cesco.

Adaptado de Cesco (2020).

El éxito o el fracaso de la implementación de las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial en los próximos tres años depende de diversos factores. En extracción y servicios se tienen las siguientes probabilidades¹² de éxito de implementación y causas de fracasos por tecnologías:

¹² Probabilidad de implementación exitosa (de menor a mayor): 1) Improbable; 2) Probable 3) Posible; 4) Casi cierto.

Tabla 21 Probabilidad de implementación tecnologías de extracción.

Proceso	Tecnología asociada	Probabilidad de implementación 2020-2022	Causas fracaso
Perforación	Modelamiento avanzado	Posible	Cultura organizacional, conocimiento
	Análisis de muestras in situ	Probable	Tecnología poco robusta
	Operación autónoma	Probable	Cultura organizacional
	Nuevos materiales para brocas	Casi cierto	
Tronadura	Modelamiento avanzado	Posible	Cultura organizacional, conocimiento
	Carga inteligente de explosivos	Probable	Cultura organizacional
Carguío	Captura de información in situ	Posible	Cultura organizacional, tecnología poco robusta
	Operación autónoma	Improbable	Tecnología poco robusta
	Operación semiautónoma	Posible	Capex
	Operación asistida	Posible	Capex
	Nuevos elementos de desgaste		
	Entrenamiento de operación	Posible	No se aprecia valor significativo de parte industria
	Equipos eléctricos	Casi cierto	
Transporte	Captura de información online	Posible	Overhaul de equipos antiguos, información propietaria de fabricante
	Operación autónoma	Probable	No aplica en todas las faenas
	Entrenamiento de operación	Posible	No se aprecia valor significativo de parte industria
	Fuel cells	Improbable	Tecnología poco robusta, Capex
	Equipos eléctricos	Probable	Tecnología poco robusta, Capex

Fuente: Cesco (2020).

De la Tabla 21, se puede destacar que se considera casi cierta la implementación de equipos eléctricos y nuevos materiales para brocas, mientras que la utilización de fuel cells en transporte y el carguío autónomo (tecnología poco robusta) son considerados improbables entre el 2020-2022.

De la Tabla 22, se puede destacar que se considera casi cierta la implementación de SAP/ERP, el uso de energías renovables en las operaciones, mientras que el monitoreo remoto y diagnóstico (cultura organizacional), MineHub, impresión 3D metálica de repuestos y elementos para la construcción modular (tecnología poco robusta) son considerados improbables entre el 2020-2022.

Tabla 22 Probabilidad de implementación tecnologías de servicio.

Proceso	Tecnología asociada	Probabilidad de implementación 2020-2022	Causas fracaso
Logística	SAP/ERP	Casi cierto	
	Centro de distribución automatizada	Improbable	No se considera como core del negocio
	Medición online de performance	Probable	
	Monitoreo remoto y diagnóstico(sensores)	Improbable	Cultura organizacional
	Operación remota		
	Uso de energía renovables	Casi cierto	
	Transporte de personal con vehículos eléctricos	Posible	Masificación de la tecnología (no hay electrolinerías)
	MineHub	Improbable	
	WEF para trazabilidad	Probable	
Evaluación económica	Simulación de Monte Carlo		
Proyectos	Impresión de elementos para la construcción modular	Improbable	Capex, conocimiento, cultura organizacional
Mantenimiento	Monitoreo de condición (predictivo)	Posible	Conocimiento
	Modelos de falla predictiva	Probable	Conocimiento, requiere implementa otras tecnologías
	Uso de drones para envío de repuestos	Improbable	Tecnología poco robusta
	Impresión 3D metálica de repuestos	Improbable	Capex, conocimiento, tecnología poco robusta, valor poco significativo de parte de la industria
	Entrenamiento y ejecución de mantenimiento	Probable	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
Servicios mina	Monitoreo condición (predictivo)	Probable	Conocimiento, no se considera como core del negocio
Seguridad	Monitoreo sísmico	Posible	No aporta valor en todas las faenas
	Control activo asociado a los sistemas de collision avoidance	Probable	Cultura organizacional
	Smartcap	Posible	Cultura organizacional
	Chalecos inteligentes	Posible	

Adaptado en base a Cesco (2020).

3.1.8 Codelco

La Corporación Nacional del Cobre de Chile es una empresa autónoma que pertenece al Estado de Chile, que lidera la producción mundial de cobre. En el año 2019, Codelco tuvo una producción de 1,706,013 toneladas métricas de cobre fino que representa el 8% de la producción de cobre mina a nivel mundial, un 29% del cobre a nivel nacional y un 41% de la producción nacional de molibdeno de mina, lo que se tradujo en 12,525 [MUSD] en ventas totales (Codelco-a, 2019).

Los principales objetivos estratégicos de Codelco de acuerdo con Codelco-a (2019) y Báez F. (2014), que se incluyen en el plan de transformación de la Corporación se tiene:

- Mantener la reputación y liderazgo, posicionando a Codelco en el segundo cuartil de costos.
- Asegurar la competitividad en el mediano y en el largo con la introducción de nuevas tecnologías.
- Materializar los proyectos estructurales clave y maximizar los retornos al dueño, para mantener la relevancia y el aporte de Codelco al país por 50 años más.
- Asegurar los niveles de producción, manteniendo y reforzando la austeridad en miras de bajar los costos.
- Codelco define la sustentabilidad como su modelo de negocio, por lo que debe adecuar cambios en un nuevo escenario del negocio.

Dados los objetivos estratégicos el foco es mejorar la productividad en minería, mejorar el desempeño en los procesos metalúrgicos, mejorar el desempeño del negocio de fundición y refinería y mejorar la sustentabilidad global de la empresa.

3.1.8.1 Innovación y tecnología en Codelco

La política de innovación de Codelco se resume en los conceptos de crear, adaptar e integrar innovación, tanto disruptivas como incrementales.

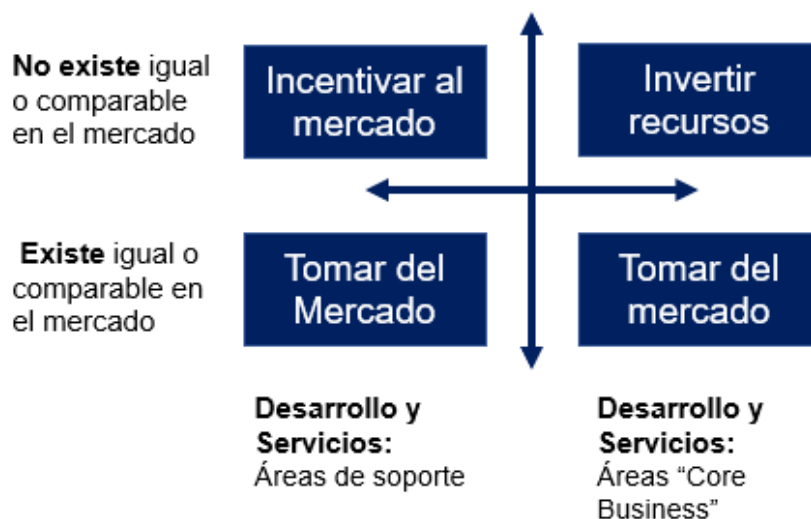


Figura 24 Estrategia de Innovación de Codelco.

Adaptado de Báez F. (2014).

La Figura 24, muestra la estrategia que tiene Codelco para materializar las innovaciones en las operaciones. Se destaca que Codelco focaliza sus recursos en las áreas de su Core Business que no cuentan con tecnología en el mercado, mientras que para el resto de sus desafíos se incentiva al mercado. De esta forma se busca mantener o mejorar la posición de mercado de la empresa, mejorar el desempeño de las operaciones y desarrollar ventajas competitivas con respecto a las otras empresas mineras. En la siguiente tabla se muestran los principales desafíos y soluciones que tiene Codelco en minería subterránea:

Tabla 23 Desafíos y necesidades minería subterránea según Codelco.

Desafío/Oportunidad	Solución/Necesidad	Líneas de desarrollo y aplicaciones
Profundización de los cuerpos mineralizados	Continuidad del flujo de mineral	-Minería continua -Minería subterránea autónoma
Disminución de las leyes	Mayor productividad y producción	-Automatización de operaciones de carguío y transporte
Roca de mayor competencia (Condiciones geotécnicas)	Seguridad y salud de las personas	-Descolgador -Pulsos eléctricos -Tecnologías de fragmentación
Variabilidad precio del cobre	Reducción de Costos	-HSBM -Box hole
Uso intensivo de capital	Focalización de recursos	-Elementos de fortificación triturables
Costos de insumos relevantes	Monitoreo de mejor opción precio/calidad	-Punto de vaciado -Desarrollo de túneles
Monitoreo y control de operaciones y procesos, manejo de grandes volúmenes de datos	Transformación digital	-Optimización de perforación y tronaduras -Construcción de piques con fortificación mecanizada
Compatibilidad entre equipos y procesos	Estándares de interoperabilidad	-Planificación de construcción de túneles -Eficiencia en agua y energía -Migración de datos de servidores corporativos a la nube

Fuente: Báez F. (2014) y Codelco (2020).

De acuerdo con la Tabla 23, los principales desafíos de la minería subterránea son la profundización de los cuerpos mineralizados, la disminución de las leyes, la variabilidad del precio del mineral de interés, entre otros. Nuevamente mayores productividades, reducción de costos, la seguridad y salud de las personas son necesidades centrales. Como líneas de trabajo principales de Codelco se considera la automatización de las operaciones, principalmente de las operaciones de carguío y transporte, la mejora en el desarrollo y construcción de túneles y la eficiencia en la utilización de agua y energía.

De acuerdo con Rojas P. (2020) y Carmona S. (2020), los principales desafíos justamente son la implementación de equipos autónomos, que para el caso de Chuquicamata subterráneo se está evaluando si se cumple o no con las productividades y costos esperados. Se espera la confirmación de la efectividad de la extracción con columnas de gran altura en Block/Panel caving, aplicar la electromovilidad para reducir costos de ventilación, tener un mayor dominio de la técnica de fracturamiento hidráulico, con tal de encontrar la configuración apropiada a cada caso de aplicación. Otro desafío importante, es el modelamiento del comportamiento del macizo rocoso a escala micro, con el objetivo de anticipar los estallidos de roca y obtener mayor productividad en los desarrollos y estimando de mejor manera las granulometrías del material a extraer (Mayor entendimiento de la geomecánica).

Con respecto a la electromovilidad, en Codelco se espera que todos los equipos, en los próximos 10 años si o si serán a batería y los proveedores tienen mucho que entregar en esta materia. Sin embargo, en la actualidad es difícil tener una flota completa con este tipo de equipos por los altos costos de las baterías (prácticamente una batería tiene el mismo precio que el equipo en sí), pero de a poco se irán incorporando a las faenas (Carmona S., 2020).

Como principal tecnología que se visualiza como posible quiebre tecnológico (si las pruebas resultan exitosas), se tiene el desarrollo de túneles con tuneladoras de gran tamaño (TBM) que permitan desarrollar los footprint de las minas en poco tiempo, con menores costos que la perforación y tronadura, obteniendo mejores productividades (más metros de avance por día). En general, los principales problemas que tienen estos equipos son su incapacidad de hacer ángulos agudos, tener que desarmarlas/armarlas dentro de los túneles (pérdida de horas operativas efectivas). Si los problemas mencionados se solucionan, se pueden tener importantes mejoras (Rojas P., 2020) (Carmona S., 2020).

La minería continua, si bien se considera dentro de los temas de líneas de desarrollo y aplicación, actualmente no está sobre la mesa para Codelco, básicamente por los resultados obtenidos en los proyectos anteriores. Los esfuerzos están focalizados en los equipos actuales, a las tuneladoras y al preacondicionamiento (Rojas P., 2020). Temas referentes a minería continua, al nivel que se hizo anteriormente, tienen una escasa probabilidad de ocurrencia en los próximos 10 años (Carmona S., 2020).

Para abordar con mayor fuerza temas referentes a tecnología y automatización, Codelco en el 2019 crea las siguientes áreas:

- **Vicepresidencia de Tecnología y Automatización en Procesos de Negocios:** Tiene como objetivo capturar los avances globales en digitalización, automatización, robótica y procesamiento y análisis de datos, para impactar en todos los procesos mineros y en las áreas administrativas, para mejorar la productividad, seguridad y confiabilidad de los procesos, asegurando además la ciberseguridad IT/OT de los sistemas.
- **Gerencia Corporativa Digital y Analítica Avanzada:** Tiene como objetivo, identificar las formas óptimas de operar los activos y procesos de la empresa, manejando de la manera más eficiente los grandes volúmenes de datos, para maximizar el beneficio, con tal de optimizar la producción de cobre fino, reducir los costos operacionales, mejorar los niveles de seguridad y reducir el riesgo en la operación.

De acuerdo con Rojas P. (2020), la política de inversiones en tecnología e innovación ha cambiado los últimos años. Se considera un tema relevante para el directorio, que intenta incorporar mejor tecnología a los proyectos, alineado con la estrategia de transformación de Codelco. Antiguamente la política de inversiones era que todos los proyectos debían ser con tecnología probada. Eso se cambió, ahora se considera una política con riesgos controlados (no con tecnología ultra probada), de esta manera se acepta un riesgo para incorporar nuevas tecnologías y mejorar de esta manera la competitividad de la Corporación, considerando una palanca clave la incorporación de nueva tecnología a las operaciones.

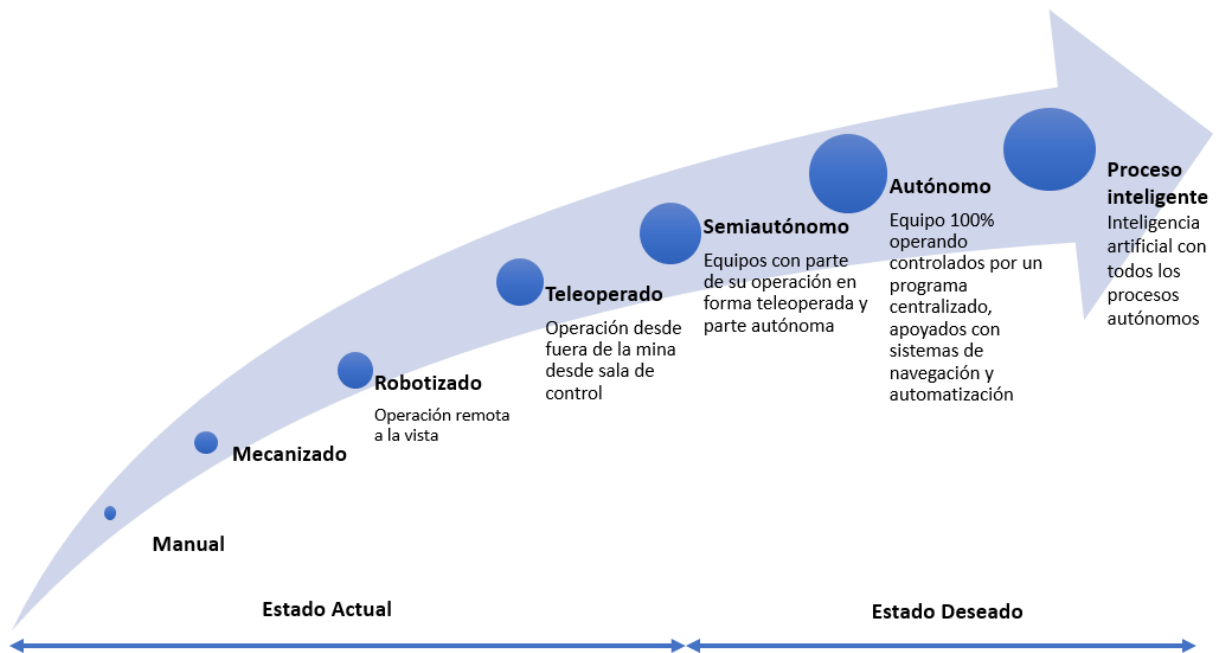


Figura 25 Visión Global de minería del futuro para Codelco.

Adaptado de Urzúa R. (2017).

De la Figura 25, se puede destacar que el estado deseado para la minería del futuro desarrollada por Codelco se basa en la operación autónoma de los equipos mineros y procesos inteligentes full automatizados.

3.1.9 Komatsu

La visión de empresa que tiene Komatsu Mining Corp. es “Ser protagonistas del éxito de nuestros clientes”, lo que muestra un claro enfoque en los clientes.

La misión es “Empoderamos a nuestra gente para vivir el negocio como propio, comprometiéndonos siempre con exceder las expectativas de los clientes, ofreciendo soluciones ágiles, flexibles y de calidad, con los mejores productos y servicios en todos los ámbitos de nuestra operación. Mejoramos continuamente la eficiencia de los procesos, cuidamos el medio ambiente y promovemos la seguridad y el desarrollo de nuestras personas, para potenciar el crecimiento sostenido y sustentable del negocio, generando valor a todos los grupos de interés” (Komatsu Cummins, 2018).

Komatsu como empresa proveedora de productos y servicios para la minería, tiene que estar alineada con los requerimientos actuales de las compañías mineras o proponer

soluciones adecuadas a los estados deseados del mediano-largo plazo de estas empresas, para de esta manera captar el interés de los clientes y obtener una ventaja competitiva con respecto a sus principales competidores. De esta manera, los desafíos y necesidades para la minería subterránea vistos desde la perspectiva de Komatsu son los desafíos y necesidades de sus clientes, donde se puede destacar:

Tabla 24 Desafíos y necesidades minería subterránea según Komatsu.

Desafíos	Necesidades	Líneas de desarrollo
Condiciones adversas en operación (minería profunda, calor, polvo, ventilación)	Reducir requerimientos de ventilación y calefacción	<ul style="list-style-type: none"> -Electrificación de equipos -Excavación mecanizada -Automatización -Gestión de mantenimiento -Sistemas de monitoreo e integración de sistemas -Soluciones inteligentes
Erradicación de emisiones subterráneas contaminantes y disminución huella de carbono	Eliminación o disminución del consumo de diésel	
Tasas de avance en desarrollos mineros	Desarrollos continuos o perforación y tronadura más eficiente	
Incrementar productividad y producción	Carguío y transporte más eficientes o Minería continua	
Seguridad en interior mina	Alcance del cero daño en la operación	
Incremento de costos operacionales	Disminución costo del ciclo de vida TCO de los equipos	
Operación en zonas inseguras o acceso restringido	Teleoperación/Automatización /Robotización	
Manejo de altos volúmenes datos y en tiempo real	Transformación digital	
Estándares de interoperabilidad	Integración de equipos	
Monitoreo y sensorización de equipos	Monitoreo en tiempo real de signos vitales de los equipos, Mantención predictiva	

Elaboración propia basada en Urzúa R. (2019), Maki B. (2019) y Lyten M. (2019).

A partir de la Tabla 24, se puede destacar que Komatsu considera como desafíos las condiciones complejas de las operaciones subterráneas, junto al mejoramiento de la seguridad en interior mina, incrementar la productividad de las operaciones, reduciendo costos de operación y disminuyendo la huella de carbono que emiten los equipos. La fabricación de equipos electrificados, sean híbridos o a baterías, la automatización de los equipos, el desarrollo de una minería mecanizada y la gestión del mantenimiento predictivo con un monitoreo efectivo de los signos vitales de los equipos, son los ejes principales de desarrollo que impacta directamente los desafíos planteados.

En resumen, Komatsu quiere impulsar una minería más segura, más productiva, de menores costos, considerando los desafíos para un desarrollo sostenible.

3.2 Tecnologías y procesos aplicables en minería subterránea

En base a las visiones de minería actual y futura recabadas en la sección anterior, se determina la factibilidad y el impacto de ciertas tecnologías y procesos en el funcionamiento de las operaciones mineras y su gestión. Se destaca la importancia de la electromovilidad, la interoperabilidad, la tecnología de la información, comunicación, automatización y robótica (TICAR).

3.2.1 Electromovilidad

Como Electromovilidad se considera al uso de sistemas de impulsión o tracción que utilizan energía eléctrica aplicados a distintos equipos de transporte (Ministerio de Energía de Chile-a, 2020).

Los principales beneficios de esta tecnología son:

- Mejor calidad del aire, libre de partículas y gases nocivos.
- Aporte cambio climático, disminución huella de carbono y emisión de gases efecto invernadero (GEI).
- Disminución de la contaminación acústica.
- Gestión de residuos más efectiva, ya que no se deben manejar residuos peligrosos como en el caso de equipos diésel (lubricantes y filtros), los sistemas de frenos sufren menores desgastes y las baterías al cumplir su vida útil (8 a 10 años) pueden ser utilizadas en aplicaciones estacionarias (10 a 15 años) y posteriormente ser recicladas.
- Mayor eficiencia energética, reducción de costos operacionales, ya que un vehículo eléctrico gasta alrededor de un quinto de la energía que un vehículo a combustión equivalente, principalmente porque las eficiencias de un motor de combustión interna no superan el 50%, mientras que las de un motor eléctrico están por sobre un 95%. Además, los vehículos eléctricos tienen la ventaja de recuperar energía gracias a los sistemas de frenos regenerativos.
- Menores costos de mantención, por menor cantidad de partes móviles y componentes más simplificados.
- Desarrollo concepto de “minería inteligente”, mayor seguridad, ya que los equipos eléctricos se consideran sensores móviles que capturan datos, simplifican la

aplicación de herramientas digitales y permite la implementación de soluciones como la conducción autónoma o semi autónoma.

Por otra parte, las principales limitaciones de la electromovilidad a la fecha son:

- Autonomía de los equipos.
- Mejoramiento en almacenamiento energético, donde se incluye mejorar las tecnologías para el almacenamiento de las baterías, mayor densidad energética, mayor capacidad de carga/descarga en tiempos menores, control de temperatura en ciclos de carga/ descarga.
- Mayores costos de fabricación de equipos.

Los equipos eléctricos no son algo nuevo en minería, ya que desde los años 70 la empresa Sandvik introdujo los LHD eléctricos a cables en distintas operaciones mineras alrededor del mundo, donde se destaca LKAB Kiruna en Suecia y Northparkes en Australia, considerándose a estos equipos como parte importante de la gama de productos mineros de esa empresa (Emilsson H., 2012).

Tabla 25 Resumen comparación entre LHD diésel y LHD eléctricos a cables.

LHD Diésel	LHD eléctrico
Gran flexibilidad, rango de operación ilimitado	Limitado rango de operación
Bajo costo de capital	Costo de capital adicional por infraestructura necesaria
Carga de combustible rápida y fácil	Cargas limitadas por la infraestructura de la mina
Baja eficiencia energética (30-35 %)	Alta eficiencia energética (90%)
Operadores altamente calificados para la mantención	Necesita menos horas de trabajo de mantención
Costo operativo fuertemente influenciado por variaciones del precio del diésel	Costo operativo fuertemente influenciado por variaciones del precio de la energía eléctrica
Altos niveles de ruidos y vibraciones	Bajos niveles de ruidos y de vibraciones
Emite alta cantidad de gases contaminantes, mayor requerimiento ventilación	No emite gases contaminantes, menor requerimiento de ventilación
Alto nivel de energía específica	Mayor facilidad para automatizar

Elaboración propia basada en University of Queens (2017).

Tabla 26 Comparación LHD de 14 toneladas diésel y eléctricos a cables Sandvik.

Tipo Costos	Parámetros	Eléctrico a cables	Diésel	Notas
Otros Datos	Modelo LHD Sandvik	LH514E	LHD514	
	Disipación de calor [kW]	107.0	614.0	
Combustible	Output nominal[kW]	177.0	256.0	
	Consumo nominal de combustible [g/kWh]	-	217.0	100% carga del motor
	Costo por electricidad [USD/kWh]	0.1	-	Estimado de Hydro Canadá
	Costo por combustible diésel [USD/litro]		0.9	
	Costo [USD/hr]	13.9	29.8	
	Rendimiento [kWh/hr] o [litro/hr]	115.0	33.1	
	Costo anual combustible [USD]	48,623.3	104,408.3	basado en 3500 horas operativas
Mantenición	Costo anual mantención [USD]	86,301	75,000.0	
Ventilación	Requerimiento [cfm]	0	20,500	CFM (100 CFM por HP)
	Costo ventilación por hora	0	22.0	
	Costo anual ventilación [USD]	0	128,736.0	
Total	Costo operación [USD]	134,924.3	308,144.3	

Elaboración propia basada en Sandvik Mining (2012).

En la Tabla 25 y Tabla 26 , se muestran los principales criterios de comparación entre los LHD a diésel y eléctricos a cables, donde se destaca la flexibilidad de los equipos a diésel y la limitación que tiene el LHD eléctrico a cable en su desplazamiento. Un equipo tradicional a cables como el LH514E (14 toneladas) de Sandvik, tiene un cable de 400 metros, que brinda una autonomía de 800 metros, lo que limita fuertemente la flexibilidad operacional. Si bien el equipo eléctrico a cables tiene un menor costo de operación relevante, el criterio de flexibilidad es clave al igual que la necesidad de una infraestructura más compleja para energizar a los equipos, por lo que la mayor cantidad de operaciones mineras alrededor del mundo han optado por los modelos a diésel en desmedro de los equipos eléctricos a cables.

En la última década, la necesidad de equipos menos contaminantes por parte de las compañías mineras, para cumplir con sus compromisos socioambientales y la mejora considerable en las tecnologías relacionadas a los sistemas de impulsión o tracción que utilizan energía eléctrica, generan una importan tendencia hacia los equipos de esta naturaleza, donde se destacan equipos híbridos y a baterías.

3.2.1.1 Tecnología híbrida

La tecnología híbrida es denominada como una “tecnología de transición” entre los equipos convencionales a combustión y los vehículos 100 % eléctricos. Si bien esta tecnología está presente en los mercados de vehículos de transporte de pasajeros (buses, taxis), transportes de carga (camiones reparto urbano, vehículos corporativos) y vehículos particulares, en operaciones unitarias de minería subterránea en el mundo, a la fecha sólo existe un caso de aplicación de esta tecnología a nivel industrial, que es el caso de los equipos LHD híbridos de Komatsu en la faena minera El Teniente de Codelco.

3.2.1.1.1 LHD Híbrido de Komatsu

El portafolio de equipos de Komatsu cuenta con innovadores equipos LHD de 18 y 22 toneladas (18HD Y 22HD), que cuentan con sistema de propulsión híbrida SR, sin caja de cambios, ni accionamientos mecánicos, que tiene la particularidad de utilizar diésel únicamente para la generación de energía eléctrica motriz. Este equipo está siendo utilizado en pruebas a nivel industrial en la faena minera El Teniente de Codelco, considerándose un hito relevante dentro de la gran minería subterránea tanto a nivel nacional como internacional (Codelco-b,2019).

Dentro de las principales posibilidades de mejoras operacionales reportadas por Codelco-b (2019) y Komatsu-a (2020) se puede destacar:

- **Mayor productividad:** 10 a 20 %, por efecto de una mayor aceleración y operación más uniforme (sin cambios de marcha).
- **Reducción esperada de costo de operación:** 30%, ya que la propulsión eléctrica es más eficiente que las propulsiones mecánicas (diferencia clave en este ítem es la eficiencia del tren motriz eléctrico).
- **Aumento de confiabilidad y disponibilidad:** 10-20% (menos horas de motor, mayor vida útil, reemplazo más fácil de componentes y menor cantidad de piezas móviles).
- **Reducción de consumo diésel:** sobre 25%.
- **Reducción de emisiones y reducción de calor liberado:** sobre 25%.
- **Preparado para automatización:** El tren motriz totalmente eléctrico es considerado una plataforma que facilita la implementación de una operación telecomandada, semi autónoma o autónoma.

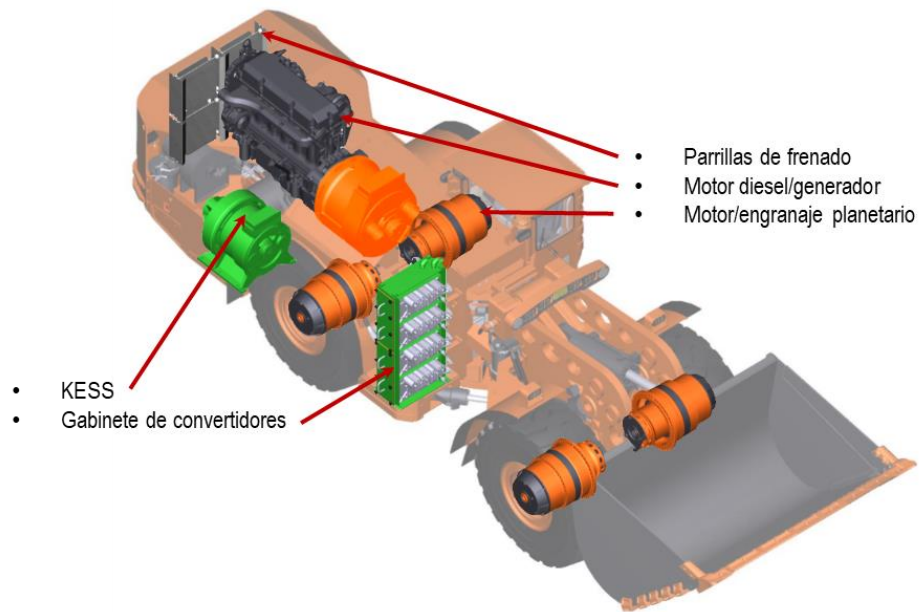


Figura 26 Esquema sistemas LHD híbrido de Komatsu.

Fuente: Maki B. (2019).

De la Figura 26, se puede destacar el posicionamiento de los distintos sistemas que caracterizan a los LHD del tipo Híbrido. De acuerdo con Komatsu-a (2020), el funcionamiento del LHD híbrido se basa en los sistemas SR y KESS, los cuales generan importantes diferencias con respecto a los equipos tradicionales. Una de las diferencias que se puede mencionar es que, al frenar el equipo, en vez de usar frenos mecánicos, los motores SR montados en cada rueda convierten la energía de frenado en electricidad enviándola al Sistema KESS (Sistema de Almacenamiento de Energía Cinética).

Cuando el LHD acelera nuevamente, se usa la energía del Sistema KESS y se reutiliza para ayudar en la aceleración de la máquina. Durante la aceleración se potencian los 429 [hp] del motor diésel con otros 550 [hp] derivados de la energía de frenado. Estos 979 [hp] de potencia brindan al equipo de una gran rapidez, generando de esta manera ahorros en combustible.

3.2.1.2 Tecnología de baterías

Independientemente del tipo de vehículo eléctrico, existen seis características clave con las que se debe evaluar la batería adecuada para su uso:

- Energía específica
- Potencia específica

- Vida útil (calendario y ciclo de vida)
- Rendimiento (estabilidad de temperatura)
- Costo
- Seguridad

El parámetro principal para los equipos mineros es la energía específica, que se define como la cantidad de energía eléctrica almacenada por unidad de masa [Wh / kg] (especifica la capacidad de una batería). En la práctica, a menudo se comprometen el tamaño de la batería, con la energía específica limitada, maximizando la vida útil del ciclo y el rendimiento térmico (The Boston Consulting Group Inc., 2010).

3.2.1.2.1 Tipos de batería

Si bien existe una amplia gama de baterías en el mercado, las baterías más utilizadas en los equipos mineros corresponden a baterías de litio o baterías de sales fundidas. Cada proceso químico de las baterías tiene sus respectivas ventajas y desventajas, los cuales se pueden utilizar dependiendo del equipo minero a fabricar y su respectivo tamaño, por ejemplo, puede que un determinado proceso químico funcione perfectamente en equipos LHD, pero en jumbos de avance no sea eficiente. Los principales tipos de batería son:

Tabla 27 Principales tipos de batería utilizadas en vehículos automotores.

Tipo de Batería	Proceso químico
Ion litio	Lithium Cobalt Oxide (LCO)
	Lithium Manganese Oxid (LMO)
	Lithium Titanate Oxide (LTO)
	Lithium Nickel Manganese Cobalt (NMC)
	Lithium Manganese Phosphate (LMP)
	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA)
	Lithium Iron Phosphate (LFP o LFPO ₄)
Sales fundidas	Sodium-Sulfur (NaS)
	Sodium Nickel Chloride (Zebra)
	Liquid metal

Fuente: De Lamberterie P. (2013).

A partir de la Tabla 27, se puede destacar que existe una gran variedad de baterías Ion litio y de sales fundidas, como principal atributo de las baterías de sales fundidas son sus bajos costos, son seguras, pero tiene bajo poder específico e importante efecto “memoria”. Por otra parte, las baterías de litio han permitido aumentar la densidad energética por peso [Wh/kg] y volumen [Wh/lt], minimizando el efecto “memoria”.

Según Soto E. (2017), son 3 las principales baterías de ion-litio:

- **Litio polímero:** compuesta por litio y óxido de cobalto en su cátodo (LCO), ampliamente utilizadas para teléfonos móviles.
- **Litio fosfato:** compuesta de litio, fosfato y óxido de hierro en su cátodo (LFP), que tiene algunas aplicaciones en electromovilidad dada su alta potencia, pero tiene la complicación de poseer una menor densidad energética. Es más robusta que los otros tipos de baterías de litio.
- **Ion litio:** pueden estar compuestas por aleaciones metálicas en su cátodo como Manganeseo (LMO), Níquel – Manganeseo – Cobalto (NMC) o Níquel – Cobalto – Aluminio (NCA). Otro tipo de batería utiliza Titanio en su ánodo (LTO), lo que mejora su desempeño y seguridad, pero tiene la desventaja de brindar una menor energía y poseer un alto costo.

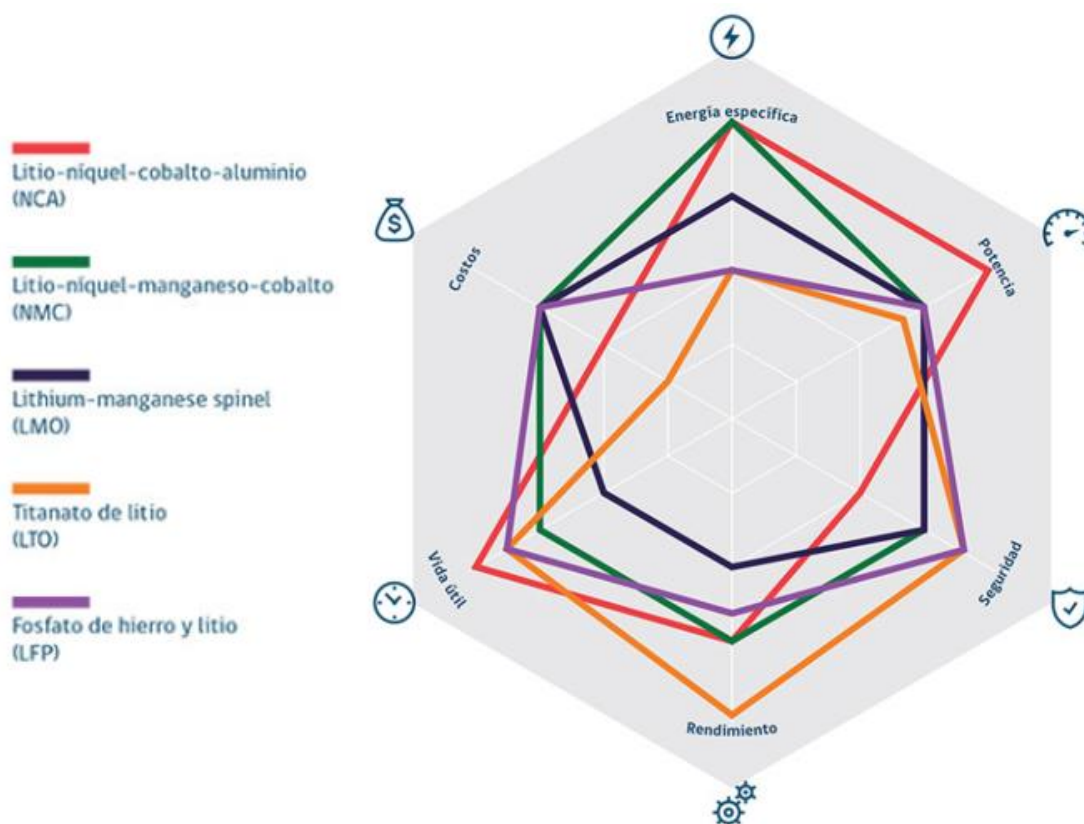


Figura 27 Comparación de baterías ion-litio.

Fuente: Ministerio de Energía de Chile-b (2020).

Como se muestra en la Figura 27, no existe una química de iones de litio que satisfaga todos los requisitos para una batería EV ideal. Esto ha llevado a un desarrollo fragmentado y a la adopción de diferentes químicas de iones de litio por los fabricantes de vehículos y OEMs presentes en el mercado. De esta manera, se predice que las baterías del tipo NMC y NCA serán el foco de la mayoría de los desarrollos futuros por su potencial de altos niveles de energía específicos y sus costos de fabricación (The Boston Consulting Group Inc., 2010).

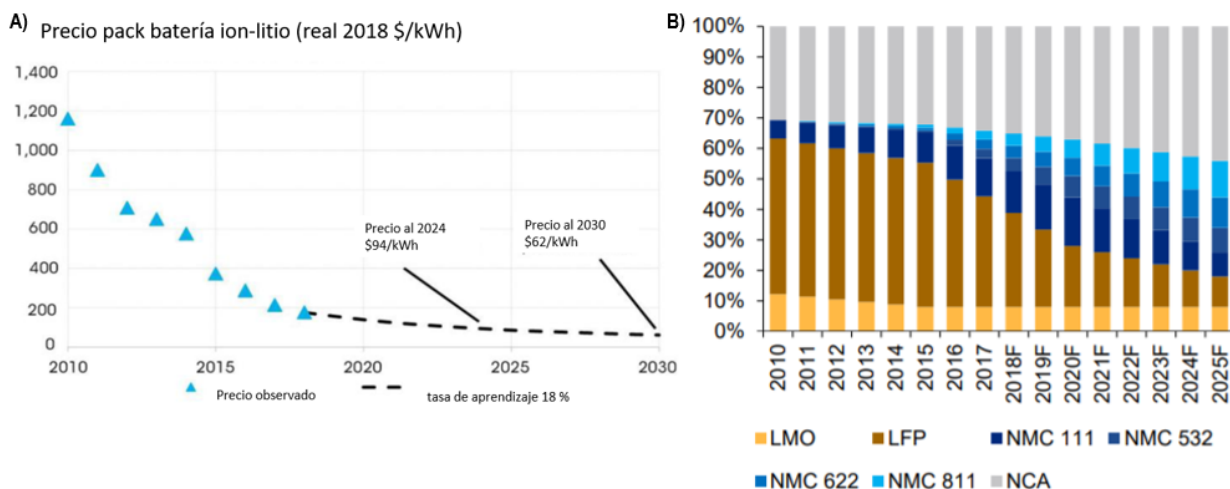


Figura 28 A) Precios de baterías ion-litio; B) Demanda estimada de baterías ion-Li en EV.

Elaboración propia basada en Curry C. (2017) y Macquarie Capital Ltd. (2018).

En la Figura 28, se muestra la tendencia de los precios de baterías de ion-litio. Se quiere destacar que los precios dentro del horizonte de estudio tendrán una variación entre 150 y 62 [USD/kWh] (2020 a 2030), que representa una variación aproximada del 60%. También se muestra que la demanda de baterías de ion-litio NCA y NMC aumenta en el tiempo. Las especificaciones técnicas de las baterías se pueden visualizar en el Anexo C, al igual que los proveedores más importantes de baterías industriales (ver desde la página 284).

3.2.1.2.2 Cargadores eléctricos

El proceso de recarga de baterías es fundamental, tanto para el funcionamiento de los equipos eléctricos, como para la red de distribución a la que se conectará la red de carga. Existen 4 parámetros para caracterizar la recarga:

- **Nivel (level):** Define al cargador según la potencia eléctrica del equipo. Se clasifican en 3 niveles de carga:
 - a) Carga convencional o lenta (1.1-3.3 [kW]): donde el tiempo de recarga varía entre 6 a 10 horas.
 - b) Carga semi-rápida (6- 44 [kW]): permite recuperar la energía necesaria para recorrer 66 [km] en una hora de carga.
 - c) Carga rápida: permite recargar las baterías al 80% en tiempos menores a 1 hora.
- **Tipo de conector:** Se refiere al tipo de enchufe, los cuales tienen distintos pines y geometrías que cumplen a su vez el rol de intercomunicar el vehículo eléctrico con el cargador, pueden ser de corriente alterna¹³ o corriente continua¹⁴.
- **Modo de carga:** Se refiere a la conectividad y comunicación entre el cargador y el equipo donde se considera principalmente enchufes no dedicados,, enchufes no dedicados con protección y control incorporado en el cable, enchufe dedicado y cargador externo.
- **Tiempo de carga:** Se basa en las potencias de los cargadores y la capacidad de almacenamiento de energía en las baterías, además de la potencia de carga máxima permitida y del control de la temperatura. En Anexos C (desde la página 284), se puede visualizar que teniendo una batería con capacidad de energía de 90 [kWh] y una potencia disponible en el cargador de 175 [kW] (DC), el tiempo de carga sería de unos 23 minutos.

Estos parámetros condicionan la conexión a la red eléctrica, los niveles de corriente/voltajes asociados, como se inyecta energía al vehículo (AC o DC), los sistemas de comunicación entre el vehículo y el cargador, entre otros (Ministerio de Energía de Chile-a, 2020).

Finalmente, es importante señalar que, dentro de las categorías mencionadas, el medio físico por el cual se establece la transferencia de energía difiere entre tecnologías, los que pueden ser conductivos (utilizan un cable o medio de conducción sólido para el flujo de electrones) e inductivos (transferencia inalámbrica mediante inductores magnéticamente acoplados).La carga inductiva permitiría, potencialmente, transferir

¹³ Corriente eléctrica variable. Forma en que la energía se distribuye en los hogares.

¹⁴ Corriente de intensidad constante. Forma en que la energía es almacenada en las baterías.

energía durante los viajes, implementando carreteras energizadas y solucionar, en gran medida, el problema de autonomía de las baterías (Stanford News, 2017). Sin embargo, los cargadores conductivos dominan, casi en su totalidad, el mercado de cargadores eléctricos debido a su madurez y desempeño probado (Yilmaz M., 2013). Las aplicaciones de cargadores inductivos tienen prototipos principalmente ligados a operación de buses bajo el concepto de carga de oportunidad u Oppcharge (OppCharge,2017).

3.2.1.2.3 Desafíos y consideraciones en desarrollo de baterías

La estrategia de carga en la utilización de equipos eléctricos a batería en las faenas mineras es considerada la decisión clave:

- **Batería fija, carga a bordo:** Requiere una carga rápida de la batería para minimizar el tiempo de inactividad de la máquina. Empresas como Sandvik y Caterpillar consideran esta estrategia. Komatsu por su parte, considera esta estrategia para equipos de mayores capacidades.
- a) *Desafío 1 Potencia de carga necesaria:* La carga rápida de una flota de baterías de alta energía (ejemplo 700 [kWh] cada una) requerirá una cantidad importante de potencia (Carga de 30 minutos (2C) = 1.4 [MW] por máquina).
Las compañías mineras, consideran que el tiempo de carga de los equipos puede desarrollarse durante el cambio de turno. La carga rápida de varios equipos al mismo tiempo impondrá una carga muy alta en el suministro de energía, lo que puede cortar el suministro de la faena.
- b) *Desafío 2 Conexión de cargador:* El hacer manualmente la conexión de los cargadores representa un riesgo altamente peligroso para los operadores. Implementar la conexión de carga robotizada sería una importante solución para este desafío, para minimizar el contacto con los cables de carga y evitar riesgo de descarga eléctrica a los operadores. Otra alternativa puede ser la carga inalámbrica mediante resonancia magnética (considerar el posible problema con entornos de materiales ferrosos).
- **Batería reemplazable, carga remota:** Requiere el retiro de la batería descargada para ponerla en carga y reemplazarla por otra batería totalmente cargada. Empresas como Artisan-Sandvik y Epiroc consideran esta estrategia. Komatsu considera que

esta estrategia puede ser factible para equipos mineros de explotación de vetas angostas.

- a) *Desafío 1 Espacio subterráneo adicional:* Las flotas grandes requerirán una infraestructura importante y un mayor desarrollo de la mina para crear espacios para almacenar e intercambiar las baterías reemplazables (de 2 a 3 baterías por máquina - aprox. de 4 a 10 [m²] por batería, 1 cargador por máquina - aprox. de 5 a 12 [m²] por cargador y un sistema de manipulación)
- b) *Desafío 2 Costo económico de un manipulador de baterías dedicado:* Necesidad de manipulador especializado por necesidad de reemplazos continuos de baterías y posibles atascamientos de las baterías.

Otros desafíos y consideraciones se pueden visualizar en la siguiente tabla:

Tabla 28 Desafíos y consideraciones para el desarrollo de baterías.

Desafío	Consideración
Eficiencia	La eficiencia de los consumidores de energía en los equipos afecta de forma significativa la vida útil general de la batería entre recargas.
Alimentación de 24 [V]	Requisitos de alta potencia para impulsar ventiladores y refrigeración (más de 5 kW). No se obtienen beneficios al convertir la energía eléctrica a hidráulica y luego a ventiladores de refrigeración o aire acondicionado. Cada cambio de tipo de energía trae consigo ineficiencia.
Sistemas de control de temperatura	Los requisitos de temperatura de la batería son significativamente diferentes de los de un motor diésel; la batería en particular, tienen una ventana de temperatura de operación mucho más estrecha que la de un motor diésel, por lo cual requiere una solución de control de temperatura (calefacción y refrigeración) muy diferente.
Demanda hidráulica/tren motriz	Mayor complejidad en las configuraciones de tren motriz y motores hidráulicos ya que separados son mejores a la hora de compartir los recursos de batería de forma eficiente.
Frenado mecánico/dinámico	Considerar los requisitos funcionales, las necesidades de seguridad y las limitaciones de diseño
Complejidad del tren motriz	Los sistemas eléctricos son más caros por [kg], en comparación al hierro de los equipos diésel. Agregar complejidad mejora el rendimiento del vehículo, pero agregara costos.

Elaboración propia basada en Lyten M. (2019).

3.2.2 Tecnología a Hidrógeno

Otra alternativa para adelantar la meta de carbono neutralidad de las operaciones mineras es la utilización del denominado “hidrógeno verde”. Puede ser utilizado en transporte, telecomunicaciones y como celdas de combustible. También puede ser utilizado para generación eléctrica y tiene potencial para reemplazar a las centrales a carbón y a gas natural.

Como principal ventaja de la utilización de hidrógeno se considera que su combustión produce sólo agua. Así, el hidrógeno puede ser particularmente apropiado para sustituir a los derivados del petróleo. Uno de los inconvenientes del hidrógeno para cumplir con el reemplazo de los derivados del petróleo es no ser un combustible primario, ya que se tiene que producir en base a otras fuentes (energía solar, por ejemplo). Sin embargo, considerando el caso de estudio de División El Teniente, se tiene la ventaja que esta faena minera proyecta la utilización de hidrógeno en sus equipos de mayor tamaño. De esta manera, en esta faena minera se dispondrá de una fuente base para la generación de hidrógeno.

De acuerdo con Valdivia P. (2019), las principales ventajas del uso de hidrógeno en las operaciones mineras son las siguientes:

- Independencia del petróleo.
- Cero contaminación, sólo emite agua.
- Menor mantenimiento que equipos diésel.
- Propicia niveles de automatización relevantes.
- Mayor autonomía del vehículo H₂ (con respecto al eléctrico a baterías) por mayor concentración de energía que las baterías.
- Rendimientos en torno al 55%.
- Bajo niveles de ruido, sólo los elementos auxiliares emiten ruido.
- Recarga de combustible rápida, en torno a 5 minutos.
- Si es producido en la misma faena minera, elimina la logística externa del diésel.

Por otra parte, de acuerdo con Rivera J. (2020) las principales desventajas del hidrógeno son:

- Gas altamente inflamable.
- Difícil de confinar, genera altas presiones al almacenar.
- Es un fluido criogénico y puede estar líquido a temperaturas (-252.87 °C)
- Amplios límites de inflamación.
- Baja energía de encendido.
- Alta velocidad de llama y poco visible.
- Hay que desarrollar normas para uso del hidrógeno en minería subterránea.

De esta manera, si bien la utilización de hidrógeno parece una buena alternativa de reemplazo del diésel, tiene mayor autonomía que los equipos a baterías y tiene una carga rápida, el tener amplios límites de inflamación y ser un gas altamente inflamable, aumenta el riesgo de incendios en las operaciones de minería subterránea, lo cual limita su utilización. Sin embargo, al mediano-largo plazo, cuando la tecnología sea más madura se puede considerar como alternativa. En cambio, para operaciones de minería a cielo abierto, puede ser una importante alternativa ya que se minimizan los riesgos de incendio por disponer de un ambiente de trabajo que cuenta con espacios abiertos, con ventilación natural y normas desarrolladas e implementadas alrededor del mundo.

Como iniciativa relevante en la utilización de hidrógeno se considera el Dumper Komatsu HD 605-7 que es considerado el vehículo a hidrógeno más grande y avanzado del mundo con una capacidad de carga de 300 toneladas métricas, que evitará la emisión a la atmósfera de 1.3 millones de kilos de CO₂, ahorrando 500,000 litros de combustible. Este proyecto es desarrollado en conjunto con Anglo American y Williams Engineering (Minería en línea, 2020).

3.2.3 Interoperabilidad

Como tendencia clásica las empresas proveedoras de equipos mineros (OEMs) o de tecnología (OTMs) han utilizado interfaces específicas, cerradas y patentadas, que no tienen una naturaleza colaborativa con respecto a las demás alternativas del mercado salvo en requerimientos específicos. De acuerdo con Valenzuela H. (2019), las principales características actuales en la industria minera son:

- Sujeta a soluciones tecnológicas propietarias.
- Carente de sistemas y tecnologías integrables.
- Falta de capacidades y competencias locales específicas.
- Cautiva de un número pequeño pero dominante de OEM¹⁵ / OTM¹⁶
- Modelos de negocio que favorecen a los OEM / OTM
- Incompatibilidad entre diversas tecnologías.

¹⁵ OEM: Original Equipment Manufacturer.

¹⁶ OTM: Original Technology Manufacturer.

La aceleración del cambio que está generando la transformación digital considera la adopción de nuevos sistemas tecnológicos, donde la compatibilidad entre ellos juega un papel fundamental para la agilización de procesos. Empresas como Codelco y BHP, están bajo la premisa de crear una Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad Minera que tenga como objetivos:

- Identificar y priorizar guías y estándares con la industria transversalmente.
- Generar nuevas guías y estándares, publicarlos y difundirlos.
- Adoptar y adaptar estándares desde otras industrias y organizaciones internacionales.

Estos objetivos están orientados principalmente para desarrollar sistemas y tecnologías integradas, donde se genere un espacio para el desarrollo de proveedores, promoviendo la generación de políticas y normativas legales, para de esta forma mejorar la competitividad de la industria minera en su conjunto, bajando los costos de operación y mantención.

Para Codelco en particular, la interoperabilidad será considerada como una de las condiciones de borde, que puede determinar dejar dentro/fuera a un proveedor (Rojas P., 2020).

La interoperabilidad se define de la siguiente manera “la capacidad de los sistemas de tecnologías de información y comunicaciones (TIC), de los sistemas de tecnología operacional (OT), y de los procesos de negocio que lo sustentan, para intercambiar datos y transferir control. Esto a su vez proporciona la capacidad para que los sistemas y organizaciones puedan trabajar juntos sin problemas (inter-operar)” (Interop, 2018).

Se considera relevante mencionar que, en minería se pueden reconocer al menos dos tipos de interoperabilidad: entre procesos y entre marcas. La Interoperabilidad entre procesos se refiere a que las distintas actividades dentro de la operación minera puedan intercambiar información, ejemplo de ello se considera que los sensores de un LHD sean capaces de entregar datos al camión de transporte del mineral que carga. Por otro lado, la interoperabilidad entre marcas se refiere a que sea posible hacer reposiciones de los sistemas y equipos, utilizando múltiples marcas, es decir, que el funcionamiento de la operación minera no dependa de utilizar un determinado proveedor de tecnologías o equipos.

Es importante desarrollar estándares de interoperabilidad que permitan el intercambio de datos y espacios de prueba para de esta manera, facilitar la innovación, su escalamiento, mejorar la productividad, entre otros. Por otro lado, existe amplio espacio de mejora en términos de homologación de requisitos a proveedores y contratistas, reduciendo de esta forma los tiempos de acreditación y los costos.

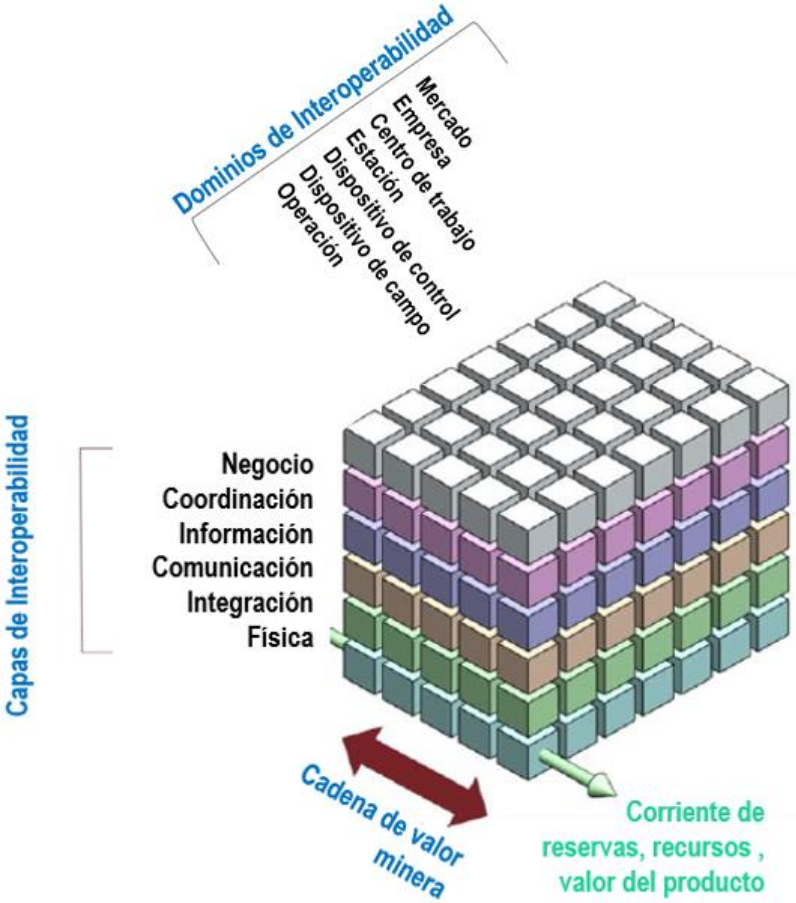


Figura 29 Modelo de Conceptual para la interoperabilidad en Minería de Interop.

Adaptado de Valenzuela H. (2019).

Al 2017, no existían estándares de interoperabilidad en la industria minera chilena, lo cual inhibía las posibilidades de intercambio de datos e innovación (Comisión Nacional de Productividad, 2017), pero distintas organizaciones están trabajando en ello (en Chile y el mundo). Como ejemplo se tiene el Programa Estratégico de Industrias Inteligentes de Corfo, quien formuló una iniciativa orientada en crear una Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad en Minería (SOMIN), cuyo objetivo será el

desarrollar, implementar y promover la adopción de estándares de clase mundial para la interoperabilidad de equipos y sistemas mineros.

Otra de las iniciativas importantes a nivel nacional e internacional es la que está impulsando Interop con su respectivo “Modelo Conceptual para la Interoperabilidad en Minería” (Ver Figura 29). Este modelo es el primer proyecto chileno que ha sido presentado en la International Organization for Standardization (ISO), que ha sido aprobado y tiene que ver con la arquitectura de referencia para los sistemas autónomos en minería. Esta arquitectura está basada en la industria manufacturera 4.0, donde se tienen 3 dimensiones que consideran todos los procesos y actividades a lo largo de la cadena de valor minera, considerando los flujos de información y la dimensión tecnológica. Se describe como una red interconectada de cubos anclados(interopblocks) a una operación física, con diferentes niveles y dominios de interoperabilidad. De esta forma, cada segmento de la cadena de valor minera se interrelaciona con las distintas capas (negocio, coordinación, información, entre otros) y dominios (operación, dispositivos de campo, mercado, entre otros), pudiendo analizar brechas y desarrollos para posteriormente aplicar medidas de mejoramiento (Jara J.,2020).

Otro de los puntos fundamentales de la interoperabilidad es permiten la integración, tanto vertical como horizontal, permitiendo que el flujo de información que se produce en la operación de dispositivos físicos de la mina puedan llegar a niveles superiores, que las decisiones estratégicas y operacionales puedan ser impulsadas por datos reales que tienen la característica de ser identificables, medibles y valorables, garantizar la efectividad de las comunicaciones entre dispositivos físicos de la mina (sensores, paneles del operador, entradas, salidas, etc), permitiendo que las compañías mineras puedan responder adecuadamente a las variaciones del mercado (tanto positivas, como negativas).Un estándar de Interoperabilidad que puede ser relevante para la integración horizontal es el OPC-UA (Open Platform Communication – Unified Architecture), el cual permite el intercambio seguro y fiable de los datos, considerando un entorno de automatización industrial como lo es la minería, facilitando la intercomunicación de sistemas y procesos en entornos distribuidos o multiplataforma (Consejo Minero *et al.* , 2020).

De acuerdo con Carmona C.-a (2020), un estándar de interoperabilidad tecnológica en la operación de carguío y transporte podría generar incrementos de productividad en extracción por sobre el 10%, una reducción de un 2% en costos de mantención al año, la reducción de un 3% en costos de operación anual. La interoperabilidad es importante para permitir la compatibilidad entre las diferentes tecnologías de monitoreo, automatización y robótica. Los estándares tecnológicos de interoperabilidad permitirán la compatibilidad y escalabilidad, lo que reducirá los costos para las compañías mineras. Las principales aplicaciones de la interoperabilidad tanto en open pit como UG, será la transferencia de datos, el intercambio de información y la transferencia de control entre los distintos procesos independiente de los desarrolladores creadores o proveedores.

En resumen, la interoperabilidad permite la integración de distintos sistemas, para de esta manera, obtener información relevante para la toma de decisiones en tiempo real (entrega valor a la data), impacta directamente la productividad por la sinergia entre los procesos y productos (elimina ineficiencias) y reduce costos (porque el cliente sabe lo que recibe). La interoperabilidad es clave para el negocio de los OEMs (Jara J., 2020) (Carmona C.-a, 2020) (Rojas P., 2020).

3.2.4 TICAR

Para mejorar los niveles de productividad, volver más eficiente el consumo de energía, mejorar la seguridad, salud y calidad de vida de las personas, lograr monitorear las variables críticas de los procesos y operaciones, la industria minera debe considerar sistemas que permitan la integración de las distintas operaciones a lo largo de toda la cadena de valor, maximizando de esta forma los beneficios. En este sentido, las TICAR tienen un rol fundamental, que permite habitar la minería del futuro.

3.2.4.1 Centros Integrados de Operaciones (CIO)

La experiencia internacional para la integración de las operaciones mineras¹⁷ se focaliza principalmente en operaciones mineras localizadas en Australia:

¹⁷ Hay que considerar que los siguientes términos corresponden a una clasificación diferente: *Sala de Control*: Donde los operadores realizan control de la planta o faena utilizando sistemas de control a diario y el operador puede tomar el control de variables y/o dejar que el sistema siga operando de forma automática; *Sala de Operación*: Donde los operadores realizan operación de equipos en forma remota, concentrando sistemas de tele operación, sistemas semi-autónomas y autónomos; *Centro Integrado de Operaciones*: Sala que concentra información para la toma de decisiones con relación a los procesos mineros, no teniendo necesariamente procesos que necesiten operación remota o teleoperación. Se basa en la recolección de información, concentrando e interpretando para mejorar

- Integrated Remote Operations Centre (IROC, Centro Integrado de Operaciones Remota) de BHP, ubicado en la ciudad de Brisbane donde se operan minas de carbón.
- Centro de Operaciones de Rio Tinto en la ciudad de Perth para operación remota de la faena minera Pilbara (grupo de 15 minas de hierro), terminales portuarias, independientes, una red ferroviaria de 1,500 [km] y su infraestructura. Este Centro se considera parte del concepto "Mine of The Future TM" de la compañía.

En experiencias nacionales, de acuerdo con Carmona C.-a (2020), las salas CIO comienzan a implementarse en la década de los 90 en Chile, se homologaron de las salas de control que se ocupaban en la industria del petróleo, específicamente en la Exxon móvil (Actual Anglo American Los Bronces), donde se instalaron las primeras salas de control con monitoreo en tiempo real "sin mirar la mina", donde la idea era mirar la mina en forma virtual para poder gestionar la mina en base a un buen modelo matemático que permitía representar la "realidad".

Por su parte Codelco tiene una serie de iniciativas para integrar tanto los procesos administrativos como procesos productivos, que tienen como principal objetivo la remotización y automatización de sus operaciones, el monitoreo a distancia y salas de control alejadas de las faenas mineras. Se destacan:

- Sala CIO de División Andina, en la ciudad de los Andes.
- Centro de Operaciones Mina (COM), en Saladillo para operar la mina Subterránea de División Andina.
- Sala CIO de División Ministro Hales, ubicada en el barrio cívico de la División.
- Centro de Operación Remoto (COR) de División Ministro Hales, ubicado en Santiago.
- Sala de Telecomandos al interior de la Mina El Teniente.
- Sala de Control de LHD semiautomáticas a 13 km de distancia (en superficie) de la Mina Subterránea de El Teniente.
- Despacho de Trenes Teniente 8, en la Mina El Teniente.
- Centro Integrado de Operaciones ubicado en Rancagua de División El Teniente.

la toma de decisiones. En este tipo de Centros, los sistemas automáticos y/o semiautónomos continúan con sus salas de datos y toma de decisión en faena; *Centro de Operaciones*: Un centro de operaciones, es la concentración de Sala CIO, Sala de Control y Sala de Operación en un mismo lugar, además de concentrar las funciones de coordinación y logística del mantenimiento y emergencia de las tareas remotas de terreno (Guzmán D. 2017).

- Centro Integrado de Operación & Gestión (CIO&G) del PMCHS.

En referencia a Codelco, también se puede mencionar que en los próximos meses será inaugurado en Santiago su CIO Estratégico (García A., 2020).

De acuerdo con Rojas P. (2020), los CIO son una realidad en Codelco y se han implementado prácticamente en todas las divisiones. Para Carmona S. (2020), los CIO tienen la fortaleza de dar seguridad, dar la posibilidad de encontrar los óptimos globales, apoyar la toma de decisiones.

En la Figura 30 se visualiza la arquitectura del CIO de Chuquicamata Subterráneo, que da cuenta del nivel de integración que se quiere dar a los procesos productivos y administrativos, donde se contempla la disponibilidad de la información de procesos y equipos mayores con sus respectivas variables críticas en tiempo real, desarrollando de esta forma la gestión operacional y de mantenimiento, retroalimentando directamente la gestión del negocio.

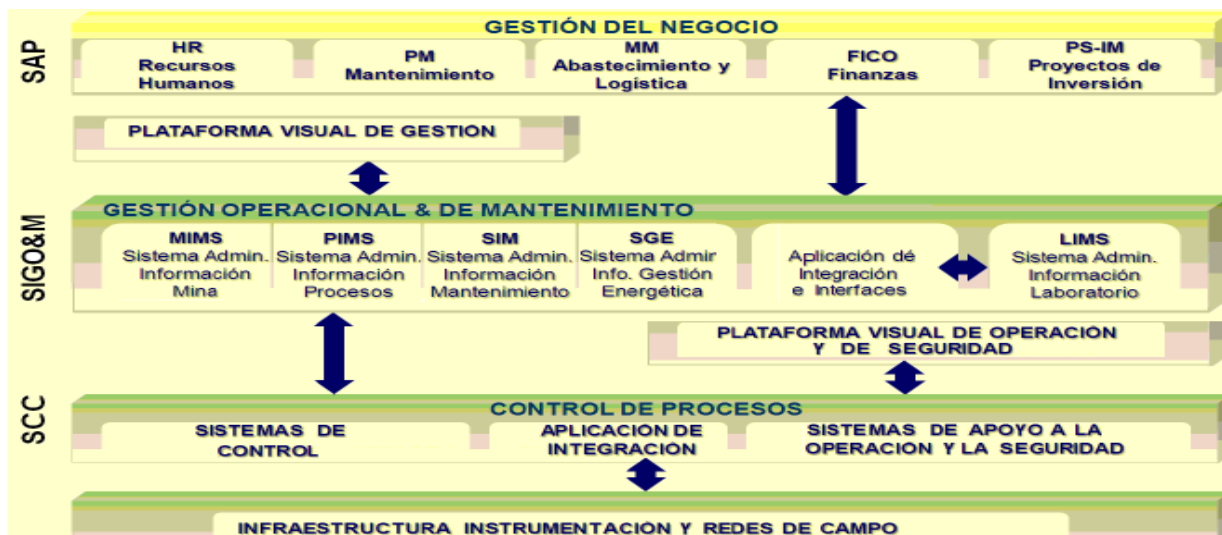


Figura 30 Arquitectura lógica del CIO&G PMCHS.

Fuente: Guzmán D. (2017).

Para Ruiz del Solar J. (2020), la implementación de salas CIO es una tendencia generalizada en la industria minera en la actualidad, la cual se está focalizando en las ciudades. Para el caso de El Teniente, la sala CIO está ubicada en Rancagua (Millán) y ha crecido poco a poco dependiendo de los requerimientos. Uno de los principales

beneficios que tienen son la reducción de los tiempos de traslados y la comodidad de los operadores.

De esta manera, los Centros Integrados de Operación (CIO) favorecen el mejoramiento del desempeño operacional, dado su ambiente colaborativo organizado y sus prácticas de gestión orientadas a la sostenibilidad de soluciones técnicas enfocadas en la cadena de valor principal (Consejo de Competencias Mineras,2020)

El problema principal que existe con este tipo de centros es que no siempre muestran la realidad de los procesos de la mina, por lo que no siempre se obtienen los resultados deseados (siempre existe un tira y afloja entre la operación y los CIO), de esta manera, también es importante el seguimiento de los procesos a un más nivel local (Carmona C.-a, 2020) (Carmona S., 2020).

3.2.4.2 Tecnologías de la información y Comunicación (TIC)

Existen numerosas definiciones de TIC, pero en este estudio se considera la siguiente: “Dispositivos tecnológicos (hardware y software) que permiten editar, producir, almacenar, intercambiar y transmitir datos entre diferentes sistemas de información que cuentan con protocolos comunes. Estas aplicaciones, que tanto la comunicación y colaboración interpersonal (persona a persona) como la multidireccional (uno a muchos o muchos a muchos). Estas herramientas desempeñan un papel sustantivo en la generación, intercambio, difusión, gestión y acceso al conocimiento” (Cobo C., 2009).

Para el caso de la industria minera, en particular para la gran minería, las operaciones son a gran escala, son complejas y generan una cantidad de datos de grandes proporciones. Además, para hacer seguimiento, se necesita una conexión segundo a segundo y en tiempo real, con tal de monitorear y hacer seguimiento a las operaciones, con tal de poder diseñar estrategias de negocio a largo plazo y gestionar en el mediano-corto plazo, con foco en obtener un mayor valor.

3.2.4.2.1 Minería Inteligente, Internet de las cosas (IoT) y redes de comunicación

La Minería Inteligente o Smart Mining, de acuerdo con Corporación Alta Ley (2019) se define como: “La minería que maximiza la utilización de medios tecnológicos computacionales, instrumentos de medición, de comunicación, de accionamiento remoto,

al servicio de las tareas de toda su cadena de valor desde el Yacimiento al Barco, desde su Detección al Cierre”.



Figura 31 Esquema Minería Inteligente.

Adaptado de Carmona C. -b (2020)

De la Figura 31, se puede destacar que la minería inteligente impacta directamente a la seguridad, la productividad, los costos, calidad y confiabilidad principalmente. Todas las tecnologías que se mencionan apuntan a mejorar la minería del futuro. Se considera que, en el corto plazo, la priorización de los esfuerzos será en la gestión de operaciones de control y optimización de los procesos (control de activos, control de calidad, monitoreo de condiciones de los equipos para la gestión del mantenimiento principalmente signos vitales, sistemas de gestión de fatiga y anticollisiones y planificación minera). En el mediano y largo plazo la productividad será impulsada por el cambio tecnológico, la calidad y la recuperación de reservas, la automatización y robótica móvil en los equipos LHD será fundamental (Carmona C.-b, 2020).

La minería inteligente está estrechamente relacionada al desarrollo de “Internet de las cosas”¹⁸ e “Internet Industrial”. La minería inteligente necesita la operación y conexión de: sensores, actuadores, terminales ERP (Enterprise Resources Planning), Sistemas de control industrial (PLC, controladores lógicos programables), consolas de monitoreo y operaciones. La IoT define los protocolos y los estándares para lograr la conexión e intercambio de datos de grandes cantidades de dispositivos autónomos (ofrece una solución tecnológica que se ajusta a las necesidades de instrumentación) y se ajusta al transporte de información no sensible a latencia.

De acuerdo con Carmona C.-a (2020), si se quiere implementar IoT, primero se requiere avanzar en temas de ciberseguridad de los distintos equipos y procesos, lo que todavía no está resultado.

La tendencia en la minería subterránea de Codelco es disponer de una minería altamente sensorizadas, con la información en tiempo real disponible, gran parte de los procesos automatizados y alto nivel de inteligencia en cuanto a disposición de la operación y de los mineros para mejorar los procesos (Araneda O., 2020).

Actualmente la instrumentación de las faenas mineras opera principalmente sobre arquitecturas y “protocolos propietarios”, normalmente desarrollados y comercializados por los fabricantes de los equipos. Ejemplos de estos sistemas son: KOMTRAX (Komatsu Machine Tracking System), CAT Connect y AUTOMINE de Sandvik.

Es esperable que estos sistemas adopten algunos de los protocolos o definitivamente migren su arquitectura de comunicaciones a los estándares IoT en un horizonte de 10 años (antes del 2027) (ADDERE Ltda., 2017).

Con respecto a los servicios de transporte de datos de alta velocidad, se puede evidenciar que la demanda de datos realizada por la industria minera está en constante aumento, por lo que la necesidad de redes de alta capacidad de transporte se vuelve relevante. Los sistemas de transporte de datos de alta velocidad (HSDT) se consideran la base para poder unir la tecnología de información (TI) y las tecnologías operacionales (TO), dado que se hace necesario contar inminentemente con una integración, visibilidad e

¹⁸ Internet de las cosas: Se refiere a la interconexión digital de objetos con internet (Mohammadi Z. *et al.*, 2015)

inteligencia dentro y entre la tecnología operacional (TO), los sistemas de control de producción y la tecnología de la información (TI) que gestionan los respectivos activos críticos, la logística, tanto externa como interna, la planificación y las operaciones de la compañía (ADDERE Ltda., 2017).

De acuerdo con ABB (2015), a medida que la convergencia de TI y TO lleva más información desde sistemas en tiempo real al software de TI, los siguientes beneficios están dentro de los cuatro indispensables que mejorarán la eficiencia, capacidad de respuesta y rentabilidad a través de la cadena de valor en la minería:

- Producción inteligente.
- Respuesta inteligente frente a la condición de los activos críticos.
- Planificación determinada por la demanda.
- Reducción del consumo de energía y de los desechos.

No obstante, un importante desafío que existe para que las compañías mineras puedan lograr sus objetivos es la falta de integración entre los sistemas de TI y TO. Un número relevante de compañías mineras visualizan que el principal beneficio de la integración de datos TI/TO son la optimización de costos y eficiencia, abordando directamente los siguientes desafíos:

- Gestionar el aumento continuo de los costos.
- Controlar el gasto y la eficiencia de la energía.
- Optimizar o maximizar la producción.

Desafortunadamente, muchas compañías tienen poca o nula integración de datos a través de la cadena de valor y aún operan sin intercambiar información con otros departamentos. En el caso de específico de Codelco, se puede considerar que la integración de datos se está generando a una escala importante como se mencionó anteriormente.

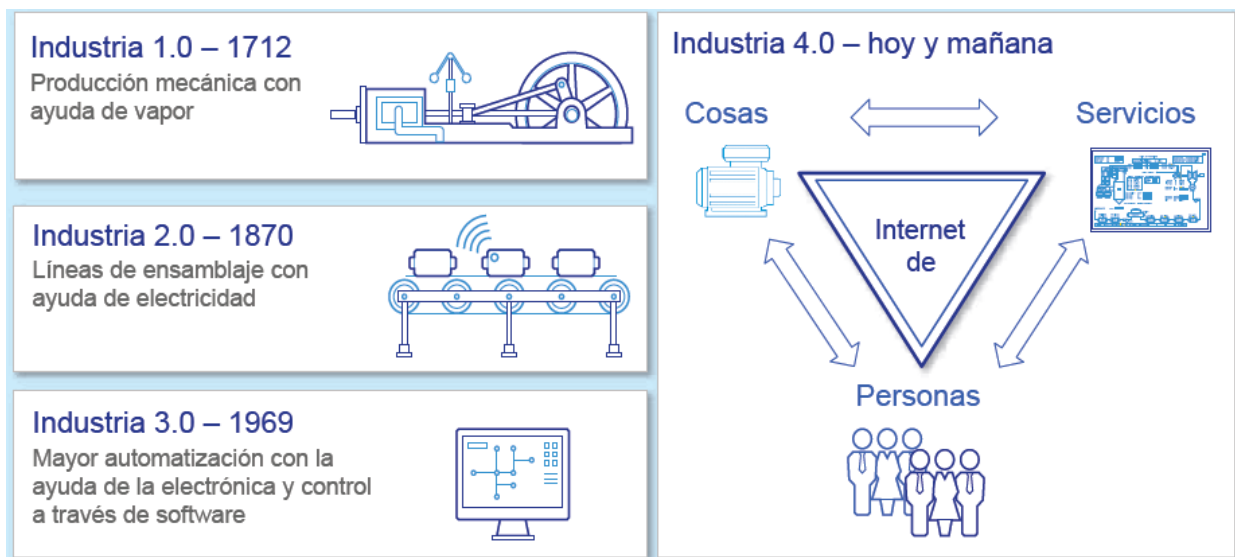


Figura 32 Futura evolución de la industria minera.

Fuente: ABB (2015).

En general se hace la distinción entre dos tipos de redes, una WAN y LAN, que permiten la interconectividad entre los equipos. La principal diferencia radica en que las redes LAN cubren áreas limitadas y poseen una mayor velocidad de transferencia de datos, en cambio las redes WAN, cubren una mayor área, pero cuentan con velocidades más reducidas. Codelco poseen una red Corporativa que manejan tráfico de datos en el rango de 1 [Gb/s] – 10/20 [Gb/s] a través de protocolos TCP/IP y Ethernet, con enlaces completamente exclusivos (ADDERE Ltda., 2017).

Tabla 29 Anchos de banda disponible de transporte de alta velocidad en Codelco.

Operación	Cobre fino 2015 [t/a]	[Mb/s] Procesos	[Mb/s] Gestión	[Mb/s] Control Automático	[Mb/s] Teleoperación/ Autónoma	[Mb/s] Comunicación	Anchos de banda totales disponibles [Mb/s]
El Teniente	471,157	400	400	400	10,000	400	11,600
Radomiro Tomic	315,000	200	200	200	1,500	200	2,300
Chuquicamata	308,000	400	400	400	1,000	400	11,600
Ministro Hales	238,305	60	60	60	1,200	60	1,440
Andina	232,444	200	200	200	2,500	200	3,300
Gabriela Mistral	125,009	50	50	50	1,500	50	1,700
El Salvador	48,582	100	200	200	1,000	200	1,500

Elaboración propia basada en ADDERE Ltda. (2017).

Tabla 30 Estimación de demanda de anchos de banda en Codelco.

Operación	Demanda estimada[kb/s] (año base 2017)			
		5 años	10 años	20 años
El Teniente	Mínima	147,160	1,332,220	2,443,525
	Máxima	422,000	1,758,200	3,406,250
Radomiro Tomic	Mínima	10,500	127,250	271,750
	Máxima	45,500	184,665	369,050
Chuquicamata	Mínima	86,350	1,405,005	2,495,050
	Máxima	523,500	2,084,250	3,915,000
Ministro Hales	Mínima	14,300	165,320	333,950
	Máxima	68,500	250,050	503,750
Andina	Mínima	27,820	121,920	246,430
	Máxima	139,000	298,000	543,000
Gabriela Mistral	Mínima	8,940	108,080	242,775
	Máxima	39,000	156,600	338,750
El Salvador	Mínima	19,720	100,520	212,180
	Máxima	103,000	232,300	434,100

Elaboración propia basada en ADDERE Ltda. (2017).

La Tabla 29 y la Tabla 30, muestran los anchos de banda disponible de transporte de alta velocidad y la demanda estimada para los anchos de banda en Codelco. Se destaca que El Teniente y Chuquicamata tienen los mayores anchos de banda totales disponibles y que la demanda estimada evoluciona aproximadamente en forma exponencial, lo cual se puede explicar por la mayor integración de los sistemas, la masificación de tecnologías como el telecomando y las operaciones autónomas/semi autónomas.

Para Carmona C.-a (2020), en términos de redes de comunicación, actualmente hay muchas faenas que están conformes con sus redes de comunicaciones inalámbricas (Wifi), sin embargo, cuando se apliquen nuevas tecnologías, se necesitan monitorear estas tecnologías (automatización), monitorear a los operadores, entre otros, para lo que la red Wifi no será suficiente (caso Codelco). Las compañías mineras coinciden que se está en la fase de “monitoreo en tiempo real”, lo cual se espera que dure 2 a 3 años.

En la actualidad, en minería subterránea, se están realizando pruebas piloto, tanto de redes LTE¹⁹ como de 5G (en El Teniente pilotajes de LTE principalmente), lo que busca habilitar la automatización, que tiene asociado videos, representación gráfica, KPI de operación/mantenimiento, la información proveniente de sensores (más completo e integrado) en otros. También se destaca que, en la mediana minería, en operaciones subterráneas de la Minera Candelaria, en la región de Atacama, la empresa PSINet tiene implementada red LTE como solución en operación (Osorio P., 2020).

Para Ruiz del Solar J. (2020), la principal interrogante en temas de redes de comunicaciones es si se irá de Wifi a LTE, se quede hartos años con LTE para posteriormente implementar 5G o se haga una apuesta más disruptiva de pasar de Wifi a 5G en alguna faena. Esto dependerá de la estrategia que quiera implementar cada faena minera en particular. Lo claro es que las redes Wifi no son el futuro (ni en minería a cielo abierto ni en subterránea) y que, de aquí a 5 años, se estará operando con redes LTE o 5G en las operaciones de la gran minería chilena. Así, para los distintos OEMs es clave tener incorporada la compatibilidad con sistemas más modernos para no quedar atrás en el mercado.

En el caso de Codelco El Teniente, esta faena espera consolidar la red LTE los próximos años y no se visualiza en la actualidad implementar redes 5G (Carmona S., 2020).

Para Carmona C.-a (2020), los servicios de mantenimiento de infraestructura tienen que ser considerados y colocados en un sitio importante para que las comunicaciones no fallen nunca, porque es mucha la inversión. Si no se mantienen correctamente la infraestructura, los daños y pérdidas pueden ser muy graves. En el caso que hubiera pérdidas de comunicación, los equipos deben tener la opción de almacenar la información en el equipo para que no se complique lo cotidiano de los procesos. Las redes de comunicación condicionan la confiabilidad de las operaciones (continuidad operacional).

3.2.4.2.2 Gestión de datos

El fenómeno de la digitalización está impulsando el cambio en la gestión de datos en la industria minera. La incorporación de sistemas basados en big data²⁰, IoT, algoritmos de

¹⁹ LTE: Long-term evolution.

²⁰ Se refiere a datos complejos tan voluminosos que el software de procesamiento de datos tradicional simplemente no puede administrarlos (Volumen, Variedad, Velocidad) (Rubio D., 2020)

Machine Learning/ Deep Learning²¹, Cloud Services²², permitirán gestionar los activos, el mantenimiento y la sintomatización de equipos principales de forma precisa y en tiempo real. El gran atractivo para las empresas está en poder sustraer, componer y/o producir información que aporte un valor diferencial basado en un gran cúmulo de datos, ya que el dato por sí sólo no tiene ningún valor. Los principales problemas radican en que los datos pueden ser dispersos, dinámicos, heterogéneos y complejos. De esta manera, cobra real importancia disponer de personas calificadas para el manejo de datos, los denominados "Científicos de datos", quienes combinan conocimientos técnicos como programación, matemáticas y estadísticas, lo cual no es del todo considerado en las organizaciones empresariales, en particular en la industria minera.

Otro punto importante para destacar que condiciona la gestión de datos y la confiabilidad de ellos es el proceso de transición de tecnología análoga a digital que está viviendo la industria minera.

De acuerdo con González A. (2017), al utilizar instrumentos de medición análoga se tienen grandes dificultades en almacenar, manipular, comparar, calcular y recuperar flujos de información o datos exactos cuando esta ha sido guardada. De esta manera, si se quiere monitorear en tiempo real, masificar la automatización o integrar procesos de la cadena de valor minera es importante disponer de instrumentos de medición digital (más precisos, más veloces, pueden guardar información, pero tienen un mayor costo de fabricación).

Con respecto al mantenimiento, la mayor confiabilidad de los datos obtenidos permite consolidar la transición de una gestión de mantenimiento basado en la falla (mantenimiento correctivo) a uno enfocado en programas sistemáticos de revisiones periódicas al que cada unidad y parte se somete, antes de fallar (mantenimiento preventivo).

En particular en Codelco, el Big Data, Data Analytics, IoT, Cloud, modelos de inteligencia artificial, Machine Learning, se están implementando hace 3 años, todos estos temas se

²¹ Algoritmos que detectan patrones en los datos y permiten hacer predicciones o clasificaciones al procesar los datos, sin ser explícitamente programados (Rubio D., 2020).

²² Es un término general para referirse a la prestación de servicios de hosting a través de internet (Rubio D., 2020).

encuentran bastante desarrollados y apuntan principalmente a mejorar la productividad y seguridad (Carmona S., 2020).

Se estima que en minería estas nuevas metodologías se encuentren totalmente aplicadas en un horizonte temporal entre 5 a 10 años (H3 del estudio) a nivel de toda la cadena de valor, pero entre la actualidad y los próximos 5 años se aplicarán de forma parcializada como habilitante del proceso de automatización, la integración de las operaciones y perfeccionamiento de procesos administrativos (Carmona S., 2020).

3.2.4.2.3 Sistemas de localización

En minería a cielo abierto, el sistema utilizado por excelencia, para ubicar tanto equipos como personas dentro de las faenas es el Global Positioning System (GPS), que basa su funcionamiento en la utilización de satélites.

Si bien este sistema, se considera una tecnología madura, presenta importantes deficiencias en su funcionamiento en ciertos lugares como puentes, túneles entre otros, lo que hace imposible su aplicación en minería subterránea.

Sin embargo, en minería subterránea existen otros sistemas de localización. Para Ruiz del Solar J. y Carmona C.-a (2020), el desarrollo de “GPS subterráneo” no sería un gran desarrollo, ya que existe otra tecnología para determinar localización de personas y equipos, que está disponible en la actualidad como los sistemas RFID (Radio Frequency Identification) o RTLS (Real-time locating System, conocidos también como TAG), que corresponden a tecnología basada en la identificación por radiofrecuencias, que tiene como propósito fundamental transmitir la identidad de un objeto o producto cuando es activado por una antena RFID. Existen diferentes frecuencias rf y cada una de ellas conlleva un uso distinto, de acuerdo con la necesidad. En la actualidad, estos sistemas se utilizan principalmente en el tracking de personas y se espera su utilización en otros procesos mina. Otro alcance mencionado por Ruiz del Solar J. (2020) es que los equipos mineros, cuando funcionan autónomamente o en teleoperado “se pueden localizar muy bien y no hay muchos grados de libertad para que puedan estar en distintos lugares”. Cabe mencionar que los sensores utilizados y la infraestructura de comunicaciones para este tipo de tecnologías se consideran relevantes.

Una de las ventajas de la tecnología RTLS Y RFID, es que se pueden conectar fácilmente a personas, procesos, datos, permitiendo realizar un seguimiento eficiente con tal de monitorear y controlar las operaciones.

3.2.4.3 Automatización y robotización

Por definición, automatización se refiere al reemplazo parcial o total de una función previamente desarrollada por un operador humano, de forma física o mental, teniendo como principal objetivo el “controlar el comportamiento de sistemas dinámicos y emular la máxima capacidad física e intelectual humana para mejorar la productividad de un proceso a través de un aumento en la precisión de las actividades realizadas” (McNab K. & Garcia-Vasquez M., 2011).

Por otra parte, según Zabala G. (2007), la robotización se refiere al uso de máquinas denominados “robots”²³ en procesos de producción, pero en el uso común en relación con la Cuarta Revolución Industrial, se conoce como robotización a la acción de sustituir al ser humano en ciertas tareas que pueden realizar las máquinas. En la industria minera se utilizan robots, para desarrollar actividades riesgosas, para reducir costos y tiempo de producción, reducir los errores por manufactura humana y mejorar los procesos, principalmente en los procesos de concentración de mineral y metalurgia, pero en operaciones de extracción mina su uso es reducido.

De acuerdo con McNab K. & Garcia-Vasquez M. (2011), el desarrollo de las tecnologías de automatización depende del desarrollo de otras áreas:

- **Tecnología de comunicación:** Permite la transmisión de grandes cantidades de datos con latencias limitadas, aumentar/disminuir las distancias de transmisión de información, determinando los grados de confiabilidad.
- **Tecnología de detección:** Permite que se pueda monitorear el estado del equipo, su operación y ubicación. Tecnologías de detección más avanzadas entregan robustez a la operación en el entorno de la mina (como ejemplos se consideran, los sistemas de radar bidimensional y el mapeo de terreno y área local).

²³ Un robot es una maquina programable que posee cierto grado de inteligencia que es capaz de ejecutar tareas de manera automática en función de las decisiones que toma, basándose en la estructura de su programa, permitiendo ejecutar tareas específicas (Zabala G., 2007).

- **Procesos del sistema:** El desarrollo de una capacidad de control y procesamiento de sistemas cada vez más sofisticada junto con una mayor potencia de procesamiento informático para permitir la gestión y el análisis de sistemas de información en toda la mina, incluidos los protocolos para el intercambio de datos entre diferentes sistemas.
- **Tecnología de navegación e imagen:** Habilita que los equipos tengan conocimiento de su ubicación espacial y del entorno que los rodea.

En Anexos C (ver desde página 287) se muestran las principales clasificaciones de automatización de acuerdo con el grado de control y la forma de operar equipos mineros.

En la Figura 33 se muestra un resumen de las formas de operar. Para el caso de sistemas autónomos, se puede visualizar que estos sistemas entregan la posibilidad de operar desde grandes distancias como lo indica la línea roja. Por otra parte, la especialización del sistema de control debe ser muy elevada (zona verde) y requiere una mínima intervención del operador como se muestra en la zona azul.

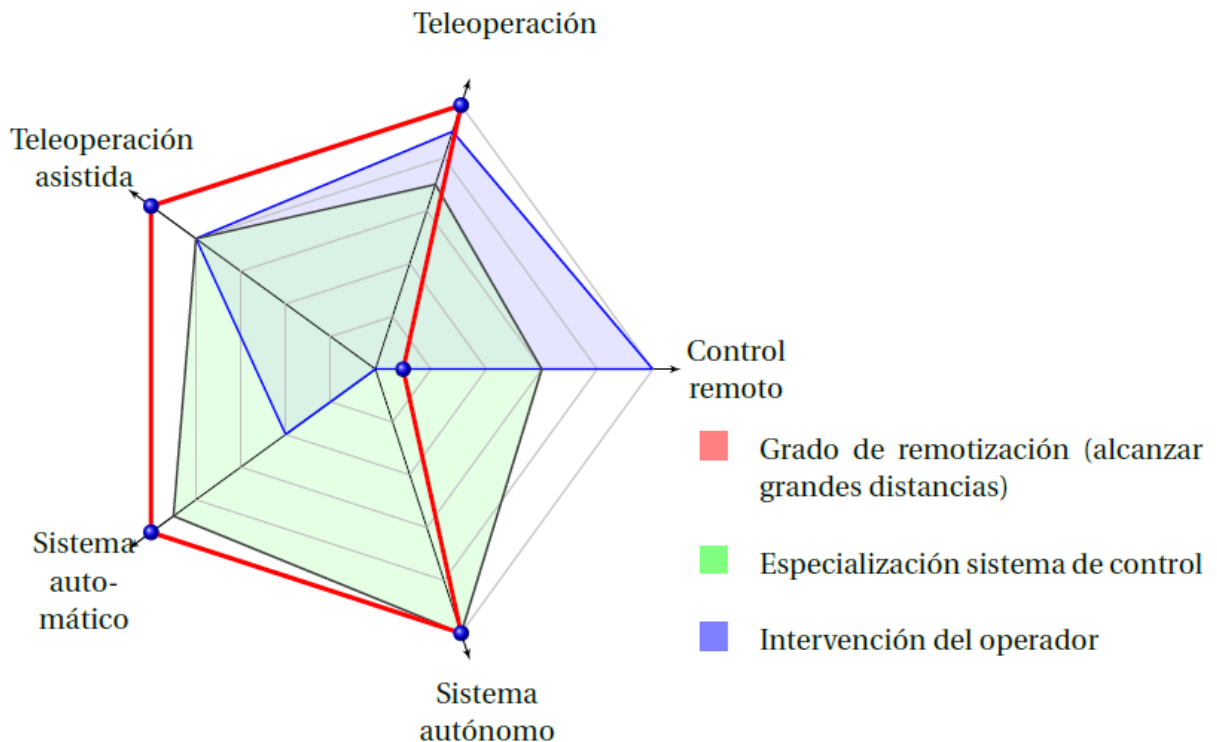


Figura 33 Comparación de clasificación por forma de operar equipos.

Fuente: Guzmán D. (2017).

De acuerdo con Morales J.-a (2019), se tienen 6 niveles de automatización:

- **Nivel 0 o Manual:** El operador es totalmente responsable de todas las funciones (incluye control remoto).
- **Nivel 1 u Orientación:** El operador recibe comentarios para mejorar la ejecución de la tarea (incluye teleoperación).
- **Nivel 2 o Automatización parcial:** Funciones limitadas son controladas por el sistema. El operador es capaz de reanudar el control en cualquier momento (incluye la automatización de tareas, telepresencia asistida, etc.)
- **Nivel 3 o Automatización condicional (Semi-autónomo):** Funciones básicas automatizadas, se requiere que el operador interceda según sea necesario o para funciones complejas (ejemplo carguío con equipos LHD).
- **Nivel 4 o Alta automatización:** Sistema capaz de ejecutar funciones centrales. La intervención del operador sólo es requerida para funciones complejas.
- **Nivel 5 o Automatización completa:** Todas las funciones están automatizadas. El sistema es capaz de manejar la incertidumbre ambiental significativa o fallas del sistema sin intervención externa, el rendimiento excede el manual en todos los escenarios.

Estos niveles servirán para clasificar los sistemas que están presentes en el mercado o se esperan desarrollar en el futuro.

3.2.4.3.1 Principales desafíos de aplicación de tecnología autónoma en minería subterránea

De acuerdo con Piérola M. (2020) y Canelo A. (2020), los principales desafíos para la aplicación de la autonomía en minería subterránea son los siguientes:

- **Procedimiento discontinuo**
 - a) Largos cambios de turno que disminuyen las horas operativas
 - b) Acceso vehicular único a la mina
 - c) Tronadura genera tiempos muertos por necesidad de ventilación y por alto nivel de riesgo
 - d) Frentes de desarrollo con bajas tasas de avance, condicionada por los ciclos de operaciones unitarias.

- **Visibilidad, control, infraestructura**
 - a) Zona de trabajo de equipos sin acceso a supervisión.
 - b) Iluminación limitada a zonas de mayor tráfico de personas y equipos.
 - c) Redes de comunicación requieren alta inversión.
 - d) Daños a infraestructura de comunicación por tronaduras o tránsitos de equipos pesados.
- **Espacios confinados y condiciones ambientales**
 - a) Logística de ingreso de productos e insumos.
 - b) Polvo en suspensión que dificulta la visión de los equipos.
 - c) Condición de agua / barro.
 - d) Altas temperaturas.
- **Interacción de equipos autónomos con equipos manuales**
 - a) Estándares y protocolos bien definidos.
 - b) Criterios de interacción bien definidos y planificados.
- **Gestión del cambio**
 - a) Ambiente de trabajo colaborativo.
 - b) Necesidad de motivación, proactividad y liderazgo.
 - c) Administrar correctamente el cambio de forma temprana, integral y simple.
 - d) Necesidad de capacidades y competencias específicas de trabajadores

Con respecto al caso específico de la gestión del cambio, es importante destacar que los cambios tecnológicos de la automatización impactan de forma relevante el trabajo de las personas. De acuerdo con un estudio del Consejo de Competencias Mineras (2018), en el mediano plazo, aproximadamente un tercio de las competencias sufrirán cambios, aumentando principalmente las competencias de teleoperado en extracción y las competencias de automatizado en mantención. Tanto en extracción como en mantenimiento, las competencias de operación manual disminuyen en el mediano plazo (ver Figura 34).

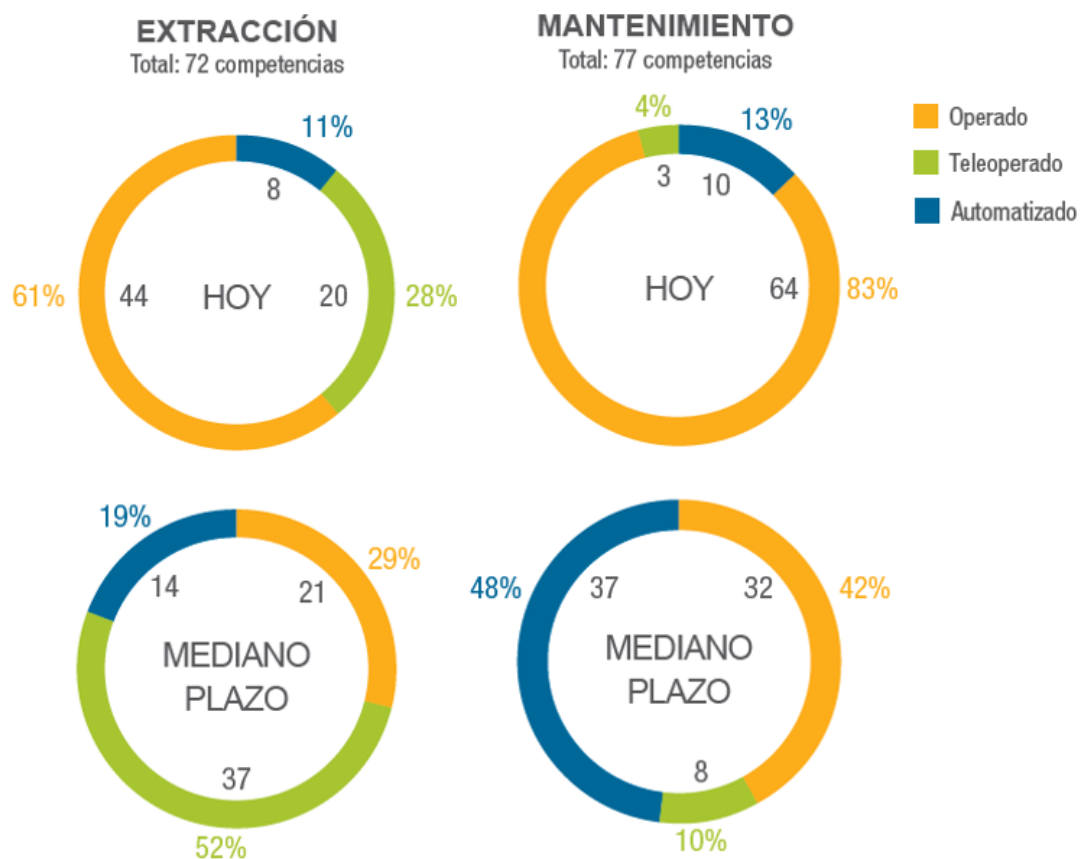


Figura 34 Evolución competencias necesarias en procesos mineros.

Fuente: Consejo de competencias mineras (2018).

Por otro parte, en Codelco se visualiza que los operadores están siendo partícipes de los cambios que está promoviendo la Corporación, más que un miedo a la transformación tecnológica existe un clima de colaboración, sobre todo el último tiempo, se están aceptando los cambios tecnológicos y tienen una disposición positiva al desarrollo de los distintos proyectos de innovación (Carmona S., 2020) (Rojas P., 2020).

3.2.4.3.2 Estado de operaciones automatizadas en minería

En minería subterránea, las distintas operaciones unitarias se encuentran en diferentes niveles de automatización, nivel que viene dado principalmente por la complejidad de la operación, los altos/bajos niveles de predictibilidad de la operación, la carga de trabajo manual a la que está expuesta, la propensión a errores y el retrabajo.

Tabla 31 Nivel de maduración tecnológica de automatización en principales operaciones de minería subterránea.

Operación	Nivel de maduración tecnológica	
	Menor	Mayor
Perforación de avance		X
Tronadura de avance	X	
Fortificación	X	
Perforación radial		X
Tronadura radial	X	
Carguío	X	
Transporte		X
Reducción secundaria	X	

Elaboración propia basada en Piérola M. (2020).

Con respecto a la Tabla 31, se puede destacar que operaciones como la perforación de avance, la perforación radial y el transporte se encuentran en altos niveles de maduración tecnológica, por lo que su implementación a nivel industrial puede tener mayores probabilidades de éxito. Por otra parte, operaciones relacionadas con las tronaduras, el carguío con equipos LHD y la fortificación de las excavaciones tienen un bajo nivel de maduración.



Figura 35 Evolución de productividad por efecto del cambio tecnológico.

Fuente: Consejo de competencias mineras (2018).

A lo largo de la historia, la industria minera ha mostrado incrementos importantes de productividad basado en incorporación de innovaciones, tanto incrementales como disruptivas (principalmente las disruptivas). De esta manera, se estima que la automatización de equipos y procesos mineros permitiría duplicar los actuales niveles de productividad (de 3,500 a 7,000 toneladas anuales por persona, ver Figura 35) y se estima que se consolide del año 2025 en adelante (largo plazo, H3: 2026-2030 del presente estudio) para las principales faenas mineras del país. Una vez automatizadas las operaciones mineras, se pasará a un estado de optimización de la producción, donde se visualizan procesos con altos niveles de automatización (nivel 5), con una minería que intenta eliminar los cuellos de botellas generados por las operaciones Batch, tendiendo a una operación continua e integrada.

3.2.5 Covid 19 como acelerante de la digitalización en minería

La situación sanitaria producida por el Covid 19, ha comprometido la operatividad de diferentes áreas y operaciones de la minería. Muchas empresas mineras han decidido suspender sus proyectos estructurales, por ello, la adopción de tecnologías relacionadas a la digitalización y automatización se muestran como una alternativa para mejorar la continuidad operacional y la productividad ante este tipo de situaciones. Uno de los principales resultados de la pandemia tiene que ver con que ha llegado de golpe la digitalización, el trabajo remoto, entre otros, por lo que hay muchas cosas que en el futuro cercano tendrán que hacerse de manera digital. Hay muchas soluciones de eficiencia energética, de gestión de activos, de control de operaciones unitarias, que pueden permitir poseer una visión holística de los datos de las compañías mineras (Reporte Minero-a, 2020).

De acuerdo con Ruiz del Solar J. (2020), el covid 19 será un acelerador de las tecnologías de trabajo a distancia y las empresas emplearán mano de obra local en mayor proporción. De esta manera, la digitalización se convierte en una importante aliada de la continuidad operacional.

La pandemia obliga a las empresas a transformarse, se genera una especie de “tormenta perfecta” para la transformación digital, la cual no es opcional, obligando a las empresas a tomar si o si el teletrabajo, el cual en Codelco anterior a la pandemia era el 0% (y otras

industrias un 10% máximo), pero en la actualidad con la pandemia es de un 70 a 80 % (García A. ,2020).

3.3 Resumen capítulo: Dirección de la industria minera en el segmento de minería subterránea de roca dura

Con la información recabada en el presente capítulo, se puede definir el contexto y la dirección de la industria minera en el segmento de minería subterránea de roca dura.

Los procesos y/o actividades más recurrentes en las distintas organizaciones visualizadas y sus respectivas razones de implementación y masificación en el futuro se mencionan a continuación.

3.3.1 Automatización de equipos y robotización (Proceso Market pull)

Se implementa principalmente para mejorar los niveles de seguridad de las operaciones (menor exposición del personal a zonas inseguras), mayor productividad por mayor cantidad de horas efectivas de operación de los equipos y menores costos de operación por homogenización de la operación principalmente en la conducción (disminuye la variabilidad de los procesos).

Es relevante considerar que dependiendo de la operación que se esté analizando (producción o preparación, considerando transporte, carguío, perforación, tronadura), se tendrá un determinado nivel de automatización, dependiendo de la dificultad del proceso y el nivel de madurez de las tecnologías a utilizar. La gestión del cambio aparece como uno de los puntos clave de la implementación de la automatización. Mostrar y enseñar a los operadores ser buenos usuarios de tecnología es fundamental en el proceso de transición.

Al futuro se proyecta una combinación de operaciones full automatizadas (principalmente acarreo con camiones UG, martillos rompe roca), semi automatizadas (equipos LHD, donde el carguío será telecomandado, perforación de avance) y telecomandadas (reducción secundaria, fortificación). Los robots, en operaciones mina, se utilizarán principalmente para el carguío de explosivos, el descuelgue de puntos de extracción y el acceso a zonas peligrosas.

3.3.2 Equipos eléctricos (Proceso Market pull)

Se espera que su implementación la impulse la reducción de las emisiones contaminantes, la reducción de la huella de carbono, la reducción de costos de ventilación de las operaciones y la mayor eficiencia de la utilización del combustible (en este caso electricidad).

La tecnología híbrida es considerada una “tecnología de transición” hacia la autonomía totalmente dependiente de baterías, que, para el caso particular de Komatsu, es importante consolidar.

Las baterías del tipo NMC y NCA serán el foco de la mayoría del desarrollo futuro por su potencial de altos niveles de energía específicos y sus costos de fabricación.

Es relevante considerar tanto las limitaciones actuales de los equipos eléctricos, como las estrategias a considerar por las compañías mineras. Dentro de las principales limitaciones se consideran la autonomía, el almacenamiento de energéticos y los mayores costos de fabricación (eleva el Capex en compañías mineras), pero en el futuro cercano serán superadas. Con respecto a las estrategias de las compañías mineras pueden ser la utilización de baterías fijas con carga a bordo, donde los desafíos son la potencia de carga necesaria y la conexión del cargador y la estrategia de batería reemplazable con carga remota, donde los desafíos son el disponer de un espacio subterráneo adicional (mayores desarrollos de cavernas para las baterías) y el costo económico de un manipulador de baterías dedicado.

3.3.3 Transformación digital (Proceso Market pull)

La transformación digital en minería apunta principalmente a sustentar el negocio, para mantener la competitividad, evolucionando hacia una industria 4.0. Se espera que su implementación, permita optimizar el funcionamiento de los equipos y los distintos procesos, habilite la toma de decisiones en tiempo real, entregue valor a la información obtenida, habilitando también el proceso de automatización de las operaciones.

Se considera que, en el corto plazo, la priorización de los esfuerzos será en la gestión de operaciones de control y optimización de los procesos con el control de activos (La incorporación de sistemas basados en big data , IoT, algoritmos de Machine Learning/ Deep Learning , Cloud Servicios se aplicarán en los próximos 5 años de forma parcializada como habilitante del proceso de automatización, la integración de las

operaciones y perfeccionamiento de procesos administrativos), control de calidad, monitoreo de condiciones de los equipos para la gestión del mantenimiento principalmente signos vitales, sistemas de gestión de fatiga y anticolisión y planificación minera. En el mediano y largo plazo será la productividad impulsada por el cambio tecnológico, la calidad y la recuperación de reservas, la automatización y robótica móvil en los equipos LHD será fundamental y se consolidará la aplicación de la Big Data, IoT entre otros.

Hay que considerar que el desarrollo de la ciberseguridad tiene un rol importante, la cual se fortalecerá dentro de los próximos 5 años aproximadamente.

3.3.4 Minería continua (Proceso Technology push)

Existe mucha investigación y desarrollo en temas relacionados a minería continua, los principales beneficios sería el aumento de producción y de productividad en referencia a los actuales métodos de extracción con equipos LHD. Sin embargo, no se visualiza que en el corto-mediano plazo el mercado esté demandando equipos de minería continua para producción o desarrollos a nivel masivo, sólo se considera a escala de pruebas piloto o industriales, pero no operando y reemplazando los procesos actuales. De esta manera, para instalar el concepto en el largo plazo, los OEMs tienen el protagonismo y deben mostrar que las distintas tecnologías con este enfoque pueden ser efectivas.

3.3.5 Estándares de interoperabilidad (Proceso Market pull)

El desarrollo de estándares es uno de los temas más relevantes para las compañías mineras en la actualidad. Las principales razones de su implementación son el tener un mayor control y optimización de la cadena de valor minera, mayor compatibilidad entre equipos y procesos (mayor integración) independiente de la marca (tendencia a modelo agnóstico), disminución de costos por el mayor conocimiento de los productos adquiridos y la habilitación del proceso de automatización. El trabajo colaborativo es un eje primordial para la elaboración de estándares de interoperabilidad. De esta manera, es importante para los OEMs, OTMs y compañías mineras participar de la elaboración de estos estándares (sobre todo en instancias como la ISO).

En resumen, la interoperabilidad permite la integración de distintos sistemas, para de esta manera, obtener información relevante para la toma de decisiones en tiempo real (entrega valor a la data), impacta directamente la productividad por la sinergia entre los

procesos y productos (elimina ineficiencias) y reduce costos (porque el cliente sabe lo que recibe) y será implementada completamente en la industria minera chilena dentro de los próximos 10 años. La interoperabilidad es clave para el negocio de los OEMs.

3.3.6 Monitoreo y sensorización (Proceso Market pull)

La implementación de sensores de alta calidad y confiabilidad, al igual que el monitoreo exhaustivo de las operaciones es clave para habilitar otros procesos como la transformación digital y la automatización principalmente, entregando de esta manera, un mayor valor a las operaciones. La seguridad es otro de los puntos clave, una interacción segura entre los equipos, el ambiente minero y las personas en base a sistemas de alta calidad permiten previsualizar y prevenir eventos catastróficos para la operación como lo son los estallidos de roca y los bombeos de agua/barro, el monitoreo de estas situaciones, sobre todo en las labores de preparación son importantes y se está avanzado con estudios en ello. Es importante mencionar que las compañías mineras coinciden que se está en la fase de “monitoreo en tiempo real”, lo cual se espera que dure 2 a 3 años.

Las condiciones de mayor monitoreo y sensorización de la mina, requieren de una infraestructura de comunicaciones robusta, la actual red Wifi no es suficiente (por la necesidad de transmitir video, representaciones gráficas, información del ambiente, etc). De esta manera, las operaciones mineras subterránea que deseen implementar nuevas tecnologías, donde se requiera monitorear tecnologías, operadores y otros, se deberán implementar otro tipo de redes como las redes LTE o 5G (una de las interrogantes más relevantes es si la migración se hace desde Wifi a LTE, para luego pasar a 5G o migrar directamente de Wifi a 5G). Operaciones como El Teniente están en pruebas piloto de redes LTE, mientras que Candelaria ya está operando con red LTE. De esta manera, para los distintos OEMs es clave tener incorporada la compatibilidad con sistemas más modernos para no quedar atrás en el mercado.

Con respecto a los sistemas de ubicaciones, se estima que el desarrollo de un “GPS subterráneo” no es un desarrollo relevante, ya que existe otra tecnología disponible en la actualidad, como son los sistemas RFID o RTLS (TAG) que tienen la ventaja de poder conectarse fácilmente a personas, procesos, datos, permitiendo realizar un seguimiento eficiente con tal de monitorear y controlar las operaciones.

3.3.7 Minería subterránea masiva (Proceso Market pull)

La minería subterránea masiva se considera la minería del futuro, ya que las grandes operaciones mineras a cielo abierto podrían tener su transición a minería subterránea. Los grandes desafíos se concentran en mayor investigación y desarrollo en sistemas mineros del tipo mega Block/Panel caving, donde se necesita mayor conocimiento de la caracterización del flujo gravitacional con extracción de columnas de gran alturas, el conocimiento de las condiciones de esfuerzo en tiempo real y la optimización del uso del Preacondicionamiento (fracturamiento hidráulico) para de esta manera disminuir los riesgos inherentes al macizo rocoso trabajado, aumentar las productividades y la producción.

3.3.8 Gestión del Cambio (Proceso Market pull)

Para iniciar, desarrollar, implementar o consolidar cualquier cambio tecnológico, se debe considerar la participación y cooperación de las personas involucradas en los procesos desde un inicio. El disponer de un ambiente de trabajo altamente colaborativo, que motive a los involucrados, que tenga un liderazgo adecuado al grupo, la administración simple, integral y temprana, permitiría tener buenos resultados en los proyectos. Es importante considerar que, en el mediano plazo, en referencia a temas de automatización, las competencias específicas de los trabajadores serán impactadas de forma relevante, aumentando principalmente las competencias de teleoperado en extracción y las competencias de automatizado en mantención. Tanto en extracción como en mantenimiento, las competencias de operación manual disminuyen en el mediano plazo

Por otro parte, en Codelco en general, se visualiza que los operadores están siendo partícipes de los cambios que está promoviendo la Corporación, más que un miedo a la transformación tecnológica existe un clima de colaboración, sobre todo el último tiempo, se están aceptando los cambios tecnológicos y tienen una disposición positiva al desarrollo de los distintos proyectos de innovación.

Tabla 32 Resumen desafíos y necesidades principales de la industria minera.

Procesos	CEMI	AMTC	AC3E	CSIRO	Mining3-CRC Mining	Fundación Chile/Alta Ley	Cesco	Codelco	Komatsu
Automatización equipos y robotización	Mayor seguridad y menores costos	Mayor seguridad (robotización para manipulación sustancias peligrosas y descargadores)	Mayor productividad y sostenibilidad de procesos industriales	Mayor productividad y reducción de costos	Disminución de costos y mayor seguridad	Mayor seguridad	Mayor productividad de operaciones de transporte y perforación principalmente	Mayor seguridad y disminución de costos	Operar en zonas inseguras o con acceso restringido
Equipos eléctricos	Menores costos de ventilación	Necesidad de nuevos métodos de procesamiento más sustentables	Menores emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero	Sustentabilidad medio ambiental	Operaciones más eficientes	Reducción huella de carbono	Mayor eficiencia en operaciones, principalmente en la operación de carguío	Disminución de huellas de emisiones, de carbono y costos de ventilación	Eliminación de emisiones contaminantes y disminución huella carbono
Transformación digital	-	Toma de decisiones en tiempo real	Optimización de equipos y procesos	Toma de decisiones en tiempo real para aumentar la productividad	Mayor monitoreo de las operaciones	Entregar valor a los datos obtenidos	Entrega mayor valor a la información, habilita el funcionamiento de las operaciones autónomas	Monitoreo y control de operaciones	Manejo de altos volúmenes de datos y en tiempo real
Minería continua	Mayor producción	Aumento de productividad	-	-	Mayor productividad y producción	Mayor productividad	-	Necesidad por la profundización de los cuerpos mineralizados (Reducción de costos)	Mayor productividad y producción
Estándares interoperabilidad	-	Trabajo cooperativo	Conectividad verdadera y trabajo colaborativo	Mayor productividad	Mayor control y optimización de cadena de valor minera y la posibilidad de implementación de la automatización de procesos	Mayor seguridad, eficiencia energética, implementación automatización, digitalización, integración operativa y análisis de datos	-	Compatibilidad entre equipos y procesos	Mayor integración de equipos
Monitoreo y sensorización	Condición geotécnica y operacional altamente cambiantes	Interacción segura (previsualizar, prevenir eventos de alta sismicidad y bombeos)	Control eficiente de sistemas de potencia y energía	Mayor productividad a través de elaboración de digital twins para anticipar problemas	Mayor control y optimización de cadena de valor minera	Mayor confiabilidad a los datos, trazabilidad de consumo de energía, mayor seguridad	Mayor seguridad, mejor logística y mantenimiento. Habilita operaciones autónomas	Habilitan la transformación digital, para mayor valorización de las operaciones	Monitoreo en tiempo real de signos vitales de los equipos, Mantenimiento predictiva
Minería subterránea masiva	Reducción de los riesgos por esfuerzos del macizo rocoso	Megas Block/Panel caving. Necesidad de mejor caracterización de flujo gravitacional y condiciones de esfuerzos	-	-	Futuro de la minería mundial, Reducción de los riesgos por esfuerzos del macizo rocoso (monitoreo sismicidad)	Necesidad de mayor productividad, visualizando la operación con altos esfuerzos del MR	-	Mayor productividad y producción por disminución de leyes. Extracción de columnas de gran altura y optimización del uso de fracturamiento hidráulico	Equipos adaptados para estos requerimientos

Elaboración propia.

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE BRECHAS Y NECESIDADES DE DESARROLLO PARA KOMATSU

4.1 Definición caso base equipos Komatsu

Para la elaboración del caso base, se consideran los equipos y herramientas disponibles actualmente en el portafolio de Komatsu, que están diseñados para operar en labores subterránea de roca dura. En las siguientes secciones se detallan las principales características de los equipos.

4.1.1 Equipos LHD

Las principales características del portafolio de equipos LHD de Komatsu se pueden visualizar en las siguientes tablas:

Tabla 33 Características físicas principales de equipos LHD de Komatsu.

Modelo	Capacidad nominal [t]	Rango tamaño balde [m ³]	Rango tamaño balde [yd ³]	Altura [m]	Ancho sin balde [m]	Ancho con balde estándar[m]	Largo total [m]	Túnel recomendado [m x m]	Rango ancho túnel [m]	Ángulo de giro [°]
LT-270	2.722	1.2	1.56	1.9	1.4	1.5	6.4	2.5 x 2.5	2.5 – 3.2	37.0
4 LD	4.000	1.9 - 2.3	2.47 - 2.99	2.0	1.6	1.8	7.7	3.0 x 3.0	3.0 – 3.7	40.0
LT-650	6.591	3.1	4.03	2.2	2.0	2.1	8.9	3.5 x 3.5	3.5 – 4.2	36.0
LT-1051	10.000	4.6 - 5.0	5.98 - 6.50	2.4	2.4	2.7	9.8	4.0 x 4.0	4.0 – 4.7	42.5
18HD	18.000	8.2 - 11.2 (base: 9.2)	10.70 - 14.70 (base:12.00)	3.0	2.9	3.2	11.6	4.7 x 4.7	4.7 – 5.4	46.0
22HD	22.000	10.0 - 13.8 (base:11.2)	13.00 - 18.00 (base: 14.56)	3.0	3.0	3.7	11.7	5.0 x 5.0	5.0 – 5.7	48.0

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020).

Con respecto a la Tabla 33 ,se puede destacar que Komatsu dispone de una amplia gama de equipos LHD que pueden ser utilizados en pequeñas operaciones mineras subterráneas especializadas en vetas angostas (equipos entre 2.7 a 6.5 toneladas de capacidad) o en operaciones que requieran el transporte de mayores tonelajes (18 y 22 toneladas), como lo es en el caso de grandes faenas con métodos de explotación de Block/Panel caving. La posibilidad de tener más de una opción de balde para los equipos, principalmente en los equipos de mayor tamaño, permite ajustar el ancho máximo del equipo con tal de adaptarse a las condiciones operacionales de la faena en particular.

Con respecto a la Tabla 34, se puede destacar la posibilidad de utilizar distintos modelos de motor para un mismo equipo, de acuerdo con los requerimientos de mayor poder o de alguna certificación en particular, generando una diferenciación de precios entre la utilización de un modelo de motor u otro.

Tabla 34 Características mecánicas principales de equipos LHD de Komatsu.

Modelo	Modelo Motor	Poder [hp]	Poder [kW]	Certificación	Peso equipo [t]	Capacidad combustible [litros]
LT-270	Deutz BF4M2012C o Cummins QSB 3.3	75 o 99	56 o 74	EPA Tier 2 MSHA	9.570	140
4LD	Cummins QSB 4.5 T o MTU MBE 904	130 o 148	97 o 110	EPA Nivel 3 UE Etapa 3 MSHA o EPA Nivel 3 MSHA CANMET	14.562	129
LT-650	Cummins QSB 6.7 o MTU MBE	220 o 228	164 o 170	EPA Nivel 3 MSHA	19.671	276
LT-1051	Cummins QSL 9 O Mercedes 926	280 o 295	209 o 220	MSHA US EPA Tier 3 EU nivel 3A CANMET 1187 o US nonroad Tier 3 Euro nonroad Etapa 3	28.818	362
18HD	US tier IV final	375 o 429 (550 extra con poder hibrido)	280 o 320	Tier 4	53.300	757
22HD	US tier IV final	429 o 510 (550 extra con poder hibrido)	320 o 380	Tier 4	59.091	757

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020).

4.1.2 Camiones UG

Las principales características del portafolio de camiones subterráneos de Komatsu se pueden visualizar en las siguientes tablas:

Tabla 35 Características físicas principales de camiones UG de Komatsu.

Modelo	Capacidad nominal [t]	Volumen de caja de descarga [m³]	Volumen de caja de descarga [yd³]	Altura [m]	Ancho [m]	Largo total [m]	Túnel recomendado [m x m]	Rango ancho túnel [m]	Ángulo de giro [°]
7TD	6.600	3.3	4.3	2.1	1.6	6.2	2.5 x 2.5	2.5 - 3.2	42
16TD	16.000	7.3-9.0 (Estándar: 8.0)	9.5-11.7 (Estándar: 10.4)	2.4	2.3	7.7	3.3 x 3.3	3.3 - 3.8	45
DT-3504	31.819	14.5 - 17.4 (Estándar: 17.4)	19.0 - 22.7 (Estándar: 22.7)	2.6	3.1	10.5	4.3 x 4.3	4.3 - 5.0	40

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020).

Con respecto a la Tabla 35, se puede destacar que Komatsu cuenta con 3 modelos de camiones, que tienen un rango de capacidad nominal de baja a media magnitud, especializados en operaciones de minería de vetas angostas o de minería de medianas producciones.

Con respecto a la Tabla 36, se puede destacar la posibilidad de utilizar distintos modelos de motor para un mismo equipo, de acuerdo con los requerimientos de mayor poder o de alguna certificación en particular, generando una diferenciación de precios entre la utilización de un modelo de motor u otro.

Tabla 36 Características mecánicas principales de camiones UG de Komatsu.

Modelo	Modelo Motor	Poder [hp]	Poder [kW]	Certificación	Torque [N m]	Peso equipo [t]	Capacidad combustible [litros]
7TD	Deutz BF4L 914	96	72	EPA Tier 2	355	8.120	117
16TD	Cummins QSB 6.7 o MTU 0M906LA	220 o 228	164 o 170	EPA Nivel 3 MSHA, EPA Nivel 3 EU Etapa 3 o EPA Nivel 2 MSHA	949 o 809	17.900	338
DT-3504	Cummins QSB 11 o Detroit Diesel Series 60	400	298	EPA Tier 3 o MSHA	1,898	30.418	398

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020).

4.1.3 Equipos de perforación

De acuerdo con el portafolio de equipos de Komatsu, se tiene a disposición del mercado los siguientes modelos de jumbos de avance:

Tabla 37 Características físicas principales de Jumbos de avance de Komatsu.

Modelo	Cobertura de frente [m x m]	Cobertura de frente [m²]	Tamaño de túnel [m]	Aplicación	Tamaño barrenos [mm]	Altura (vagón/perf.) [m]	Ancho [m]	Largo [m]	Ángulo de giro [°]
VR11	3.00 x 3.00 a 5.10 x 5.70	36.0	3.0 - 5.7	Perforación anclaje	45 a 76	2.31/2.83	1.42	10.75	40
DR1SB	3.50 x 3.50 a 6.07 x 5.69	40.4	3.5 - 6.0	Perforación anclaje	43 a 86	2.53/3.09	1.96	13.25	38
DR2SB	4.00 x 4.00 a 6.07 x 8.28	56.0	4.0 - 8.3	Perforación anclaje	43 a 86	2.31/2.83	1.42	10.75	38

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020).

De la Tabla 37, se puede destacar que se tiene 3 modelos de jumbos de avance, que operan en las clases de rango pequeño a mediano. Un caso especial representa el modelo VR11 (Vein Runner), ya que este modelo está adaptado para operar

eficientemente en minería de vetas y en desarrollos mineros, donde la maniobrabilidad en pequeños espacios es una característica clave.

Es importante mencionar que sólo un modelo de jumbo posee más de un brazo, justamente por la especialización de la marca Joy en minería de vetas, que fue adquirida por Komatsu el 2017.

Tabla 38 Características mecánicas principales de Jumbos de avance de Komatsu.

Modelo	Modelo Motor	Poder [hp]	Poder [kW]	Certificación	Torque [N m]	Opciones de martillos perforadores [kW]	Peso equipo [t]	Capacidad combustible [litros]
VR11	Deutz BF4L914	99 o 109	72 o 81	EPA Tier 2 o EPA Tier 3	461	13 a 22	12.610	62.7
DR1SB	Cummins QSB 4.5	130	97	EPA Tier 3 MSHA	622	13 a 27	19.190 (estándar) o 20,865	72.0
DR2SB	Cummins QSB 4.5	130	97	EPA Tier 3 MSHA	622	13 a 27	24.600	72.0

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020).

En cuanto a la información mostrada en la Tabla 38, se puede destacar que los modelos están diseñados para tipos de martillos perforadores con distinta potencia.

4.1.3.1 Martillos perforadores Montabert y Timberock

Los martillos perforadores hidráulicos Montabert son una de las máquinas de perforación de roca dura más valorada en el mercado, que tienen asociada una tradición de casi 100 años de producción de herramientas de perforación. Son fabricados en la ciudad de Lyon, Francia. Los martillos perforadores hidráulicos son reconocidos principalmente por las siguientes características:

- Alto rendimiento.
- Alta confiabilidad.
- Intervalos prolongados de mantenimiento, lo que genera mayores disponibilidades.
- Bajo nivel de desgaste de herramientas.
- Altas velocidades de penetración

Las aplicaciones de estos martillos se concentran en desarrollo de túneles, empernado, producción y superficie. Los modelos disponibles se muestran en la siguiente figura:

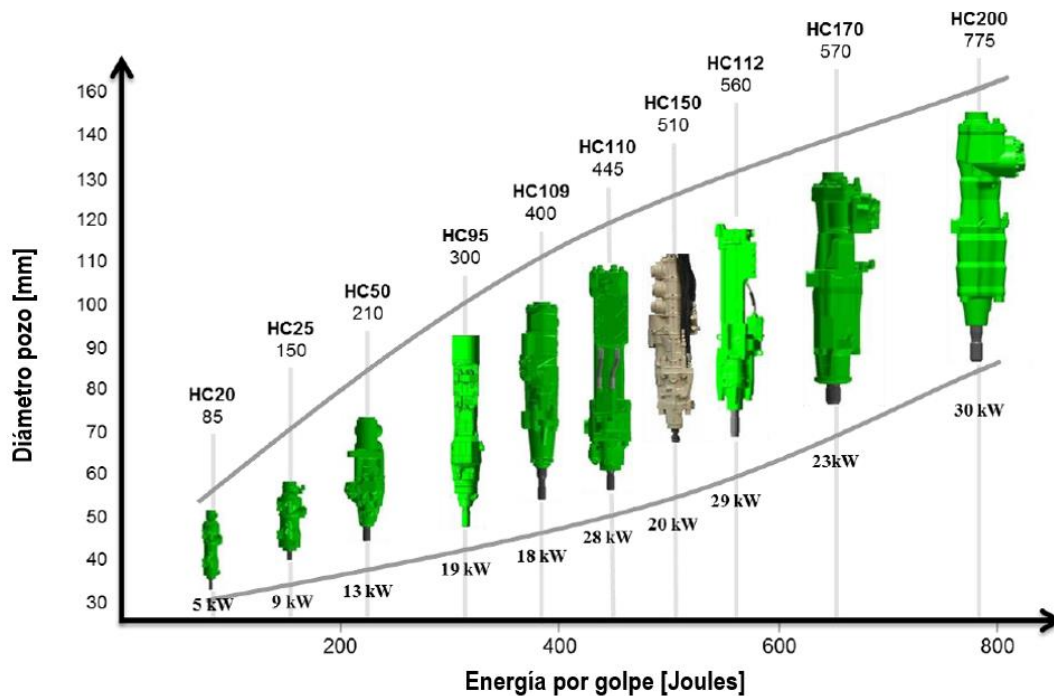


Figura 36 Martillos perforadores hidráulicos de Komatsu.

Adaptado de Urzúa R. (2019)

De la Figura 36 se puede destacar que existen 9 modelos de martillos disponibles y uno en desarrollo, donde sus potencias varían entre 5 y 33 [kW], que son recomendadas dependiendo del diámetro de pozo que se quiera perforar y la energía necesaria para perforar el macizo rocoso condicionado por las características geotécnicas particulares de la faena minera. Para diámetros pequeños (entre 30 y 50 [mm] aprox.) se tiene el modelo HC20 y para diámetros mayores se tienen las HC170 y HC200.

Un servicio importante que Komatsu puede brindar a sus clientes, relacionado con las perforadoras, es la conversión de los equipos de perforación para minería de roca dura, ofreciendo una solución completa de reacondicionamiento, que puede entregar la posibilidad de estandarizar flotas y así facilitar la mantención de los equipos (las conversiones son compatibles con todos los principales fabricantes de equipo original). Esta característica promueve la utilización de estos martillos, ejemplo de ello es que empresas como Resemin (Perú), que tiene aproximadamente el 10 % del mercado mundial de perforadoras de avance utiliza estos martillos en sus jumbos.

Con respecto a los cabezales Timberrock, se puede mencionar que Komatsu tiene disponible a la fecha para roca dura, una oferta de conversión de equipos Sandvik y Epiroc utilizando cabezales de empennadoras, permitiendo disponer de utilización de múltiples pernos como los Swellex, pernos de anclaje por fricción y pernos de anclaje químico, con sistema de carrusel para 9 pernos y manipulador de malla integrados. Cabe destacar que se pueden utilizar pernos entre 5 a 10 pies (1.5 a 3.0 [cm]), teniendo como opción la utilización de martillos Montabert HC25, HC28 y HC95.

4.2 Iniciativas enfoque Market pull

Como principales iniciativas con enfoque Market pull se consideran los equipos a baterías y los equipos automatizados.

4.2.1 Equipos mineros a baterías presentes en el mercado

4.2.1.1 LHD y camiones UG

Los principales equipos en el mercado actual de LHDs y camiones UG a baterías se puede resumir en la siguiente figura:

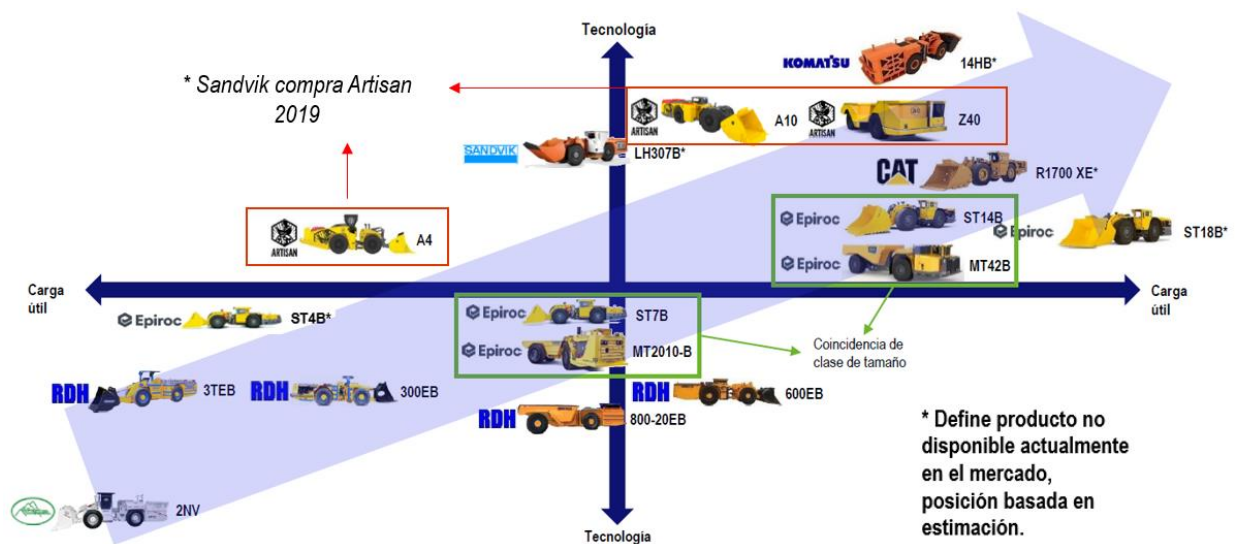


Figura 37 Panorama competitivo equipos LHD y camiones UG a batería.

Adaptado de Lyten M. (2019)

En base a la Figura 37, se puede visualizar que el mercado de equipos LHD y camiones UG tiene un número acotado de marcas y de modelos disponibles a la fecha del presente estudio. Se quiere destacar que empresas como Komatsu y Caterpillar, no tienen

presencia en el mercado actual, pero se espera lanzamientos de equipos como el LHD Komatsu 14HD y LHD Caterpillar R1700XE. Por su parte, la marca Sandvik, al adquirir la empresa Artisan el 2019, pasa a disponer de una línea importante en equipos a batería.

Como principal empresa en este segmento se considera a la empresa Epiroc, ya que a la fecha tiene disponibles en el mercado equipos LHD 7 [t] y 14 [t] y camiones 20 [t] y 42 [t] que hacen match con los respectivos LHD de mayor capacidad (tienen en desarrollo un equipo LHD de 4 [t] y 18 [t]).

Tabla 39 Comparación LHD y camiones a baterías presentes en mercado.

Parámetro	LHD						Camiones			
	Epiroc		Sandvik Artisan		RDH Scharf		Epiroc		Sandvik Artisan	RDH Scharf
	ST7B	ST14B	A4	A10	300EB	600EB	MT2010B	MT42B	Z50	800-20 EB
Capacidad [kg]	7,000	14,000	4,000	10,000	5,400	11,000	20,000	42,000	50,000	20,000
Peso operacional [kg]	21,500	42,000	10,886	33,315	14,470	31,100	24,400	37,700	48,148	29,120
Tipo de Batería	LiFePO4	NMC	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	NMC	LiFePO4	LiFePO4
Estado batería	Cambiable				Fija		Cambiable			Fija
Voltaje batería [VDC]	630	850	600	345	470	470	630	850	850	620
Energía específica [Ah]	262	500	147	442	260	400	262	603	576	260
Motor eléctrico [Kw]	108-149	200	100-170	150	75-149	75-149	79-113	400	245-358	75-224

Elaboración propia basada en Catálogos Epiroc (2020), Catálogo Artisan (2020) y Catálogos RDH Scharf (2020).

De la Tabla 39, se puede destacar que los equipos de menor capacidad utilizan baterías del tipo ion-litio LiFePO₄, mientras que los de mayor capacidad utilizan ion-litio NMC. La estrategia más utilizada es la utilización de Baterías reemplazables con carga remota.

4.2.1.2 Equipos de perforación

El mercado actual de equipos de perforación a baterías, al igual que el mercado de camiones UG y LHD, se encuentra acotado a un reducido número de proveedores y modelos disponibles a la fecha.

Nuevamente se destaca el liderazgo que tiene la empresa Epiroc en este segmento de mercado, ya que es la primera empresa que tiene un modelo de perforadora disponible (Jumbo de avance Boomer E2 Battery de tamaño grande). Otra empresa que tiene una perforadora disponible es Sandvik con su modelo DD422iE (Jumbo de avance mediano).

Empresas como Komatsu y Resemin, tienen dentro de sus planes de desarrollo disponer de perforadoras a baterías, pero a la fecha no tienen disponibilidad de este tipo de equipos.

Cabe destacar que los equipos disponibles, utilizan baterías sólo para el desplazamiento del equipo y no para la operación en sí, la cual se desarrolla con la conexión eléctrica del equipo a través de cables a la infraestructura de la mina.

Tabla 40 Perforadoras a baterías disponibles en mercado al 2020.

	Epiroc	Sandvik
Parámetros/Modelos	Boomer E2 Battery	DD422iE
Cobertura frente [m ²]	112.0	60.0
Potencia tren eléctrico [kW]	150.0	195.0
Boom	1 o 2 SB60 / SB60i	2 SB60 / SB60i
Peso operacional [kg]	22000.0 a 41000.0	27500
Tamaño de túnel [m x m]	4.5 x 4.5	4.5 x 4.5
Longitud total [m]	15.0 - 16.2	13.8
Ancho [m]	2.6	2.5
Alto [m]	2.5/3.1	3.1/3.2
Voltaje batería [V]	700.0	380.0 -1000.0

Elaboración propia basada en Catálogos Epiroc (2020) y Catálogos Sandvik (2020).

En la Tabla 40 se tienen las características principales de las perforadoras disponibles en el mercado al 2020. Se destaca que el equipo de Epiroc tiene una mayor cobertura de frente que el equipo Sandvik (el Epiroc es para frentes grandes y el Sandvik es para frentes medianos) y que tiene la opción de acondicionar el equipo con uno o dos brazos.

4.2.1.3 Estrategias de desarrollo de Komatsu en electromovilidad

En la actualidad, Komatsu está buscando mejorar su posicionamiento en un segmento de mercado donde, como empresa, ha ingresado hace un corto período de tiempo. Uno de los pilares fundamentales en la estrategia de minería subterránea de roca dura de Komatsu es justamente la electromovilidad, donde la electrificación de su portafolio de equipos se considera la primera tecnología clave, utilizando los equipos híbridos como transición hacia los equipos con funcionamiento en base a baterías, como jumbos de avance, empernadores, camiones UG y equipos LHD.

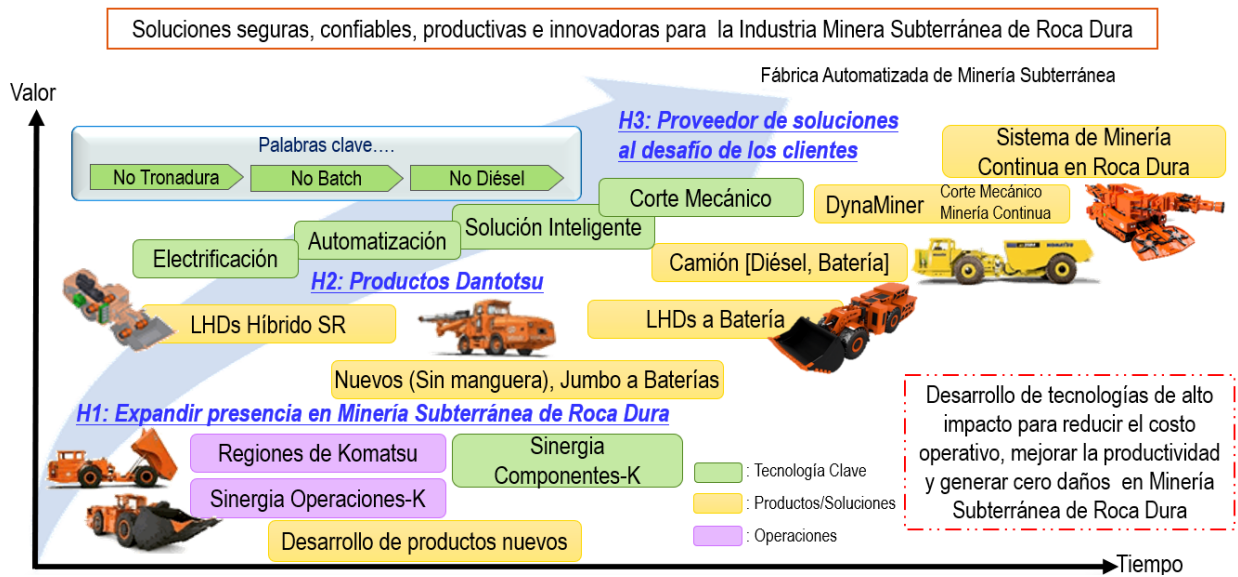


Figura 38 Roadmap de minería subterránea de roca dura de Komatsu.

Adaptado de Morales J.-b (2019).

En la Figura 38, se puede visualizar el Roadmap de Komatsu en minería subterránea de roca dura, donde las tecnologías claves consideradas son la electrificación, la automatización de los equipos, el desarrollo de soluciones inteligentes y la minería continua en base al corte mecánico, la que buscarán reducir los costos operativos, mejorar la productividad y promover la seguridad en las operaciones, transformando la operación minera en una fábrica automatizada de mineral.

4.2.1.3.1 LHD y camiones UG a baterías o híbridos

Como se puede visualizar en la Figura 39, las pruebas conceptuales de las baterías en LHD comenzaron el 2018 y en la actualidad están en conversión el LHD 7LD (7 toneladas) y el camión de 20 toneladas. Para el 2022, se espera tener completada la conversión a baterías de los equipos a diésel del portafolio de productos especializados en vetas angostas, tener desarrollado el LHD híbrido de 14 toneladas, el LHD de 10 toneladas a baterías e iniciar el desarrollo de baterías para camiones de altos tonelajes.

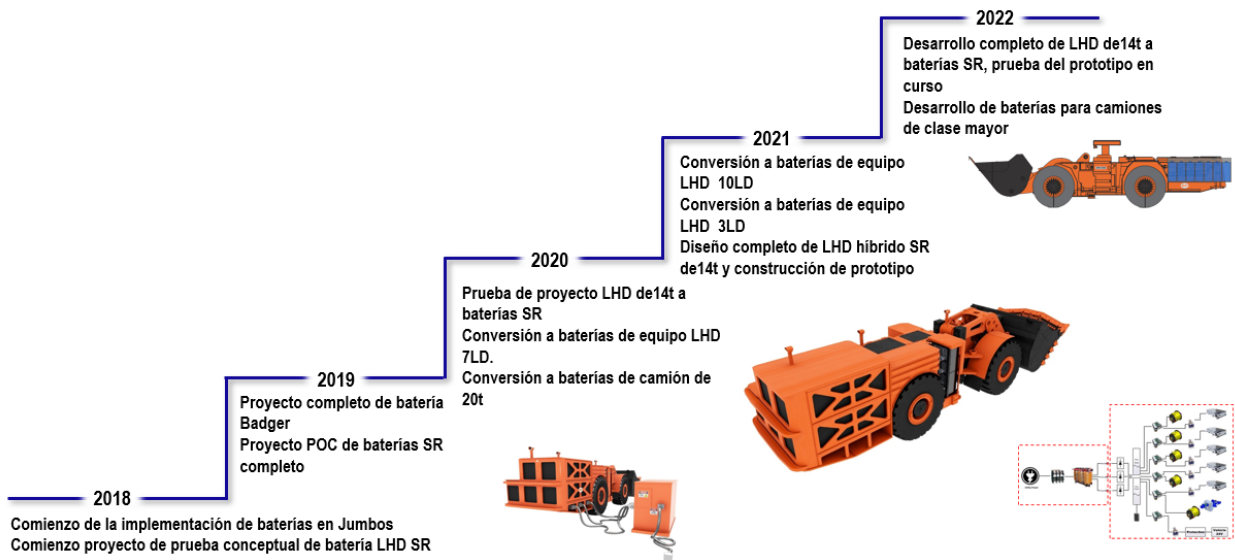


Figura 39 Roadmap electromovilidad de Komatsu en minería subterránea.

Adaptado de Morales J.-a (2019).

4.2.1.3.2 Jumbos de avance y emperadores a baterías

El desarrollo de emperadores y jumbos de avance con desplazamiento basado en baterías, es una de las prioridades de Komatsu.

En la Figura 40, se puede visualizar la planificación estratégica de los lanzamientos de los equipos pertenecientes al portafolio de jumbos y emperadores, donde es importante destacar la especialización de estos equipos en minería de vetas angostas o frentes de medianas proporciones. A finales de octubre del 2020, se espera hacer el lanzamiento del jumbo pequeño (ZJ21) y del emperador pequeño (ZB21) que representan el inicio de una nueva gama de productos con el sello de la compañía, en minería subterránea de roca dura. La evolución de estos equipos será de equipos de menor a mayor, primero impulsados por diésel para luego ser convertidos en equipos a baterías y de máquinas de control hidráulico a máquinas inteligentes que estén preparadas para el desafío de la automatización.

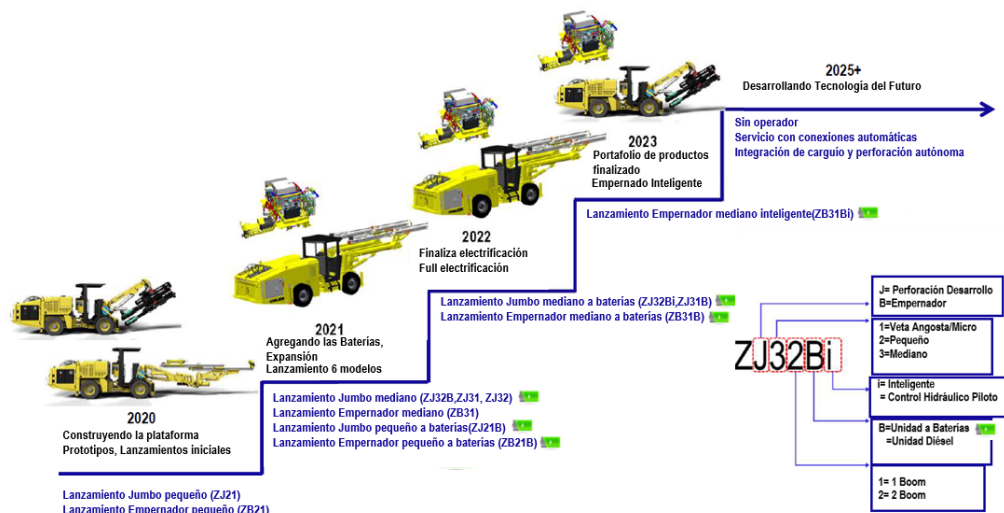


Figura 40 Roadmap electromovilidad de Jumbos de avance y empennadores de Komatsu.

Adaptado de Komatsu-b (2020).

Para entregar un resumen del proceso de electromovilidad de los equipos de minería subterránea de roca dura de Komatsu, se tiene la Figura 41, que muestra la conversión de los principales equipos disponibles en la actualidad (que se pueden visualizar en el caso base) y el desarrollo de nuevos equipos como lo es el LHD híbrido de 14 toneladas y su posterior conversión a baterías.

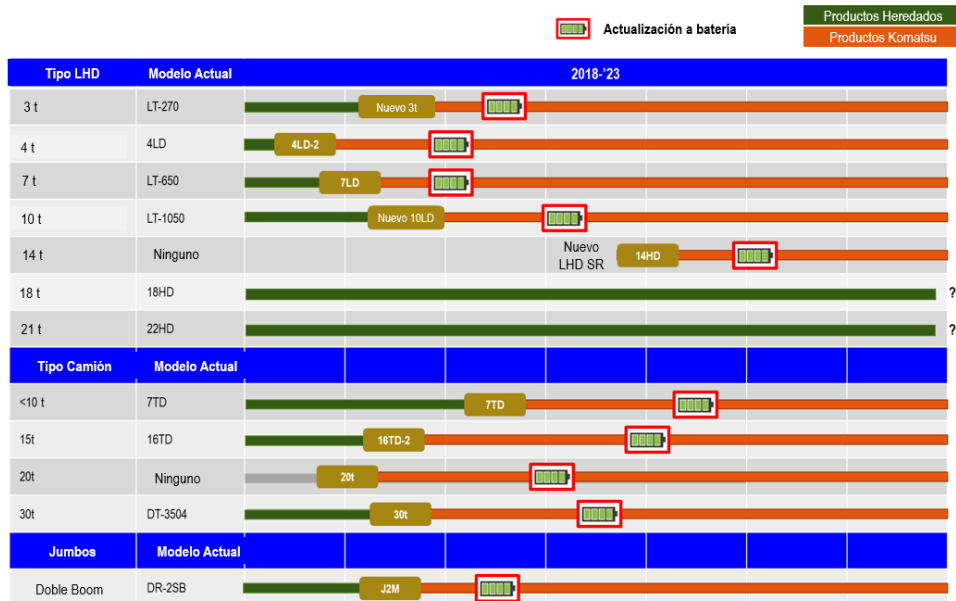


Figura 41 Resumen actualización y electrificación equipos Komatsu.

Adaptado de Komatsu (2018).

4.2.2 Equipos mineros automatizados en el mercado

Con respecto al mercado de automatización en minería, se espera que crezca de 2.22 mil millones de dólares en 2017 a 3.29 mil millones de dólares para el 2023, a una tasa compuesta anual de 6.77%. La creciente necesidad de seguridad de los trabajadores, el mejorar los índices de productividad y la reducción de los costos operativos están impulsando el crecimiento del mercado. Las principales compañías en este mercado son Komatsu (Japón), Caterpillar (USA.), Sandvik (Suecia), Epiroc (Suecia) y Hexagon Mining (Suecia) (Markets and Markets,2017).

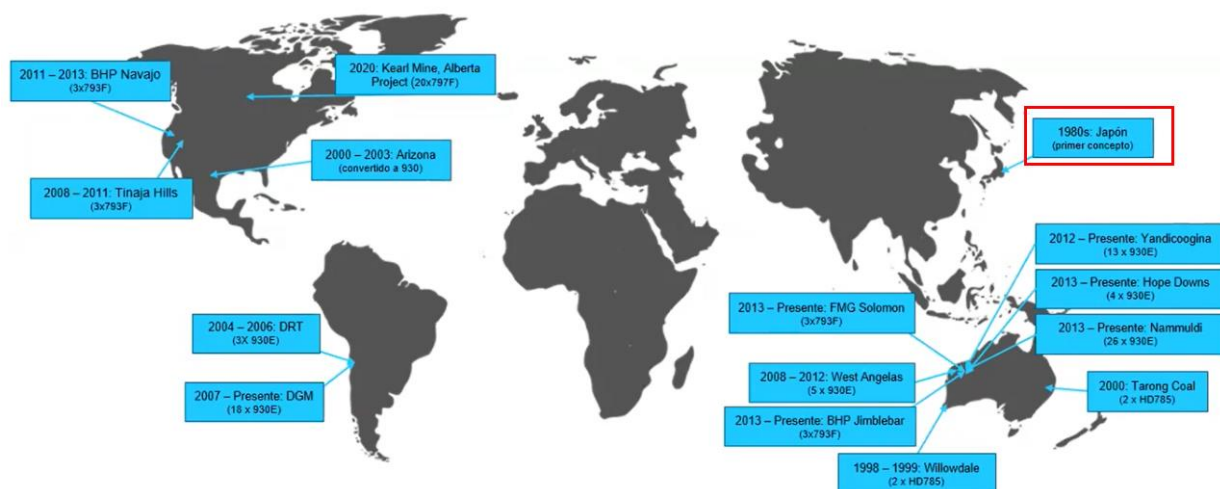


Figura 42 Tecnología de Camiones autónomos alrededor del mundo.

Fuente: Canelo A. (2020)

Cabe destacar que el primer concepto de autonomía en la industria minera fue planteado por Komatsu en la década de los ochenta, para luego ser expandido por todo el mundo. En la Figura 42, se puede visualizar la distribución mundial de las diferentes flotas de CAEX autónomos, donde Komatsu es líder con los modelos 930, 930E y HD785, seguido del modelo 793F de Caterpillar.

En el segmento de minería subterránea, Epiroc y Sandvik son consideradas las principales compañías proveedoras de equipos automatizados.

4.2.2.1 Automatización en Epiroc

Epiroc agrupa su estrategia de automatización bajo el concepto de “Sexto Sentido”, donde mediante la integración de la automatización, los procesos y los sistemas, busca

entregar valor a los clientes. De acuerdo con Catálogos Epiroc (2020) los principales productos y servicios de automatización en minería subterránea son:

- **Mobilaris Mining Intelligence™:** Corresponde a un servicio que permite la localización, el seguimiento y la supervisión de vehículos, operadores y equipos en tiempo real, lo que permite tomar decisiones de forma eficiente. Se destaca que es interoperable entre distintas tecnologías y proveedores.
- **Certiq:** Es una solución telemática²⁴ que recopila, compara y comunica información vital de los equipos mineros Epiroc.
- **Simba Automation (Nivel 2 de automatización):** Sistema para la automatización de equipos de perforación de producción. Puede funcionar de forma independiente o integrada, permitiendo navegar y perforar desde una sala de control, utilizando joysticks.
- **Scooptram Automation Regular (Nivel 2):** Sistema de teleoperación para un solo equipo LHD que permite una fácil transición del modo manual al automático.
- **Scooptram Automation Total (Nivel 3):** Sistema para automatizar una flota múltiple, que permite que los operadores puedan controlar y supervisar con facilidad la operación de los equipos en la mina, incluye gestión de tráfico.

4.2.2.2 Automatización en Sandvik

Sandvik ofrece distintos sistemas de teleoperación y automatización que pueden ser utilizados principalmente en equipos de carguío como los LHD y equipos de transporte como los camiones. También desarrolla sistemas de software que permiten hacer seguimiento de los equipos, permitiendo controlar y optimizar operaciones mineras. De acuerdo con Catálogos Sandvik (2020) los principales productos y servicios de automatización en minería subterránea son:

- **Optimine®:** Es una solución de gestión de data, que está enfocada en el desarrollo de reportes predictivos. Permite visualizar en tiempo real los datos de las operaciones mineras. se basa en una arquitectura de sistema abierto, que permite la integración eficiente de datos entre varios sistemas y equipos de minería de diferentes

²⁴ “La telemática consiste en utilizar herramientas de software para agregar inteligencia a los tradicionales sistemas de telecomunicaciones o, bien, en ofrecer servicios informáticos a distancia usando sistemas de telecomunicaciones como, por ejemplo, la internet” (UTFS,2020).

proveedores (sistema interoperable). En la Figura 43, se puede visualizar el esquema general de funcionamiento de esta solución tecnológica.



Figura 43 Visualización digitalización del ambiente de Sandvik.

Fuente: Vega E. (2020)

- **Automine® (Niveles 1-4 de automatización):** Corresponde a un sistema de teleoperación y automatización de equipos mineros para carga y transporte en minería subterránea. En la Figura 44, se pueden visualizar las distintas versiones del sistema, que van desde la teleoperación de un equipo, hasta el control de toda una flota con el respectivo control de tráfico.



Figura 44 Automatización subterránea para camiones y LHD de Sandvik.

Fuente: Vega E. (2020)

Cabe destacar, que el primer prototipo del sistema Automine® para equipos LHD en el mundo fue probado en División El Teniente, en la mina Pipa Norte el 2004. En la actualidad, Automine® está siendo aplicado en sus 4 versiones en Chile, en sección Anexos C (desde la página 289) se puede visualizar el esquema de una mina full automatizada (faena minera UVA, mediana minería) y los esquemas de algunos proyectos en curso que tiene la marca en Chile.

En el 2019, Sandvik se adjudica 3 proyectos con Codelco, uno en Chuquicamata subterráneo en el macrobloque central con equipos LHD (donde un operador tiene la capacidad de controlar 3 LHD) y otros 2 proyectos en el Teniente (1 en Diablo Regimiento con LHD y otro en Esmeralda con camiones UG) (Vega E., 2020).

4.2.2.3 Automatización en Komatsu

Komatsu tiene tradición en temas referentes a automatización, ya que durante más de 20 años se ha mantenido a la vanguardia y con el liderazgo en temas de automatización de CAEX mineros. De esta manera, la empresa en la actualidad se encuentra en una fase de adaptación de todo este conocimiento y experiencia, a dimensiones y restricciones de minería subterránea, para ser aplicado con los mismos estándares que a la fecha ha demostrado en minería a cielo abierto.

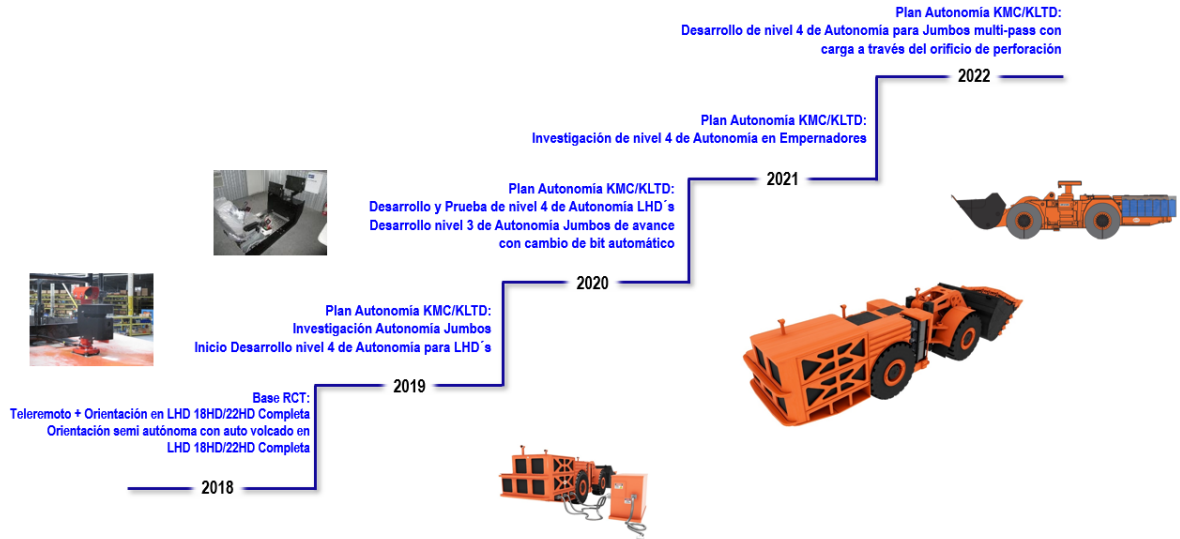


Figura 45 Roadmap automatización de productos Komatsu.

Adaptado de Komatsu (2018).

En la Figura 45, se puede visualizar la estrategia de desarrollo de la automatización en Komatsu. Como primera prioridad se tiene automatizar los LHD híbridos SR 18HD Y 22HD respectivamente. En el 2019 se completaron las pruebas de validación de los equipos en teleremoto y las pruebas de validación del sistema semi autónomo siguen en desarrollo, donde se trabajó en colaboración con la empresa especializada en las áreas de automatización y control de máquina RCT, la cual ofrece soluciones agnósticas y totalmente interoperables. Otra de las prioridades de automatización en equipos subterráneos son los jumbos de avance y los empernadores, los cuales iniciaron su proceso hacia la inteligencia el 2018.

Para el 2020, se contempla el desarrollo y testeo del nivel 4 de autonomía de los equipos LHD y el desarrollo del nivel 3 de los jumbos de avances.

4.3 Análisis de brechas y desarrollos para Komatsu

El mercado de proveedores de equipos mineros subterráneos en el mundo se caracteriza por tener un pequeño número de marcas que dominan el mercado²⁵. En el caso particular de Latinoamérica, entre el 2016 y el 2019 se vendieron 2,442 equipos nuevos entre LHD, camiones y jumbos, donde las principales marcas fueron Sandvik, marca que tiene un 36% del mercado de equipos de minería subterránea de roca dura (Ver Figura 46), Epiroc con un 27%, seguido de Caterpillar con un 19%, Komatsu con un 7% y el resto de las marcas se distribuyen un 11%. Cabe mencionar que la demanda total de equipos de minería subterránea varía entre 400 a 800 equipos anuales aproximadamente (393 el 2016, 557 el 2017, 662 el 2018 y 830 en el 2019). Para el caso particular de Chile, se visualiza como Epiroc como la empresa líder con un 48% del mercado, seguido de Sandvik con un 27%, Caterpillar con un 14%, Komatsu con un 6% y el resto de las marcas un 11% respectivamente.

²⁵ En el contexto de este estudio, se considera el mercado de equipos nuevos (no se consideran los equipos usados).

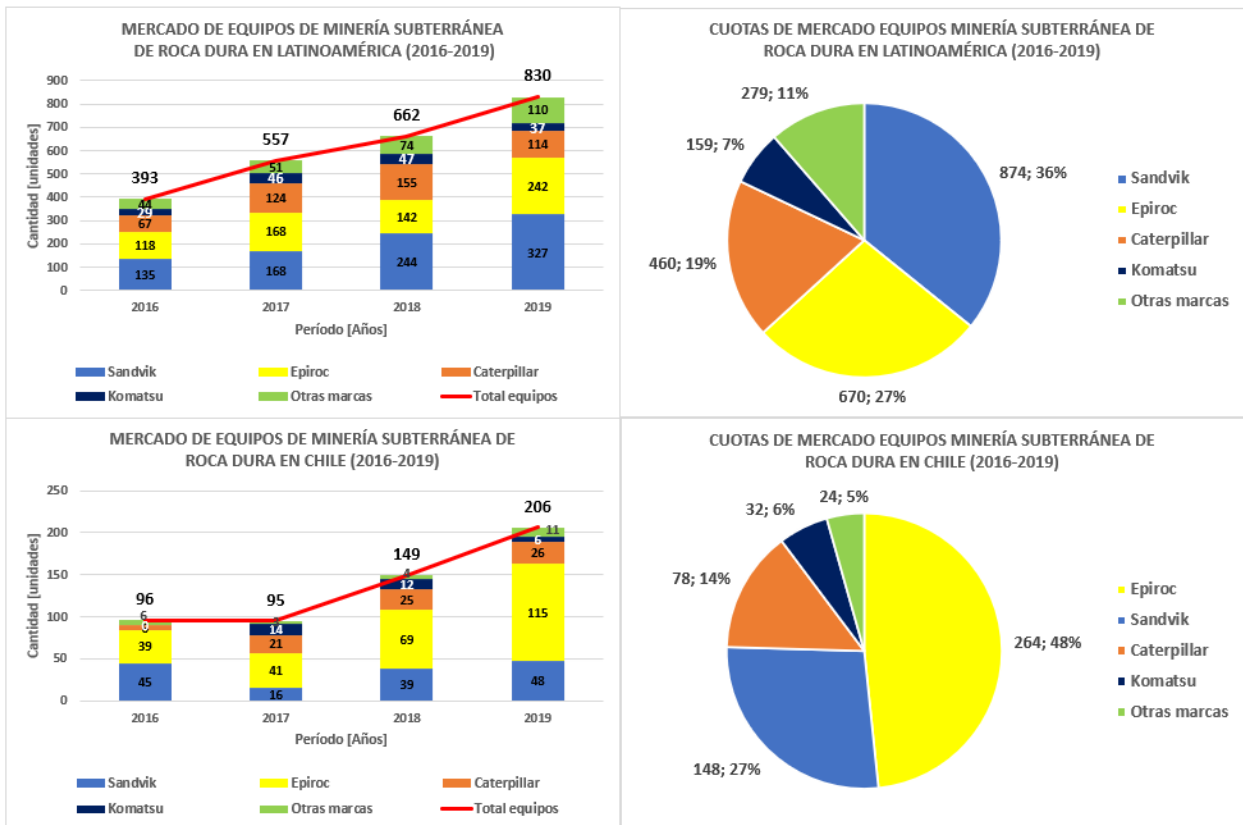


Figura 46 Dimensión del mercado latinoamericano y chileno en equipos de minería subterránea.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

De la Figura 46, se puede destacar que existe una amplia brecha entre Komatsu y las principales empresas suecas Sandvik y Epiroc, que juntas concentran más del 60% del mercado de minería subterránea latinoamericano y existe un gran número de empresas que se distribuye un 11 % de mercado (Resemin, Paus, Yantai, GHH, Dux, Normet, RDH, entre otras). También es relevante destacar que los últimos 4 años, la tendencia ha sido el aumento de la demanda de equipos subterráneos.

4.3.1 Mercado equipos LHD

El mercado de equipos LHD en Latinoamérica entre 2013 y al 2019 fue de 2,115 equipos. En la siguiente figura se pueden visualizar las principales características de este segmento de mercado:

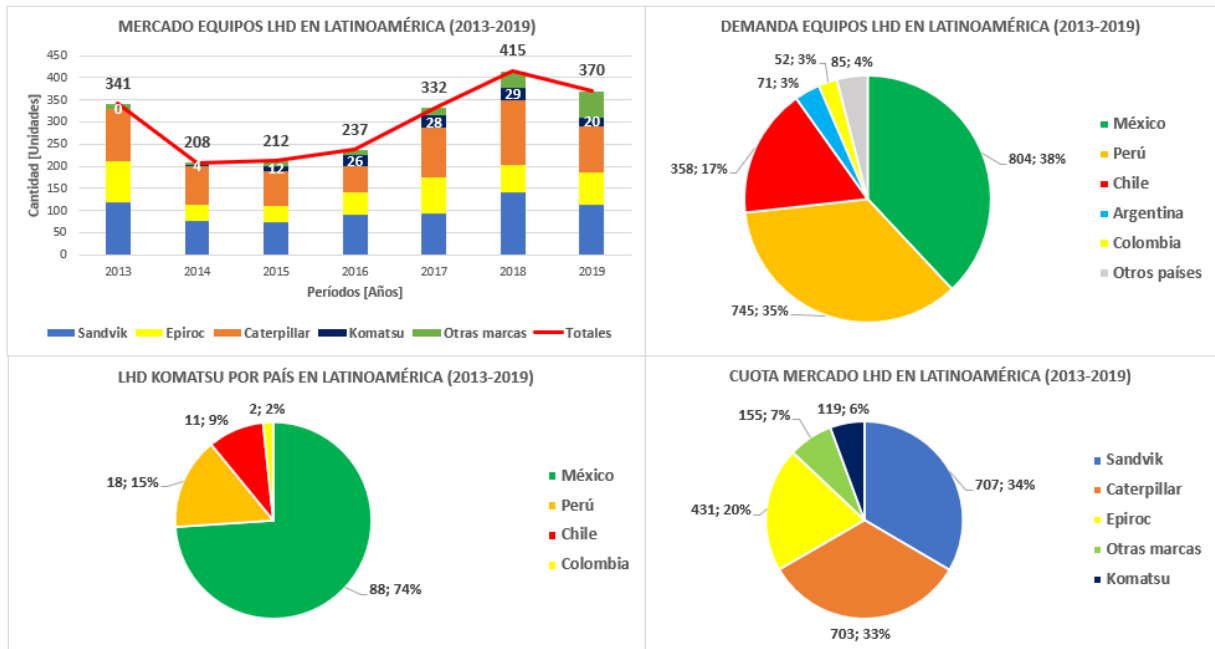


Figura 47 Mercado equipos LHD en Latinoamérica.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

A partir de la Figura 47, se destaca que la cantidad vendida de equipos LHD en Latinoamérica varía entre los 200 y 400 equipos aproximadamente, la mayor demanda está concentrada en México (38%), Perú (35%) y Chile (17%). La mayor cantidad de equipos LHD de Komatsu está en México (88 unidades, 74%) y en Chile sólo hay 11 equipos. Con respecto a la distribución del mercado por marcas, Sandvik tiene la mayor cantidad de LHD en Latinoamérica con 707 equipos, seguido de Caterpillar con 703 y Epiroc con 431 unidades. Komatsu por su parte, tiene una flota de 155 equipos que representan el 7% del mercado.

De la Figura 48, se puede destacar que la cantidad vendida de equipos LHD en Chile varía entre los 20 y 80 equipos aproximadamente. Con respecto a la distribución del mercado por marcas, Sandvik tiene la mayor cantidad de LHD en Chile con 121 equipos, seguido de Epiroc 118 y Caterpillar con 88 unidades. Komatsu por su parte, tiene una flota de 11 equipos que representan el 3% del mercado. Se destaca que el 2019 ingresa una marca China al mercado, Fambition, con 4 equipos a las operaciones subterráneas de Codelco (2 en El Teniente y 2 en El Salvador, donde se probará principalmente su costo de mantenimiento y operación) con capacidad de 10 toneladas, que tienen como

principal característica que en promedio son 20% más baratos en inversión (El Teniente-a, 2020).

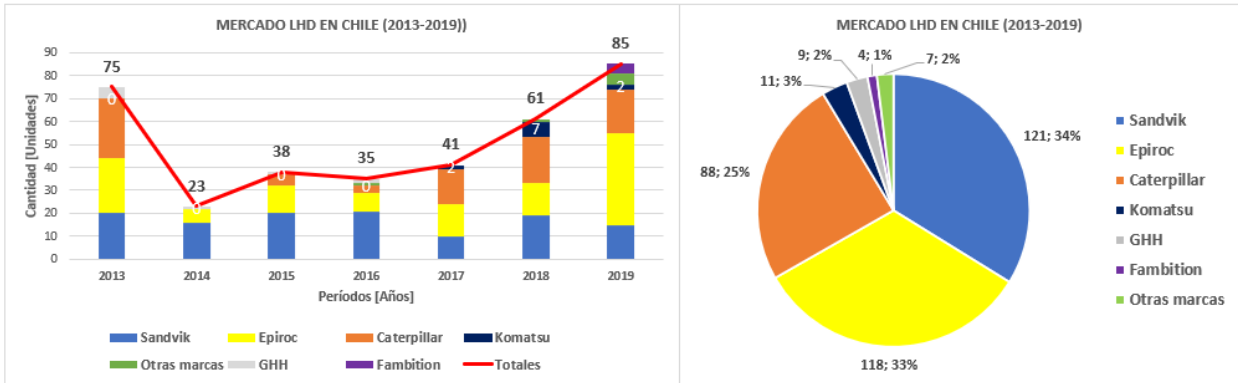


Figura 48 Mercado equipos LHD en Chile.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

El mercado total de LHD en Chile son 358 equipos.

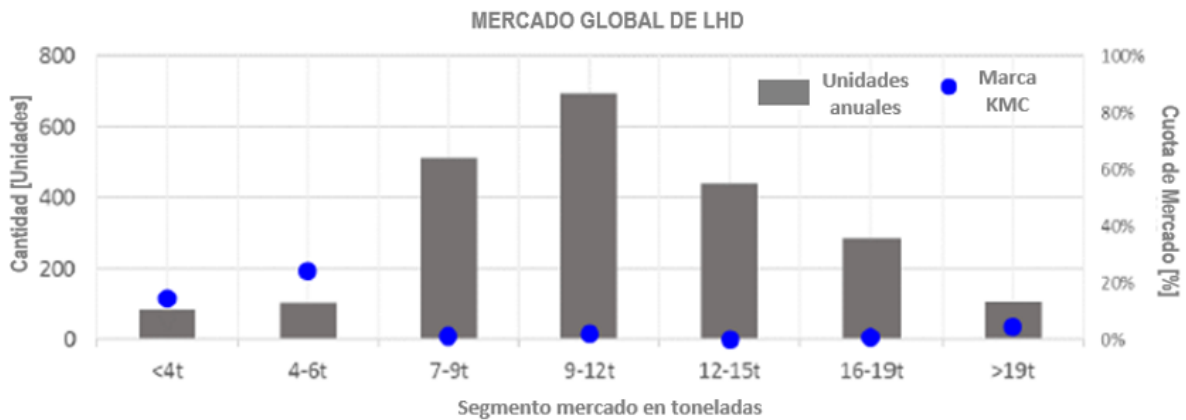
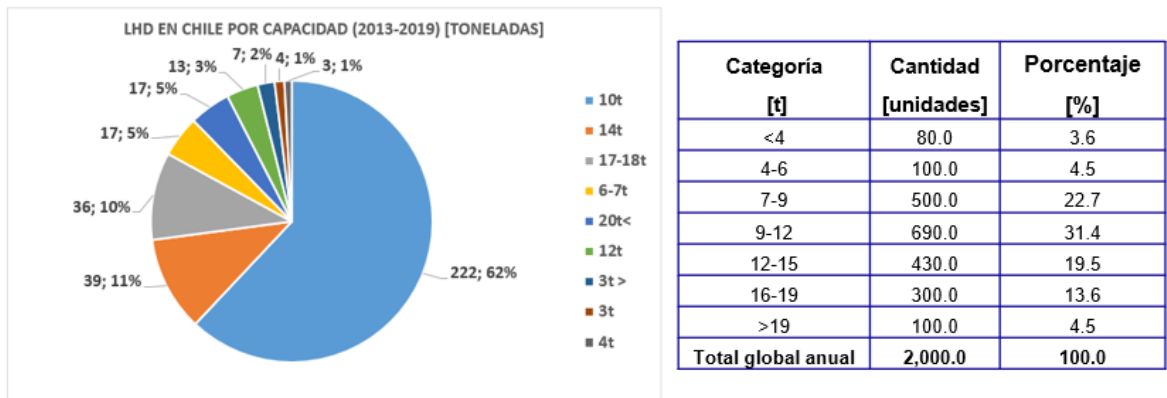


Figura 49 Mercado equipos LHD a nivel de Chile y el mundo.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019) y Lyten M. (2019).

Si se analiza la capacidad de los equipos LHD en Chile, se puede mencionar que la mayoría de los equipos tiene una capacidad de 10 toneladas (ver Figura 49) que representan el 62% del mercado, seguido de los equipos de 14 toneladas que representan el 11 % y luego los de 17-18 toneladas con un 10%. Los equipos de mayor tamaño (mayores a 20 toneladas) representan 5% del mercado y el resto de los equipos que son para una minería más pequeña o de vetas angostas (entre 1 y 7 toneladas), representa el 9% aproximadamente.

De la Figura 49 también se puede destacar, que los equipos más comunes utilizados en la minería subterránea chilena son también los más utilizados a nivel mundial, por lo que tener un equipo con capacidad 10 toneladas, con altos niveles de productividad, bajos costos operativos, seguro y con altas disponibilidades mecánicas puede traer beneficios relevantes al proveedor que lo desarrolla. Cabe mencionar que la mina chilena Chuquicamata subterránea, que es una de las minas más grandes del mundo, está utilizando equipos de 10,18 y 21 toneladas (en abril del 2020 Epiroc se adjudicó una orden de equipos que incluía modelos Scooptram ST1030 y ST18 y Sandvik tiene operando equipos modelo LH621), por lo que para minería masiva el LHD de 18 toneladas también sería atractivo (Reporte Minero-b, 2020).

Otro punto importante para destacar es que Komatsu tiene una base instalada activa de 338 equipos LHD en el mundo 11 de ellos en Chile, lo que representa el 3.3% (Urzúa R., 2019).

Desde el punto de vista de los modelos que tiene cada marca en los distintos segmentos, como se puede visualizar en la Figura 50, para equipos mayores de 20 toneladas el modelo principal es el Sandvik 621 con un 88% del mercado, en el segmento de 17-18 toneladas el mercado prácticamente se encuentra dividido en tercios, pero los equipos Epiroc ST18 son los más utilizados. El segmento de los equipos de 14 toneladas está dividido entre 2 modelos, que tienen similares cuotas de mercado (Epiroc ST-14 y Sandvik LH514) y por último en el segmento de 10 toneladas se tiene que el modelo principal es el Epiroc ST-1030 (37% del mercado y 82 equipos), seguido del Sandvik LH410 con 29% y 63 equipos. También se quiere destacar que, para equipos de 12 toneladas, Caterpillar posee el monopolio con 13 unidades, que representan el 4% del mercado con el modelo R1700G.

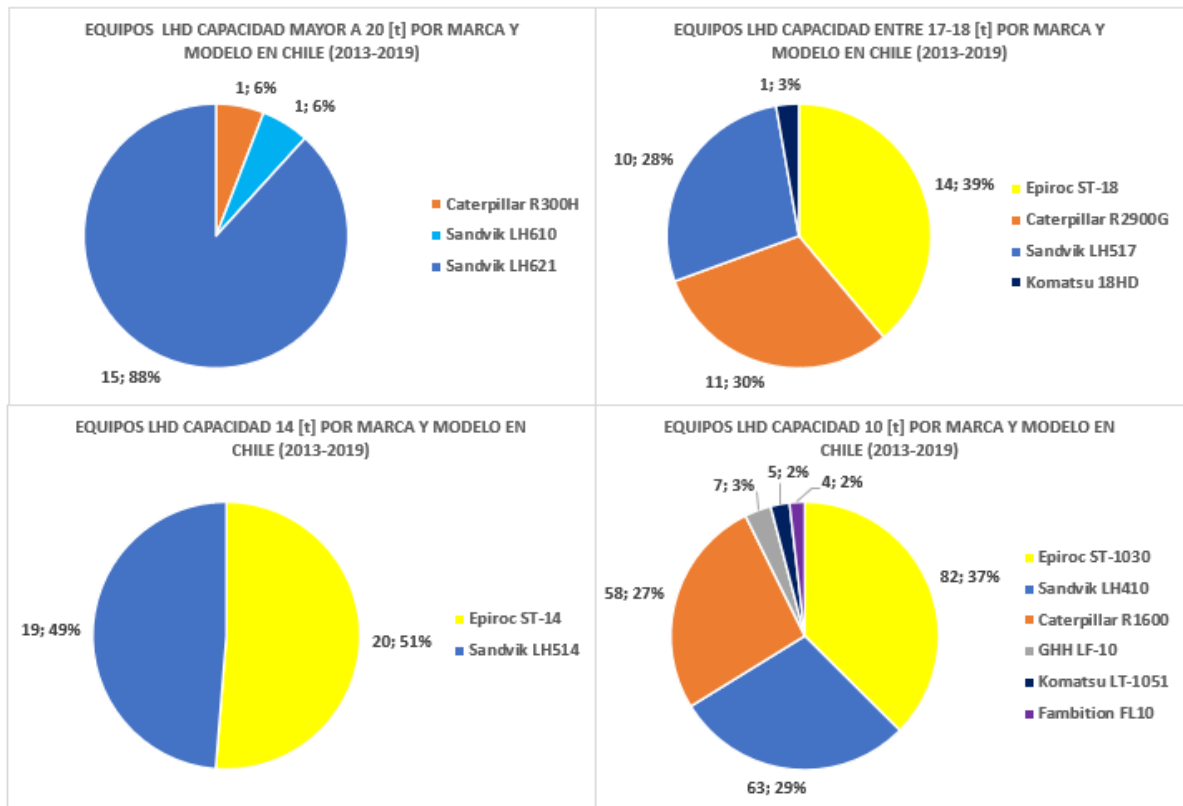


Figura 50 Mercado LHD en Chile por modelos y capacidades entre 10 y +20 toneladas.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

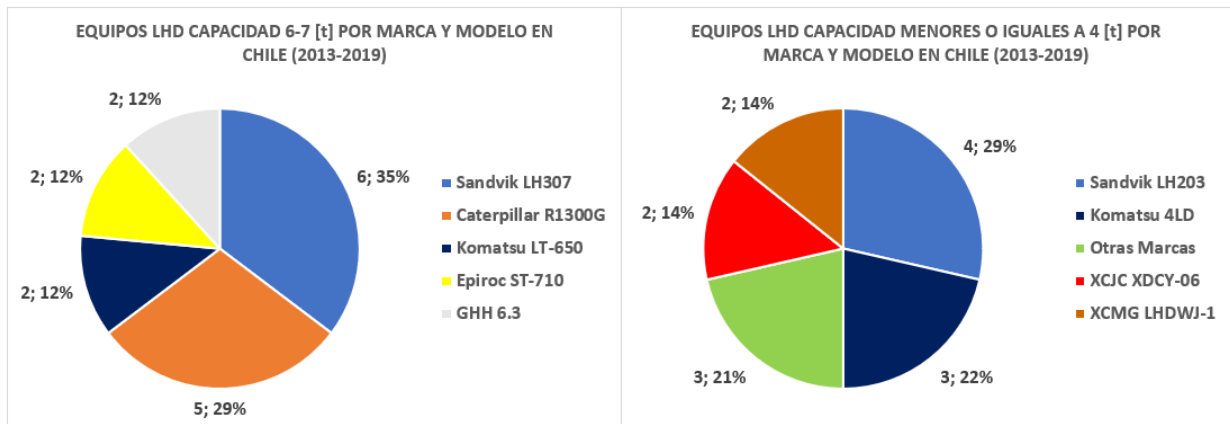


Figura 51 Mercado LHD en Chile por modelos y capacidades entre 1 y 7 toneladas.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

Para minería de pequeñas dimensiones o de vetas angostas, en la Figura 51 se pueden visualizar los respectivos modelos que lideran este segmento. Nuevamente se tiene a Sandvik con la mayor cantidad de equipos, pero se aprecia una mayor presencia de los

equipos Komatsu teniendo un 12% del mercado en equipos de entre 6 y 7 toneladas y un 22% en equipos menores o iguales a 4 toneladas (recordar que este segmento representa aproximadamente un 10% del mercado total de LHD en Chile).

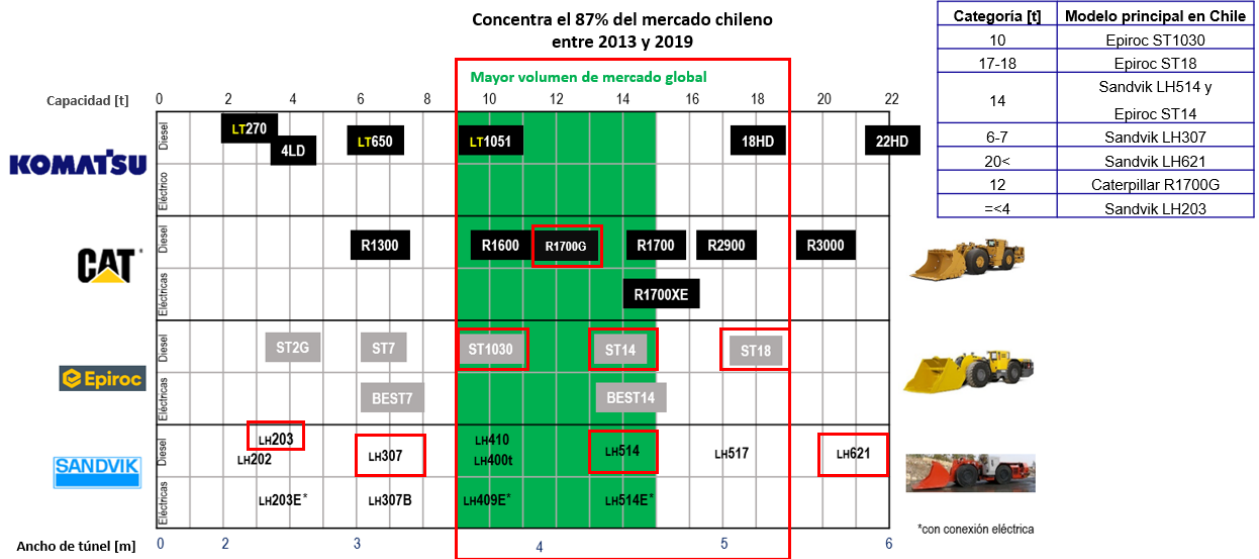


Figura 52 Resumen mercado equipos LHD.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019) y Maki B. (2019).

La Figura 52, muestra un resumen del mercado de los principales equipos LHD en el mundo y entrega una visualización simplificada de donde se encuentra el mayor volumen de mercado, tanto en el mundo como en Chile (cuadro verde el mundo y contorno rojo Chile), donde se destaca que el 87% del mercado de Chile se concentra entre los equipos de 10 a 18 toneladas con anchos de túneles de 3.5 a 5.5 metros aproximadamente.

A continuación, se comparan²⁶ los principales equipos del mercado chileno con los equipos de Komatsu de acuerdo con sus capacidades de carga.

De la Tabla 41 se puede destacar, que el equipo Komatsu LT1051 es más robusto, potente y posee mayor autonomía. Se considera importante la capacidad de combustible, ya que influye directamente en las horas que el equipo puede estar disponible para la operación. Con respecto al equipo de Epiroc, se destaca la mayor flexibilidad operacional

²⁶ Cuando se comparan precios de los equipos se utilizan los valores declarados en aduanas Free On Board (FOB), que pueden ser distintos a los precios de venta reales. De esta manera, se considera una aproximación el ahorro en capex mencionado. El mismo concepto se utilizará para las demás comparaciones.

de la máquina por el menor tamaño y la opción de disponer de una amplia gama de baldes (entre 3.3 a 5.0 metros cúbicos) lo que es muy valorado en algunas faenas mineras, sobre todo porque los equipos de 10 toneladas se encuentran en una zona de transición entre los equipos de mayores y menores capacidades. El tiempo de ciclo es otra ventaja importante del ST1030 al igual que su amplia base instalada en Chile. No se considera relevante el factor capex, ya que un 3% de diferencia entre sus capex no es una diferencia sustancial. La decisión del cliente, en este caso vendría condicionada por el trade-off entre la flexibilidad operacional del equipo Epiroc, versus la autonomía del equipo Komatsu.

Tabla 41 Comparación equipos LHD 10 toneladas.

Parámetros	Komatsu LT1051	Epiroc ST1030	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Epiroc
Capacidad	10,000 kg	10,000 kg		
Tamaño de balde	4.6 m ³ (4.6 a 5.0m ³)	4.5 m ³ (3.3 a 5.0 m ³)		-Mayor flexibilidad operacional
Motor diésel	QSL9 208 kW	QSL9 186 kW	-Mayor potencia en motor, permite carguío más efectivo	
Altura del pasador del balde	3.379 m	3.415 m		-Mayor facilidad de carga del camión
Transmisión/Convertidor	Dana 36000 / 8000	DF250		
Largo x ancho X alto	9.8 x 2.7 x 2.4 m	9.7 x2.5 x2.4 m		-Mayor flexibilidad operacional
Capacidad de combustible	362 lt	284 lt	-Mayor autonomía	
Peso operativo	28,818 kg	27,200 kg	-Equipo más robusto	
Tiempo de ciclo del balde	10.8 s	10.1 s		-Tiempos de ciclo más rápidos
Ángulo de giro	42.5°	45.0°	-Mejor maniobrabilidad en curvas	
Precio FOB	Mayor	Menor		-Ahorro en Capex (3% menor)
Presencia en mercado	Menor	Mayor		-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Menor experiencia en minería masiva subterránea	Mayor experiencia en minería masiva		-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea masiva
Match con camiones de la misma marca	-Si (con mayoría camiones 30 t y el DT-3504)	-Si (con mayoría de camiones y modelos 28.1t y 32.6t)		

Elaboración propia basada en Catálogo Komatsu (2020), Komatsu (2019), Lara M. (2019) y Catálogo Epiroc (2020).

Para el segmento de 14 toneladas, que es la capacidad para analizar a continuación, Komatsu no dispone de una alternativa en el mercado, por lo que se considera que este desarrollo es importante de concretar, ya que el segmento de mercado de esta capacidad representa el 11% en Chile y se considera dentro de los equipos con mayor volumen en el mercado global. A continuación, se comparan los modelos Sandvik 514 y Epiroc ST14 (19 equipos el modelo de Sandvik y 20 equipos el modelo Epiroc).

Tabla 42 Comparación equipos LHD 14 toneladas.

Parámetros	Sandvik 514	Epiroc ST14	Fortalezas Sandvik	Fortalezas Epiroc
Capacidad	14,000 kg	14,000 kg		
Tamaño de balde	6.2 a 7.0 m ³	4.7 a 7.8 m ³		-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de balde
Motor diésel	Volvo TAD1340VE 256 kW	250 kW	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el carguío.	-Consumo reducido de combustible
Altura del pasador del balde	4.08 m	4.12 m		-Mayor facilidad de carga del camión
Transmisión/Convertidor	Dana C9602	Dana TE32		
Largo x ancho X alto	10.55 x 3.00 x 3.00 m	10.85 x 2.79 x2.60 m		
Capacidad de combustible	540 lt	390 lt	-Mayor autonomía	
Peso operativo	38,100 kg	39,100 kg		-Más robusto
Tiempo de ciclo del balde	9.3 s	10.6 s	-Tiempos de ciclo más rápidos	
Ángulo de giro	42.5 °	45.0 °	-Mejor maniobrabilidad en las curvas	
Precio FOB	Menor	Mayor	-Ahorro en Capex (25% menor)	
Presencia en mercado	Igual	Igual		
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Igual	Igual		
Match con camiones de la misma marca	Sí (30t,45 t, 51t)	Sí (32.6t,42t,50t)		

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Komatsu (2019), Catálogos Sandvik (2020) y Catálogos Epiroc (2020).

Con respecto a la Tabla 42, se puede destacar que las principales ventajas del equipo Sandvik son el tener una mayor autonomía por mayor capacidad de combustible, tiempos de ciclos más rápidos (beneficia la productividad) y ahorro en CAPEX (25% en comparación al Epiroc). Por otra parte, el equipo de Epiroc permite cargar con mayor facilidad los camiones, consume una menor cantidad de combustible (menor opex), es más robusto y tiene la posibilidad de adaptar el tamaño de balde en un mayor rango de tamaños en comparación con su competencia. Los factores clave para el desarrollo del equipo Komatsu de 14[t] son la autonomía del equipo, la flexibilidad operacional por las opciones de balde y la robustez del equipo. El factor capex no es un factor fundamental, ya que el equipo Epiroc tiene aproximadamente la misma base operativa que el modelo de Sandvik y su diferencia de precio es aproximadamente del 25%.

Tabla 43 Comparación equipos LHD 17-18 toneladas.

Parámetros	Komatsu 18HD	Epiroc ST18	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Epiroc
Capacidad	18,000 kg	17,500 kg	-Más toneladas por ciclo	
Tamaño de balde	9.2 m ³ (8.2 a 11.2 m ³)	7.9 m ³ (6.3 a 9.7 m ³)	-Mayores capacidades de balde	
Peso operativo	53,300 kg	51,500 kg	-Más robusto	
Ángulo de giro	46°	45°		-Mejor maniobrabilidad en las curvas
Sistema de propulsión	Propulsión eléctrica	Propulsión mecánica	-Consumo reducido de combustible -Costos reducidos de tren motriz -Propulsión más eficiente	- Este modelo está disponible en versión full baterías
Motor Diésel	280 kW/320 kW	336 kW	-Menor potencia del motor disponible para transporte a nivel -Consumo reducido de combustible	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el carguío.
Capacidad de combustible	757 lt	626 lt	-Mayor autonomía	
Captura de energía	KESS	Ninguno	-Aceleración más rápida = más toneladas por ciclo	
Capacidad de carga	18,000 kg	17,500 kg		
Distancia entre ejes	4.1 m	4.0 m	-Mayor distancia entre ejes = desplazamiento más uniforme.	
Tiempo de ciclo del balde	13.8 s	14.0 s	- Tiempos de ciclo más rápidos	
Altura de pasador del balde	4.7 m	4.5 m	-Mayor facilidad de carga del camión	
Sistema de control	LINCS	RCS	-Mayor desempeño y datos de estado disponibles -Preparado para automatización	-Modelo a baterías puede competir de mejor forma en la preparación de la automatización -Sistema Scooptram Automation Regular y Total.
Precio FOB	Mayor	Menor		-Ahorro en Capex (36% menor)
Presencia en mercado	Menor (En prueba industrial)	Mayor		-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Menor experiencia en minería masiva subterránea	Mayor experiencia en minería masiva		-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea masiva
Match con camiones de la misma marca	No tiene	Variada gama de camiones (42t,50t,53t,65t)		-Oferta compatible de camiones de la misma marca
Tamaño cabina	Menor	Mayor		-Brinda mayor comodidad al operador por tener más espacio para los pies
Emisiones de gases y ruidos	Menor	Mayor	-Menor requerimiento de ventilación, mejor salud de operadores.	-Versión a baterías puede prácticamente eliminar las emisiones y ruidos.
Confiabilidad y disponibilidad	Menos horas de motor, menor cantidad de piezas móviles	Mayor cantidad de piezas móviles y horas de motor	Aumento de confiabilidad y disponibilidad (10-20%)	

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Komatsu (2020), Maki B. (2019) y Catálogos Epiroc (2020).

En la Tabla 43, se hace la comparación entre el equipo híbrido de Komatsu y el equipo con mayor flota en Chile en el segmento de 17-18 toneladas. Se puede destacar que el equipo Komatsu 18HD posee mejores características técnicas singulares en comparación al equipo Epiroc ST18, principalmente por la mayor productividad por efecto de la mayor aceleración (10-20% mayor), reducción de costos de operación por la emisión de gases y menor consumo de combustible (30 % aprox.), mayor confiabilidad y disponibilidad (10-

20%). Sin embargo, en el corto plazo, el tener un mayor precio de comercialización (36% mayor, que es considerablemente mayor), el estar en período de pruebas industriales sin una flota consolidada y sin opción de hacer match con un camión de la propia marca, pueden ser factores determinantes que inclinen las preferencias hacia la competencia. El criterio de decisión del cliente para que adquiriera el equipo Komatsu vendría dado principalmente por el criterio de disminución de su opex y la vía de transición hacia los equipos a baterías.

Tabla 44 Comparación equipos LHD 6-7 toneladas.

Parámetros	Komatsu LT650	Sandvik LH307	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Sandvik
Capacidad	6,591 kg	6,700 kg		-Más toneladas por ciclo
Tamaño de balde	3.1 m ³	3.0 a 3.7 m ³		-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de balde
Motor diésel	164 kW o 170 kW	160 kW	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el carguío.	-Consumo reducido de combustible
Altura del pasador del balde	2.60 m	3.25 m		-Mayor facilidad de carga del camión
Transmisión/Convertidor	Dana 32000	Dana RT32421		
Largo x ancho X alto	8.9 x 2.1x 2.2 m	8.7 x 2.3 x 2.3 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Capacidad de combustible	276 lt	220 lt	-Mayor autonomía	
Peso operativo	19,671 kg	18,020 kg	-Más robusto	
Tiempo de ciclo del balde	7.5 s	8.5 s	-Tiempos de ciclo más rápidos	
Ángulo de giro	36.0 °	42.5 °	-Mejor maniobrabilidad en las curvas	
Precio FOB	Menor	Mayor	-Ahorro en Capex (7% menor)	
Presencia en mercado	Menor	Mayor		-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Mayor	Menor	-Equipos adquiridos por Komatsu son especializados en minería de pequeñas dimensiones y vetas angostas	
Match con camiones de la misma marca	Sí (17.9 t)	Sí (20.0 t)		

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Komatsu (2020) y Catálogos Sandvik (2020).

Con respecto a la Tabla 44, se puede destacar que el equipo Komatsu LT650 tiene mayor número de fortalezas que su competidor. La mayor autonomía y la robustez del equipo pueden ser factores diferenciadores, ya que, en conceptos de flexibilidad operacional, productividad de los equipos y precios de ventas presentan pequeñas diferencias. Un factor a favor del equipo Sandvik es la mayor facilidad para cargar un camión, lo que debe ser considerado por Komatsu. Como desarrollo para Komatsu se puede considerar

aumentar levemente la altura del pasador y aumentar la capacidad de carga a lo menos en 100 [kg], para de esta manera, tener un mejor equipo que la competencia.

4.3.1.1 Resumen brechas y necesidad de desarrollos para Komatsu en equipos LHD

Las brechas y necesidades de desarrollo para Komatsu en equipos LHD se resumen de la siguiente manera:

- Foco de desarrollo y fabricación debe estar centrado en equipos de 10 toneladas principalmente (62% del mercado chileno y aproximadamente un 30% del mercado global), seguido del LHD de 14 toneladas y de 18 toneladas (para el caso del equipo de 18 toneladas podría considerarse desarrollar un equipo del mismo tamaño, pero con capacidad mayor a 20 toneladas, por la cuota de mercado relevante y la tendencia del auge de la minería subterránea masiva).
- Los equipos híbridos pueden ser una buena alternativa de transición de equipos diésel a los equipos a baterías, ya que teóricamente pueden tener mejores rendimientos que los equipos diésel y comparten algunos de los beneficios de los equipos eléctricos a cables o a baterías. Se necesita ampliar el concepto de híbrido al resto de los equipos del portafolio, principalmente en equipos de 10 y 14 toneladas.
- Necesidad de reducción de costos de fabricación de equipos híbridos, para poder disminuir el capex de los clientes en aproximadamente un 10% y así masificar la utilización de la nueva tecnología (el equipo Epiroc de 14 toneladas tiene un capex 25% mayor al equipo Sandvik y de igual manera, los 2 modelos tienen aproximadamente el mismo número de equipos instalados en Chile, 20 equipos y 18 equipos respectivamente).
- En equipos de 10 toneladas, considerar mejorar la flexibilidad operacional del equipo teniendo un rango de tamaños de balde más amplio (como el caso del ST1030) y aumentar la altura del pasador del balde. Por otra parte, también es importante disminuir el tiempo de ciclo de balde para mayor productividad.
- Para el desarrollo del equipo de 14 toneladas, hay que considerar que son fundamentales para superar a sus competidores los criterios de autonomía del equipo, la flexibilidad operacional entregada por las opciones de balde y la robustez del equipo.

- En equipos de 6-7 toneladas, se considera necesario aumentar levemente la altura del pasador y aumentar la capacidad de carga al menos en 100 [kg] para tener un mejor equipo que la competencia.
- Con respecto a equipos a baterías, se ratifica la necesidad de hacer la conversión de diésel a baterías en el período 2020-2023 (H1 del estudio y principios del H2), con tal de disminuir las brechas con Epiroc y Sandvik principalmente, quienes al 2020 tienen equipos a baterías disponibles en el mercado.
- El principal competidor en temas de electromovilidad es la empresa Epiroc, ya que tiene equipos de 7 y de 14 toneladas con sus respectivos camiones que coinciden en tamaño. Sandvik por su parte, tiene la ventaja del conocimiento y la expertiz de trabajar con equipos eléctricos desde la década de los 70 con los LHD eléctricos a cables, sumado a la reciente adquisición de la empresa Artisan (en 2019), cuya especialización son precisamente los equipos a baterías.
- La utilización de baterías de ion-litio NMC puede ser una alternativa para equipos de alta capacidad, tal como utiliza la competencia o baterías NCA por su alta energía específica. En cambio, para equipos de menor capacidad se podrían utilizar baterías LiPO₄ que pueden ser más económicas, disminuyendo costos de fabricación. La disminución de los costos y el mayor desarrollo de las baterías en concepto de energía específica puede apoyar la decisión estratégica de utilizar baterías fijas.
- Con respecto a temas de automatización, se ratifica la necesidad de desarrollo de los niveles 3 y 4 de automatización de los equipos antes del 2023 (inicios de H2), para de esta forma disminuir la brecha con Epiroc y Sandvik.
- Un desarrollo clave en equipos LHD, es el carguío autónomo del material. Si Komatsu lograra implementar esta operación en sus equipos de forma exitosa, se tendría una solución “Dantotsu”, que entregaría una importante ventaja con respecto a sus competidores. La asociación con algún centro de investigación como el Mining 3, CSIRO, AMTC, entre otros podría ser una alternativa.
- El concepto de interoperabilidad se está masificando en la gran minería del mundo, impulsado por empresas como Codelco, BHP y Río Tinto, por lo que desarrollar equipos y servicios interoperables (entre productos y marcas) en el corto y mediano plazo (H1 y H2 del estudio) es fundamental.

- Es necesario desarrollar programas especiales de capacitación de servicio, de ventas y de operadores, para implementar y hacer seguimiento de los equipos híbridos. Si los operadores no se acostumbran a los equipos, la probabilidad de fracaso de la tecnología aumenta. La gestión del cambio y el apoyo en terreno tiene que ser un factor diferenciador de Komatsu.
- Con respecto a equipos diésel de menor tamaño, se hace necesario implementar tecnología Tier IV con tal de disminuir emisiones de material particulado y gases nitrosos, disminuir el consumo del combustible (10 % aprox. comparado a un Tier III).

4.3.2 Camiones UG

El mercado de camiones en Latinoamérica entre 2013 y el 2019 fue de 584 equipos. En la siguiente figura se pueden visualizar las principales características de este segmento de mercado:

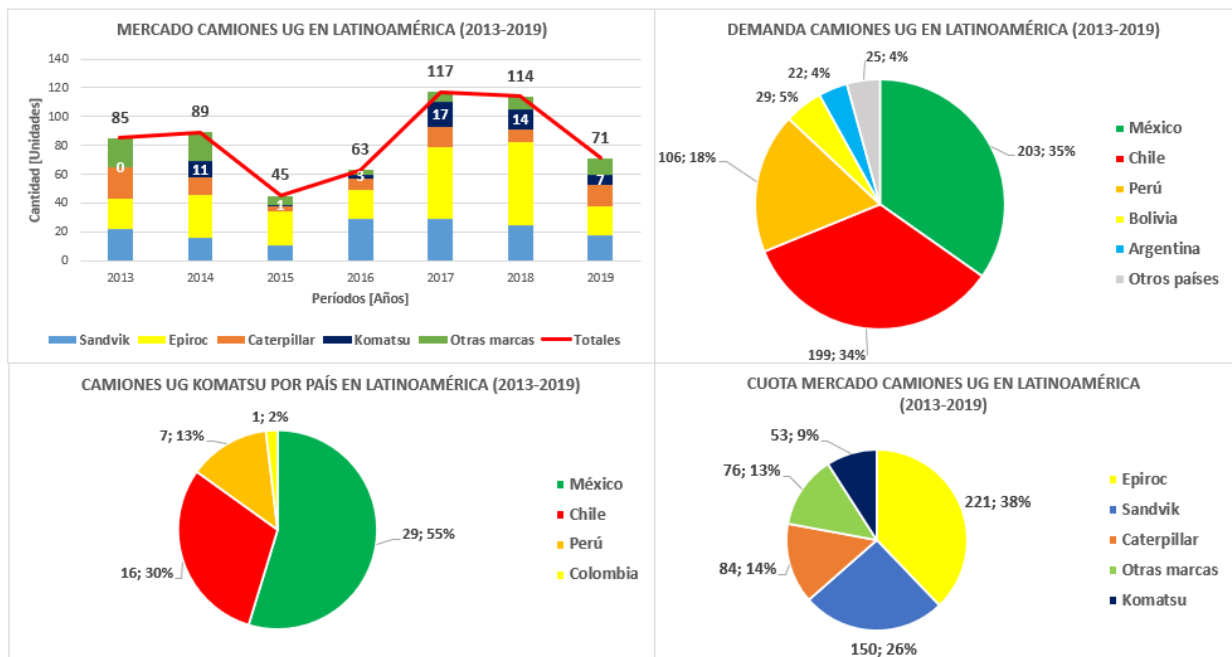


Figura 53 Mercado camiones subterráneos en Latinoamérica.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

A partir de la Figura 53, se destaca que la cantidad vendida de camiones UG en Latinoamérica varía entre los 40 y 120 equipos aproximadamente. La mayor demanda está concentrada en México (35%), Chile (34%) y Perú (18%). La mayor cantidad de camiones de Komatsu está en México (29 unidades, 55%) y en Chile (16 equipos, 30%).

Con respecto a la distribución del mercado por marcas, se tiene que Epiroc tiene la mayor cantidad de camiones UG en Latinoamérica con 221 equipos, seguido de Sandvik con 150 y Caterpillar con 84 unidades. Komatsu por su parte, tiene una flota de 53 equipos que representan el 9% del mercado.

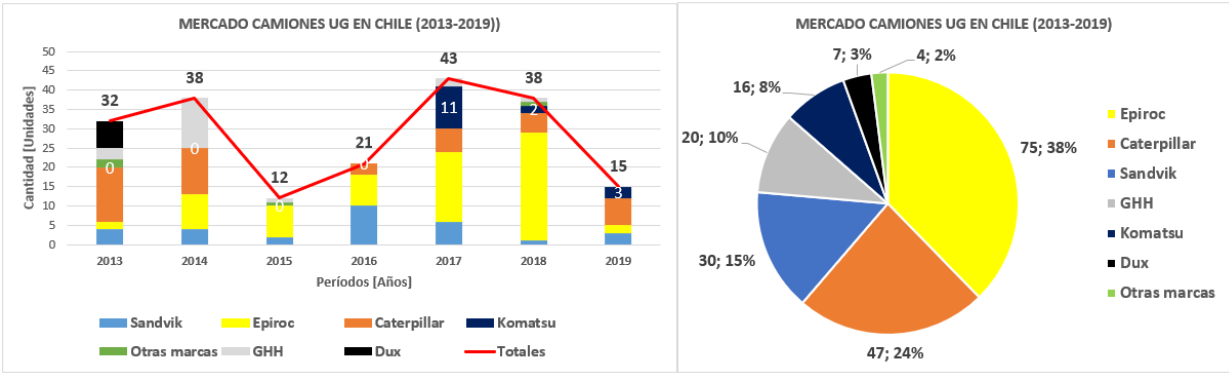


Figura 54 Mercado camiones UG en Chile.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

De la Figura 54, se puede destacar que la cantidad vendida de camiones UG en Chile varía entre los 10 y 40 equipos aproximadamente. Con respecto a la distribución del mercado por marcas, se tiene que Epiroc tiene la mayor cantidad de camiones UG en Chile con 75 equipos, seguido de Caterpillar con 47 y Sandvik con 30 unidades. Komatsu por su parte, tiene una flota de 16 equipos que representan el 8% del mercado. Se destaca también que el año 2017, Komatsu obtuvo el 26 % (11 equipos) de la cuota de este segmento de mercado. El total del mercado en Chile corresponde a 199 equipos entre 2013 y 2019.

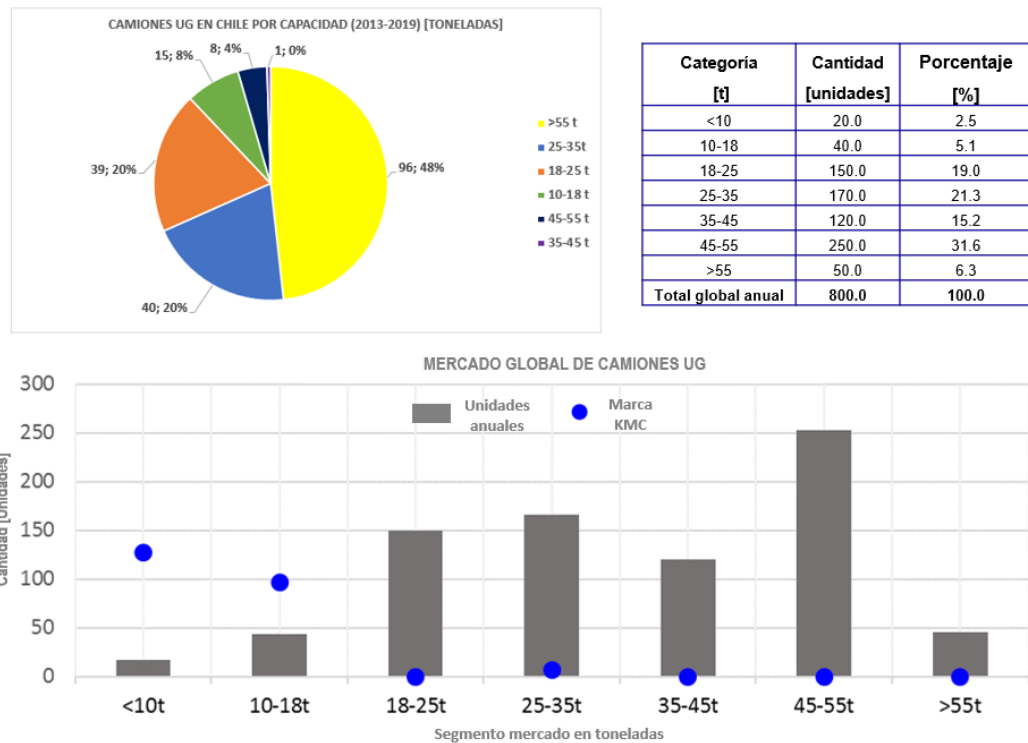


Figura 55 Mercado de camiones UG a nivel de Chile y el mundo.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019) y Lyten M. (2019).

Si se analiza la capacidad de los camiones en Chile, se puede mencionar que la mayoría de los equipos tiene una capacidad de más de 55 toneladas (ver Figura 55) que representan el 48% (96 unidades) del mercado, seguido de los equipos de 25-35 toneladas que representan el 20.1% (40 unidades) y los equipos de 18-25 toneladas que representan el 19.6% (39 unidades). Estos 3 segmentos representan el 87.9% del mercado, por lo que el análisis se centra sobre ellos. Se destaca que ninguna faena minera en Chile, tiene camiones UG menores de 10 toneladas. También se puede mencionar, que los camiones más comunes utilizados en la minería subterránea chilena son de un segmento de mercado que no es común en el mundo (6.3% a nivel mundial), lo cual indica la fuerte tendencia al gigantismo de los equipos de transporte en Chile.

Otro punto importante para destacar es que Komatsu tiene una base instalada activa de 90 camiones UG en el mundo, 16 de ellos en Chile, lo que representa aproximadamente el 18% (Urzúa R., 2019).

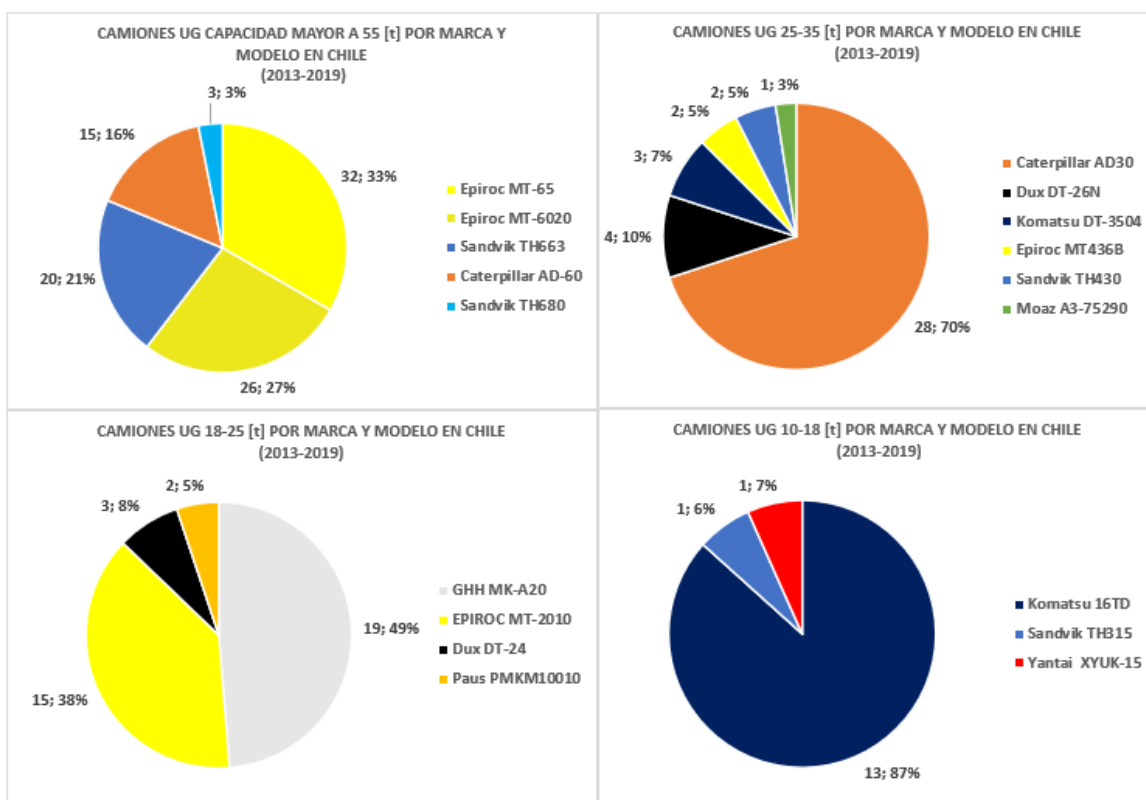


Figura 56 Mercado camiones UG en Chile por modelos y capacidades entre 18-35 y mayores a 55 toneladas.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

Como se puede visualizar en la Figura 56, para equipos mayores de 55 toneladas el modelo principal es el Epiroc MT-65 (de 65 toneladas) con un 33% del mercado seguido de otro equipo Epiroc, el MT-6020 (de 60 toneladas) que representa el 27% (si se agrupan los equipos Epiroc de esta categoría, se considera una cuota de mercado del 60%).

Dado este contexto, considerando que Komatsu no tiene camiones en este segmento, se estima conveniente no desarrollar equipos de estas capacidades, impulsados por diésel o baterías en el corto plazo, priorizando otros segmentos por las siguientes razones:

- Las marcas Epiroc, Sandvik y Caterpillar están consolidadas en este segmento.
- El mercado mundial de estos equipos representa sólo el 6.3 %.
- El costo de fabricación de estos equipos es mayor, por las mayores proporciones y consideraciones que se deben tener a la hora de fabricar el equipo.

- En el caso si se quisiera implementar baterías, el costo de ellas sería mayor por los tonelajes transportados.
- Existe una tendencia hacia la utilización de correas transportadoras como sistema de manejo de materiales, sobre todo en proyectos subterráneos nuevos, el cual competiría directamente con los sistemas en base a camiones de gran tonelaje.

Sin embargo, en el mediano plazo (H2 del estudio) se debería considerar ingresar en este segmento, pero con una tecnología que no esté disponible en la actualidad, como es el caso de los equipos a hidrógeno (Fuel cells). Komatsu posee la tecnología más avanzada en equipos a hidrógeno en la actualidad aplicada en CAEX de 300 toneladas, por lo que implementar esta tecnología en camiones UG de 65 toneladas podría generar una ventaja competitiva importante (considerar para el desarrollo, las desventajas de la tecnología a hidrógeno en espacios más cerrados).

En la siguiente tabla se comparan el equipo Epiroc MT-65 y el Sandvik TH663:

Tabla 45 Comparación camiones UG de capacidades mayores a 55 toneladas.

Parámetros	Epiroc MT65	Sandvik TH663	Fortalezas Epiroc	Fortalezas Sandvik
Capacidad	65,000 kg	63,000 kg	-Más toneladas por ciclo	
Capacidad de la caja	27.0 - 40.4 m ³ (estándar 29.6 m ³)	24.0 – 40.0 m ³ (estándar 36.0 m ³)		-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de caja
Motor diésel	567 kW (Tier 2)	565 kW (Tier 2)	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte	
Peso operativo	46,300 kg	48,440 kg		-Más robusto
Capacidad de combustible	844 lt	850 lt		-Mayor autonomía
Largo x ancho X alto	11.5 x3.2 x 3.5 m	11.6 x 3.5 x 3.5 m		-Más robusto
Ciclo completo elevación caja	13.0 s	16.0 s	-Tiempos de ciclo más rápidos	
Ángulo de giro	44.0 °	44.0 °		
Transmisión, máx. marcha de avance	36.3 km/h	32.6 km/h	-Tiempos de ciclo más rápidos	
Precio FOB	Mayor	Menor		- Ahorro en capex (5% menor)
Presencia en mercado	Mayor	Menor	-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención	
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Alta	Alta	-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea	-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea
Match con LHD de la misma marca	Sí	Sí		

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Sandvik (2020) y Catálogos Epiroc (2020).

De la Tabla 45 se puede destacar, que el equipo Epiroc supera levemente al equipo Sandvik, principalmente por su mayor capacidad y tiempos de ciclos menores (mayor velocidad y menores tiempos en ciclo caja). Sin embargo, en los demás parámetros pueden considerarse aproximadamente igual incluso en el capex (diferencia promedio aproximada de 5%).

Un punto importante que debe considerar Komatsu es visualizar que sus competidores tienen sus motores en norma Tier 2, los cuales generan más emisiones de material particulado y gases contaminantes que un equipo con norma Tier 4. De esta manera, un equipo a hidrógeno, en el mediano plazo, permite obtener una ventaja con respecto a los principales competidores, por su nula emisión de contaminación (los equipos a hidrógeno eliminan agua, no gases contaminantes).

Con respecto al segmento de 25-35 toneladas, el modelo de camión UG consolidado es el Caterpillar AD30 con un 70% del mercado, seguido por el Dux DT-26N con un 10% y el Komatsu DT3504 con un 7%. A continuación, se comparan los equipos de Komatsu y de Caterpillar de este segmento:

Tabla 46 Comparación camiones UG de 25-35 toneladas.

Parámetros	Komatsu DT3504	Caterpillar AD30	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Caterpillar
Capacidad	31,819 kg	30,000 kg	-Más toneladas por ciclo	
Capacidad de la caja	14.5-17.4 m ³	11.3-17.5 m ³		-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de caja
Motor diésel	298 kW	305 kW	-Consumo reducido de combustible	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte
Peso operativo	30,418 kg	28,870 kg	-Más robusto	
Capacidad de combustible	398 lt	410 lt		-Mayor autonomía
Largo x ancho X alto	10.5 x2.6 x 3.1m	10.4x 2.3 x 2.8 m	-Más robusto	
Ciclo completo elevación caja	30.5 s	21.7 s		-Tiempos de ciclo más rápidos
Ángulo de giro	40.0 °	42.5 °	-Mejor maniobrabilidad en las curvas	
Transmisión, 4.º marcha de avance	25.3 km/h	36.7 km/h		-Tiempos de ciclo más rápidos
Precio FOB	Menor	Mayor	-Ahorro en capex (23% menor)	
Presencia en mercado	Menor	Mayor		-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Menor	Mayor		-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea
Match con LHD de la misma marca	Sí (10 t)	Sí (10.2t)		

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020), Komatsu (2019) y Catálogos Caterpillar (2020).

En referencia a la Tabla 46 se puede destacar que el equipo Komatsu tiene como principales ventajas ser más robusto, mayor capacidad de transporte y tiene un capex 25% menor. Por otra parte, el modelo Caterpillar tiene mayor autonomía por mayor capacidad en su tanque de combustible, mayor flexibilidad operacional por la disponibilidad de distintos tamaños de caja y lo principal, hace tiempos de ciclos más rápidos.

Si bien el camión UG Komatsu tiene una mayor capacidad de transporte, es necesario evaluar dependiendo las condiciones de la faena minera en particular, la ganancia de productividad del equipo Caterpillar por su capacidad de hacer ciclos más cortos. De esta manera, se considera la necesidad de mejorar los tiempos de ciclo del camión UG Komatsu, mejorando el sistema de elevación de la caja y mejorar la flexibilidad operacional teniendo a disposición distintos tamaños de caja.

En el segmento de camiones UG entre 18-25 toneladas, Komatsu no tiene equipos presentes en el mercado. Como se considera un mercado relevante tanto para Chile (20% del mercado) como el mundo (19 % del mercado), es necesario desarrollar un equipo para este segmento. En este segmento se visualizan 2 principales competidores, el GHH MK A20 con un 49% del mercado (19 unidades) y el Epiroc MT2010 con 38% del mercado (15 unidades).

Cabe destacar que la empresa Epiroc recientemente actualizó su modelo MT2010 a uno con mayores capacidades y con mejores prestaciones (de 20 toneladas pasó a 22 toneladas con el modelo MT2200²⁷), por lo que la comparación en miras del desarrollo de Komatsu se hará con el modelo MT2200 y no con el MT2010.

Con respecto a la Tabla 47, se puede destacar que el equipo Epiroc supera al equipo GHH prácticamente en todos los parámetros, salvo en el capex (que es un 15 % mayor). Por la masividad de uso del equipo GHH, considerando que el precio de venta del modelo Epiroc MT2010 es un 15% superior, se puede mencionar que el factor capex puede ser relevante en este segmento, ya que este equipo es utilizado fundamentalmente en operaciones de mediana escala (túneles de 3 x 3 [m]). También se destaca que ambos

²⁷ Se tiene como supuesto que el precio del equipo Epiroc MT2200, será similar al del equipo MT2010, por lo que el ahorro en capex podría ser mayor para el caso del equipo GHH MK A20.

equipos utilizan motores Cummins, por lo que estos 2 modelos están relacionados con las empresas de Komatsu.

Tabla 47 Comparación camiones UG de 18-25 toneladas.

Parámetros	Epiroc MT2200	GHH MK A20	Fortalezas Epiroc	Fortalezas GHH
Capacidad	22,000 kg	20,000 kg	-Más toneladas por ciclo	
Capacidad de la caja	7.9 -12.3 m ³	10.0 m ³	-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de caja	
Motor diésel	242 kW (Cummins QSL9)	194 kW (Cummins QSB6.7)	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte	-Consumo reducido de combustible
Peso operativo	20,500 kg	18,955 kg	-Más robusto	
Capacidad de combustible	379 lt	280 lt	-Mayor autonomía	
Largo x ancho X alto	9.2x2.4 x 2.9m	9.4x 2.2 x 2.6 m		
Ciclo completo elevación caja	14.0 s	14.5 s	-Tiempos de ciclo más rápidos	
Ángulo de giro	42.0°	42.0 °		
Transmisión, 4.º marcha de avance	20.0-28.2 km/h	26.5- 29.5 km/h		-Tiempos de ciclo más rápidos
Precio FOB	Mayor	Menor		- Ahorro en capex (15% menor aprox.)
Presencia en mercado	Menor	Mayor		-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención
Especialización de empresa en segmento de minería subterránea	Mayor	Menor	-Empresa tradicional y consolidada en equipos de minería subterránea	
Match con LHD de la misma marca	Sí (6.0 o 10.0 t)	Sí (6.0, 6.8 o 10.0 t)		

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020), Komatsu (2019) y Catálogos GHH (2020).

Los factores clave en este segmento para el desarrollo del equipo Komatsu, es considerar un equipo de 20-22 toneladas (superior capacidad al GHH) y con un valor acorde al segmento de mercado (participan muchas faenas de mediana minería).

En el segmento de camiones UG entre 10-18 toneladas, el modelo principal es el Komatsu 16 TD (de 16 toneladas) con un 87% del mercado. El modelo de Sandvik TH315 y el Yantai XYUK-15 tienen un 7% aproximado de mercado cada uno (1 equipo cada uno). Es importante para Komatsu mantener el liderazgo en este segmento, por lo que la comparación en miras de la mejora continua del equipo Komatsu se hace con el modelo Sandvik TH315, por ser el principal competidor a nivel latinoamericano (12 equipos Sandvik vs 27 equipos Komatsu).

Tabla 48 Comparación camiones UG de 10-18 toneladas.

Parámetros	Komatsu 16TD	Sandvik TH315	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Sandvik
Capacidad	16,000 kg	15,000 kg	-Más toneladas por ciclo	
Capacidad de la caja	7.3 – 9.0 m ³ (estándar 8.0 m ³)	7.5 m ³	-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de caja	
Motor diésel	164 kW (Cummins QSB6.7 Nivel3)	185 kW (Volvo TAD851VE Nivel 3)	-Consumo reducido de combustible	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte
Peso operativo	17,900kg	18,400 kg		-Más robusto
Capacidad de combustible	338 lt	240 lt	-Mayor autonomía	
Largo x ancho X alto	7.7 x 2.3 x 2.3 m	7.8 x 2.3 x 2.4 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Tiempo de descarga	11 s	10 s		-Tiempos de ciclo más rápidos
Ángulo de giro	45 °	44 °		-Mayor flexibilidad operacional
Cabina cerrada	Disponible	No disponible	-Mayor seguridad	
Precio FOB	Mayor	Menor		- Ahorro en capex (10% menor aprox.)
Match con LHD de la misma marca	Sí (6.8 t)	Sí (6.7 t)		

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020), Komatsu (2019) y Catálogos Sandvik (2020).

Con respecto a la Tabla 48, se puede destacar que el equipo Komatsu supera al equipo Sandvik en temas de mayor capacidad de transporte, mayor autonomía, mayor seguridad y flexibilidad operacional. Por su parte el equipo Sandvik es más robusto, tiene una mayor potencia y ahorra en promedio un 10% en capex.

De esta manera, para Komatsu es relevante mantener o mejorar levemente los tiempos de descarga y el ángulo de giro para tener un mejor equipo que la competencia y así mantener el liderazgo en el segmento analizado.

En referencia al segmento de mercado 45-55 toneladas para túneles de 5 x 5 metros, si bien en Chile se tiene sólo 8 equipo (4 % mercado), a nivel mundial es el segmento con mayor demanda, por lo que se considera relevante analizar los principales equipos. Otro punto para destacar es que Komatsu necesita el desarrollo de un camión que haga Match con el LHD híbrido 18HD. Los equipos para considerar en el análisis son los siguientes:

Tabla 49 Comparación camiones UG de 45-55 toneladas.

Parámetros	Sandvik TH551i	Epiroc MT54	Fortalezas Sandvik	Fortalezas Epiroc
Capacidad	51,000 kg	54,000 kg		-Más toneladas por ciclo
Capacidad de la caja	24.0 -30.0 m ³ (estándar 28 m ³)	24.6-33.8 (estándar 24.6 m ³)		-Mayor flexibilidad operacional, por mayores opciones de caja
Motor diésel	515 kW (Tier II)	567 kW (Cummins QSK19 Tier II o IV)	-Consumo reducido de combustible	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte
Peso operativo	41,000 kg	46,300kg		-Más robusto
Capacidad de combustible	840 lt	844 lt		
Largo x ancho X alto	11.6 x 3.2 x 2.9m	11.5x3.2x3.3 m		
Tiempo de descarga	14 s	12 s		-Tiempos de ciclo más rápidos
Ángulo de giro	44 °	44 °		
Transmisión, 4.º marcha de avance	34.5 km/h	30.6 km/h	-Tiempos de ciclo más rápidos	
Precio FOB	Mayor	Menor		- Ahorro en capex (10% menor aprox.)
Match con LHD de la misma marca	Sí (18 t)	Sí (18 t)		

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Sandvik (2020) y Catálogos Epiroc (2020).

Con respecto a la Tabla 49, se puede destacar que el equipo Epiroc tiene un rendimiento superior al equipo Sandvik principalmente por la mayor capacidad de transporte y tiempos de descarga menores. En el resto de las características, los equipos son bastante similares, pero difieren en su capex (Epiroc 10% aproximado menor). Para el desarrollo del equipo Komatsu, se debe considerar principalmente las variables de capacidad y tiempos de descarga.

Concentra el 92.5 % del mercado chileno entre 2013 y 2019



Figura 57 Resumen mercado de camiones UG con equipos más comunes en Chile.

Elaboración propia basada en Lara M. (2019) y Komatsu (2019).

En la Figura 57 se puede visualizar un resumen de los principales modelos de camiones a diésel, con los respectivos rangos de capacidad y tamaño de túnel recomendado. Se destaca que el 92.5% del mercado chileno y el 92 % del mercado global se concentran entre las 18 y las 70 toneladas principalmente.

4.3.2.1 Resumen brechas y necesidad de desarrollos para Komatsu en camiones UG

Las brechas y necesidades de desarrollo para Komatsu en camiones UG se resumen de la siguiente manera:

- Si bien los equipos con mayor flota instalada en Chile son los con capacidades mayores a 55 toneladas, se estima conveniente no desarrollar este tipo de equipos en el corto plazo. Sin embargo, en el mediano plazo se podría introducir al mercado un camión UG de 65 toneladas, que sea impulsado por hidrógeno (Fuel cells) y ser el primer equipo de esta naturaleza en minería subterránea.
- Es necesario desarrollar un camión del segmento 45-55 toneladas, primero por ser el tipo de camión UG más utilizado a nivel global y segundo para hacer Match con el equipo LHD Híbrido 18HD de Komatsu. La capacidad ideal debiera ser entre 54-55 toneladas, para competir directamente con el equipo Epiroc MT54, considerando que el tamaño de túnel a utilizar sería de 5x5 metros. El tiempo de descarga es una variable importante al igual que su precio de venta, las cuales deben ser consideradas en el momento del desarrollo del equipo.
- En el modelo DT-3504 se considera necesario mejorar el sistema de elevación de la caja (para mejorar los tiempos de ciclo) y mejorar la flexibilidad operacional teniendo a disposición distintos tamaños de caja.
- Se considera necesario desarrollar un camión para el segmento entre 18-25 toneladas, ya que es un importante mercado en Chile (20 % del mercado) y representa el 19 % del mercado global de camiones UG. Se considera que el parámetro más importante es el precio de venta del equipo, por el segmento de minería al que pertenece (mediana minería).
- En equipos entre 10-18 toneladas Komatsu tiene el liderazgo del mercado con el modelo 16TD, pero para tener un mejor equipo que la competencia debe mejorar levemente los tiempos de descarga y el ángulo de giro del camión.

- En temas de electromovilidad, Komatsu no dispone de camiones híbridos o a baterías, lo que se considera una brecha relevante con respecto a Epiroc (tiene camiones a baterías 20 y 42 toneladas disponibles a la fecha) y Sandvik (50 toneladas). Por lo que se considera relevante desarrollar camiones a batería en los segmentos 18-25, 25-35 y 45-55 toneladas en el corto a mediano plazo.
- Utilizar baterías de ion-litio NMC puede ser una alternativa para equipos de alta capacidad (camiones entre 25-35 y 45-55 toneladas), tal como utiliza la competencia o baterías NCA por su alta energía específica y baterías LiPO4 para equipos de menor capacidad (18-25 toneladas).
- Otra alternativa que puede considerar Komatsu, para los camiones UG de mayores capacidades (55 o 65 toneladas), es la utilización de Fuel cells de hidrógeno, ya que es una de las tendencias presentes en la industria minera que en el largo plazo espera consolidarse. En particular, Komatsu ya dispone de un CAEX de 300 toneladas impulsado por hidrógeno, por lo que el conocimiento y la expertiz, ya se tiene dentro de la organización.
- Al igual que en los equipos LHD, se requiere que los equipos sean interoperables entre marcas y productos.
- Una brecha para considerar es el nivel de automatización de los camiones de la competencia, especialmente Sandvik, empresa que tiene operando a la fecha camiones full autónomos en distintas operaciones en el mundo (la madurez tecnológica de la operación de transporte es alta). Por lo que se debe considerar relevante desarrollar automatización alta o completa (nivel 4 o 5) del modelo DT-3504.

4.3.3 Equipos de perforación

El mercado anual de perforadoras a nivel global corresponde a 750 unidades de jumbos de avance, 80 unidades de jumbos de producción y 200 unidades de empernadores (Lyten M.,2019).

Para el caso de Latinoamérica, considerando el período entre el año 2016 y el 2019, la venta de jumbos tuvo un equivalente a 678 equipos.

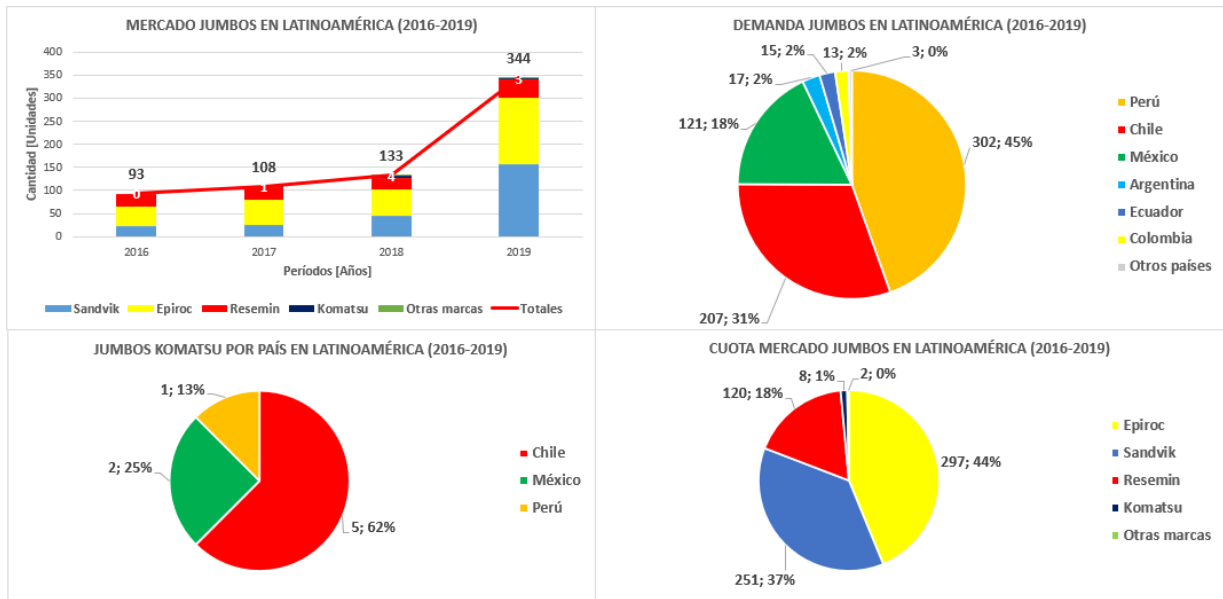


Figura 58 Mercado jumbos mineros en Latinoamérica.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

A partir de la Figura 58, se destaca que la cantidad vendida de jumbos en Latinoamérica varía entre los 90 y 350 equipos anuales aproximadamente, donde la mayor demanda está concentrada en Perú (45%), Chile (31%) y México (18%). La mayor cantidad de jumbos de Komatsu está en Chile con 5 equipos. Con respecto a la distribución del mercado por marcas, se tiene que Epiroc tiene la mayor cantidad jumbos en Latinoamérica con 297 equipos, seguido de Sandvik con 251 y Resemin con 120 unidades. Komatsu por su parte, tiene una flota de 8 equipos que representan el 1% del mercado.

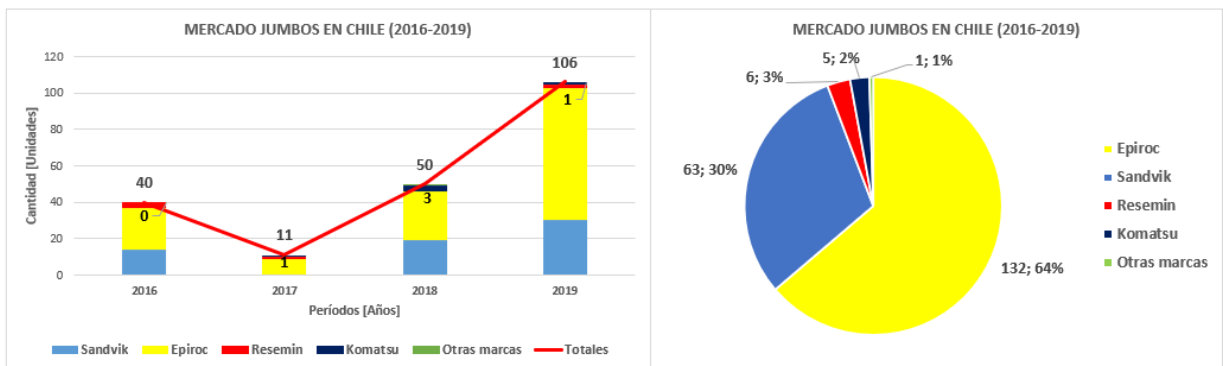


Figura 59 Mercado de jumbos en Chile.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

De la Figura 59, se puede destacar que la cantidad vendida de jumbos en Chile varía entre los 10 y 110 equipos al año aproximadamente. Con respecto a la distribución del mercado por marcas, se tiene que Epiroc tiene la mayor cantidad de jumbos en Chile con 132 equipos (64% del mercado), seguido de Sandvik con 63 (30% del mercado) y Resemin con 6 unidades (3% del mercado). Komatsu por su parte, tiene una flota de 5 equipos que representan el 2% del mercado.

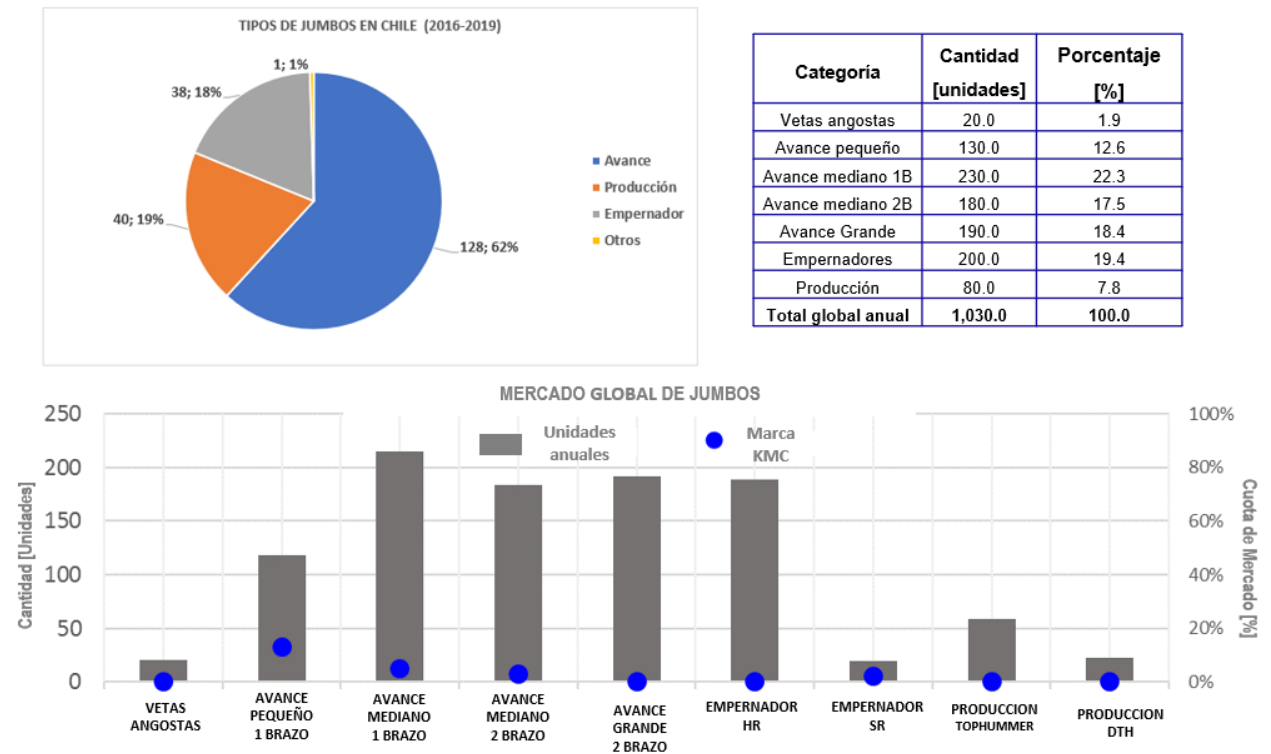


Figura 60 Mercado de jumbos a nivel de Chile y el mundo.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019) y Lyten M. (2019).

Si se analiza las categorías de jumbos en Chile, se puede mencionar que la mayoría de los equipos pertenecen a la categoría de jumbos de avance (ver Figura 60) que representan el 62% (128 unidades) del mercado, seguido de los jumbos de producción que representan el 19% (40 unidades) y los emperradores que representan el 18 % (38 unidades). Se destaca que los jumbos de avance a nivel global, al igual que en Chile, representan el mercado más solicitado en perforadoras, con un 71 % aproximadamente. De esta manera, se menciona que los desarrollos de Komatsu se deben focalizar en jumbos de avance medianos (de 1 y 2 brazos).

Con respecto a los jumbos de producción, si bien representan un porcentaje relevante del mercado chileno (19%), a nivel mundial la demanda de este tipo de equipos sólo representa el 8% aproximadamente, por lo que se recomienda no desarrollar este tipo de productos.

Con respecto al desarrollo de emperadores, se puede mencionar que representan un 15 % del mercado chileno y un 20% aproximado del mercado mundial, por lo que su desarrollo debiera ser una de las prioridades de Komatsu en el segmento de jumbos.

Otro punto importante para destacar es que Komatsu tiene una base instalada activa de 125 equipos entre jumbos de avance (123 unidades) ,5 de ellos en Chile, lo que representa aproximadamente el 4% (Urzúa R., 2019).

4.3.3.1 Jumbos de avance

En referencia a los jumbos de avance, el mercado global se resume en la siguiente tabla:

Tabla 50 Mercado global jumbos de avance.

Categoría	Cantidad [Unidades]	Porcentaje [%]
Pequeño	130.0	17.8
Mediano 1 Brazo	230.0	31.5
Mediano 2 Brazos	180.0	24.5
Grande	190.0	26.0
Total	730.0	100

Elaboración propia basada en Lyten M. (2019).

De la Tabla 50, se puede destacar la relevancia de los jumbos de avance medianos de un brazo que representan el 31.5 % del mercado. También se destaca que la proporción entre los equipos medianos de 2 brazos y grandes es aproximadamente igual.

Como se puede visualizar en la Figura 61, se puede destacar, que el mercado de jumbos de avance en Chile es liderado por la empresa Epiroc, que tiene un 61% del mercado (78 equipos), seguido de Sandvik con un 34% (44 equipos) y Komatsu con un 4% (5 equipos). En referencia a los tipos de jumbos de avance, los equipos medianos de 1 brazo y 2 brazos son los más importantes, ya que representan el 91.4% del mercado chileno. El modelo Epiroc S1D es el más utilizado junto al Sandvik DD311 en el segmento de avance mediano de 1 brazo y el Sandvik DD321 con el Epiroc Boomer S2 en avance mediano de 2 brazos.

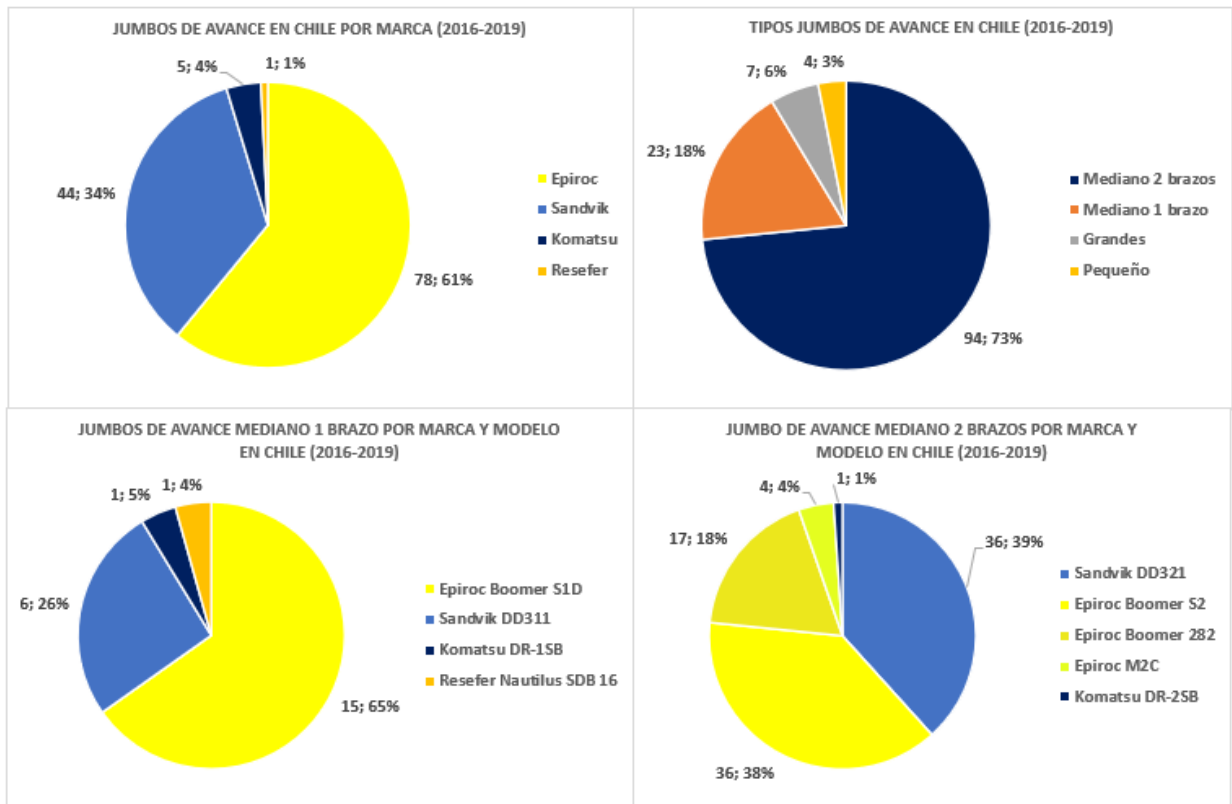


Figura 61 Mercado jumbos de avance en Chile por tamaños y modelos principales.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

En referencia a la Tabla 51, se destaca que, en general, el modelo de Komatsu posee mejores características que el equipo de Sandvik, principalmente por los parámetros ligados a la flexibilidad operacional (mayor variedad de diámetros de pozos) y a la productividad por frente de avance (pozos más largos y mayores tasas de penetración).

Para el desarrollo o la mejora del equipo Komatsu, se considera aumentar la autonomía con un estanque de combustible de mayor tamaño y disminuir los costos de producción del equipo, para de esta manera, poder reducir, en parte, el precio de venta.

Tabla 51 Comparación jumbos de avance de tamaño mediano de 1 brazos.²⁸

Parámetros	Komatsu DR1SB	Sandvik DD311	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Sandvik
Cobertura de frente	40.4 m ²	40.0 m ²	-Mayor cobertura de frente	
Peso operacional	19,190 a 20,865 kg	15,000 a 18,000 kg	-Mas robusto, esfuerzo de tracción superior	
Motor	Cummins QSB4.5, 97 kW, EPA Tier 3, MSHA	TCD2012, 95 kW, Tier 3, Stage IIIA	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte	- Menor consumo de combustible
Opciones de martillos perforadores	De 13 a 27 kW	20 kW	-Tasas de penetración más rápidas (mayor productividad) - Más opciones de martillos que incluyen el más potente de este segmento (HC110)	
Capacidad de combustible	72 lt	180 lt		-Mayor autonomía
Diámetros de pozos	43 a 86 mm	43 a 64 mm	-Mayor flexibilidad operacional	
Plataforma	Intelsense	THC560		
Largo total pozos	Entre 5.3 a 6.0 m	Entre 3.4 a 4.6 m	-Mayores largos de pozos, mayores avances por disparo	
Altura(vagón/perf)	2.56/3.09 m	2.14/3.10m		
Longitud	13.25 m	12.35 m		-Mayor flexibilidad operacional
Ancho	1.96 m	1.98 m		
Ángulos de giro	38 °	38 °		
Ejes	John Deere serie 1200	Dana 112	-Distancia entre ejes levemente mayor, permite desplazamiento más uniforme teniendo un recorrido más rápido	
Precios FOB	Mayor	Menor		- Ahorro en capex (24% menor aprox.)
Presencia en mercado	Menor	Mayor		-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Komatsu (2020) y Catálogos Epiroc (2020).

En referencia a la Tabla 52, donde se comparan los jumbos medianos de 2 brazos, se destaca que, en general, el modelo de Komatsu posee mejores características que el equipo de Sandvik principalmente por los parámetros ligados a la flexibilidad operacional y a la productividad por frente de avance. El disponer de más opciones de martillos, mayor cobertura de frente, mayor variedad en los diámetros de pozos y mayores largos, permiten mejores rendimientos operacionales. Para el desarrollo o para la mejora del equipo Komatsu, se considera aumentar la autonomía con un estanque de combustible de mayor tamaño y mejorar el radio de giro del equipo, para de esta manera tener disponer de un equipo con mejores parámetros en todo sentido.

²⁸ Se comparan los equipos Komatsu DR1SB y Sandvik DD311 por no contar con información completa del equipo Epiroc S1D para hacer una comparación válida.

Tabla 52 Comparación jumbos de avance de tamaño mediano de 2 brazos.

Parámetros	Komatsu DR2SB	Sandvik DD321	Fortalezas Komatsu	Fortalezas Sandvik
Cobertura de frente	56 m2	49 m2	-Mayor cobertura de frente con menor tamaño de máquina, mayor flexibilidad operacional.	
Peso operacional	24,600 kg	22,000 kg	-Mas robusto, esfuerzo de tracción superior.	
Motor	Cummins QSB4.5, 97 kW, EPA Tier 3, MSHA	MB OM904LA, 110 kW, Tier 3, Stage IIIA	-Menor consumo de combustible	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte
Opciones de martillos perforadores	De 13 a 27 kW	20 kW	-Tasas de penetración más rápidas (mayor productividad) - Más opciones de martillos que incluyen el más potente de este segmento	
Capacidad de combustible	72 lt	140 lt		-Mayor autonomía
Diámetros de pozos	De 43 a 86 mm	De 43 a 64 mm	-Mayor flexibilidad operacional	
Largo total pozos	Entre 5.2 y 6.8 m	Entre 5.2 y 6.5 m	-Mayores largos de pozos, mayores avances por disparo	
Plataforma de control	Intelesense	THC561		
Altura(vagón/perf)	2.31/2.83 m	2.30/3.20 m		
Longitud	10.75 m	12.55 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Ancho	1.42 m	2.15 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Ángulos de giro	38 °	35 °		-Mejor maniobrabilidad en curvas
Ejes	Dana 113	Dana 113	-Distancia entre ejes levemente mayor, desplazamiento más uniforme	
Precio FOB	Mayor	Menor		- Ahorro en capex (12% menor aprox.)
Presencia en mercado	Menor	Mayor		-Base instalada amplia -Conocimiento de mecánicos para su mantención

Elaboración propia basada en Catálogos Komatsu (2020), Komatsu (2019) y Catálogos Sandvik (2020).

4.3.3.1.1 Elementos principales de tiempo improductivo en jumbos de avance y consideraciones de compra

De acuerdo con Koekemoer R. (2019), las principales pérdidas operacionales en los jumbos de avance se concentran en:

- **Mangueras:** Es necesario cambiar y reparar continuamente, considerándose el problema número en pérdidas de ciclos de perforación y aumentos de costos de mantención de la operación (25 % de los tiempos improductivos en pluma y 33% en conjunto de alimentación).
- **Brazo:** Requieren de mantenciones mensuales, semanales e incluso diarias. Todos los proveedores tienen brazos de similares características. Una mantención deficiente

del brazo genera problemas de precisión, falla de consumibles, aumento de costos y pérdida de ciclos de perforación.

- **Viga:** Componente que requiere mantención continua de ajuste y/o reemplazo de componentes. Si la mantención es deficiente, se generan imprecisiones en los pozos, fallas en las barras, bujes y sellos en el cabezal de la perforadora.

De esta manera, se puede mencionar que el desarrollo de productos con mangueras, brazos y vigas de mayor calidad beneficiaría directamente la operación de los equipos. Se quiere destacar, que Komatsu en miras de desarrollar productos Dantotsu, tiene en desarrollo equipos que no utilizan mangueras, atacando directamente el tema de los tiempos improductivos por las fallas más comunes.

Con respecto a las decisiones de compra, se tiene la siguiente figura:

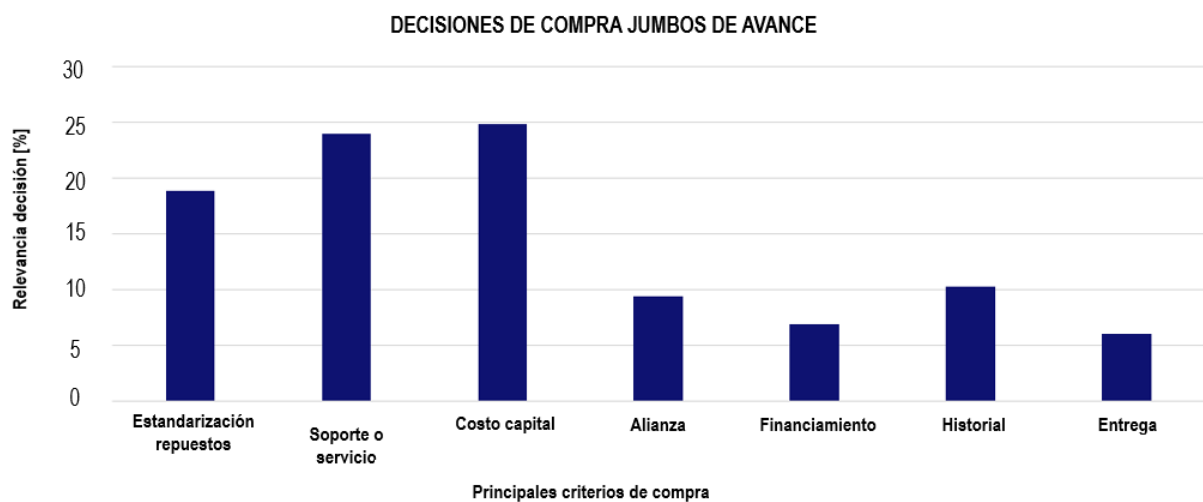


Figura 62 Decisiones de compra en jumbos de avance.

Adatado de Koekemoer R. (2019).

De la Figura 62, se puede destacar que las decisiones de compra en el mercado de los jumbos de avance se basan principalmente en criterios de estandarización de las flotas, con tal de disponer de manera más sencilla de repuestos, de un soporte o servicio postventa de calidad de los proveedores y menores costos de inversión. Se destaca que para empresas contratistas el tiempo de entrega es fundamental por la naturaleza de su negocio (Koekemoer R., 2019).

4.3.3.2 Empernadores

En referencia a los emperradores, como se puede visualizar en la Figura 63, se puede destacar, que el mercado de emperradores en Chile tiene una flota de 38 equipos, liderado por la empresa Epiroc, que tiene un 81% del mercado (22 equipos) considerando los distintos modelos que van de tamaños pequeños de túnel a tamaños más grandes, seguido de Sandvik con un 16% (6 equipos) y Resemin con un 3% (1 equipo).

Los emperradores medianos representan el 45% del mercado (17 equipos), 34% los pequeños (13 equipos) y 21% del mercado (8 equipos) los grandes.

El modelo Epiroc Boltec S en emperradores pequeños y el Epiroc Boltec M en equipos medianos son los más utilizados en faenas mineras chilenas.

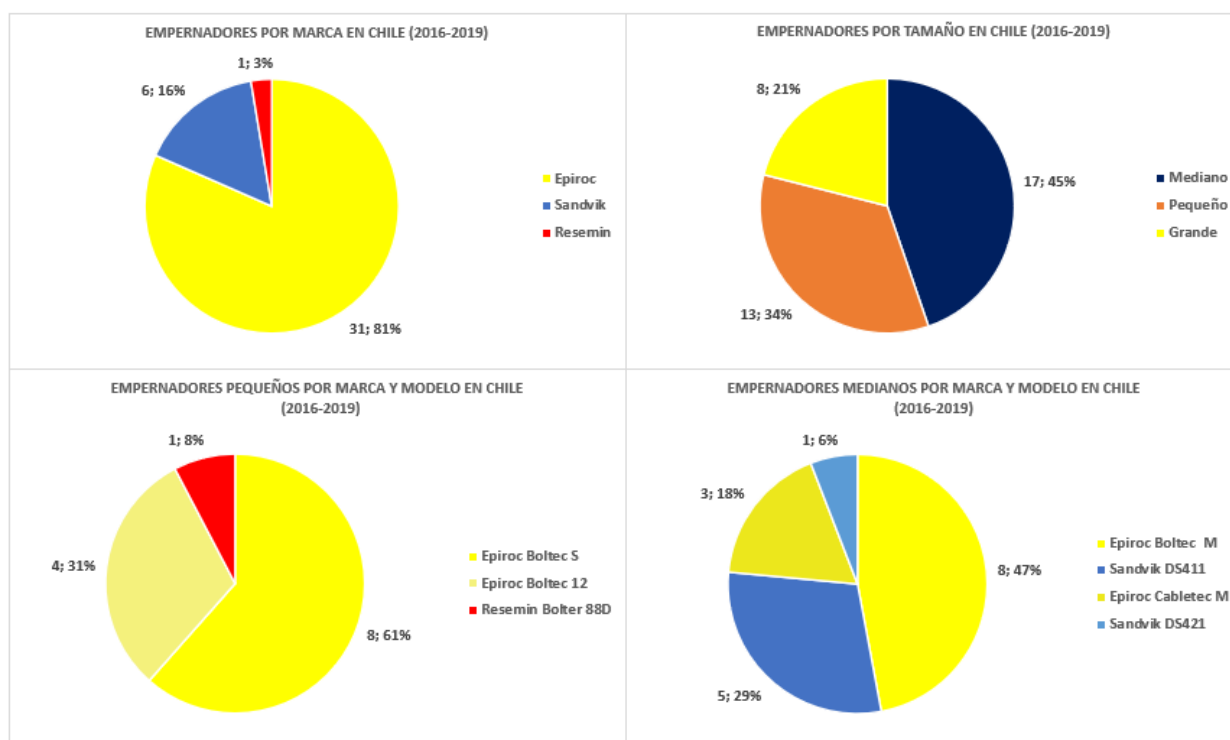


Figura 63 Modelos de emperradores en Chile.

Elaboración propia basada en Komatsu (2019).

Para las respectivas comparaciones, se considerarán los equipos de Epiroc Boltec S y M y los Sandvik DS411 y DS311 (este último equipo no aparece en el mercado chileno, pero es uno de los principales competidores del modelo Boltec S).

Se menciona que Komatsu a la fecha dispone de una amplia variedad de equipos emperadores, pero con aplicación en roca blanda, no en roca dura (foco del estudio), pero está en proceso de desarrollo de estos equipos. Lo que sí está disponible a la fecha para roca dura es la oferta de conversión de equipos Sandvik y Epiroc utilizando cabezales de emperadoras, como el Sistema de emperado Timberock, permitiendo disponer de utilización de múltiples pernos.

Tabla 53 Comparación de emperadores medianos.

Parámetros	Epiroc Boltec M	Sandvik DS411	Fortalezas Epiroc	Fortalezas Sandvik
Peso operacional	27,900 o 29,900 kg	23,000 kg	-Más robusto, esfuerzo de tracción superior	
Motor	Deutz TCD 2013 L4 120 kW 4-cylinder Tier 3/Stage IIIA	MB OM904LA, 110 kW, Tier 3, Stage IIIA	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte	-Menor consumo de combustible
Martillos perforadores	COP RR11 o RR14, 11 o 14 kW	RD314, 14 kW	- Más opciones de martillos, mayor flexibilidad operacional	
Longitud pernos	1.5-3.5 m	1.5 - 3.0 m	- Mayor flexibilidad operacional y agarre al macizo rocoso	
Longitud atornillada	9.5 m	10.9 m		-Mayor agarre al macizo rocoso
Capacidad de carrusel de pernos	10 unidades (150 mm x 150 mm tamaño máximo de placa)	8 unidades (150 mm x 150 mm tamaño máximo de placa)	-Mayor cantidad de pernos, menores tiempos de ciclo	
Velocidad (horizontal)	12 km/h	16 km/h		-Menores tiempos de traslado
Capacidad estanque	110 lt	140 lt		-Mayor autonomía
Altura(vagón/perf)	2.4 m/3.0 m	2.9 m/ 2.9 m		
Longitud	13.9 m	11.4 m		-Mayor flexibilidad operacional
Ancho	2.2 m	2.7 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Ángulos de giro	41b°	30 a 35 °		-Mayor maniobrabilidad en curvas
Precios FOB	Mayor	Menor		-Ahorro en capex (25 % aprox.)
Versión a baterías	Sí	No	-Posibilidad de menor cantidad de emisiones -Disminución costo de ventilación	

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Sandvik (2020) y Catálogos Epiroc (2020).

A partir de la Tabla 53, se puede destacar que el equipo Boltec M, es más robusto, tiene más opciones de martillos perforadores, lo que entrega mayor flexibilidad operacional, tiene una mayor capacidad de carrusel para los pernos y entrega la posibilidad de mejor agarre al macizo rocoso por concepto de longitud de pernos con los que puede trabajar. Una de las opciones importantes del modelo Boltec M, es disponer de una versión a baterías del equipo, lo que permite a disminuir las emisiones contaminantes de los equipos diésel, disminuyendo los costos de ventilación.

En referencia al modelo de Sandvik DS411, se puede destacar la mayor autonomía y ahorro en capex de un 25 % aproximado considerando a su competidor.

Tabla 54 Comparación de emperadores pequeños.

Parámetros	Epiroc Boltec S	Sandvik DS311	Fortalezas Epiroc	Fortalezas Sandvik
Peso operacional	13,700 kg	16,000-18,000 kg		-Más robusto, esfuerzo de tracción superior.
Motor	Deutz 4-cylinder 55 o 72 kW (Tier 3/Stage II o Tier 2)	Deutz TCD2012, 95 kW, Tier 3, Stage IIIA.	-Menor consumo de combustible	-Mayor potencia que permite ser más efectivo en el transporte
Martillos perforadores	COP RR11 o RR14, 11 o 14 kW	10 kW	-Tasas de penetración más rápidas (mayor productividad) - Más opciones de martillos	
Longitud pernos	1.5 a 2.4 m	1.5 - 3.0 m		- Mayor flexibilidad operacional y agarre al macizo rocoso
Longitud atornillada	7.5 m	2.9-4.7 m	- Mayor agarre al macizo rocoso	
Capacidad de carrusel de pernos	10 unidades (150 mm x 150 mm tamaño máximo de placa)	10 a 15 unidades (150 mm x 150 mm tamaño máximo de placa)		-Mayor cantidad de pernos, menores tiempos de ciclo
Velocidad (horizontal)	15 km/h	12 km/h	-Menores tiempos de traslado	
Capacidad estanque	60 lt	160 lt		-Mayor autonomía
Altura(vagón/perf)	2.1 m / 2.8 m	2.1m/3.1 m		-Mayor flexibilidad operacional
Longitud	10.0 m	11.5 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Ancho	2.1 m	2.0 m	-Mayor flexibilidad operacional	
Ángulos de giro	40 °	38 °		-Mayor maniobrabilidad en curvas
Precio FOB	Mayor	Menor		-Ahorro en capex (28 % aprox.)

Elaboración propia basada en Komatsu (2019), Catálogos Sandvik (2020) y Catálogos Epiroc (2020).

A partir de la Tabla 54, se puede destacar que el equipo Boltec S posee ventajas importantes en cuanto al empernado en sí, ya que tiene la opción de adaptar 2 tipos de martillos perforadores al equipo y la longitud del atornillado posee mayores largos.

Por su parte el DS 311 tiene mayor autonomía y un ahorro de capex relevante con respecto a su competidor (28% aprox. menor).

De esta manera, para el desarrollo de equipos Komatsu, se debe tener en cuenta entregar la posibilidad de adaptar distintos tipos de martillos a los equipos (martillos Montabert), brindar mayor autonomía a los equipos, tanto en opción diésel como a baterías y tener en consideración los precios de venta de los competidores.

4.3.3.3 Resumen brechas y necesidad de desarrollos para Komatsu en equipos de perforación

- Una de las principales brechas se concentra en la falta de equipos para frentes de grandes dimensiones. Sin embargo, el desarrollo de excavaciones mayores puede ser abordado por otros métodos, como, por ejemplo, los métodos mecanizados. Por este motivo se estima que no es necesario desarrollar equipos de perforación para frentes de grandes dimensiones en el corto plazo, sólo de pequeño a mediano

tamaño, los cuales concentran el 52 % de la demanda de jumbos al año aproximadamente.

- En los jumbos de avance de tamaño mediano de 2 brazos, para el equipo Komatsu DR2SB, se estima necesaria la mejora de la autonomía del equipo (aumentar la capacidad de combustible) y mejorar el radio de giro para maniobrar de mejor manera en curvas.
- En jumbos de avance de 1 brazo, se estima el desarrollo de una mayor autonomía del equipo Komatsu y la disminución de su costo de producción, para de esta manera ser más competitivo en temas de costos de capital para el cliente.
- Para el desarrollo de equipo, se debe tener en consideración las principales decisiones de compra en jumbos de avance, que son la disponibilidad de repuestos, soporte o servicio de post venta y el menor costo de capital de los equipos.
- Considerando que el problema principal en los jumbos son las pérdidas de ciclos de perforación y aumento de los costos de mantención por efecto del rompimiento de mangueras, el desarrollar equipos “sin mangueras” o minimizar el uso de ellas, beneficiaría directamente al propietario del equipo. Por esto, el desarrollo de un equipo sin mangueras como está proyectando fabricar Komatsu sería un acierto en el mercado.
- Con respecto a equipos empernadores, se estima que deben ser una de las prioridades de desarrollo para Komatsu, porque este tipo de equipos representan un alto porcentaje del mercado, tanto chileno como global (18 % del mercado chileno y un 20% del mercado mundial) y aumentan los niveles de seguridad en las etapas de preparación.
- Para el desarrollo de empernadores, se debe tener en cuenta entregar la posibilidad de adaptar distintos tipos de martillos a los equipos (martillos Montabert), brindar mayor autonomía a los equipos, tanto en opción diésel como a baterías y tener en consideración los precios de venta de los competidores.
- Con respecto a la electromovilidad, sólo existen 2 jumbos de avance disponibles en el mercado (1 de Sandvik y otro de Epiroc), que utilizan baterías básicamente para el traslado del equipo y un modelo de empernador (Epiroc Boltec M). Komatsu por su parte, a la fecha no tiene ningún equipo de perforación (ni de avance, ni de producción, ni empernadores) que utilice baterías, por lo que es necesario desarrollar equipos

para este segmento del mercado, tal como se tiene planteado en los Roadmaps de electrificación de equipos de perforación (jumbos de avance y empernadores) disponibles en la actualidad.

- No existen jumbos que funcionen completamente con baterías (desplazamiento equipo+ perforación), por lo que desarrollar un jumbo de avance que funcione totalmente en base a baterías, para frentes pequeños en primera instancia, para luego pasar a tamaños medios, puede ser una opción que impacte de forma relevante al mercado, ya que quitaría los requerimientos de la conexión directa a la infraestructura eléctrica de la mina (a la fecha sólo está la opción de perforación independiente de la infraestructura eléctrica en base a diésel)
- Los martillos Montabert son uno de los mejores de su clase, por lo que se debe mantener los estándares de calidad y no descuidar el servicio al cliente. El desarrollo de los equipos de perforación de avance y empernado, deben brindar la posibilidad de adaptarse a más de un tipo de martillo, para de esta forma entregar a los clientes una mayor flexibilidad operacional.

4.4 Iniciativas Technology push

Como principal iniciativa con enfoque Technology push que propone Komatsu como proveedor de equipos mineros, que buscará generar un quiebre tecnológico considerando su filosofía Dantotsu, se tienen equipos que buscan que la extracción de mineral sea continua (minería continua) o el desarrollado de túneles sea mecanizado.

4.4.1 DynaMiner

Es una máquina de excavación, que corresponde a un sistema de minería continua, que basa su funcionamiento en el quiebre de la roca utilizando técnicas de rebaje. Este equipo fue diseñado considerando el desafío en desarrollar un sistema de corte que utilice eficazmente la energía, con tal de excavar rápidamente en roca dura, aprovechando los mecanismos de falla por corte y tensión de la roca, combinando un enfoque de socavación con movimientos dinámicos de alta frecuencia. Mining3 desarrolló el cortador de disco oscilante, que fue licenciado en 2006 por Joy Global (ahora Komatsu Mining Corp.) y renombrado como DynaCut. Esta tecnología es incorporada en la máquina DynaMiner de Komatsu, permitiendo la extracción continua o semicontinua de roca dura tanto en aplicaciones superficiales como subterráneas.

La máquina DynaMiner tiene dos partes clave: el disco DynaCut que oscila, que está montado en una pluma inteligente y una máquina minera compacta, liviana y móvil que juntos forman parte de un sistema de corte continuo. Puede cortar en cualquier dirección y no está limitado por la disponibilidad de un borde libre, lo que permite desarrollar perfiles de túnel flexibles y precisos de la forma requerida.

Una de las ventajas relevantes del equipo, es generar una menor perturbación del macizo rocoso en comparación con los métodos de perforación y tronadura, disminuyen los requerimientos de ventilación, reduce los requisitos de máquinas auxiliares de carga y manipulación y posee facilidad para automatizar el proceso de desarrollo de túneles (Mining 3,2020).

De esta manera, el DynaMiner, representa para Komatsu una alternativa para la producción de una minería continua, el cual debe probarse en distintas operaciones subterráneas, tanto de mediana como de gran minería, para de esta manera posicionar esta tecnología en el largo plazo.

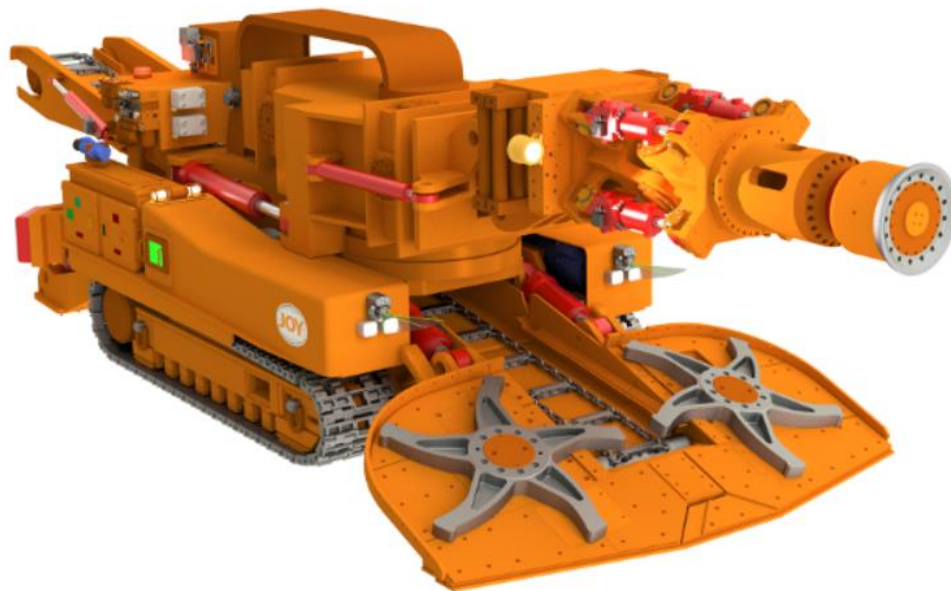


Figura 64 DynaMiner de Komatsu.

Fuente: Cim Magazine (2017).

4.4.2 Tuneleras (Tunneling Boring Machine, TBM)

Utilizar máquinas tuneladoras no es algo nuevo, ya que desde los '50, han sido utilizadas para distintos propósitos en proyectos mineros, destacando su uso en túneles de

accesos, transporte de material, drenaje, exploración y conducción de aguas respectivamente. Sin embargo, el uso de las TBM en minería es tema complejo principalmente por el riesgo geológico asociado a su utilización (Brox D. y Piaggio G.,2013).

Las principales empresas en el mercado de las TBM son Herrenknecht AG, China Railway Construction Heavy Industry, The Robbins Company, China Railway Engineering Equipment Group, Dalian Huarui Heavy Industry, Komatsu, Mitsubishi Heavy Industries, Hitachi Zosen Corporation, Kawasaki Heavy Industries, IHI Corporation y Qinhuangdao Tianye Tolian. El tamaño del mercado en el 2017 fue de 5,189.8 millones de dólares y se espera que sea de 8,385.6 millones de dólares el 2025 (Allied Market Research, 2019).

Los principales proyectos mineros donde se utilizaron TBM son:

Tabla 55 Utilización de TBM en proyectos mineros al 2014.

Proyecto	Ubicación	Comienzo proyecto	Longitud [km]	Dimensión [m]
Step Rock Iron	Canadá	1957	0.30	2.74
Nchanga	Zambia	1970	3.20	3.65
Oak Grove	USA	1977	0.20	7.40
Blyvoor	Sud. África	1977	0.30	1.84
Fosdalen	Noruega	1977	670.00	3.15
Blumenthal	Alemania	1979	10.60	6.50
Westfalen	Alemania	1979	12.70	6.10
Donkin Morien	Canadá	1984	3.60	7.60
Autlan	México	1985	1.80	3.60
Kiena	Canadá	1986	1.40	2.30
Stillwater EB	USA	1988-91	6.40	4.00
Fraser (CUB)	Canadá	1989	1.50	2.10
Río Blanco	Chile	1992	11.00	5.70
San Manuel	USA	1993	10.50	4.60
Cigar Lake	Canadá	1997	>20.00	4.50
Port Hedland	Australia	1998	1.30	5.00
Stillwater EB	USA	1998-01	11.20	4.60
Mineral Creek	USA	2001	4.00	6.00
Amplats	Sud. África	2001	0.35	2.40
Monte Giglio	Italia	2003	8.50	4.90
Tashan Coal	China	2007	-	4.90
Ok Tedi	PNG	2008	4.80	5.60
Los Bronces	Chile	2009	8.00	4.20
Stillwater Blitz	USA	2012-13	6.80	5.50
Grosvenor Coal	Australia	2013	1.00	8.00
Oz Minerals	Australia	2013	11.00	5.80
Northparkes	Australia	2013	2.00	5.00
El Teniente	Chile	2014	6.00	10.00

Adaptado de Brox D. y Piaggio G. (2013).

De la Tabla 55, se puede destacar que al 2014, en Chile se han desarrollado 3 proyectos mineros considerando tuneladoras (Río Blanco, Los Bronces y El Teniente), 2 de ellos relacionados con Codelco.

De acuerdo con Brox D. y Piaggio G. (2013), las principales ventajas para utilizar tuneladoras en proyectos mineros son:

- Tasas de avance significativas y sostenidamente más altas que otros métodos, si se tiene roca dura de buenas condiciones.
- Menor necesidad de soporte de roca por el casi nulo daño al macizo rocoso.
- Posibilidad de construir tramos largos sin necesidad de ventanas intermedias en terrenos empinados.
- Menores requerimientos de ventilación, lo que permite túneles más pequeños.
- Mejores condiciones de salud y seguridad para los operadores al disminuir su exposición a los gases de la tronadura.
- La Tabla 56 presenta tasas de avance típicas alcanzadas algunos proyectos mineros.

Tabla 56 Tasas históricas de avance con TBM.

Proyecto	Ubicación	Año	Tamaño [m]	Tasa de avance [m/d]
Stillwater EB	USA	1988-91	5.5	15.0
Río Blanco	Chile	1992	5.7	30.0
San Manuel	USA	1993	4.6	17.0
Mineral Creek	USA	2001	6.0	18.0
Ok Tedi	PNG	2008	5.6	30.0
Los Bronces	Chile	2009	4.2	17.0

Adaptado de Brox D. y Piaggio G. (2013).

De acuerdo con Brox D. y Piaggio G. (2013), las principales desventajas para utilizar tuneladoras en proyectos mineros son:

- La excavación produce solamente una sección circular, la cual puede imponer importantes restricciones al momento de transportar equipos de grandes dimensiones no contemplados previamente.
- Su aplicación se restringe a túneles relativamente rectos donde la curvatura mínima típica sería de 50 metros.

- La presencia de un alto porcentaje de roca alterada y/o débil podría resultar en un incremento significativo de soporte, afectando de esta manera, las tasas de avance de la TBM.
- Fenómenos de sobreesfuerzos y relajación de esfuerzos justo detrás del cabezal de corte pueden requerir de soporte inmediato para protección de los trabajadores y de la máquina.
- Disponibilidad limitada de espacio si debe ser instalado soporte de gran capacidad para condiciones de roca muy malas.
- Disponibilidad limitada de espacio si se desea perforar tiros para inyecciones que prevengan el influjo de agua subterránea.

De esta manera, si Komatsu logra solucionar algunas de las principales desventajas visualizadas en el uso de TBM en proyectos mineros podría ser un importante quiebre tecnológico en el mediano/largo plazo.

CAPÍTULO V: LEVANTAMIENTO DE PLAN DE NEGOCIOS Y ROADMAPS DE DIVISIÓN EL TENIENTE

5.1 Proyectos e inversiones

El período 2017-2022 de División El Teniente como se mencionó en la sección antecedentes, se caracteriza por ser una etapa intensiva en inversiones, donde los montos ascienden a 5 mil millones de dólares. Los principales proyectos y desarrollo de infraestructura son:

5.1.1 Proyecto Andesita

- Método de explotación: Panel caving convencional con PA.
- Reservas: 114 [Mt]
- Ley de Cu: 0.87%
- Producción: 25 [kt/d]
- Inversión: 554 [MUSD]
- Año de inicio de producción: 2023
- Vida útil: 17 años

5.1.2 Proyecto Diamante

- Método de explotación: Panel caving convencional con PA.
- Reservas: 122 [Mt]
- Ley de Cu: 0.98%
- Producción: 30 [kt/d]
- Inversión: 736 [MUSD]
- Año de inicio de producción: 2022
- Vida útil: 17 años

5.1.3 Proyecto Recursos Norte

- Método de explotación: Panel caving convencional con PA.
- Reservas: 137 [Mt]
- Ley de Cu: 0.75%
- Producción: 30 [kt/d]
- Inversión: 759 [MUSD]
- Año de inicio de producción: 2020

- Vida útil: 20 años

Como información relevante, se considera que la puesta en marcha de este proyecto se anticipó 15 meses con respecto al cronograma original (comenzó el 23 de enero de 2020).

5.1.4 Proyecto Andes Norte- Nuevo Nivel Mina

- Método de explotación: Panel caving convencional con PA.
- Reservas: 375 [Mt]
- Ley de Cu: 1.02%
- Producción: 140 [kt/d]
- Inversión: 1,923 [MUSD]
- Año de inicio de producción: 2023
- Vida útil: 50 años

5.1.5 Túnel de acceso ADIT 77

- Será acceso principal al yacimiento.
- Inversión: 49 [MUSD].
- En operación: 2° semestre 2022.
- Largo/Ancho/Alto: 3.5 [km] / 8.3 [m] / 6.3 [m]
- Permite modelo de mantención centralizado.
- Características principales: sistemas de señalización vial, sistemas de emergencias, radiocomunicaciones, detección de presencia, detección de incendios y circuito cerrado de TV redes.

El desarrollo de los proyectos e infraestructura mencionados, vienen a entregar continuidad operacional a la actual operación de la faena minera durante los siguientes 50 años. En la Figura 65, se pueden visualizar los flujos de caja libres de acuerdo con los planes de negocios del 2017 y el 2020, donde se destaca la pérdida de capacidad de generar caja hasta el 2025, la cual se va recuperando a medida que entran en producción los distintos proyectos.

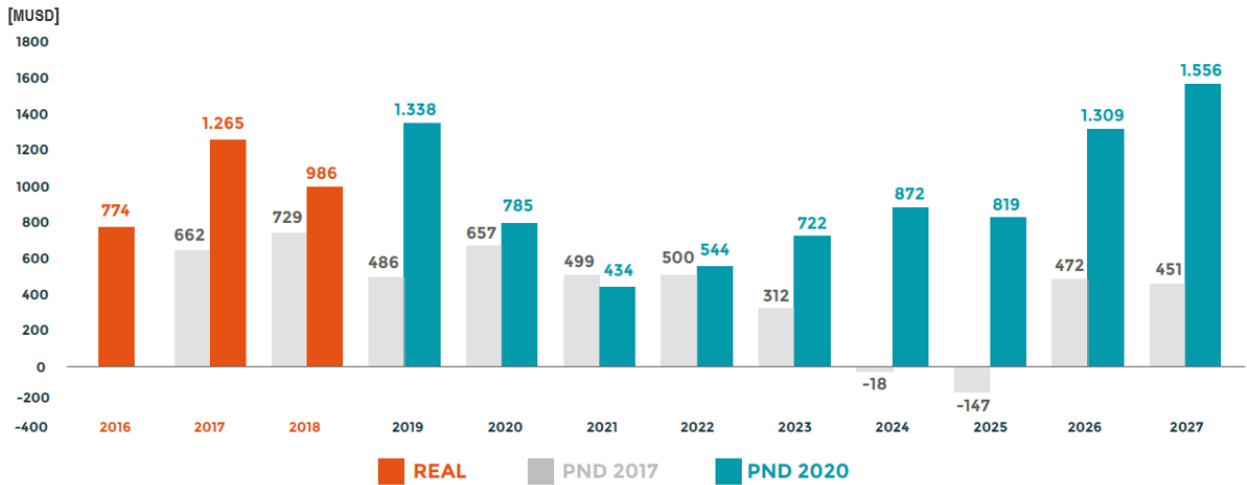


Figura 65 Flujos de caja libre de acuerdo Real, PND 2017 y PND 2020.

Fuente: Rivera N. (2019).

En la Figura 66, se pueden visualizar la ubicación espacial de los proyectos mencionados, donde se destaca que las minas se construyen alrededor de la Pipe Braden y las cotas donde están emplazadas las minas.

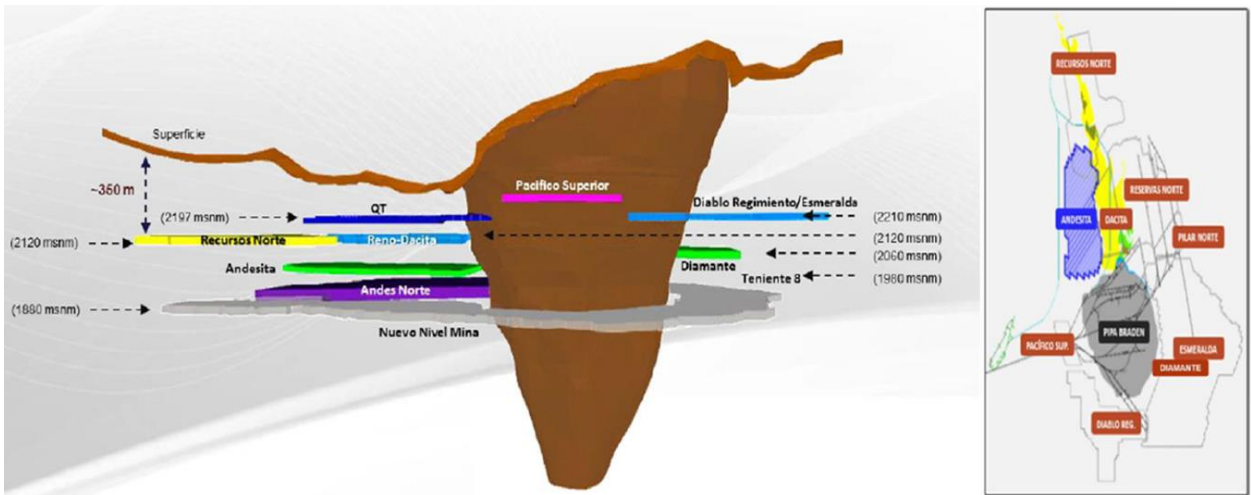


Figura 66 Ubicación espacial de proyectos El Teniente.

Fuente: Gerencia de Minas División El Teniente (2019).

5.2 Diseño Minero

El diseño minero del Nuevo Nivel Mina tiene en consideración dos niveles de hundimiento en las cotas mina 1,880 [msnm.] y 1,862 [msnm.], dos niveles de producción en cotas 1,862 [msnm.] y 1,844 [msnm.], dos subniveles de ventilación (inyección - extracción) en la cota 1,844 [msnm] (Sector Pacífico) y 1,826 [msnm.] (Sector Andes), un nivel de Transporte Intermedio en la cota 1,808 [msnm] y un nivel de Drenaje en la cota 1,790 [msnm.] (Acevedo J., 2017).

La siguiente figura, muestra un perfil asociado a los distintos niveles:

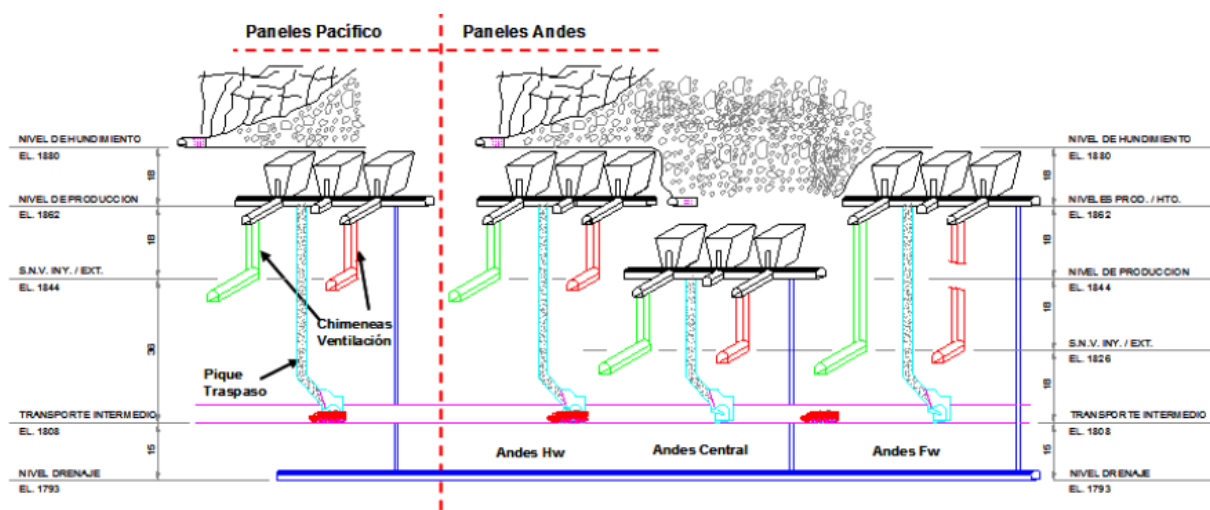


Figura 67 Perfiles Esquemáticos de Distribución de Niveles.

Fuente: Acevedo J. (2017).

5.2.1 Nivel de Hundimiento

El Nivel de Hundimiento está ubicado 18 [m] sobre el nivel de producción, manteniendo igual separación y orientación de calles, sus secciones son de 4.2 [m] x 4.1 [m] (Guerrero A., 2017).

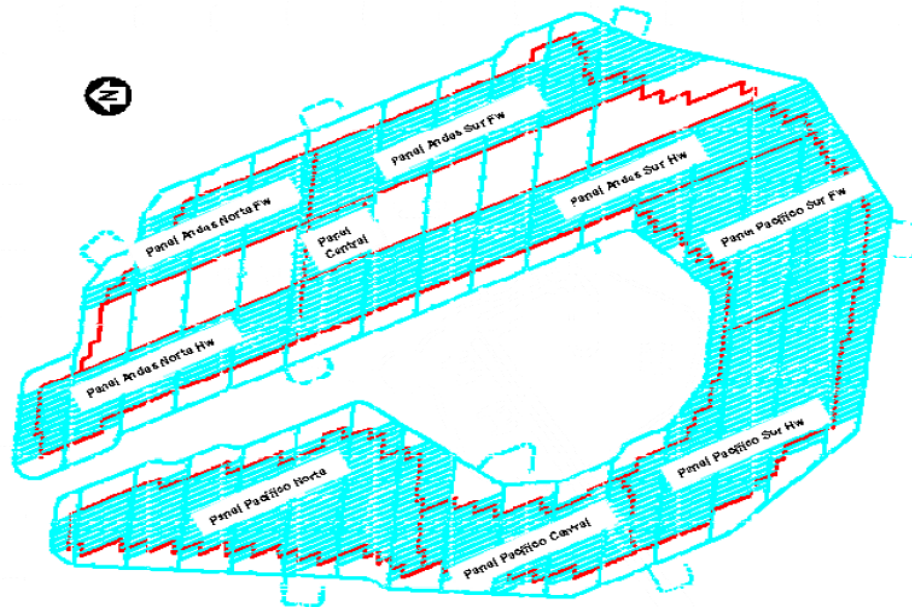


Figura 68 Nivel de Hundimiento Proyecto Nuevo Nivel Mina (1,880 y 1,862 [msnm.]

Fuente: Guerrero A. (2017).

5.2.2 Nivel de producción

Los niveles de producción están ubicados en las cotas 1,862 [msnm.] y 1,844 [msnm.]. La malla de extracción que se utilizará es del Tipo Teniente de 16 [m] x 20 [m] (320 [m²] de influencia), con un ángulo de sesenta grados entre calle y galería zanja. La Figura 69 muestra la disposición de la malla de extracción de 16 [m] x 20 [m] (Guerrero A., 2017).

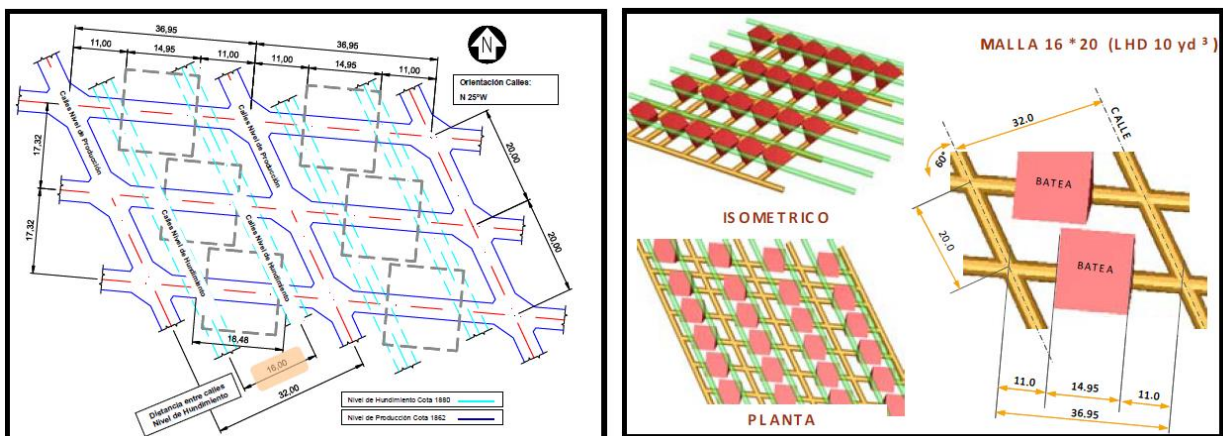


Figura 69 Malla de Extracción Tipo Teniente 16 [m] x 20 [m].

Fuente: Guerrero A. (2017).

Con respecto a la capacidad de los equipos LHD, se determina que su capacidad óptima será de 10 [yd³]. Según Acevedo J. (2017), los factores que influyeron en la ratificación de la capacidad de 10 [yd³] (14-15 toneladas) versus la de 13 [yd³] (19-20 toneladas) son:

- Buen funcionamiento en faenas extranjeras y nacionales en panel y block caving.
- Mejor maniobrabilidad de acuerdo con la malla de extracción escogida y las secciones de las calles y zanjas.
- Mejor flexibilidad para adaptarse, ante una eventual reducción de malla de extracción por nivel de esfuerzos del macizo rocoso.
- Menores dimensiones de galerías para la operación por esfuerzos altos.

La separación entre puntos de vaciado será de 120 [m]. Se tiene en consideración que las secciones de las galerías se construyen adaptadas a la operatividad de equipos automatizados y las fortificaciones especiales recomendadas para los niveles de esfuerzos, por lo que las secciones excavadas serán de 4.4 [m] x 4.1 [m] (Guerrero A., 2017).

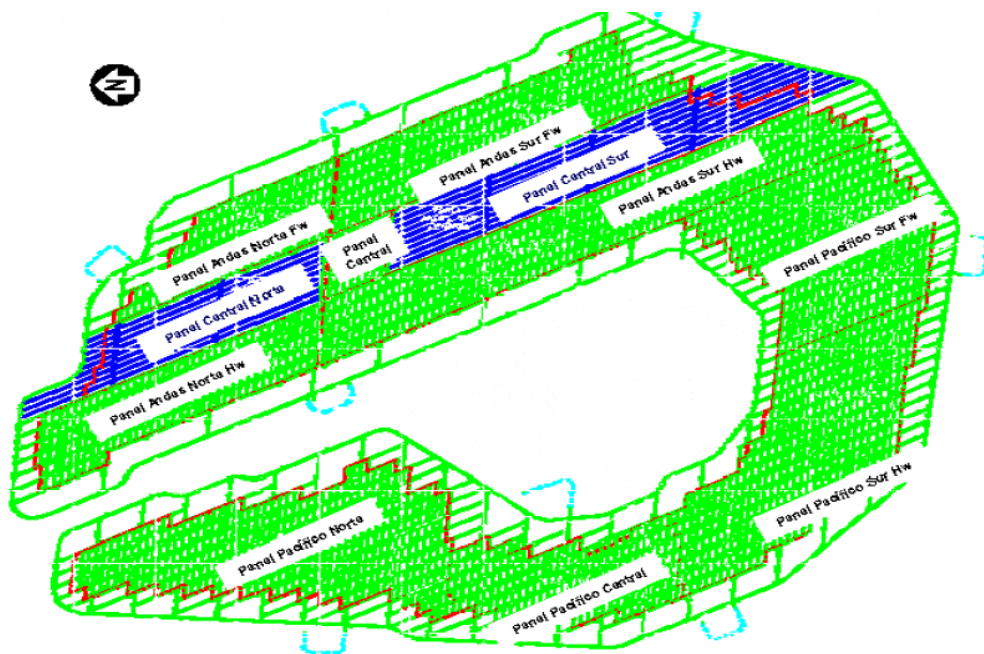


Figura 70 Nivel de Producción Proyecto Nuevo Nivel Mina.

Fuente: Guerrero A. (2017).

5.2.3 Nivel de transporte intermedio

El nivel de Transporte Intermedio está ubicado en la cota 1,808 [msnm.]. La sección libre de las galerías es 5.5 [m] x 5.5 [m], que permite la circulación de camiones UG automatizados de 60 [t] (diésel), que serán cargados por buzones de forma lateral a los camiones ubicados longitudinalmente en la zona de carga (parrillas clasificadoras en los piques son de 45 pulgadas. En la Figura 71, se muestra la disposición general del nivel de transporte intermedio. El diseño considera sólo un sentido de tráfico (unidireccional), mientras que sus vías dispondrán de carpetas de rodado en toda su extensión. Los camiones transportan el mineral hasta las tolvas de vaciado de las estaciones de chancado que estarán ubicados en la Pipa Braden (Acevedo J. 2017).

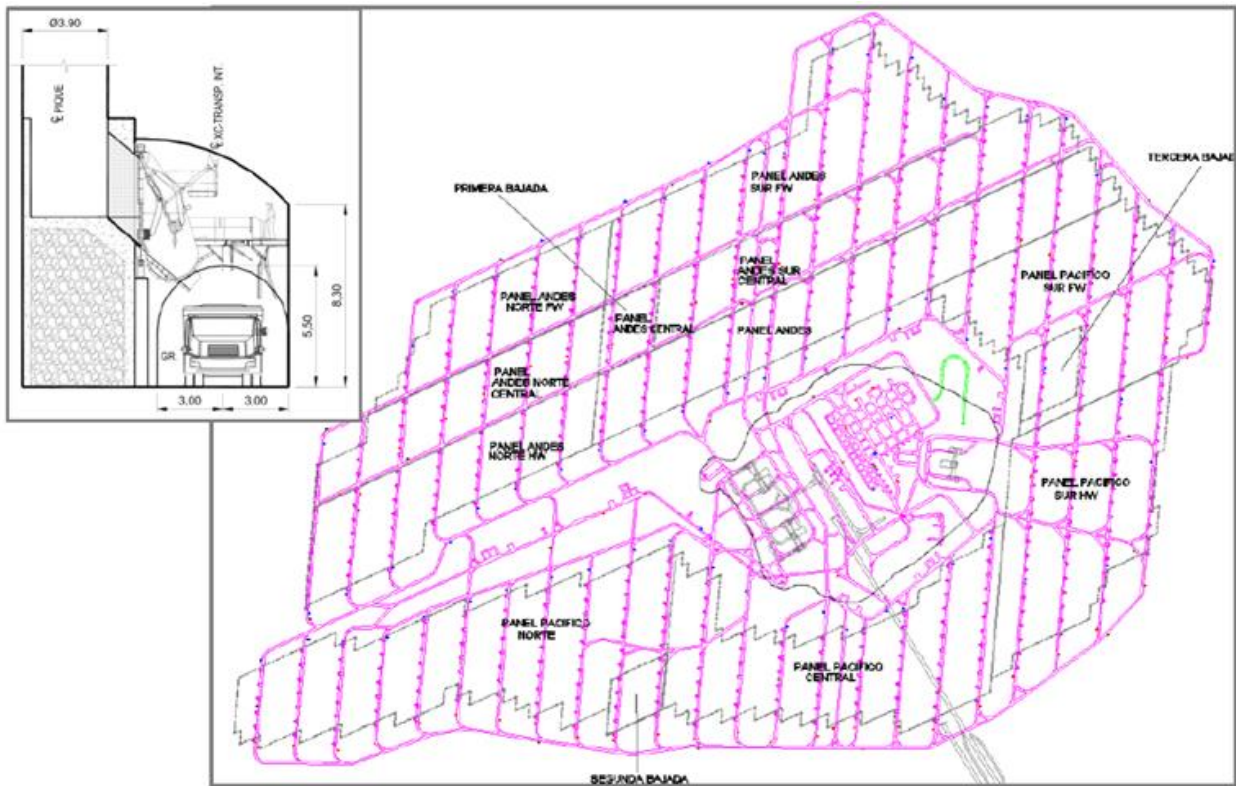


Figura 71 Nivel de Transporte Intermedio Proyecto Nuevo Nivel Mina.

Fuente: Acevedo J. (2017).

En forma de resumen, en la Tabla 57 se muestran las principales características del diseño minero a considerar en el estudio:

Tabla 57 Medidas relevantes del diseño minero del NNM.

Parámetro	Medidas
Sección galerías nivel de hundimiento	4.2 [m] x 4.1 [m]
Malla de extracción	16.0 [m] x 20.0 [m]
Sección galerías nivel de producción	4.4 [m] x 4.1 [m]
Abertura parrilla en pique	45.0 pulgadas
Sección galerías nivel de transporte intermedio	5.5 [m] x 5.5 [m]

Elaboración propia basada en Acevedo J. (2017) y Guerrero A. (2017).

5.3 Planificación Minera

5.3.1 Plan minero

Los proyectos nuevos de División El Teniente consideran explotar las reservas de mineral bajo la cota 1,880 [msnm.], que se encuentran bajo los actuales sectores productivos de la mina, considerando una producción estimada en régimen de 137 [kt/d]. El plan de producción general considera:

- Ramp up: 11 años
- Régimen: 29 años
- Ramp down: 12 años
- Horizonte total: 52 años

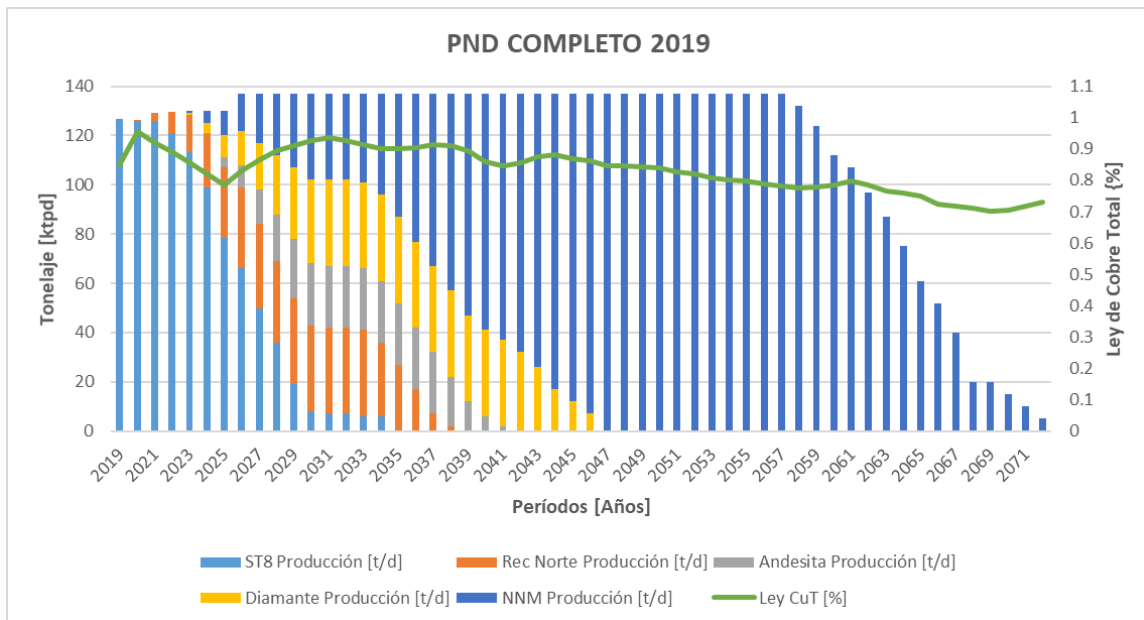


Figura 72 Plan Minero División El Teniente en base a PND 2019.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

La Figura 72 muestra el respectivo plan minero, donde se puede destacar que al año 2024, todas las futuras minas de El Teniente estarán en fase de producción (primer sector del nuevo nivel mina Andes Norte). Para el horizonte de estudio considerado, se debe tener en cuenta que la mayor cantidad de producción considerada será de los sectores Sub Teniente 8 y Recursos Norte.

Al 2030, la producción de ST8 prácticamente habrá finalizado (actual mina en producción).

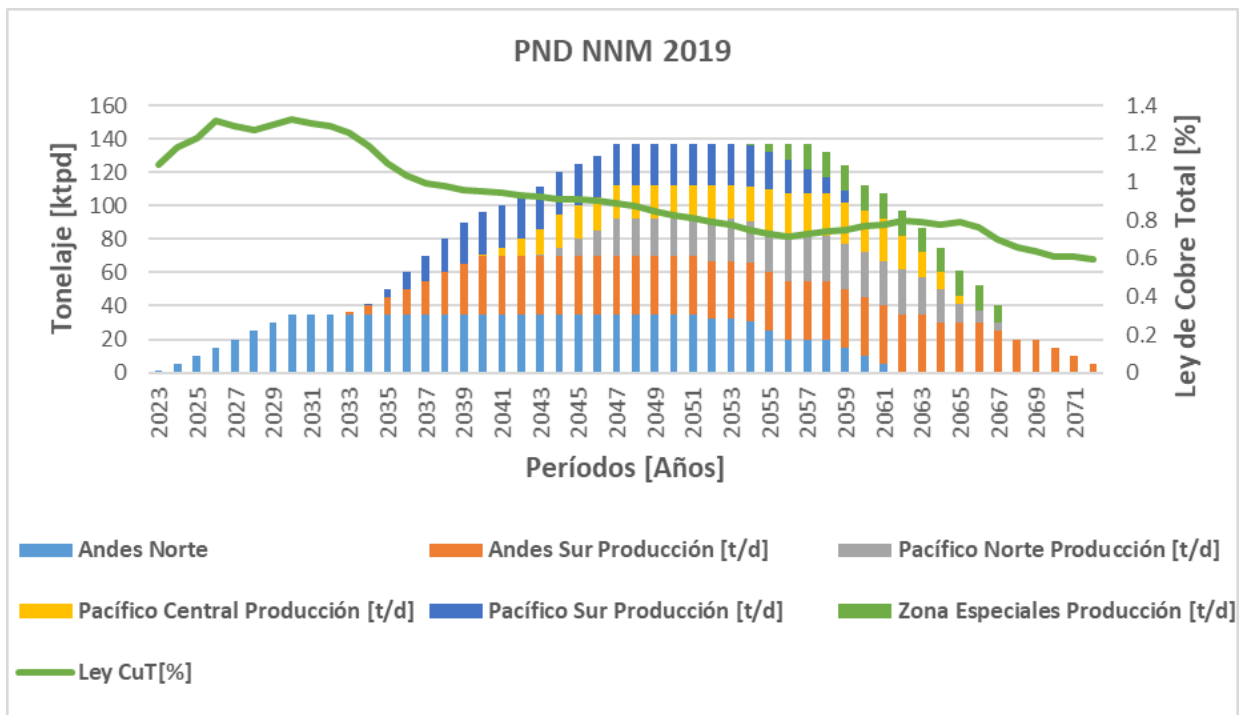


Figura 73 Plan Minero Nuevo Nivel Mina en base a PND 2019.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

En Figura 73 se puede visualizar el Plan Minero con el detalle de los sectores del Nuevo Nivel Mina, donde se destaca que la producción del segundo sector del NNM está planificada para el 2033 (fuera del horizonte de estudio).

5.3.2 Flotas de equipos

De acuerdo con los requerimientos de producción estimados para los años en estudio (2020-2030), en las siguientes secciones se detallan las respectivas flotas de equipos:

5.3.2.1 Equipos LHD

El Teniente utiliza distintos equipos LHD, que tienen una capacidad desde las 5 [y³] (7 toneladas) hasta las 15 [yd³] (21 toneladas). La siguiente figura muestra la flota equipos LHD en el tiempo:

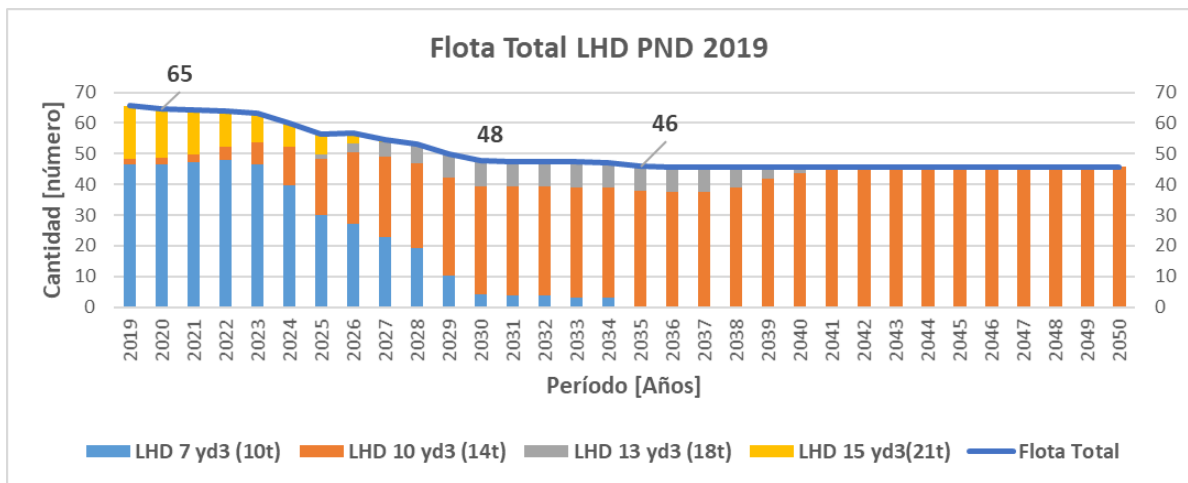


Figura 74 Flota operativa de equipos LHD por capacidad.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

De acuerdo con la Figura 74, se puede destacar que la flota de equipos LHD en la actualidad corresponde a 65 equipos, a 48 equipos en el 2030 y desde el 2035 en adelante se consideran 46 equipos.

En la actualidad y en el corto plazo, el equipo más común en las operaciones de El Teniente corresponde a los LHD de 10 toneladas y en el mediano/largo plazo será el equipo de 14 toneladas.

El motivo que se observa para la disminución de flota es el aumento de los LHD de 14 toneladas versus la disminución de los de 10 toneladas, los cuales tienen mayores rendimientos. Otro punto relevante para considerar es la estandarización de la flota de equipos LHD al tamaño de 14 toneladas, lo que entrega a la operación ahorros de tiempo

de trabajo (sobre todo en mantención) y ahorro de recursos económicos (logística interna/externa más sencilla).

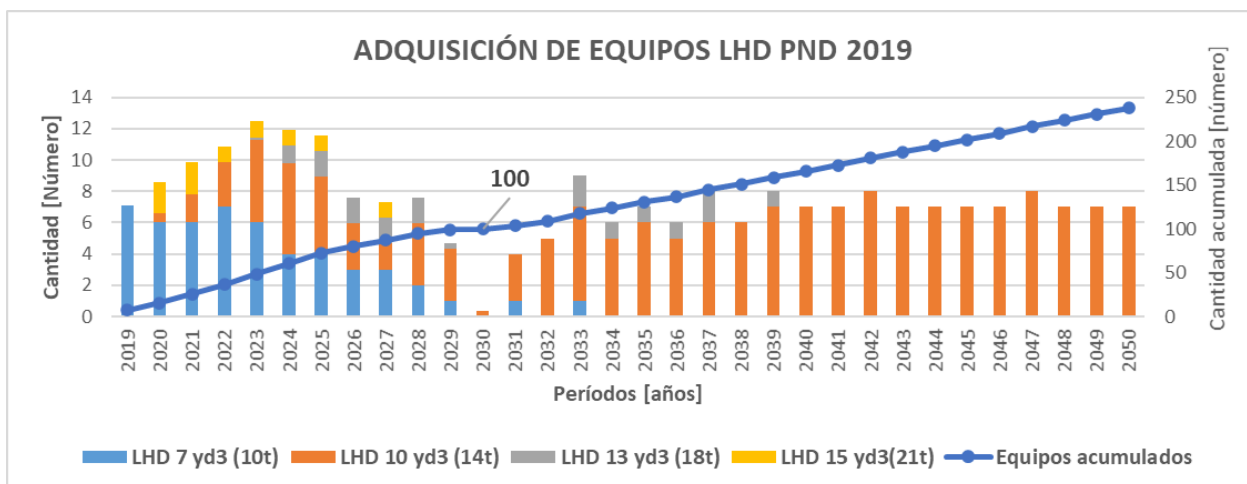


Figura 75 Plan de adquisiciones equipos LHD División El Teniente.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

En la Figura 75, se puede visualizar el plan de adquisición de equipos LHD de División El Teniente. Se destaca que entre los años 2019 y 2030 se tiene la adquisición de 100 equipos de distintas capacidades.

La adquisición de equipos LHD de interés para el presente estudio se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 58 Adquisición de equipos LHD de acuerdo con horizontes en estudio.

Capacidad equipos LHD	H1 (2020-2022)	H2(2023-2025)	H3(2026-2030)	Totales globales
7 yd ³ (10t)	19	14	9	42
10 yd ³ (14t)	5	16	12	34
13 yd ³ (18t)	0	3	5	8
15 yd ³ (21t)	5	3	1	9
Totales por período	29	36	28	93

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

De acuerdo con la Tabla 58, se puede destacar que el mayor número de adquisiciones en el corto plazo será de equipos de 10 toneladas (19 equipos) y en el mediano/largo plazo serán equipos de 14 toneladas. De esta manera, Komatsu debe prestar especial atención a los equipos de 14 toneladas (34 equipos en total), los cuales se encuentran

en desarrollo y también a los equipos de 10 toneladas por ser las máquinas más solicitadas considerando el período total (42 equipos).

5.3.2.2 Camiones UG

El Teniente se ha caracterizado por tener en sus operaciones camiones UG de altos tonelajes, donde se pueden encontrar modelos con capacidades de 50, 60, 63 y 80 toneladas respectivamente.

En la actualidad, de acuerdo con División El Teniente (2019), los principales camiones que se utilizarán en el futuro son equipos de 60 y 80 toneladas respectivamente.

La siguiente figura muestra la flota de camiones UG en el tiempo:

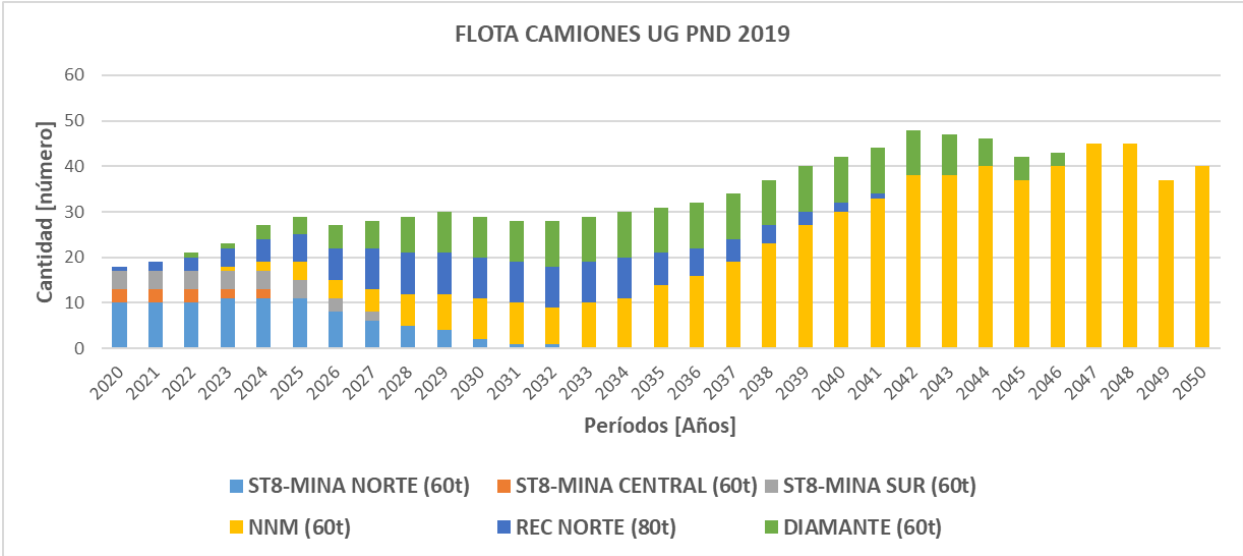


Figura 76 Flota operativa de camiones UG División El Teniente.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

En la Figura 76 se puede visualizar que la flota de camiones operativa en División El Teniente aumentará con la puesta en marcha del proyecto Nuevo Nivel Mina teniendo como foco los camiones de 60 toneladas.

Es relevante mencionar que la División no tiene camiones UG propios, sino que externaliza la operación con empresas proveedoras mediante contratos de servicios, donde la operación exige una disponibilidad, utilización operativa y rendimientos específicos. También se arrienda considerando mantención de los equipos.

Tabla 59 Posibilidad de arriendos de camiones UG de acuerdo con horizontes en estudio.

Períodos de estudio	Horizonte 1 (H1)			Horizonte 2 (H2)			Horizonte 3(H3)				
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Capacidad camión UG											
60 toneladas	17	17	18	19	22	23	20	19	20	21	20
80 toneladas	1	2	3	4	5	6	7	9	9	9	9
Totales por período	18	19	21	23	27	29	27	28	29	30	29

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

De la Tabla 59 se puede destacar que existe una oportunidad de negocio relevante para las empresas proveedoras que disponen de camiones UG de 60 toneladas. Sin embargo, para Komatsu, que no dispone de equipos de estos tonelajes en la actualidad, considerando también la particularidad de este segmento de mercado a nivel global, el riesgo de no arrendar equipos en el corto/ mediano plazo puede ser muy alto por la participación de Epiroc, Sandvik y Caterpillar (estas empresas tienen equipos de estos tonelajes funcionando en la División). En el mediano/largo plazo Komatsu podría participar de este segmento, pero primero es necesario destinar recursos y esfuerzos a otros equipos.

5.3.2.3 Equipos de perforación

El Teniente utiliza distintos equipos de perforación dentro de las distintas minas que lo componen. Como equipos propios de la División se consideran los jumbos de producción (radiales), jumbos de reducción secundaria, jumbos descolgadores y martillos rompe rocas (estacionarios y semi móvil).

Cabe destacar que los equipos relacionados con los desarrollos, como jumbos de avance y emperadores, no pertenecen a División El Teniente, ya que este tipo de operaciones Codelco las externaliza, donde se licitan contratos que en su mayoría son adjudicados por empresas contratistas, de obras y construcciones mineras como Zublin, Astaldi, Geovita, Mas Errázuriz, entre otras. De esta manera, los clientes de Komatsu en los principales equipos de perforación (jumbos de avance y emperadores), que fabrica en la actualidad y espera desarrollar, son las empresas contratistas y no División El Teniente como tal (como se mencionó en secciones anteriores, en temas de equipos de perforación, uno de los factores decisivos de compra para las empresas contratistas es

el tiempo de entrega de los equipos, por lo que Komatsu debe prestar especial atención a este criterio de compra). Sin embargo, de la Figura 61, se puede inferir que los jumbos de avance más importante para División El Teniente, por ser la mina subterránea más grande de Chile y estar en permanente desarrollo, es el jumbo de tamaño mediano de 2 brazos, por ser el equipo más común en Chile.

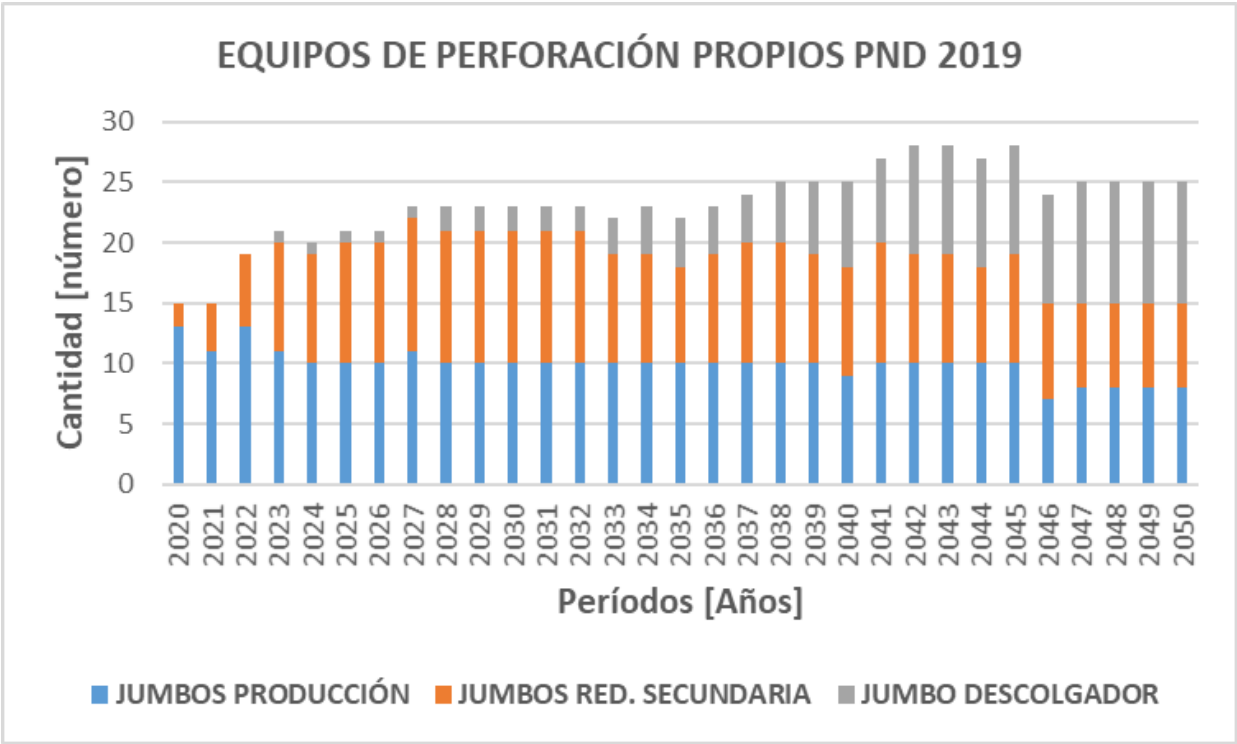


Figura 77 Flota equipos de perforación propios División El Teniente.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

En referencia a la Figura 77, se puede destacar que la flota de equipos de perforación propios de Teniente, en el corto plazo, tiene una mayor cantidad de jumbos de producción que del resto de los equipos, mientras que, para el mediano plazo, la cantidad de equipos operativos entre jumbos de reducción secundaria y jumbos de producción es la misma (10 equipos). Otra tendencia que se puede observar es el aumento paulatino de jumbos descolgadores, hasta llegar a ser los equipos de perforación propios más utilizados en el 2050.

Es importante destacar que El Teniente está considerando utilizar un mayor número de equipos de perforación destinados a labores de reducción de sobretamaños en los puntos

de extracción del nivel de producción, lo que indica la relevancia de la interacción entre los equipos de reducción secundaria y los equipos LHD al momento de funcionar correctamente en modo automatizado (la interacción entre los equipos será importante).

Tabla 60 Equipos de perforación de acuerdo con horizontes en estudio.

Períodos de estudio	Horizonte 1 (H1)			Horizonte 2 (H2)			Horizonte 3 (H3)				
Tipos de Jumbos	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Producción	13	11	13	11	10	10	10	11	10	10	10
Reducción secundaria	2	4	6	9	9	10	10	11	11	11	11
Descolgador	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2
Totales por período	15	15	19	21	20	21	21	23	23	23	23

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

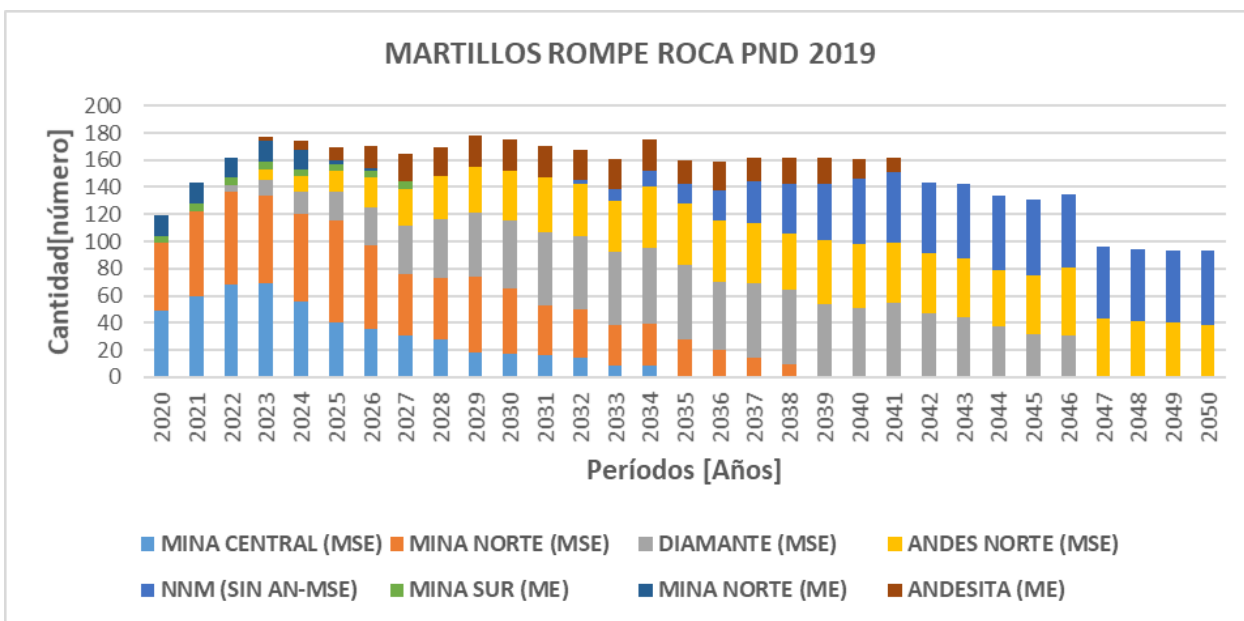


Figura 78 Flota de martillos rompe rocas División El Teniente.

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

En la Figura 78, se muestra la flota de martillos rompe roca de División El Teniente. Se puede destacar que, la división tiene un importante parque de martillos operando en modo telecomando (cerca de 160 equipos), dependiendo de las calles activas de la operación. Los martillos más utilizados son los martillos semi-estáticos, ya que permiten una mayor flexibilidad operacional en comparación a los martillos estáticos. El aumento del parque de martillos rompe rocas se debe principalmente a la masificación del sistema de manejo

de materiales de piques en calles, el cual mejora los niveles de productividad en comparación al sistema de Chancador en cabecera (Cornejo J.,2018).

Tabla 61 Martillos rompe roca de acuerdo con horizontes en estudio.

Períodos de estudio	Horizonte 1 (H1)			Horizonte 2 (H2)			Horizonte 3 (H3)				
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Tipos de martillos											
Estáticos	20	21	21	24	26	17	23	26	21	23	23
Semi-estáticos	99	122	141	153	148	152	147	139	148	155	152
Totales por periodo	119	143	162	177	174	169	170	165	169	178	175

Elaboración propia basada en División El Teniente (2019).

La Tabla 61 muestra la flota de martillos de acuerdo con los horizontes de estudio. Teniendo en consideración estos datos, se puede apreciar una oportunidad de negocio para Komatsu, ya que la empresa tiene una de las mejores tecnologías de perforación con los martillos Montabert y los martillos hidráulicos de excavadoras de superficie y el segmento de mercado en específico representa una suma aproximada de 50 [MUSD]²⁹ sólo en El Teniente. Es importante considerar que los parámetros requeridos para estos equipos son tener un rendimiento de aproximadamente 800 [t/h], una disponibilidad mecánica y utilización efectiva cercanas al 80% y una vida útil de 8 años (División El Teniente, 2019).

5.4 Modelo de negocios

Para analizar y caracterizar de mejor manera el negocio de División El Teniente, se muestra su respectivo Modelo de Negocios (Modelo Canvas).

De la Figura 79, se puede destacar que existen 2 sectores, el primero (lado derecho) destinado a los aspectos del mercado, que hacen referencia a los factores externos de la División (el entorno, el mercado, los clientes objetivo) y un segundo sector (lado izquierdo) que muestra los aspectos de la División en sí, en referencia a los requerimientos internos y las necesidades observadas. Esta estructura, permite analizar los aspectos esenciales

²⁹ Para obtener este dato se consideró la flota promedio de equipos (164 unidades) y el valor aproximado de mercado de los martillos rompe roca estáticos (300 mil dólares). Cabe destacar que no se cuenta con el precio de mercado de los martillos rompe roca semi-estáticos, por lo que el valor estimado podría ser mayor. Este valor de mercado se estimó considerando que, una vez terminada la vida útil de cada martillo, se adquieren igual cantidad de martillo (164 unidades).

(estratégicos) del negocio y vincularlos entre sí, siendo de utilidad para el análisis y el desarrollo del negocio.

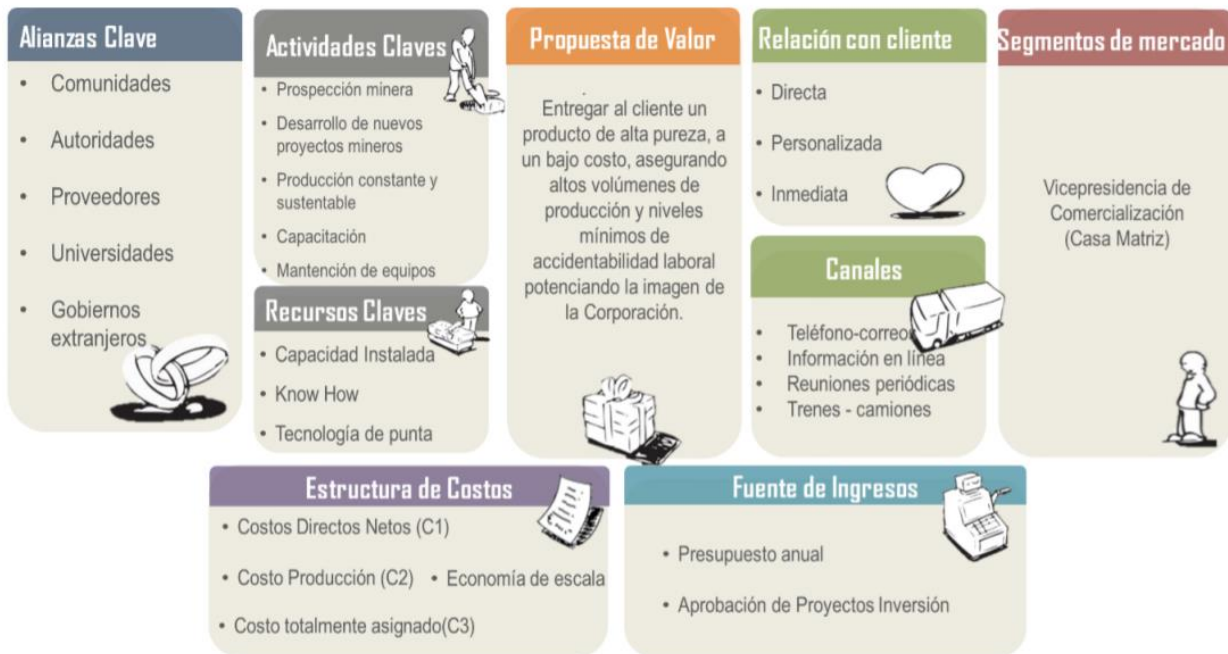


Figura 79 Modelo de negocios División El Teniente.

Fuente: Araya D. (2018)

▪ **Aspectos del mercado**

- Segmentos de mercado o de Clientes: El principal cliente para El Teniente es la Vicepresidencia de Comercialización de Codelco que está ubicada en la Casa Matriz de la Corporación. Se destaca que es el único cliente considerado, ya que esta Vicepresidencia es la encargada de comercializar la producción de El Teniente en los principales mercados de metales del mundo como la Bolsa de metales de Londres, de Nueva York y de Shanghai.
- Propuesta de valor: División El Teniente ofrece a su cliente cobre de alta pureza en forma de ánodos como producto principal y como subproductos molibdeno, plata, entre otros. El principal valor se considera el entregar un producto de alta calidad, a bajos costos y en altos volúmenes con niveles mínimos de accidentalidad laboral, respetando las normativas medioambientales vigentes. La necesidad cubierta sería entregar a su cliente, la posibilidad de obtener beneficios económicos/financieros

directos por la venta de la producción en los mercados de metales, para de esta forma contribuir al presupuesto del Estado de Chile.

- c) Canales: Como principales canales de comunicación se considera la información en línea a través de un sistema de nube, la utilización de celulares y correos electrónicos, reuniones periódicas con el cliente y trenes- camiones para distribuir la producción hacia el exterior. De esta manera, se busca tener una comunicación efectiva, para hacer los procesos de forma más eficiente.
- d) Relación con cliente: La relación con la Vicepresidencia de Comercialización se considera directa, personalizada e inmediata, ya que las partes pertenecen a la misma corporación y tienen el mismo objetivo final que es aportar valor al país. La comunicación fluida facilita cumplir los objetivos propuestos.
- e) Fuentes de ingresos: La principal fuente de ingresos de División Teniente viene dada por el “Presupuesto anual” aprobado por la Corporación Chilena de Cobre (Cochilco) y el Ministerio de Hacienda, quienes ratifican un monto específico de dinero que se puede gastar durante el período de un año, que es solicitado por la División en el mes de octubre, para ser aprobado a comienzos del mes de enero. Otra fuente de ingreso que tiene El Teniente es obtener “aprobación de proyectos de inversión”, donde se solicita al directorio de la Codelco y a Cochilco, la aprobación de capital para concretar proyectos de inversión, para de esta manera, conservar los niveles de producción de la faena minera.

- **Aspectos de la División**

- a) Recursos clave: Para llevar a cabo las distintas actividades de la División, se necesitan distintos tipos de recursos, pero los principales son la capacidad instalada para procesar altos tonelajes de material, donde se consideran los equipos de las plantas concentradoras, los equipos de producción para habilitar área productiva, los equipos para el manejo de materiales y la ventilación de las excavaciones.

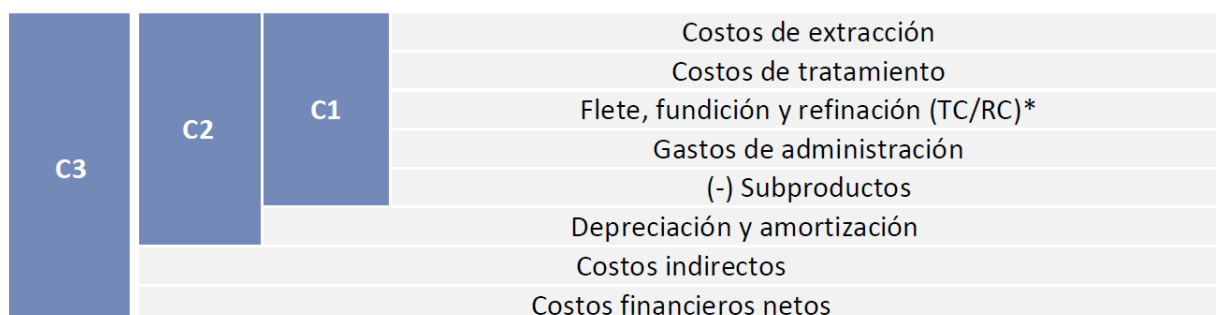
El “know how” de los trabajadores de la División, que considera las capacidades y habilidades requeridas para las labores mineras, es un recurso clave, ya que El Teniente tiene toda una historia minera de más de 100 años, donde la explotación del yacimiento ha estado en permanentes cambios basados en innovaciones, que han sido muchas veces, probadas por primera vez en el mundo en la faena en cuestión.

La expertiz y la mejora continua de la División ha permitido mantener niveles de costos bajos que incluso llegan a competir con faenas mineras a cielo abierto.

- b) Actividades clave: Las actividades esenciales que tienen que llevarse a cabo y que se realizan con recursos propios en la División son las siguientes:
- Cumplimiento de los planes de desarrollo del negocio, manteniendo así los niveles de producción, entregando los recursos prometidos al Estado, cumpliendo estándares de seguridad y sustentabilidad.
 - Permanente desarrollo de prospección minera para identificar nuevas oportunidades de negocio o mejorar el conocimiento del macizo rocoso y mantener así la operación en el largo plazo.
 - Capacitación de trabajadores, tanto propios como de empresas contratistas, para fomentar una cultura de trabajo basada en la salud ocupacional, la seguridad y el cuidado al medio ambiente. De esta manera se minimiza la accidentabilidad en la mina.
 - La mantención de los equipos se considera fundamental para el buen funcionamiento de los procesos. Si bien esta actividad puede ser desarrollada por proveedores, como el caso de los camiones UG, esta es una actividad que sin duda condiciona los resultados productivos de la faena, por lo que el control de los contratos con los proveedores o el control de una mantención efectiva por parte del personal propio, se consideran relevantes.
- c) Alianzas o socios clave: Las alianzas o acuerdos que son fundamentales para División El Teniente son los que se tiene con la comunidad cercana a la operación, ya que es ella la que entrega la “Licencia Social para operar”, la relación con las autoridades del país, con los proveedores que entregan productos y servicios, que si funcionan de mala manera condicionan directamente la producción, con las universidades que pueden aportar conocimiento para mejorar los distintos procesos y gobiernos extranjeros para afianzar las relaciones comerciales en referencia a temas tecnológicos y de experiencias de otras faenas mineras.
- d) Estructura de costos: Los costos más importantes para el modelo de negocios son:
- Costos directos netos (C1): Costo utilizado para análisis comparativos, que muestra la competitividad de la división en el corto plazo.

- Costo de producción (C2): El mismo costo C1 considerando además los montos generados por depreciaciones, amortizaciones o agotamiento del recurso. Este costo permite tener una noción del costo operacional, entregando una visión de sustentabilidad del negocio en el mediano plazo.
- Costo totalmente asignado (C3): Considera C1, C2 más costos indirectos, y gastos de cargos financieros netos. Este costo permite tener nociones de la sustentabilidad económica del largo plazo.
- Existencia de economías de escala

El resumen de los costos se puede ver en la siguiente figura:



*Según corresponda al tipo de producto de la operación.

Figura 80 Estructura de costos modelo de negocios División El Teniente.

Fuente: Cochilco (2015).

5.5 Roadmaps de Electromovilidad

Dentro del proceso de transformación de El Teniente, en su proyección de los próximos 50 años, la electromovilidad es considerada parte del compromiso de la División en miras de un futuro más eficiente y sustentable, que aporta a mantener la viabilidad del negocio (El Teniente-b, 2019).

De acuerdo con Leiva A. (2020), El Teniente apunta a tener una flota 100% eléctrica antes del año 2030 y se espera comenzar hacia el 2023 el diseño de minas 100% eléctrica.

De acuerdo con Dorner V. (2020), la electromovilidad se considera una oportunidad para El Teniente, ya que permite:

- Reducir costos, por menor uso de energía (50-70%) y menores costos de mantención aproximadamente un 40% (opex 2 a 5 veces menor que equipos diésel).

- Impactos en capex de futuros proyectos de minería subterránea, ya que se espera reducir en un 30% los costos de ventilación y desarrollo, si se diseña y opera una mina full eléctrica.
- Reducir el impacto al entorno, ya que se reduce en un 60 % las emisiones y un 95 % el calor liberado, lo que reduce la exposición de los trabajadores a emisiones peligrosas.
- Aumentar la productividad.
- Permite que ingrese un mayor número de actores al modelo de negocios.
- Beneficia directamente el negocio para Chile y la región de O'Higgins.

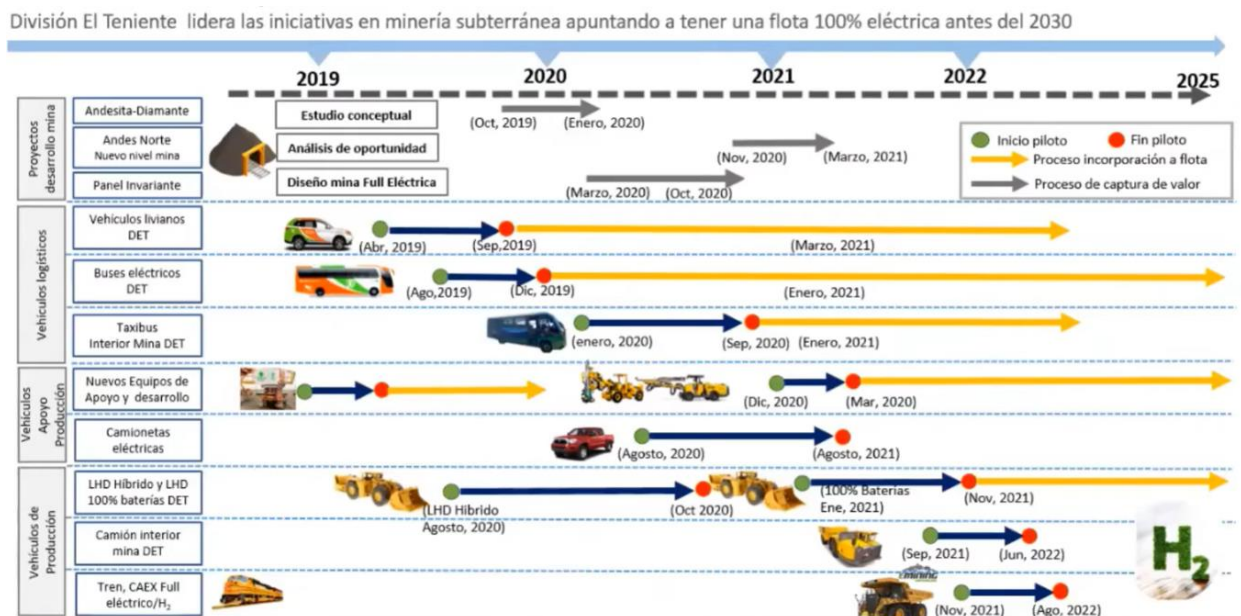


Figura 81 Roadmap procesos generales de electromovilidad División El Teniente.

Fuente: Dörner V. (2020).

En la Figura 81, se puede visualizar el Roadmap de electromovilidad en procesos generales de la división, donde se destaca el avance en la electrificación de la flota de vehículos logísticos, vehículos de apoyo de la producción y vehículos de producción. Komatsu con su equipo LHD híbrido 18 HD está siendo pieza fundamental del proceso de electrificación de la división, donde en la actualidad, se está en etapa de captura de valor de la tecnología. En referencia a los equipos LHD 100% con baterías, a la fecha se tiene una prueba adjudicada que inicia su proceso el primer semestre del 2021.

La principales brechas y focos de trabajo que se visualizan en electromovilidad por parte de El Teniente, de acuerdo con Dorner V. (2020) son:

Tabla 62 Brechas y focos de trabajo en electromovilidad El Teniente.

Tecnología y mercado	Capacidades	Escalabilidad de tecnología
Desarrollo limitado de tecnología de acuerdo con los requerimientos de Codelco en Block caving	Requerimiento de capacitación de operadores y personal de mantenimiento	Necesidad de análisis de impactos de tecnología en el diseño de la mina, operación y producción
No existe un mercado dominante para esta tecnología.	Necesidad de generar una filosofía de operación en favor de la tecnología	Necesidad de adaptación (normativas, contratos)
Entorno cambiante, ya que el cambio tecnológico es acelerado principalmente en tema de baterías	Nuevas oportunidades de negocio y desarrollo de capacidades, ejemplo economía circular	Generar una estrategia de escalabilidad divisional y corporativa
No existen los volúmenes de producción de equipos a baterías que permitan, hoy en día escala (producción a pedido)	Nuevos desafíos: Involucramiento en el diseño de mina con el fin de provechar al máximo el beneficio de la tecnología	
Necesidad de trabajo colaborativo con proveedores para visibilizar requerimientos		

Fuente: Dorner V. (2020).

Actualmente se están desarrollando proyectos y pruebas de pilotaje industrial, que permitirán generar una línea base para la operación de los equipos eléctricos. De acuerdo con Dorner V. (2020), los proyectos al 2020 son los siguientes:

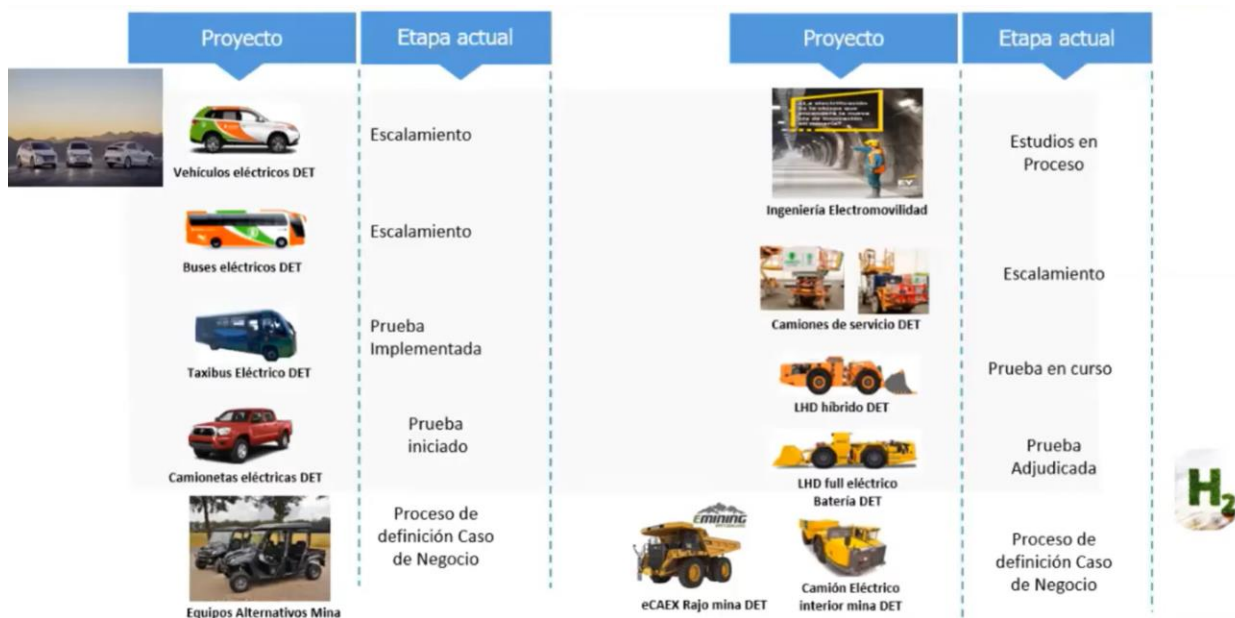


Figura 82 Estatus de proyectos de electromovilidad en División El Teniente.

Fuente: Dorner V. (2020).

Con respecto a las tecnologías con hidrógeno, se espera utilizar en equipos de mayores capacidades como equipos CAEX y camiones UG, ya que es difícil concebir la implementación de la electromovilidad sólo con el uso de baterías, principalmente por el tiempo necesario para la recarga (el hidrógeno tiene una velocidad de recarga similar al combustible diésel) y el tamaño de sus baterías (relación peso/ batería alto).

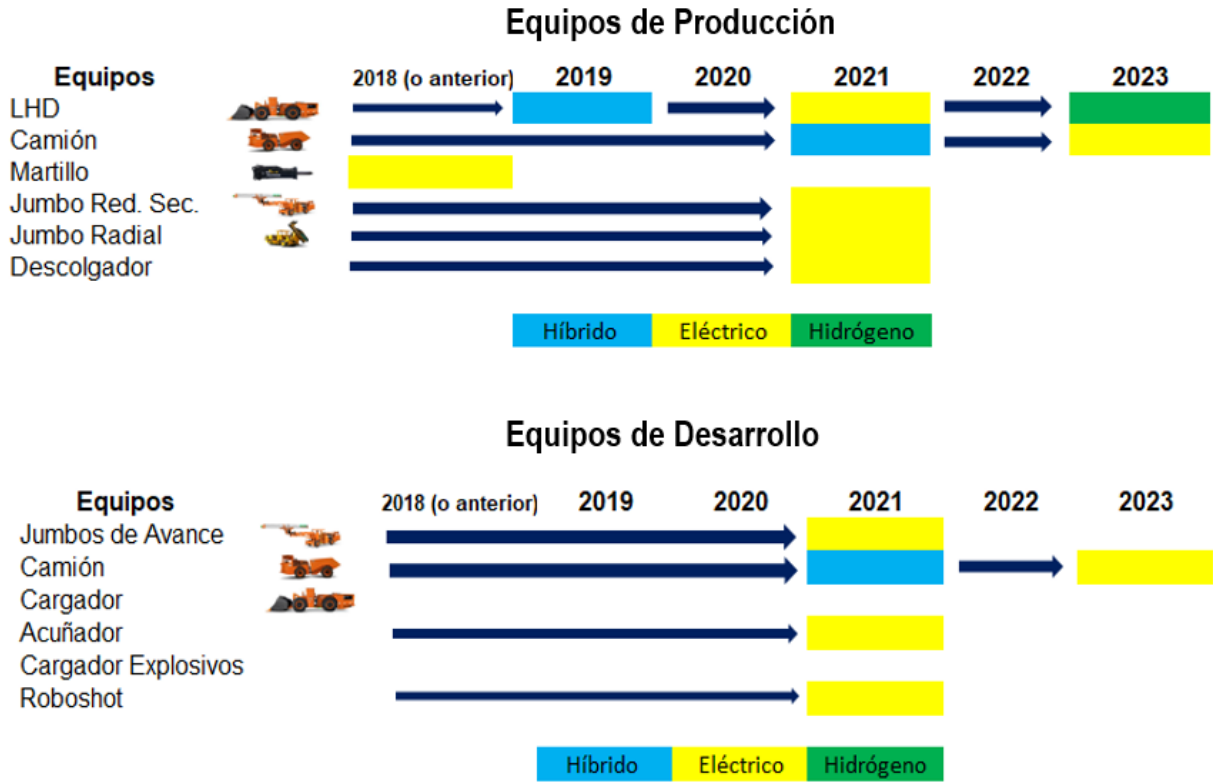


Figura 83 Roadmap electromovilidad equipos de desarrollo y producción en El Teniente.

Elaboración propia basada en Codelco El Teniente (2018).

Con respecto a la Figura 83, se puede destacar el desglose de los principales equipos tanto de producción como de desarrollo. División El Teniente considera 3 categorías principales para sus equipos: híbridos, eléctricos a baterías e hidrógeno.

En producción se destaca que los equipos LHD inician el proceso de electrificación con equipos híbridos (2019 y la actualidad), para luego el 2021 poner a prueba equipos a baterías y el 2023 equipos a hidrógeno.

Para el caso de los jumbos de avance, su electrificación completa (sin depender de diésel) se iniciará el 2021, por lo que se considera importante disponer de jumbos de

avance medianos a baterías para el 2021-2022. De esta manera, Komatsu con su modelo ZJ32Bi, el cual será lanzado el 2022 de acuerdo con el Roadmap de la Figura 40, debe tener como una de las prioridades de desarrollo.

Es relevante mencionar que uno de los casos de estudio que está visualizando el Teniente para comparar el caso de utilización de equipos diésel y de equipos a baterías, es el caso de negocio de Glencore en Onaping Depth, donde en el estudio de prefactibilidad del proyecto se logró la reducción del aire de ventilación estimado, se eliminaron 3 ventiladores y 3 piques de traspado, lo que implica menores desarrollos y se reduce la emisión de gases invernadero (de 17,130 toneladas de CO₂ por año con mina diésel a 9,620 toneladas) en un 44 %. Los principales impactos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 63 Comparación diésel y eléctrico a baterías Onaping Depth (Glencore).

Parámetros	Diésel	Eléctrico a baterías	Diferencia casos
Requerimientos de ventilación	300 [m ³ /s]	180 [m ³ /s]	40 %
Diámetro de shaft de inyección	6.5 [m]	5.0 [m]	23 %
Diámetro de shaft de extracción	5.0 [m]	3.8 [m]	24 %
Requerimientos de refrigeración	BAC=19.2 [MW _r] CSC=25.3 [MW _r]	BAC=13.3 [MW _r] CSC=17.5 [MW _r]	31 %
Demanda de energía de ventiladores	10,900 [kWe]	6,100 [kWe]	44 %
Demanda de energía por refrigeración [kWe]	3,300 [kWe]	2,300 [kWe]	30 %
Total energía [kWe]	14,200 [kWe]	8,400 [kWe]	41 %

Fuente: Dorner V. (2020).

De la Tabla 63, se puede destacar que la reducción de distintos parámetros tanto operativos como de desarrollo, considerando equipos diésel o equipos eléctricos a baterías es importante e impacta fuertemente tanto el opex como el capex. Este es uno

de los principales motivos que impulsa la electromovilidad en El Teniente además del cuidado del medio ambiente.

De esta manera, se considera que Komatsu, para satisfacer la demanda de El Teniente, considerando un retraso de los proyectos por efecto del covid-19, debe disponer de los siguientes equipos:

Tabla 64 Principales equipos a considerar por Komatsu para El Teniente.

Período	Equipo LHD	Jumbos de avance	Camiones UG
H1 (2020-2022)	Híbrido	Eléctrico a batería	Híbrido
H2 (2023-2025)	Híbridos o eléctrico a baterías	Eléctrico a batería	Eléctrico a baterías o hidrógeno
H3 (2026-2030)	Eléctrico a baterías o hidrógeno	Eléctricos a batería	Eléctrico a baterías o hidrógeno

Elaboración propia basada en Codelco El Teniente (2018) y Dorner V. (2020).

Considerar que los tipos de equipos se recomiendan de acuerdo a los Roadmaps de la División y corresponde al inicio de implementación de las tecnologías mencionadas, ya sea en modo prueba industrial o masificación de la utilización de una tecnología en particular en la operación (no significa que en H1 todos los LHD de Teniente sean híbridos y en H2 sólo se utilicen a baterías, la operación es una mezcla de las diferentes tecnologías, pero existe la tendencia a abandonar los equipos diésel y migrar hacia la full electrificación de los equipos).

5.6 Roadmaps Automatización

Para División El Teniente, la automatización de las operaciones es uno de los pilares fundamentales considerado el salto disruptivo que requieren y que están haciendo realidad. La motivación principal de la División para implementar la automatización son sus beneficios en materia de seguridad, ya que permite retirar a trabajadoras y trabajadores de zonas con altos riesgos, reducir los costos de operación, aumentar la productividad por mayores tiempos efectivos de operación (entre 10-15% mayores, dependiendo de la operación), además de aumentar las reservas disponibles por operación en puntos de extracción con agua/barro. Se espera automatizar toda la gama de equipos como equipos LHD, camiones y jumbos principalmente (Gerencia de Minas División El Teniente,2019).

Actualmente se están desarrollando proyectos y pruebas de pilotaje industrial, que permitirán generar una línea base para la operación autónoma de los proyectos PDET (Recursos Norte, Diamante y Andesita) y NNM. De acuerdo con Gerencia de Minas División El Teniente (2019), los proyectos son los siguientes:

- **LHD`s autónomos:** Proyecto desarrollado en el nivel de producción del Bloque 1 de la mina Esmeralda, que tiene el objetivo principal de implementar autonomía de 5 equipos LHD al nivel de semi autonomía (nivel 3), permitiendo la extracción de reservas sin exponer a operadores a condiciones de riesgo y aumentando así la continuidad operacional. Se encuentra en estado de montaje de infraestructura y se espera que al 2021 se haga la integración a PDET (la aprobación del proyecto y la adjudicación fueron en abril/mayo del 2019).
- **Camiones autónomos:** Proyecto desarrollado en el panel 2 de la mina Esmeralda, que tiene el objetivo principal el implementar autonomía de 3 camiones UG al nivel de Full Autonomía (nivel 4-5), con tal de permitir aumentar la utilización efectiva y capacidad de acarreo del sector, disminuyendo los requerimientos de operadores en el transporte de material. El estado actual del proyecto es fase de puesta en marcha de pruebas industriales (a principio del 2019 se aprobó el proyecto y se hizo la respectiva adjudicación).
- **Sistema Control LHD RCT –Diablo Regimiento Fase II:** A finales del 2017 se tiene en operación un equipo LHD de 13 [yd³] con tecnología de teleoperación asistida (nivel 2 de automatización), con motivos de habilitar reservas en sectores donde predomina la condición agua-barro, con una empresa agnóstica (independiente del fabricante), que se alinea con los conceptos de interoperabilidad que desea integrar División El Teniente en sus operaciones (se tienen 2 equipos operando con este sistema).
- **Automatización Diablo Regimiento Fase III:** Implementación de 2 + 1 equipos LHD para operar en niveles de automatización semi y full autónomo (desde niveles 3 hasta el 5), utilizando red Wifi de la Gerencia Mina.
- **Desarrollo Martillos autónomos:** Se tiene en fase de desarrollo piloto la automatización de martillos de reducción secundaria, asociado con centros de estudios y proveedores de equipos. Inicialmente se desarrolla con 1 equipo y su estado actual es en pruebas de laboratorio (la carta de intención y la adjudicación del

proyecto fueron a inicios del 2019) y se espera integrar a los proyectos en la División en 2021.

Es importante destacar que División El Teniente, para los distintos proyectos de automatización, ha considerado un horizonte temporal de 3 años aproximadamente, horizonte que Komatsu debe considerar para sus respectivas presentaciones a licitación.

Además de los proyectos recién mencionados, en la siguiente tabla, se pueden visualizar los principales proyectos de automatización considerados para los próximos años en División El Teniente:

Tabla 65 Proyectos de Automatización en División El Teniente.

Estado de automatización de proyectos PDET y VP/NNM			
Proyecto	Puesta en Marcha Proyecto (PEM)	Equipos autónomos	PEM Operación autónoma³⁰
Recursos Norte	1º Semestre 2020	LHD	2º Semestre 2021
		Camiones	2º fase, 2031
Diamante	1º Semestre 2023	LHD	1º Semestre 2023
		Camiones	
Andesita	1º Semestre 2024	LHD	1º Semestre 2024
Andes Norte	1º Semestre 2023	LHD	2º Semestre 2023
		Camiones	

Fuente: Gerencia de Minas División El Teniente (2019).

De acuerdo con la Tabla 65, se puede destacar que se espera implementar 4 proyectos en las futuras minas que entrarán en operación los próximos años (Recursos Norte lo hizo a principios de enero del 2020), para los cuales Komatsu debe prestar especial atención para adjudicarse los proyectos.

Considerando el Roadmap de automatización de Komatsu mostrado en la Figura 45, el desarrollo y la prueba del nivel 4 de autonomía en equipos LHD debe estar completo para el 2020, por lo que Komatsu podría participar de los proyectos de Diamante, Andesita y Andes Norte respectivamente.

³⁰ Inicio de montaje de Infraestructura para Operación autónoma.

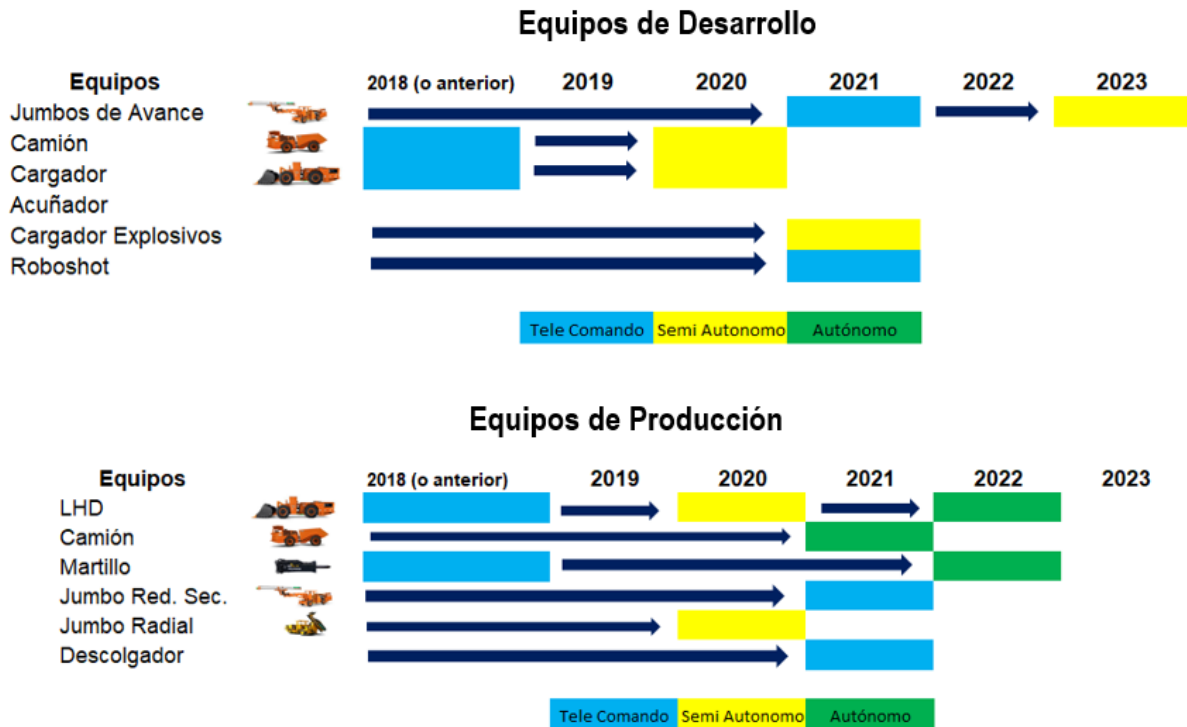


Figura 84 Roadmap automatización equipos de desarrollo y producción en El Teniente.

Elaboración propia basada en Codelco El Teniente (2018).

De la Figura 84 se puede destacar el desglose de los principales niveles de automatización que espera desarrollar El Teniente los próximos años, donde se destacan las categorías de telecomandado, semi autónomo y autónomo respectivamente.

En producción se destaca que los equipos LHD a la fecha ya cumplen con la teleoperación y está en desarrollo la implementación de la semi autonomía. Para el 2022 se espera tener equipos full autónomos operando en islas autónomas dentro de respectivos sectores de la mina.

Para el caso de los jumbos de avance, su teleoperación se espera desarrollar dentro del 2021, para luego el 2023 contar con una operación semi autónoma de estos equipos. De esta manera, Komatsu, que espera desarrollar la autonomía nivel 4 en jumbos de avance para el 2022 (ver Figura 45), estará listo para competir en las respectivas licitaciones de los proyectos.

Respecto a los martillos rompe rocas, El Teniente espera tener martillos autónomos para el 2022.

Tabla 66 Principales niveles de automatización a considerar por Komatsu para El Teniente.

Período	Equipo LHD	Jumbos de avance	Camiones UG
H1 (2020-2022)	Semi autónomo	Telecomando	Autónomo
H2 (2023-2025)	Autónomo	Semi autónomo	Autónomo
H3 (2026-2030)	Autónomo	Semi autónomo	Autónomo

Elaboración propia basada en Codelco El Teniente (2018).

Considerar que los tipos de equipos se recomiendan de acuerdo a los Roadmaps de la División y corresponde al inicio de implementación de las tecnologías mencionadas, ya sea en modo prueba industrial o masificación de la utilización de una tecnología en particular en la operación (no significa que en H1 todos los LHD de Teniente sean semi autónomos y en H2 sean full autónomos, la operación es una mezcla de las diferentes tecnologías, pero existe la tendencia a abandonar la operación manual y migrar hacia la automatización completa si la tecnología y las condiciones mina lo permiten).

5.7 Resumen Plan de Negocios y Roadmaps El Teniente

- El Teniente actualmente se encuentra en un período de transformación que le permitirá operar durante los próximos 50 años y más. Los principales proyectos por considerar en este estudio son las minas Andesita, Diamante, Recursos Norte y Andes Norte (inicio Nuevo Nivel Mina), además de las minas actualmente en operación (Sub Teniente 8).
- La Tabla 57, muestra las medidas relevantes del diseño minero del Nuevo Nivel Mina, donde se destaca que las secciones de galería del nivel de hundimiento serán de 4.2 [m] x 4.1 [m], del nivel de producción 4.4 [m] x 4.1[m] y del nivel de transporte intermedio 5.5 [m] x 5.5[m] respectivamente.
- Para el horizonte de estudio considerado (2020-2030), se debe tener en cuenta que la mayor cantidad de producción considera será de los sectores Sub Teniente 8 y Recursos Norte. Al 2030, la producción de ST8 prácticamente habrá finalizado (actual mina en producción).
- Con respecto a equipos LHD, se puede destacar que el mayor número de adquisiciones en el corto plazo será de equipos de 10 toneladas (19 equipos) y en el mediano/largo plazo serán equipos de 14 toneladas. De esta manera, Komatsu debe focalizar recursos en equipos de 14 toneladas (34 equipos en total) y de 10 toneladas

por ser las máquinas más solicitadas considerando el período total (42 equipos) (ver Tabla 58).

- Con respecto a los camiones UG, se destaca que El Teniente no adquiere camiones, sino que funciona mediante contratos de arriendo, incluyendo servicios de mantención. El camión por considerar es el equipo de 60 toneladas de capacidad. Para Komatsu puede ser atractivo participar en este segmento, pero en el mediano/largo plazo, ya que en el corto plazo es necesario destinar recursos y esfuerzos a otros equipos (ver Tabla 59).
- Con respecto a equipos de desarrollo como jumbos de avance y empernadores, se menciona que El Teniente externaliza las operaciones de desarrollo, por lo que el cliente objetivo para Komatsu en este tipo de equipos son las empresas contratistas de obras y construcciones mineras (como Zublin, Astaldi, Geovita, Mas Errázuriz, entre otras).
- La flota de equipos de perforación propios de División El Teniente, en el corto plazo, tiene una mayor cantidad de jumbos de producción. En el mediano plazo, la cantidad de equipos operativos entre jumbos de reducción secundaria y jumbos de producción será la misma (10 equipos) (ver Tabla 60).
- El Teniente tiene un importante parque de martillos operando en modo telecomando (cerca de 160 equipos, ver Tabla 61). Se puede apreciar una oportunidad de negocio para Komatsu, ya que la empresa tiene una de las mejores tecnologías de perforación con los martillos Montabert y los martillos hidráulicos de excavadoras de superficie y el segmento de mercado en específico representa una suma aproximada de 50 [MUSD] sólo en El Teniente. Esta integración no representa un mayor esfuerzo para Komatsu.
- Del modelo de negocios se puede destacar que El Teniente considera a las empresas proveedoras como “Socios clave”, ya que permiten cumplir su propuesta de valor condicionando directamente la producción de la mina. De esta manera, los productos que debe suministrar Komatsu a la faena minera deben ser de la mayor calidad con servicios Post venta que permita asesorar al cliente adecuadamente.
- Se destaca el fuerte compromiso de la División con el proceso de electromovilidad, tanto en vehículos logísticos, de apoyo y de producción. En equipos LHD las tendencias son: para H1(2020-2022) equipos híbridos, para H2 (2023- 2025) equipos

a baterías y para H3 (2026-2030) equipos a hidrógeno. Para jumbos de avance, en el período H1 se está considerando disponer de equipos eléctricos a baterías. Con respecto a camiones UG, es importante destacar que para el largo plazo los camiones necesarios deben ser eléctricos a baterías o a hidrógeno.

- Para División El Teniente, la automatización de las operaciones es uno de los pilares fundamentales considerado el salto disruptivo que requieren y que están haciendo realidad. Se tienen distintos proyectos a escala de pilotaje o industrial, donde se destacan el caso de los equipos LHD, camiones UG y martillos rompe roca. En equipos LHD las tendencias son: para H1 equipos semi autónomos y para H2 equipos autónomos. Para jumbos de avance, en el período H1 se está considerando disponer de equipos telecomandados y en H2 se consideran equipos semi autónomos. Con respecto a camiones UG, es importante destacar que, para el largo plazo, estos equipos deben ser autónomos.

CAPÍTULO VI: CONSTRUCCIÓN DE ROADMAP TECNOLÓGICO DE KOMATSU Y ANÁLISIS DE ESTRATÉGICO

6.1 Diseño del RoadMap tecnológico de Komatsu

Como se ha mencionado en secciones anteriores, un Roadmap tecnológico es una herramienta visual que proporciona una visión estratégica de alto nivel sobre el tema o foco de interés, que, para el caso particular de este estudio, son los cambios y desarrollos de nuevos equipos, tecnologías y procesos con las respectivas demandas de los mercados futuros a un período final de 10 años.

Se muestran diferentes dimensiones de la estrategia pudiendo determinar la posición actual de Komatsu en el mercado, donde se quiere llegar con los respectivos desafíos, necesidades y soluciones a considerar, para alcanzar el resultado esperado, que es posicionar a la empresa como OEM referente en el mercado de minería subterránea de roca dura.

El Roadmap se construye considerando el contexto de la industria minera (visiones, desafíos, necesidades y tecnologías) determinado en el Capítulo 3 (ver desde página 42), las respuestas de Komatsu a los desafíos de la industria en referencia al mercado de equipos mineros en Latinoamérica y en Chile mostradas en el Capítulo 4 (ver desde la página 119) y la caracterización del cliente, Codelco División El Teniente en el Capítulo 5 (ver desde página 175).

6.1.1 Estructura principal del Roadmap

La estructura del Roadmap se basa en modelo de desarrollo tecnológico de los tres horizontes (ver Figura 6 y Figura 7), donde se considera un Horizonte 1 o de innovaciones incrementales, Horizonte 2 o de mejoras importantes de los procesos existentes y de nuevas tecnologías y Horizonte 3 o cambio de dirección. Se considera también un caso base de referencia.

De esta manera, el Roadmap se configura de la siguiente manera:

- **Caso base (Pasado-2019):** Estado actual de Komatsu y la industria minera.

- **H1 (2020-2022), cambios incrementales:** Monitoreo en tiempo real, electrificación de equipos y masificación de procesos teleoperados y semi-autónomos.
- **H2 (2023-2025), estado medio:** Hacia la integración de los procesos mina y masificación de procesos autónomos.
- **H3 (2026-2030), estado final:** Minería full conectada e inteligente, full electrificada y automatizada.

Para dar cuenta de los equipos, procesos, tecnologías, sistemas, operaciones, entre otros, se considera ordenar el Roadmap de acuerdo con los siguientes núcleos:

- **Núcleos traccionantes:** NT1: Extracción de material, NT2: Acarreo de material y NT3: Desarrollo de túneles.
- **Núcleos habilitantes:** NH1: Energía, poder y sustentabilidad, NH2: Automatización de equipos, NH3: Procesos/Métodos mineros, NH4: Digitalización, NH5: Interoperabilidad, NH6: Monitoreo, sensorización y seguridad y NH7: Gestión del cambio y mantenimiento.

Donde los núcleos traccionantes muestran la proyección de equipos que Komatsu puede tener disponibles en el mercado en los distintos horizontes y los núcleos habilitantes muestran los procesos, tecnologías, estrategias, entre otros, que permitan disponer de los equipos en el determinado horizonte.

6.1.2 Roadmap tecnológico Komatsu de minería subterránea de roca dura con potencial aplicabilidad en Codelco División El Teniente (2020-2030)

El Roadmap, se puede visualizar en la siguiente figura desglosada:

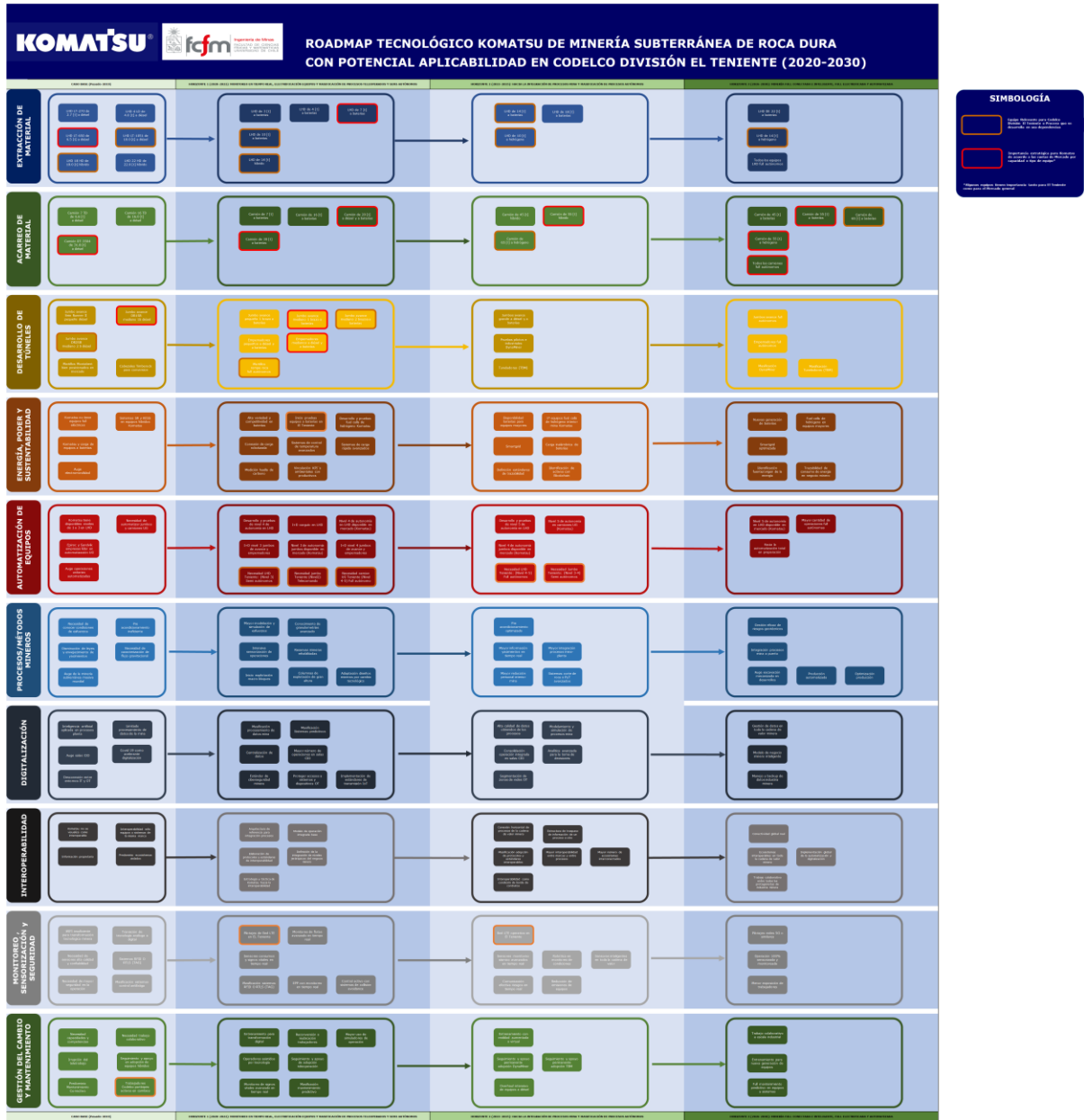


Figura 85 Roadmap tecnológico de Komatsu con potencial aplicabilidad en División El Teniente (2020-2030).

Elaboración propia.

EXTRACCIÓN DE MATERIAL

CASO BASE (PASADO-2019)

LHD LT-270 de 2.7 [t] a diésel

LHD 4 LD de 4.0 [t] a diésel

LHD de 3 [t] a baterías

LHD de 4 [t] a baterías

LHD de 7 [t] a baterías

H2 (2023-2025)

LHD de 14 [t] a baterías

LHD de 18 [t] a baterías

LHD de 18 [t] a baterías

H3 (2026-2030)

LHD DE 22 [t] a baterías

LHD LT-650 de 6.5 [t] a diésel

LHD LT-1051 de 10.0 [t] a diésel

LHD de 10 [t] a baterías

LHD de 10 [t] a hidrógeno

LHD de 14 [t] a hidrógeno

LHD de 18 [t] a hidrógeno

LHD de 22 [t] a hidrógeno

LHD 18 HD de 18.0 [t] híbrido

LHD 22 HD de 22.0 [t] híbrido

LHD de 14 [t] híbrido

Todos los equipos LHD full autónomos

ACARREO DE MATERIAL

CASO BASE (PASADO-2019)

Camión 7 TD de 6.6 [t] a diésel

Camión 16 TD de 16.0 [t] a diésel

H1 (2020-2023)

Camión de 7 [t] a baterías

Camión de 16 [t] a baterías

Camión de 20 [t] a diésel y a baterías

H2 (2023-2025)

Camión de 45 [t] híbrido

Camión de 55 [t] híbrido

H3 (2026-2030)

Camión de 45 [t] a baterías

Camión de 55 [t] a baterías

Camión de 65 [t] a baterías

Camión DT-3504 de 31.8 [t] a diésel

Camión de 30 [t] a baterías

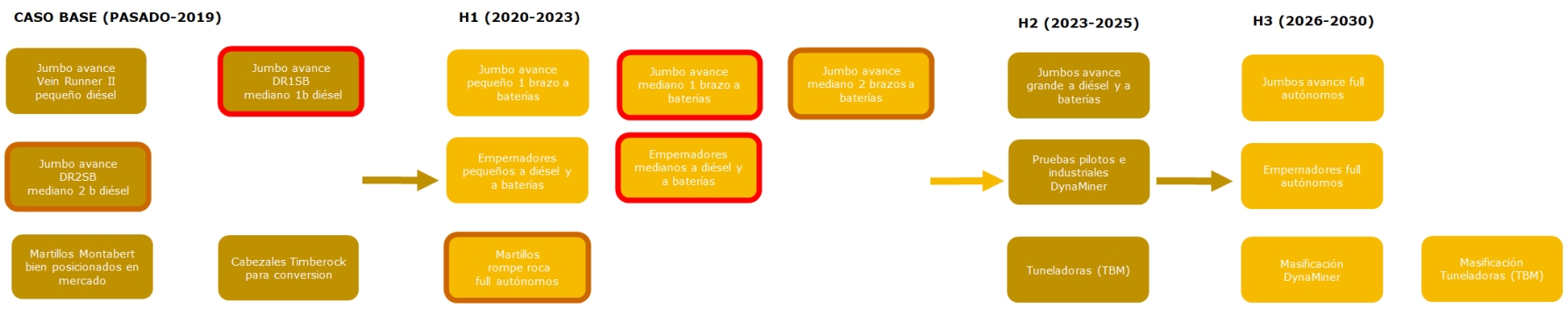
Camión de 65 [t] a hidrógeno

Camión de 45 [t] a hidrógeno

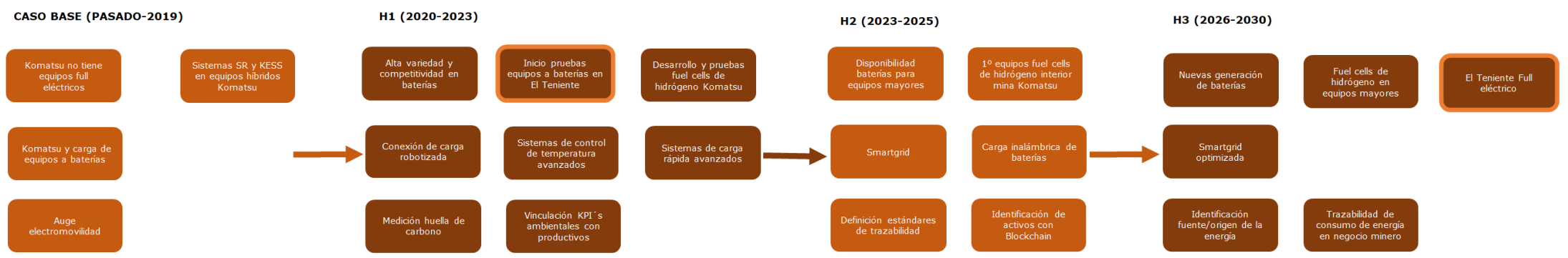
Camión de 55 [t] a hidrógeno

Todos los camiones full autónomos

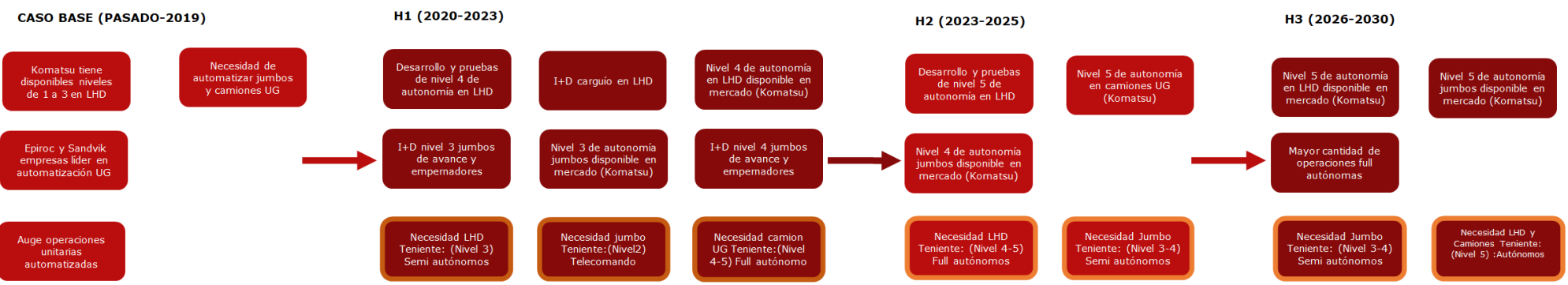
DESARROLLO DE TÚNELES



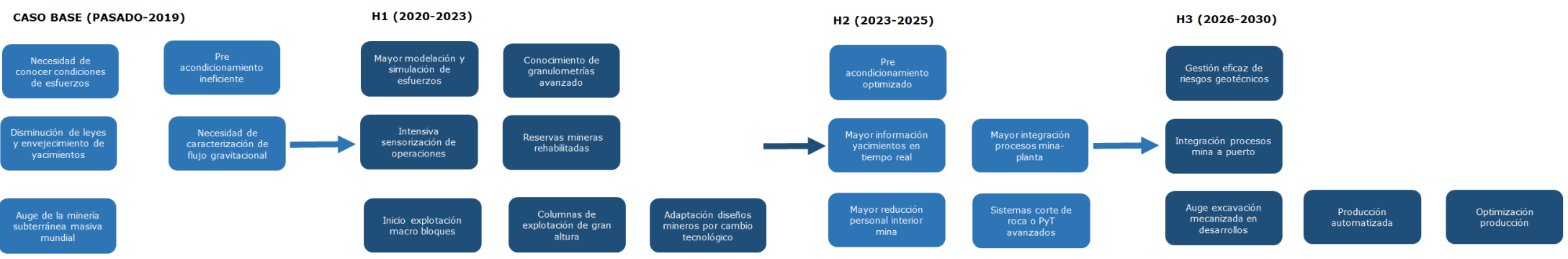
ENERGÍA, PODER Y SUSTENTABILIDAD



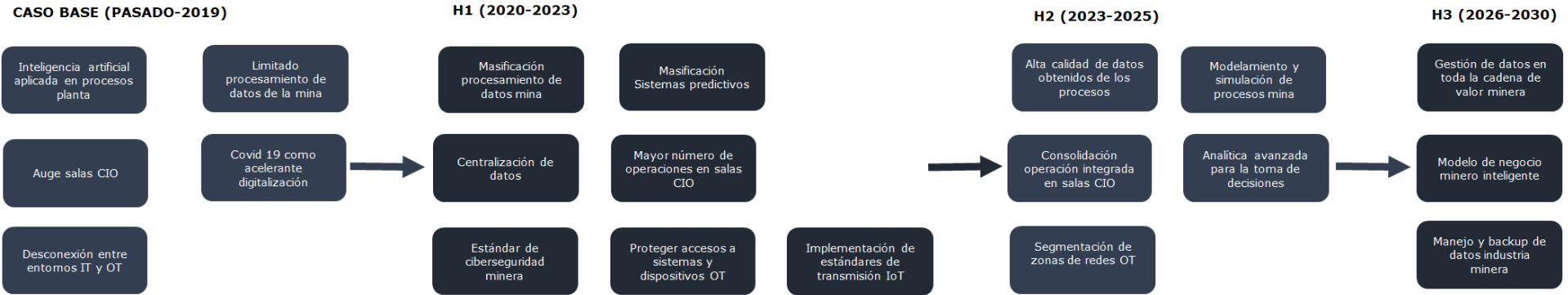
AUTOMATIZACIÓN DE EQUIPOS



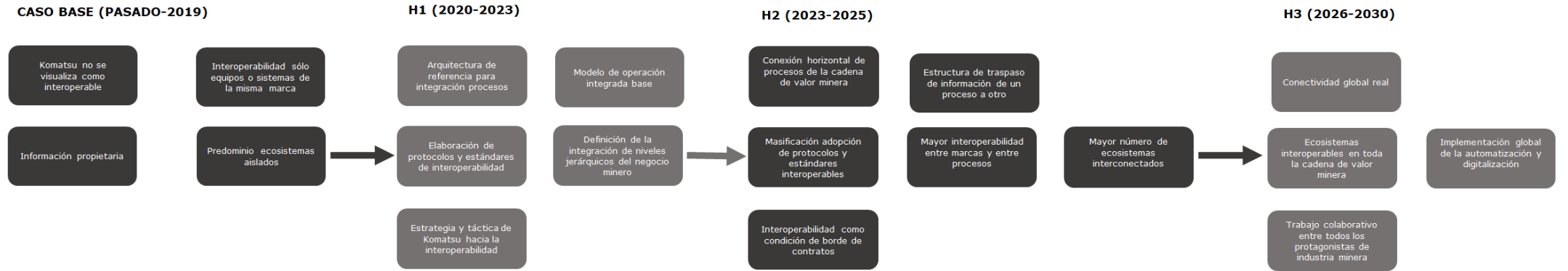
PROCESOS/MÉTODOS MINEROS



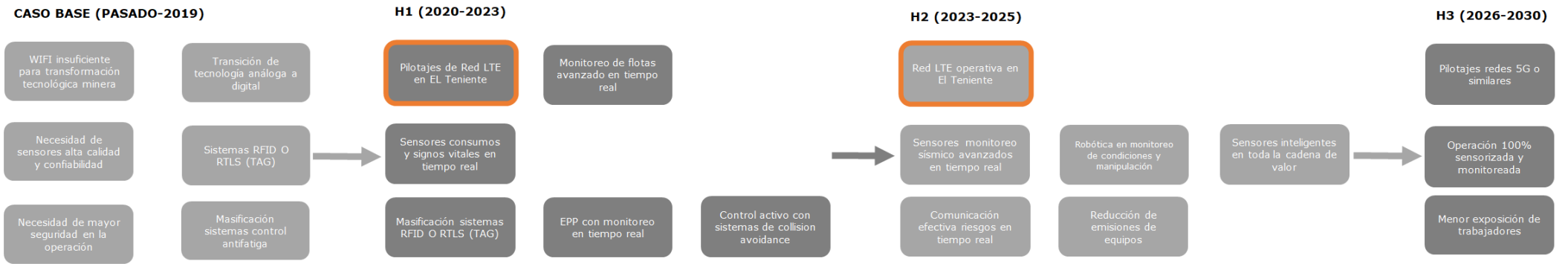
DIGITALIZACIÓN



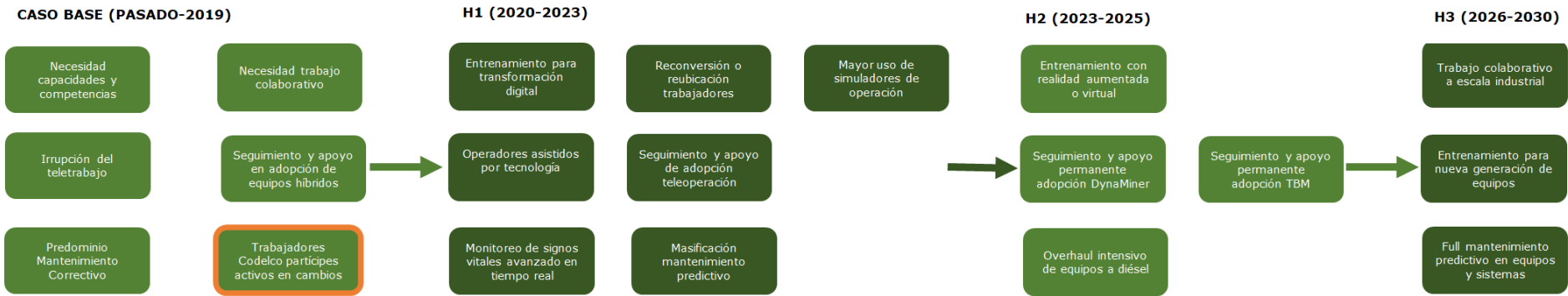
INTEROPERABILIDAD



**MONITOREO,
SENSORIZACIÓN Y
SEGURIDAD**



**GESTIÓN DEL CAMBIO
Y MANTENIMIENTO**



De la Figura 85 se puede destacar que los elementos presentes dan una configuración determinada a los distintos núcleos, generando estados futuros de la industria minera en el segmento subterráneo de roca dura.

Los detalles de los horizontes se mencionan en las siguientes secciones:

6.1.2.1 Horizonte 1 (2020-2022), innovaciones incrementales: Monitoreo en tiempo real, electrificación de equipos y masificación de procesos teleoperados y semi-autónomos.

Este primer horizonte desarrolla el core business de Komatsu en minería subterránea de roca dura, que tiene como principal objetivo extender y aumentar la cuota de mercado que tiene actualmente la empresa en este segmento, que en Latinoamérica es alrededor de un 7% (159 equipos de 2,242 totales) y en Chile es de un 6% (36 equipos de 546 totales, ver Figura 46), considerando entre el 2016 y el 2019.

El horizonte tiene su inicio en el estado actual de la empresa y finaliza en los denominados “cambios incrementales”.

Las tecnologías que se visualizan que pueden entregar mayores ganancias son los equipos del tipo híbrido y los equipos a baterías, por el auge de la electromovilidad. En particular, para el caso de estudio de El Teniente, se tiene que considerar que los equipos de interés en este horizonte temporal son los LHD híbridos, los jumbos a baterías y los camiones UG híbridos (ya sea en modo prueba industrial o masificación de la utilización de una tecnología en particular en la operación). Como Komatsu ya tiene la experiencia con los equipos LHD híbridos de 18 y 22 toneladas, los nuevos equipos de este tipo deben ser más eficientes, maximizando los beneficios esperados para el cliente. De esta manera se amplía el concepto de híbrido al equipo LHD de 14 toneladas, se concreta la conversión a baterías de los LHD de menores a medianas capacidades (equipos de 3, 4, 7 y 10 toneladas).

Se destaca que los equipos LHD más relevantes para El Teniente en este período son los de 10 toneladas.

En referencia a los camiones UG, se considera la conversión a baterías y disponer de un nuevo modelo para el segmento de 18-25 toneladas.

En referencia a equipos de perforación, se considera la electrificación de los equipos pequeños (de un brazo) y medianos (de uno y dos brazos), la disponibilidad de emperradores (tanto a diésel como a baterías) y martillos rompe roca full autónomos.

Se conceptualizan los desarrollos claves en I+D, principalmente en automatización, y se determinan los recursos para abordar los desafíos conocidos utilizando tecnologías y equipos existentes y probados, donde se destaca la necesidad de sensores de alta calidad y confiabilidad para poder realizar el monitoreo en tiempo real de las operaciones mineras. También se determina y da a conocer la estrategia y táctica que tiene Komatsu hacia la interoperabilidad.

El estado final que se alcanza es el “estado de cambios incrementales”, donde todos los equipos, tecnologías y procesos desarrollados permiten llegar a un estado de monitoreo en tiempo real, con algunos procesos automatizados, principalmente a nivel de teleoperación o semi autonomía, iniciando el camino de electrificación de las operaciones mina, con niveles básicos de interoperabilidad en los procesos y equipos, masificando el procesamiento de datos con la respectiva valoración de los datos obtenidos y la reconversión o entrenamiento intensivo, tanto de los operadores como de los ejecutivos.

En resumen, el portafolio de equipos y los habilitadores mencionados en este horizonte responde a la necesidad que tiene la industria minera de tener a disposición equipos que respondan los requerimientos de electrificación y el monitoreo en tiempo real considerando los siguientes KPI:

- **Mayor seguridad (5-10%):** Disminuye la exposición de los operadores a gases peligrosos para la salud, menor ruido y menor liberación de calor (teleoperación, semi autonomía, robotización), se comienza la elaboración de estándares de ciberseguridad e interoperabilidad. Mayor entrenamiento de los operadores.
- **Mayor productividad (2-5%):** Por disponer de equipos más eficientes, mayor conocimiento de los procesos (mayor valor de los datos obtenidos), trabajadores más productivos por asistencia tecnológica, mayores disponibilidades de los equipos por masificación de mantenimiento predictivo.
- **Reducción de capex (5-10%):** Baterías menos costosas, menor necesidad de desarrollos mina (por menor ventilación principalmente).

- **Reducción opex (5-10%):** Menores requerimientos de ventilación, menores consumos de energía/combustible, operación más homogénea por utilización de procesos semi autónomos o autónomos.
- **Operaciones más sustentables (5-10%):** Reducción huella de carbono, reducción del impacto al entorno, reducción de emisiones y de calor. Mayor eficiencia energética (impacto generado por los equipos eléctricos).
- **Mayor continuidad operacional (2-5%):** Por sensorización de alta calidad, monitoreo en tiempo real y mejor infraestructura de comunicaciones. El sistema basal de interoperabilidad permite mayor interacción entre los distintos equipos y operadores. El mantenimiento predictivo mejora la disponibilidad física de los equipos.

6.1.2.2 Horizonte 2 (2023-2025), estado medio: Hacia la integración de los procesos mina y masificación de procesos autónomos.

Este segundo horizonte considera el desarrollo de oportunidades que se consideran emergentes y con medianos a altos impactos, pero con altas inversiones por parte de Komatsu, como lo es el concepto de minería continua con el equipo DynaMiner y desarrollos con mayores productividades por medio tuneladoras con mayores flexibilidades operacionales.

El horizonte tiene su inicio en el “estado incremental” y finaliza en los denominado “estado medio” o estado hacia la integración y la autonomía en las operaciones mina.

Las tecnologías que se visualizan que pueden entregar mayores ganancias, considerando el caso de El Teniente y los principales equipos a nivel global, son nuevamente los equipos del tipo híbridos y equipos a baterías, por el inicio de la consolidación de la electromovilidad, pero también se considera la irrupción de la tecnología de equipos a hidrógeno, particularmente en los camiones de mayores tonelajes (65 toneladas) y el equipo LHD de 10 toneladas (considerado por ser el equipo LHD más utilizado a nivel mundial).

Con respecto a los equipos para desarrollo de túneles, se completa el portafolio de jumbos de avance teniendo a disposición del mercado equipos grandes a diésel y a baterías y se comienza a fortalecer las líneas de producción de los equipos DynaMiner y tuneleras.

En referencia a la autonomía de equipos, se espera tener disponible en el mercado el nivel 5 de autonomía en camiones UG, el nivel 4 en jumbos y estar en desarrollo y pruebas del nivel 5 de autonomía en equipos LHD.

Con respecto a los demás núcleos habilitantes, se destaca que la sensorización, digitalización, la gestión del cambio, la interoperabilidad, generan una minería semi-conectada, donde algunos procesos y operaciones mineras se encuentran integradas, masificando de esta manera la automatización.

El estado final que se alcanza en este período considera que algunos equipos, tecnologías y procesos desarrollados permiten una semi conexión con el resto de la cadena de valor minera, con masificación de los procesos automatizados, principalmente a nivel de teleoperación, semi autonomía y full autonomía, con niveles básicos a medios de interoperabilidad en los procesos y equipos, con el procesamiento de datos consolidado.

En resumen, el portafolio de equipos y los habilitadores mencionados en este horizonte responde a la necesidad de completar la electrificación de equipos medianos y grandes, el lanzamiento de camiones de alto tonelaje UG y el ingreso en el mercado de equipos de excavación mecanizada impulsados por un proceso Technology push como el DynaMiner y las tuneladoras, considerando el nivel de integración de las operaciones que se espera tener en la industria minera con los siguientes impactos:

- **Mayor seguridad (15-50%):** Disminuye la exposición de los operadores por masificación de automatización (semi autonomía, autonomía, robotización), disponibilidad de sensores de monitoreo sísmico avanzados en tiempo real, mayor utilización de robots para labores peligrosas, reducción de emisiones peligrosas, comunicación efectiva de riesgos, técnica de preacondicionamiento optimizada.
- **Mayor productividad (10-30%):** Por disponer de equipos más eficientes, mayor conocimiento de los procesos que se encuentran parcialmente conectados, herramientas de analítica avanzada para la toma de decisiones, trabajadores más productivos por asistencia tecnológica y entrenamiento más efectivo, mayores disponibilidades de los equipos por masificación de mantenimiento predictivo, carga de equipos eléctricos más eficiente (más horas operativas).

- **Reducción de capex (15-30%):** Nuevamente se considera disponer de baterías menos costosas, menor necesidad de desarrollos mina (por menor ventilación principalmente). La analítica avanzada permite generar una planificación y diseño mina más eficiente. Menor fortificación por perforación y tronadura más eficiente y la irrupción de las tuneleras y DynaMiner o similares.
- **Reducción opex (15-30%):** Menores requerimientos de ventilación, menores consumos de energía/combustible, operación más homogénea por utilización de procesos semi autónomos o autónomos. Mayor eficiencia en la utilización de los recursos por mayor valor de los datos. Mayor utilización de modelamiento y simulación en toda la cadena de valor.
- **Operaciones más sustentables (20-40%):** Reducción huella de carbono, reducción del impacto al entorno, reducción de emisiones y de calor por masificación de utilización de equipos eléctricos, mayor eficiencia energética por implementación de Smartgrid.
- **Mayor continuidad operacional (15-30%):** Disponibilidad de sensores de alta calidad en tiempo real, mayor interoperabilidad que permite la interacción sin interrupciones. Mejores redes de comunicaciones operativas. Equipos con mayores disponibilidades por mantenimiento predictivo.

6.1.2.3 Horizonte 3 (2026-2030), estado Final: Minería full conectada e inteligente, electrificada y automatizada.

Este tercer horizonte considera la noción de un crecimiento rentable en el futuro o el largo plazo. El horizonte tiene su inicio en el “estado medio” llegando al denominado “estado final”.

Las tecnologías que se visualizan que pueden entregar mayores ganancias, considerando el caso de El Teniente y los principales equipos a nivel global, son nuevamente los equipos del tipo híbridos, los equipos a baterías y los equipos a hidrógeno (estos últimos comienzan a tener un protagonismo importante sobre todo en equipos de mayores tonelajes), por la consolidación de la electromovilidad (recordar que El Teniente espera tener todos sus equipos electrificados al 2030), la completa automatización de los distintos equipos, tanto de extracción y acarreo de material y

desarrollo de túneles. Se destaca la consolidación de las tuneleras y el DynaMiner (o equipos similares que apunten al desarrollo de una minería continua).

Con respecto a los demás núcleos habilitantes, se destaca que se finaliza con una minería con un modelo de negocios inteligente, con las operaciones 100% sensorizadas y monitoreadas, con conectividad global de los equipos y procesos en toda la cadena de valor, donde los trabajadores están menos expuestos y se aplica mantenimiento full predictivo en equipos y sistemas. La automatización de los distintos procesos pasa a un estado de optimización.

En resumen, el portafolio de equipos y los habilitadores mencionados en este horizonte responde a la necesidad que tiene el mercado de tener a disposición equipos full autónomos, interoperables completamente, con camiones UG de alto tonelaje cero emisiones de gases contaminantes y excavación mecanizada con los siguientes impactos:

- **Mayor seguridad (80-100%):** Disminuye la exposición de los operadores por consolidación de automatización (semi autonomía, autonomía, robotización) y auge de la excavación mecanizada disminuyendo operaciones de tronadura principalmente, operaciones 100% sensorizadas y monitoreadas con gestión eficiente de los riesgos geotécnicos, dentro de un contexto de modelo de negocios inteligente. Se destaca también la disponibilidad de sistemas de ciberseguridad avanzados, que protegen tanto las tecnologías informativas como las operativas.
- **Mayor productividad (70-90%):** Por disponer de equipos más eficientes, considerando principalmente equipos de excavación mecanizada como las tuneleras o el DynaMiner, mayor conocimiento de los procesos que se encuentran totalmente conectados (contexto de modelo de negocios inteligente), herramientas de analítica avanzada para la toma de decisiones en toda la cadena de valor, trabajadores más productivos por asistencia tecnológica y entrenamiento más efectivo, mayores disponibilidades de los equipos por consolidación del mantenimiento predictivo, carga de equipos eléctricos más eficiente con nuevas generaciones de baterías (más horas operativas).
- **Reducción de capex (70-90%):** Nuevamente se considera disponer de baterías menos costosas, menor necesidad de desarrollos mina, que en el caso de División El

Teniente considera una mina full eléctrica al 2030 (por menor ventilación principalmente). La analítica avanzada permite generar una planificación y diseño mina más eficiente. Menor fortificación por perforación y tronadura más eficiente y la consolidación de las tuneleras y DynaMiner o similares.

- **Reducción opex (70-90%):** Menores requerimientos de ventilación (mina full eléctrica), menores consumos y uso más eficiente de energía/combustible, operación más homogénea por utilización de procesos semi autónomos o autónomos (logística más sencilla). Alta eficiencia en la utilización de los recursos por mayor valor de los datos. Mayor utilización de modelamiento y simulación en toda la cadena de valor.
- **Operaciones más sustentables (80-100%):** Reducción huella de carbono, reducción del impacto al entorno, reducción de emisiones y de calor por consolidación de equipos eléctricos, mayor eficiencia energética por implementación de Smartgrid optimizada y la mayor trazabilidad del consumo de energía, que permite usar eficiente y responsablemente la energía que se tiene a disposición.
- **Mayor continuidad operacional (70-100%):** Disponibilidad de sensores y monitoreo de alta calidad en tiempo real, altos niveles interoperabilidad entre marcas y entre procesos, que permite la interacción sin interrupciones, entregando mayor valor a los datos obtenidos. Mejores redes de comunicaciones operativas y pilotajes de las siguientes generaciones (5G o similares). Equipos con mayores disponibilidades por mantenimiento predictivo consolidado.

6.2 Análisis estratégico

6.2.1 Matriz de esfuerzo/impacto

Con motivo de priorizar y focalizar recursos de Komatsu y apoyar la estrategia reflejada en el Roadmap tecnológico de la Figura 85, se construyen matrices impacto/esfuerzo, donde el impacto se relaciona directamente con el nivel de beneficios que se pueden lograr y el esfuerzo con la dificultad de implementación o habilitación. La determinación de los niveles de esfuerzo/impacto se hace en base a las referencias bibliográficas y las entrevistas realizadas a expertos principalmente (Alto, medio o bajo).

Los principales supuestos que se consideraron para la elaboración de las respectivas matrices son los siguientes:

- Se consideran para el análisis los procesos y/o actividades visualizados en el Capítulo 3 (ver desde página 42) como los principales directores de la industria; equipos eléctricos (diferenciando entre equipos híbridos, eléctricos a batería e hidrógeno), transformación digital, minería continua, interoperabilidad, monitoreo y sensorización, minería subterránea masiva y gestión del cambio.
- Las variables clave para las matrices esfuerzo/impacto son la seguridad, productividad, capex, opex, sustentabilidad y continuidad operacional.
- Para determinar la dificultad de implementación (esfuerzo), se considera los recursos que deben ser empleados, el nivel de maduración de la tecnología/proceso/actividad, la recurrencia de aplicación actual en operaciones mineras, las visiones de minería consultadas en la revisión bibliográfica y entrevista a expertos (la dificultad que ellos visualizan) y la información mostrada en el Roadmap.
- Para determinar el impacto en:
 - a) Seguridad: Se considera la exposición de los trabajadores, el manejo de sustancias peligrosas, protección de los trabajadores/equipos/infraestructura, reducción/previsualización de las condiciones peligrosas del ambiente.
 - b) Productividad: Se considera mejoría en producción (toneladas hombre/equipo diario), incrementos en desarrollo (avances metros por día) y habilitación de mejoras de producción.
 - c)Capex: Se considera la magnitud de capital para disponer de los equipos/infraestructura, necesidad de otros procesos/tecnología para habilitar, uso de sistemas convencionales o tecnología consolidada en la industria, requerimientos de I+D+i, reducción/aumento de los desarrollos mina.
 - d)Opex: Se considera reducción/aumento de uso de determinados insumos o requerimientos de los procesos mineros (combustible, ventilación), mejora de los rendimientos.
 - e) Sustentabilidad: Se considera la huella de carbono, emisión de sustancias contaminantes, eficiencia energética, cultura organizacional.
 - f) Continuidad operacional: Se considera el incremento de las horas operativas efectivas, la interacción entre los equipos/procesos/infraestructura/personas.

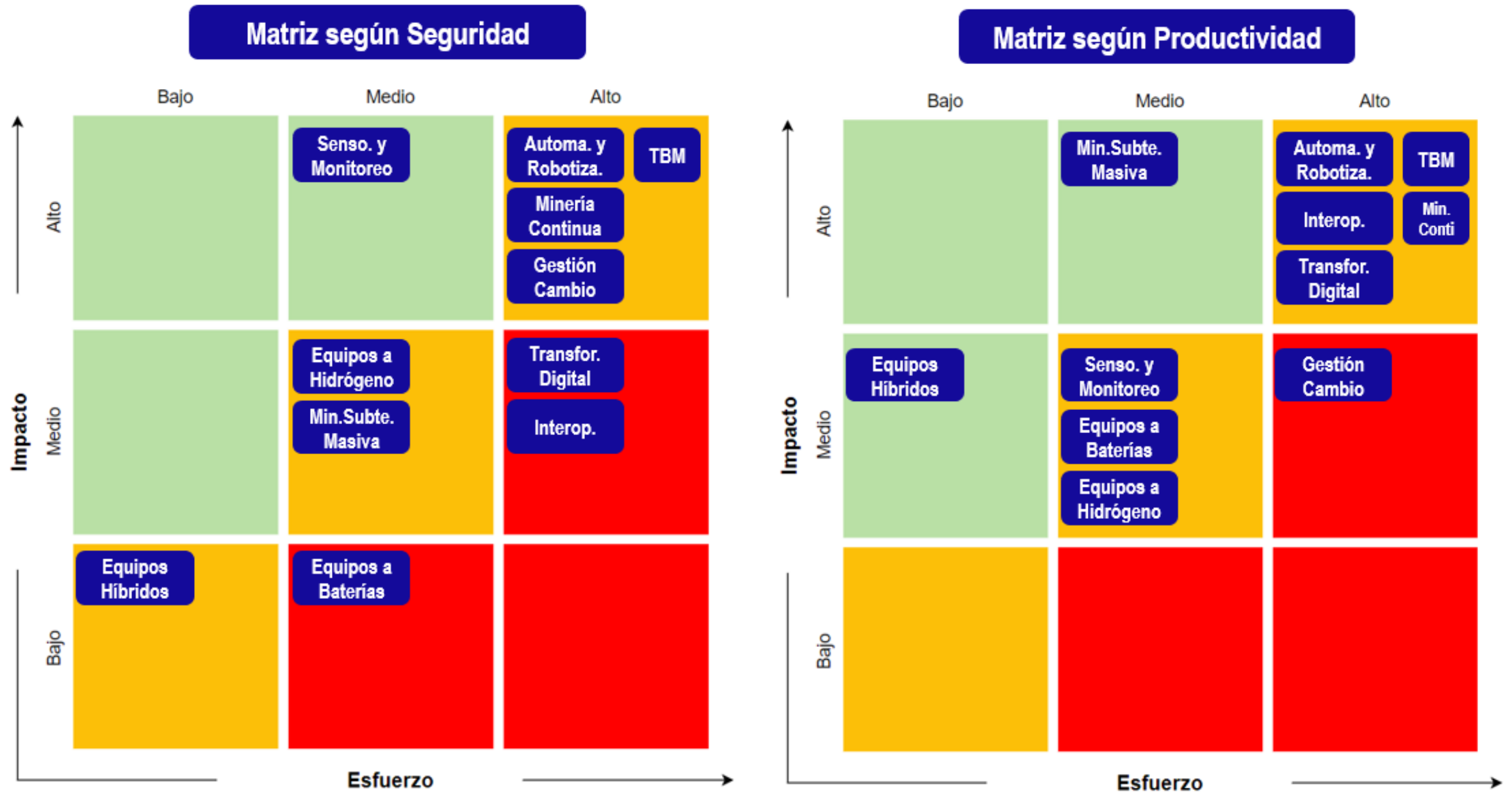


Figura 86 Matrices impacto y esfuerzo de Seguridad y Productividad.

Elaboración Propia.

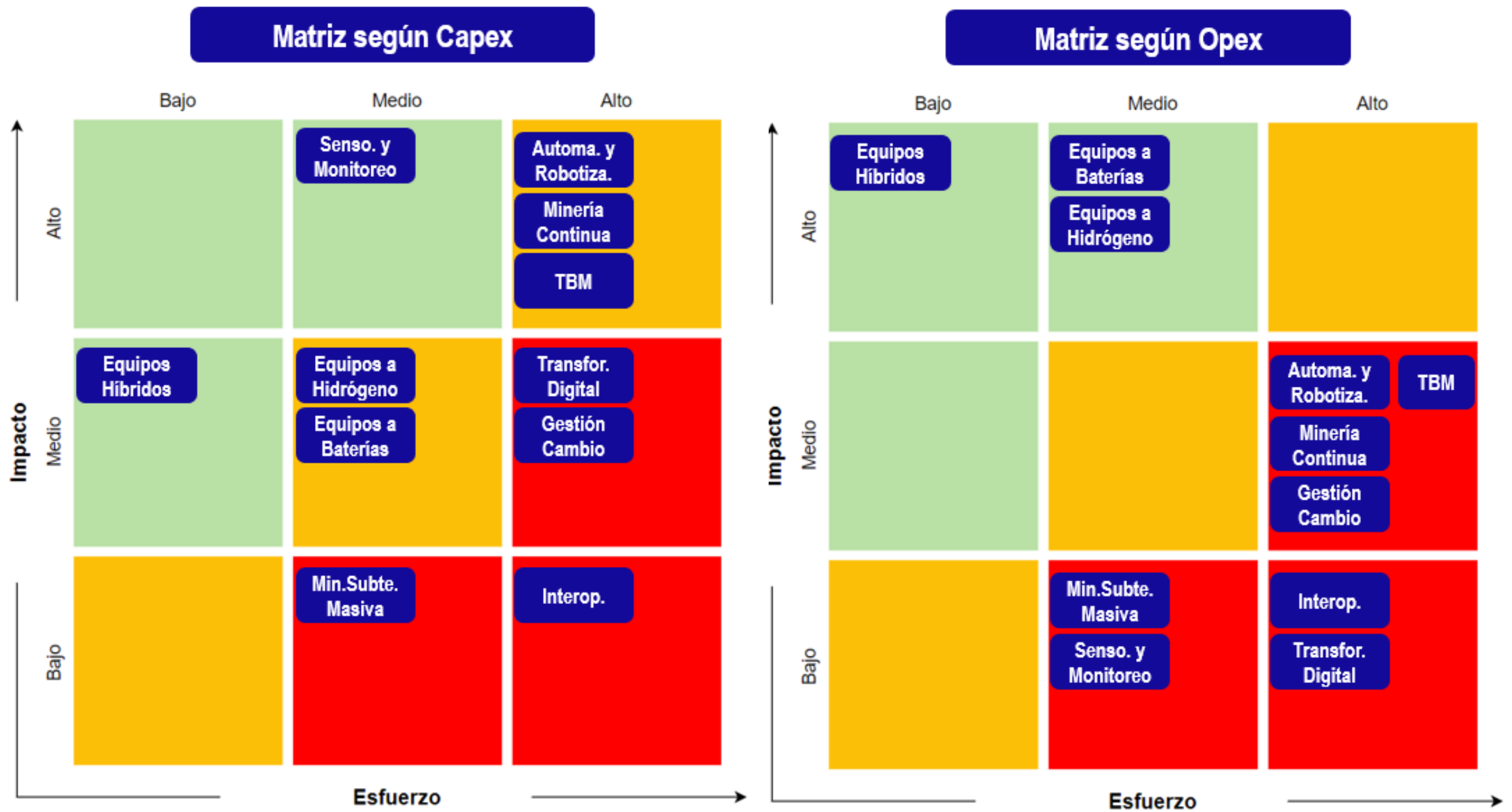
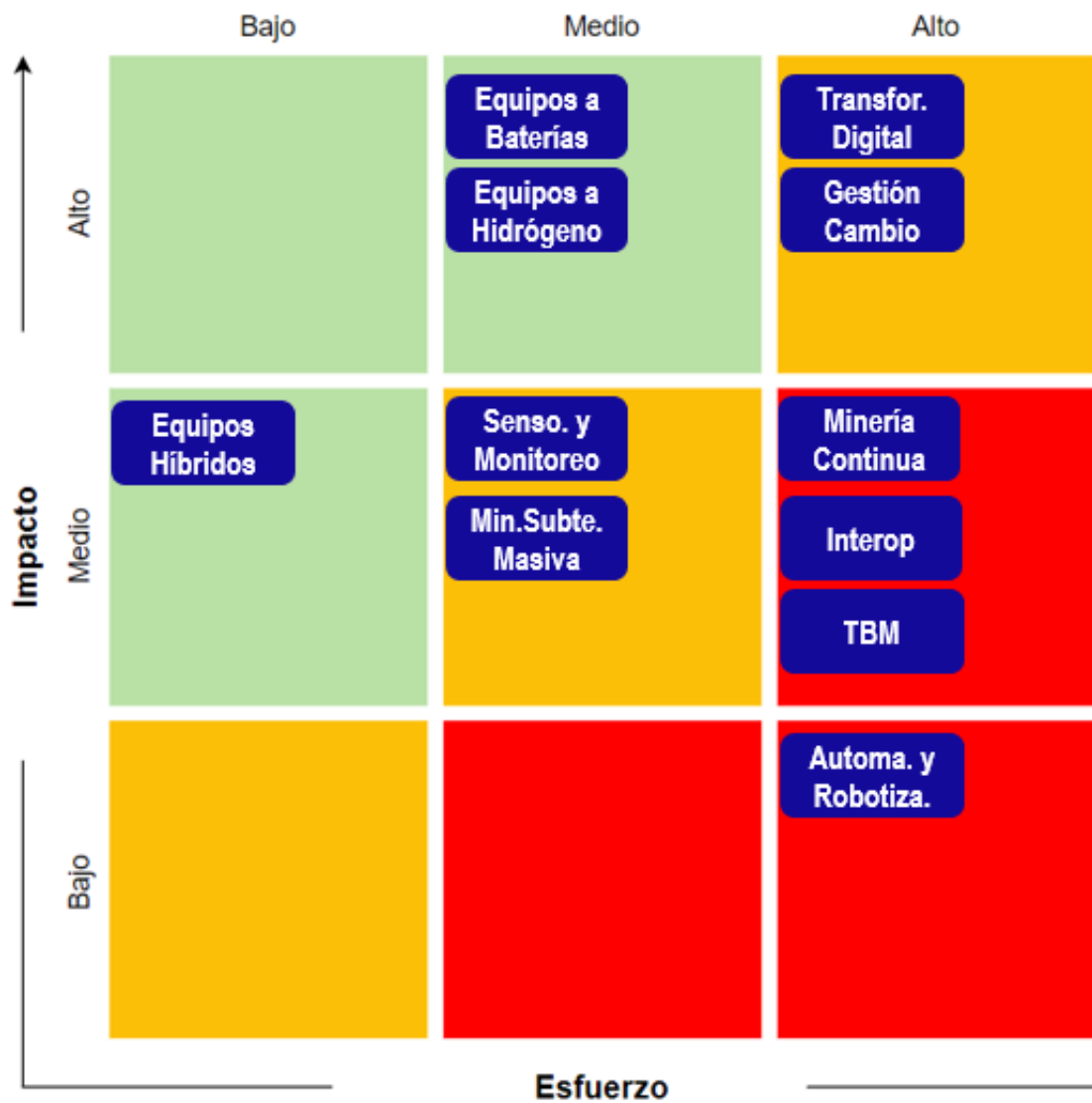


Figura 87 Matrices impacto y esfuerzo de capex y opex.

Elaboración propia.

Matriz según Sustentabilidad



Matriz según Continuidad Operacional

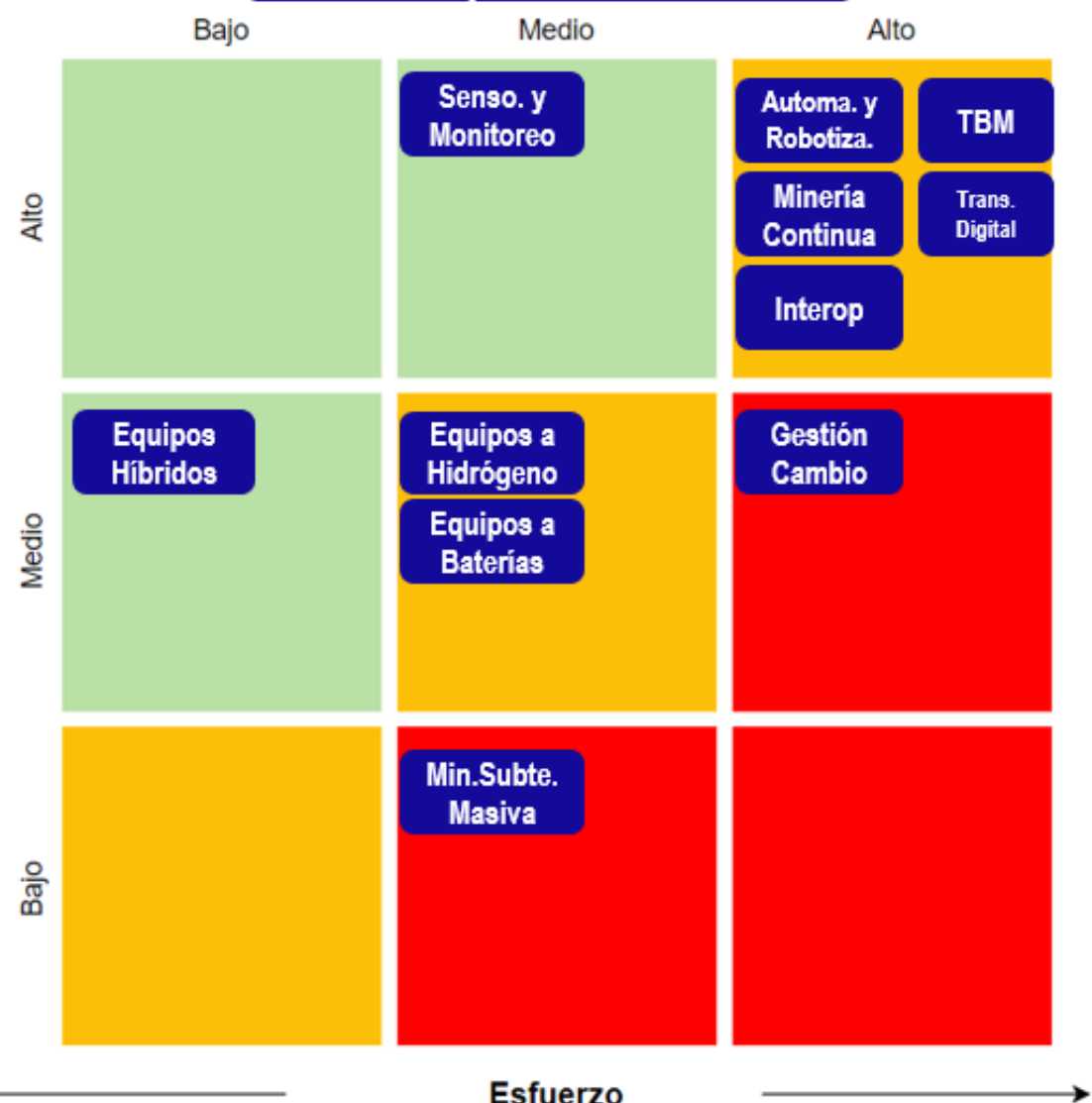


Figura 88 Matrices impacto y esfuerzo de Sustentabilidad y Continuidad Operacional.

Elaboración Propia.

Considerando la información mostrada en las Figuras 86, 87 y 88 y el enfoque que tiene el presente trabajo con respecto a los portafolios de equipos, se puede destacar:

- **Equipos híbridos (Cambio incremental-Inversión atractiva-Corto plazo):** Para aplicar esta tecnología se requiere un esfuerzo bajo, principalmente porque la tecnología que dispone Komatsu posee un alto nivel de madurez, no cambia la lógica operativa y mantiene la flexibilidad operacional de los equipos a diésel implementada tradicionalmente en la industria. Se considera dentro de inversiones atractivas, por lo criterios de productividad, capex, opex, sustentabilidad y continuidad operacional (5 de los 6 criterios). Esta tecnología tiene rentabilidad en el corto plazo.
- **Equipos eléctricos a baterías (Cambio incremental- Inversión atractiva o selectiva-corto/mediano plazo):** Para esta tecnología se tienen 2 escenarios; un primer escenario (considerado el caso base) donde el esfuerzo requerido para la implementación es medio, principalmente por la madurez de la tecnología que es media-alta y la necesidad de adaptar la infraestructura de las faenas mineras que tradicionalmente utilizan el diésel como el combustible base para los equipos. En este escenario, los equipos a baterías se consideran una inversión selectiva. El segundo escenario considera un esfuerzo bajo, principalmente por la madurez tecnológica (media-alta) y que la faena minera en particular tiene considerado dentro de su planificación estratégica el avanzar hacia una mina full eléctrica, que viene siendo el caso de División El Teniente (en un período de 10 años). De esta manera, se tiene un segundo escenario donde los equipos eléctricos a baterías son una inversión atractiva por la misma magnitud que los equipos híbridos, pero con un impacto mayor en el criterio de sustentabilidad. Esta tecnología tiene rentabilidad en el corto-mediano plazo.
- **Equipos a hidrógeno (Cambio incremental-Inversión atractiva o selectiva-Mediano plazo):** Tiene las mismas consideraciones (escenarios) que los equipos eléctricos a baterías, pero se tiene que considerar que el nivel de madurez de la tecnología es bajo-medio en general en el mercado, pero en Komatsu es media-alta y que el criterio de seguridad tiene un impacto medio, pero en forma negativa, ya que la tecnología a hidrógeno podría tener mayores probabilidades de generar incendios (ver tecnología a hidrógeno en página 88). Esta tecnología tiene rentabilidad en el mediano plazo.

- **Tuneladoras (Quiebre tecnológico-Inversión selectiva-Largo plazo):** Para aplicar esta tecnología se requiere un esfuerzo alto, principalmente porque la tecnología requiere un alto nivel de especificidad con respecto a la mina en particular y el método mecanizado en sí, lo que implica un alto nivel de inversión tanto para el OEM como la compañía minera, cambia la lógica operativa tradicional de los desarrollos mina cambiando las operaciones unitarias de perforación, tronadura, ventilación, fortificación, la interacción de los equipos y representa un fuerte cambio organizacional. Se considera dentro del grupo de las inversiones selectivas, donde los principales criterios de alto impacto son seguridad, productividad y continuidad operacional (3 de los 6 criterios). Esta tecnología tiene rentabilidad en el largo plazo y se considera clave la planificación y ejecución minuciosa (un mala planificación o plan de ejecución puede representar grandes pérdidas).
- **Sistemas de minería continua (Quiebre tecnológico-Inversión selectiva-Largo plazo):** Para aplicar esta tecnología se requiere un esfuerzo alto, principalmente por los altos niveles de inversión tanto de los OEM como las compañías mineras, porque la tecnología cambia la lógica operativa tradicional de los desarrollos mina cambiando las operaciones unitarias de perforación, tronadura, ventilación, fortificación, la interacción de los equipos y representa un fuerte cambio organizacional. Se considera dentro del grupo de las inversiones selectivas, donde los principales criterios de alto impacto son seguridad, productividad y continuidad operacional (3 de los 6 criterios). Esta tecnología tiene rentabilidad en el largo plazo y se considera clave la planificación y ejecución minuciosa.
- **Automatización y robótica (Quiebre tecnológico-Inversión selectiva-Largo plazo):** Para aplicar esta tecnología a nivel global en una faena minera se requiere un esfuerzo alto, principalmente por los altos niveles de inversión para las compañías mineras por temas de diseño mina y disponer de la infraestructura y dispositivos acorde a las necesidades, porque la tecnología cambia la lógica operativa tradicional con un operador a bordo de los equipos, representando un fuerte cambio organizacional. Se considera dentro del grupo de las inversiones selectivas, donde los principales criterios de alto impacto son seguridad, productividad y continuidad operacional (3 de los 6 criterios). Esta tecnología tiene rentabilidad en el largo plazo y se considera clave la planificación y ejecución minuciosa.

Los detalles de los análisis de impacto de las distintas tecnologías o procesos, considerando también los habilitadores de los equipos (transformación digital, interoperabilidad, sensorización y monitoreo, masificación de minería subterránea y gestión del cambio) se pueden visualizar en la sección Anexos D en la Tabla 70 y en la Tabla 71.

También se puede destacar que los resultados obtenidos en las matrices tienen una estrecha relación con los resultados mostrados en el Roadmap tecnológico., apoyando de esta manera la estrategia planteada en el Roadmap.

6.2.2 Fuerzas de Porter

Para analizar el entorno competitivo en la minería subterránea de roca dura de Chile donde está inmerso Komatsu, se desarrollan las cinco Fuerzas de Porter.

Como generalidades del mercado de equipos mineros se tiene que las compañías mineras y los proveedores, sean OEM u OTM, operan de forma independiente entre sí. De esta manera, uno de los pilares más importantes para los proveedores es constituirse como uno de los principales socios estratégicos de las compañías mineras, teniendo en consideración permanente, los incrementos de eficiencia en las operaciones, entregando soluciones que respondan a los requerimientos de los clientes.

La manera básica en que operan compañías mineras y proveedores es por la compra de flotas de equipos por parte de las compañías mineras o licitaciones de equipos y servicios. De esta forma, los compromisos involucran relaciones de mediano/largo plazo, muchas veces altas magnitudes de inversión y con requerimientos específicos (ejemplo porcentajes específicos de disponibilidad física, de confiabilidad, consumos de combustible, interoperabilidad con los equipos o sistemas ya en operación, entre otros).

6.2.2.1 Poder de negociación de los clientes (Moderado)

Las principales faenas mineras en el segmento de minería subterránea de roca dura en Chile pertenecen a Codelco, donde El Teniente es considerada la faena subterránea más importante. Otras faenas importantes son Chuquicamata subterráneo, División Andina y División El Salvador. De esta manera, el principal cliente en minería subterránea chilena es justamente Codelco.

Codelco es una empresa autónoma que pertenece al Estado de Chile, que lidera la producción mundial de cobre, representando el 8% de la producción de cobre mina a nivel mundial, un 29% del cobre chileno y un 41% de la producción nacional de molibdeno de mina, con ventas totales de 12,525 [MUSD] y tiene las mayores reservas de cobre del mundo, constituyendo la ventaja competitiva más importante de la compañía en el largo plazo (Codelco-a, 2019).

En efecto, el cliente es de gran magnitud, tiene una influencia importante a nivel mundial en el mercado del cobre, tiene un alto potencial de ingresos y tiene la posibilidad de exigir a sus proveedores requerimientos específicos de alta calidad.

Sin embargo, en el segmento de minería subterránea, existe un pequeño grupo de grandes fabricantes de equipos mineros que dominan el mercado mundial, latinoamericano (cuotas de mercado: Sandvik 36%; Epiroc 27%, Caterpillar 19%, Komatsu 7% y 11% otras marcas) y chileno (Epiroc 48%, Sandvik 27%, Caterpillar 14%, Komatsu 6% y otras marcas 5%, ver Figura 46), restándole poder a la compañía minera.

Se destaca que Epiroc y Sandvik se disputan el liderazgo del mercado de minería subterránea de roca dura (Epiroc líder en Chile y Sandvik líder en Latinoamérica).

Komatsu debe prestar especial atención a los requerimientos específicos que disponga Codelco en los contratos, para poder aumentar su cuota de mercado. En particular, el tema de la interoperabilidad, tema que es impulsado por Codelco y BHP, puede representar una barrera importante para el crecimiento de Komatsu en el segmento en estudio.

Así el poder del cliente se considera moderado.

6.2.2.2 Poder de negociación de los proveedores (Moderado)

La relevancia de Codelco, junto al tamaño de sus necesidades genera una importante limitación del poder de negociación de los principales proveedores.

La inestabilidad o la incertidumbre generada por la situación de la pandemia de Covid 19, la disminución de leyes del material extraído, el envejecimiento de los yacimientos, la variación de los precios del cobre, generan períodos de austeridad, contención de costos, atraso de inversiones o suspensión de períodos de pruebas lo que puede impactar

directamente a los proveedores considerando suspensión de contratos o servicios, reduciendo así el margen de negociación de los proveedores.

Por otra parte, Codelco participa del proyecto “Desarrollo de Proveedores de Clase Mundial”, el cual busca generar al menos 250 proveedores de clase mundial hacia el año 2035, empresas que exporten tecnologías y servicios intensivos en conocimiento, que operen con estándares de excelencia internacional en Chile, para ser un real aporte al desarrollo económico de nuestro país y sus regiones. Así se disminuye el poder de negociación de los proveedores internacionales (Consejo Minero, 2018).

De esta manera, para Komatsu, se hace importante trabajar las confianzas con Codelco para aportar al negocio como cliente estratégico.

Sin embargo, los equipos con mayores estándares de calidad, con mayores servicios de soporte, con mayores confiabilidades, mayor trayectoria, son justamente los equipos del menor número de los proveedores consolidados en la industria minera y que la utilización de sus equipos y/o tecnologías implica mayor certeza de cumplimiento de los planes de producción de las compañías mineras.

Así, el poder de negociación de los proveedores se considera moderado.

6.2.2.3 Amenaza de los nuevos competidores entrantes (Baja)

El mercado de equipos mineros tiene muchas y grandes barreras de entrada, que dificultan el ingreso de nuevas empresas. Las principales barreras son los altos niveles de inversión necesarios para la fabricación de los equipos, el alto costo de tener una presencia global, la alta madurez tecnológica, especialización, la experiencia técnica de los trabajadores que fabrican los equipos y el prestigio/tradición de los principales proveedores, que son un grupo reducido. Estas empresas están integradas verticalmente y compiten en mercados globales.

Sin embargo, en los últimos años han ingresado al mercado chileno equipos de origen Chino, que tienen como principal característica el tener en promedio un precio de mercado 20% menor (4 equipos LHD marca Fambition en El Teniente y en El Salvador), lo que abre la posibilidad de aumentar la amenaza de nuevos competidores (sobre todo

equipos chinos) si estos equipos logran buenos rendimientos (en la actualidad de encuentran en fase de prueba).

Komatsu se considera un nuevo competidor entrante en el segmento de minería subterránea de roca dura, pero tiene características que lo convierten en un caso especial:

- De acuerdo con Cochilco (2019), Komatsu es considerada la empresa líder en equipos de extracción y acarreo en Chile en minería a cielo abierto (ver Figura 89).
- Es la empresa que tiene la mayor flota instalada de Caex autónomos en faenas mineras de todo el mundo.
- Adquiere el 2017 una empresa especializa en minería subterránea como lo era Joy Global (con cuota de mercado aproximada 5%), con tecnología que se visualizaba competitiva en el mediano plazo como lo son los equipos híbridos.
- Komatsu es una empresa que está integrada verticalmente y tiene soluciones tanto para minería a cielo abierto como subterránea.



Figura 89 Komatsu como líder de equipos Caex y Palas de carguío en Chile (2005-2018).

Elaboración propia basada en Cochilco (2019).

Todas estas características mencionadas, permiten que Komatsu sea un nuevo competidor en el segmento de minería subterránea de roca dura, que representa una alta amenaza para los proveedores consolidados en este segmento. Sin embargo, en términos generales, es difícil que ingresen nuevos competidores al mercado en cuestión, por lo que la amenaza se considera baja.

6.2.2.4 Amenaza de productos sustitutos (Baja)

La industria minera usa y seguirá usando equipos que permitan extraer y acarrear material y desarrollar túneles. Como se ha visualizado en el desarrollo del presente estudio, los equipos utilizados, sea equipos LHD, camiones UG y equipos de perforación, no tendrán grandes variaciones en el corto a mediano plazo. Sin embargo, la tendencia a utilizar fuentes de energía más eficientes, que disminuyan los costos operativos y que reduzcan la huella de carbono de las faenas mineras, será el mayor cambio que tengan los respectivos equipos. El avance tecnológico relacionado con la electromovilidad hace posible la conversión de los tradicionales equipos diésel a equipos híbridos, eléctricos a baterías o a hidrógeno. Todos los OEM del mercado deben estar fuertemente alineados con estas tendencias.

Los métodos mecanizados como las tuneladoras o sistemas de minería continua como el DynaMiner se visualizan como posibles quiebres tecnológicos en el largo plazo, pero en el corto o mediano plazo no representan una alta amenaza de sustitución a los principales equipos de minería subterránea de roca dura.

6.2.2.5 Rivalidad entre empresas (Alta)

El mercado de equipos mineros se caracteriza por competir en función de rendimientos, donde se consideran parámetros de flexibilidad operacional, potencia y autonomía de los equipos, mejores tiempos de ciclo, tradición, calidad, precios y servicios al cliente, con el objetivo de obtener las mayores rentabilidades. Así las empresas proveedoras deben invertir capital constantemente en I+D+i para mantenerse al día con las tendencias del mercado o proponer soluciones tecnológicas que mejoren la rentabilidad de las empresas mineras, de lo contrario otros proveedores aumentarán su cuota de mercado pudiendo desplazarlos. También es relevante mantener una relación de confianza con los clientes.

En referencia a las cuotas de mercados de los distintos equipos, considerando las principales empresas se tiene lo siguiente:

- **Equipos LHD**

- a) Mercado latinoamericano: Sandvik 34%, Caterpillar 33%, Epiroc 20% y Komatsu 6% (ver Figura 47)
- b) Mercado chileno: Sandvik 34%, Epiroc 33%, Caterpillar 25% y Komatsu 3%.

▪ **Camiones UG**

a) Mercado latinoamericano: Epiroc 38%, Sandvik 26%, Caterpillar 14% y Komatsu 9% (ver Figura 53).

b) Mercado chileno: Epiroc 38%, Caterpillar 24%, Sandvik 15%, GHH 10% y Komatsu 8% (ver Figura 54).

▪ **Equipos de perforación**

a) Mercado latinoamericano: Epiroc 44%, Sandvik 37%, Resemin 18% y Komatsu 1% (ver Figura 58).

b) Mercado chileno: Epiroc 64%, Sandvik 30%, Resemin 3% y Komatsu 2% (ver Figura 59).

La competencia entre los 3 principales exponentes es alta.

El análisis de las cinco fuerzas, que da cuenta del entorno competitivo, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 67 Resumen análisis fuerzas de Porter.

Fuerzas de Porter	Nivel de Fuerza	Características
Poder de negociación de los clientes	Moderado	-Cliente Codelco -Influencia de cliente a nivel mundial, alto potencial de ingresos y posibilidad de exigir rendimientos y otros. -Reducido número de proveedores que pueden cumplir sus altos requerimientos
Poder de negociación de los proveedores	Moderado	-La relevancia de Codelco, junto al tamaño de sus necesidades limita a los proveedores - Los mejores equipos y soportes son de un número reducido de proveedores consolidados (necesidad del cliente)
Amenaza de los nuevos competidores entrantes	Baja	-Altas barreras de entrada -Komatsu es un caso especial de nuevo competidor
Amenaza de productos sustitutos	Baja	-Método minero utiliza prácticamente los mismos equipos. -Relevantes las mejoras incrementales
Rivalidad entre empresas	Alta	-Competencia en función de rendimiento -Necesidad de inversiones I+D+i permanente -Relevante la relación con el cliente

Elaboración propia.

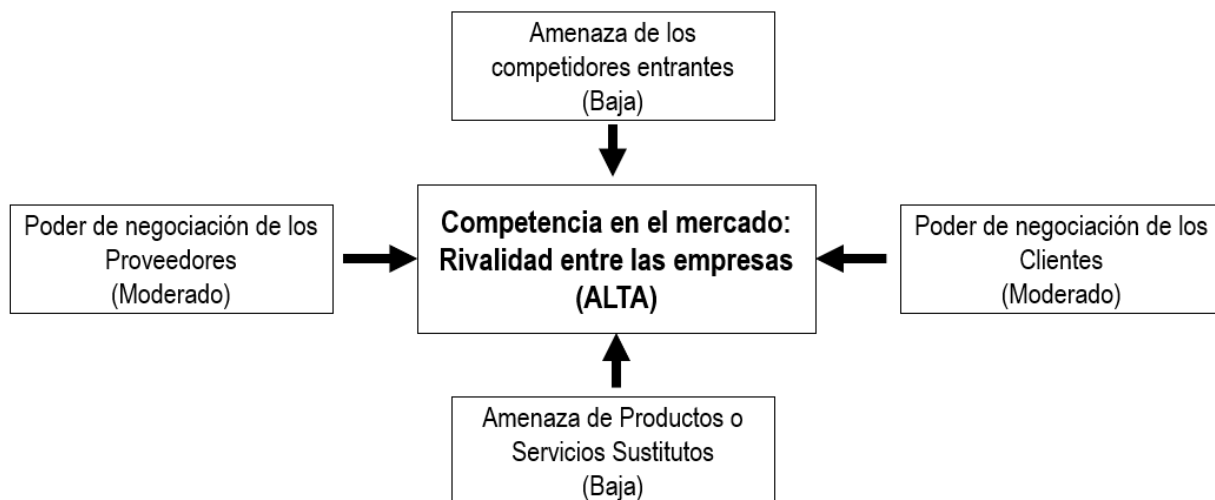


Figura 90 Cinco fuerzas de Porter del estudio.

Elaboración propia.

De esta manera, la estrategia que se propone una vez desarrollado el análisis Porter, es una estrategia en base a la diferenciación, considerando ofrecer a los clientes un producto distinto a los ofertados por los competidores, donde se vuelve fundamental la confianza con el cliente (en este caso Codelco), la calidad de los equipos y el respectivo seguimiento y marketing de la tecnología ofrecida.

6.2.3 Análisis FODA

Se realiza para visualizar posibles ventajas competitivas de Komatsu y apoyar la estrategia definida en el Roadmap en función de los factores internos (fortalezas y debilidades) y los factores externos (oportunidades y amenazas) del mercado en que participa la empresa.

6.2.3.1 Fortalezas

Se pueden visualizar las siguientes fortalezas:

- **F1 Compañía reconocida a nivel mundial por su destacada imagen corporativa y líder en equipos de minería a cielo abierto en Chile y en el mundo:** Komatsu es considerada una de las empresas más importantes del mundo, tanto en el rubro de la minería como en la construcción, teniendo un buen posicionamiento y reputación en el mercado, por su calidad en los equipos y repuestos. Cuenta con una importante flota de equipos, con presencia en las principales compañías mineras.

De acuerdo con Forbes (2020), Komatsu es la empresa número 405 del mundo (Atlas Copco 658, Epiroc 1535, Sandvik 868).

- **F2 Alto compromiso con la calidad y la confiabilidad de los productos y servicios entregados tanto en venta como en postventa:** Una de las principales prioridades de Komatsu es desarrollar productos de alta calidad y confiabilidad para ser partícipes del éxito de los clientes. La empresa prefiere dedicar una importante cantidad de horas/días/años para desarrollar un producto de calidad antes que acelerar sus procesos y lanzar al mercado productos que no cumplan con altos estándares de calidad y confiabilidad.
- **F3 Alta experiencia técnica de los trabajadores que fabrican y diseñan los equipos:** Komatsu se destaca por ser una empresa global que tiene sus respectivas fábricas en países como Japón, Estados Unidos, Francia, Canadá, Australia, entre otros, destacándose la expertiz técnica de sus trabajadores. Esto se ve reflejado en los buenos rendimientos de los equipos Komatsu en las distintas operaciones mineras a cielo abierto.
- **F4 Alta concentración de operaciones de importancia estratégica para Komatsu a nivel global tanto en Santiago como en Antofagasta:** Chile es considerado como uno de principales países mineros del mundo. Así, la estrategia de Komatsu en Chile contempla disponer, tanto en Santiago como en Antofagasta, de importantes centros de ventas, de entrenamiento, de fabricación, de remanufactura y construcción, entre otros, para consolidar el posicionamiento de la empresa en el país y entregar soporte a las distintas actividades de Komatsu y sus clientes (ver Figura 8).
- **F5 Altas inversiones de capital en temas de I+D+i para el desarrollo de productos, para responder a las necesidades del mercado y crear soluciones únicas y sin rival (filosofía “Dantotsu”):** Para generar ventajas comparativas importantes con sus principales competidores, Komatsu considera invertir constantemente en temas de I+D+i, considerando los requerimientos de la industria, focalizando los recursos en soluciones integrales.

6.2.3.2 Oportunidades

Se pueden visualizar las siguientes oportunidades:

- **O1 Auge minería subterránea en el mundo:** Se considera una Macrotendencia de la industria minera, porque muchas de las operaciones que tenían su método de explotación por minería a cielo abierto han dejado o dejarán de ser rentables migrando a operaciones subterráneas masivas o por restricciones ambientales que no permiten el desarrollo de una minería a cielo abierto (ver Figura 11).
- **O2 Avance tecnológico acelerado:** El contexto mundial de transformación digital, la disponibilidad de baterías más eficientes y menos costosas, nuevos sensores de calidad avanzada y la mayor competencia en los mercados de tecnologías de la información y tecnología operativa, permite reducir los costos de producción de los equipos Komatsu y mejorar sus rendimientos.
- **O3 Cambio en la política de inversiones y trabajadores partícipes activos en cambios tecnológicos de Codelco:** Antiguamente la política de inversiones en Codelco era que todos los proyectos debían ser con tecnología probada. Eso ha cambiado, actualmente se considera una política con riesgos controlados (no con tecnología ultra probada), de esta manera se acepta un riesgo para incorporar nuevas tecnologías y mejorar de esta manera la competitividad de la Corporación, considerando una palanca clave la incorporación de nueva tecnología a las operaciones. Por parte de los trabajadores, se considera que están aceptando los cambios tecnológicos y tienen una disposición positiva al desarrollo de los distintos proyectos de innovación en la Corporación, lo que beneficia el proceso de transformación que se está viviendo dentro de Codelco.
- **O4 Auge operaciones unitarias mineras automatizadas:** Las compañías mineras están implementando la automatización principalmente para mejorar los niveles de seguridad de las operaciones, mayor productividad por mayor cantidad de horas efectivas de operación de los equipos y menores costos de operación por homogenización de la operación, ya que disminuye la variabilidad de los procesos. Komatsu por su parte, fue pionero en el concepto de automatización de equipos mineros y es líder en implementación de Caex autónomos en el mundo (ver Figura 42), teniendo de esta manera, la posibilidad de traducir este mismo éxito, pero en minería subterránea de roca dura.

- **O5 Auge electromovilidad en operaciones mineras:** Las compañías mineras están implementando o proyectando el uso de equipos impulsados o traccionados por energía eléctrica principalmente para disminuir emisión de gases contaminantes (disminución de huella de carbono), disminuir los requerimientos de ventilación, disminuir los costos de mantención y utilizar de forma más eficiente la energía. Sin embargo, la principal barrera de la implementación de este tipo de equipos ha sido la baja flexibilidad operacional y la baja autonomía de ellos. Así, la tecnología híbrida de Komatsu puede ser considerada como un cambio incremental hacia la full electrificación de las operaciones mina, brindando niveles similares de flexibilidad operacional y autonomía que los equipos diésel convencionales.

6.2.3.3 Debilidades

Se pueden visualizar las siguientes debilidades:

- **D1 Baja experiencia de Komatsu como empresa en el segmento de minería subterránea masiva de roca dura (nuevo competidor):** Komatsu es una empresa tradicional de equipos de minería a cielo abierto, que en el 2017 adquiere una empresa especializada en minería subterránea (Joy Global), pero de roca blanda y de vetas angostas. Así se considera baja la experiencia de la empresa con equipos de medianas a mayores capacidades en roca dura.
- **D2 Komatsu es visualizado como un proveedor con bajos niveles de interoperabilidad:** Komatsu se visualiza menos interoperable que otros proveedores, como Epiroc y Sandvik que tienen sistemas más abiertos (no totalmente abiertos). Es importante el tema de interoperabilidad para Komatsu porque la interoperabilidad es una iniciativa impulsada por las principales compañías mineras como Codelco, BHP, Rio Tinto, porque existen en el mercado de minería subterránea importantes proveedores de equipos mineros (OEMs) o de tecnología (OTMs) que se visualizan interoperables y se puede ver limitado directamente el crecimiento de Komatsu en este segmento por ser un competidor nuevo.
- **D3 Los equipos Komatsu, en general, implican mayor capex para las compañías mineras:** Considerando los resultados obtenidos en el Capítulo 4 (ver desde página 119), se evidencia que los equipos Komatsu destinados a una minería subterránea masiva representan mayores inversiones para las compañías mineras en

comparación a los equipos de otras marcas que disponen de mayores flotas instaladas en cada segmento. Se destaca que el equipo LHD híbrido 18 HD (18 toneladas) implica un capex 36% mayor a su principal competidor, el LHD LT 1051 (10 toneladas) un 3% mayor, los jumbos de avance DR1SB (mediano 1 brazo) un 24% mayor y los jumbos de avance DR2SB (mediano 2 brazos) un 12% mayor.

- **D4 Bajo marketing propio de la unidad de minería subterránea de roca dura que permita posicionarla en forma diferenciada a la minería a cielo abierto:** Si bien existen operaciones de marketing corporativo para hacer difusión de la empresa, no se visualiza una orientación específica en el segmento de la unidad de minería subterránea de roca dura para mostrar en forma diferenciada esta área de la compañía.
- **D5 Posibilidad de fallas de comunicación entre distintas áreas por ser una empresa globalizada:** Komatsu al ser una empresa global, con una subdivisión de la empresa en 258 compañías (Komatsu Ltda., 215 compañías consolidadas subsidiarias y 42 empresas contabilizadas por método de participación), además de los más de 70,000 trabajadores de distintas nacionalidades que tienen distintos idiomas nativos y cerca de 150 operaciones (84 de fabricación y 57 de ventas) podría generar fallas importantes en la comunicación de las distintas unidades, provocando ineficiencias.

6.2.3.4 Amenazas

Se pueden visualizar las siguientes amenazas:

- **A1 Reducido número de proveedores con altas cuotas de mercado y buen posicionamiento:** El mercado de minería subterránea de roca dura se concentra principalmente en tres marcas (Epiroc, Sandvik y Caterpillar) que tienen alto poder de mercado y una vasta tradición en minería subterránea masiva. Este poder de mercado puede condicionar fuertemente el crecimiento de Komatsu.
- **A2 Inestabilidad o incertidumbre en el desarrollo de las operaciones de las compañías mineras:** Situaciones como la pandemia de Covid 19, la disminución de leyes, envejecimiento de los yacimientos, la variación de los precios del cobre, generan períodos de austeridad, contención de costos, atraso de inversiones o

suspensión de períodos de pruebas lo que puede impactar directamente a los proveedores considerando suspensión de contratos o servicios.

- **A3 Competidores consolidados con tecnología de potencial interés para las compañías mineras:** Una de las tecnologías de especial interés para las compañías mineras es la electromovilidad, en particular, los equipos eléctricos a batería. Komatsu no tiene equipos eléctricos a baterías disponibles para el mercado en la actualidad para el segmento de minería subterránea de roca dura. Por otra parte, empresas como Epiroc y Sandvik sí tienen disponibilidad de equipos eléctricos a baterías (Epiroc tiene equipos LHD a baterías de 7 y 14 toneladas, camiones UG de 20 y 42 toneladas y jumbo de avance grande de 1 o 2 brazos, mientras que Sandvik tiene equipos LHD de 4 y 10 toneladas, camiones UG de 50 toneladas y un jumbo de avance mediano de 2 brazos), lo que supone una ventaja competitiva con respecto a Komatsu. Otra tecnología de interés que Epiroc y Sandvik tienen con un desarrollo avanzado en el segmento es la autonomía de los equipos.
- **A4 Captura de los profesionales y técnicos de Komatsu por el cliente minero:** La relación proveedor-cliente desarrollada en el contexto de negocio, en algunas ocasiones despierta el interés del cliente en contratar los servicios de los respectivos profesionales o técnicos del proveedor para sí mismo. De esta manera, se pueden afectar las capacidades operativas del proveedor como el soporte comercial y técnico de los equipos en el corto plazo.
- **A5 Alza de costos o retrasos de transporte marítimo o aéreo:** Komatsu al ser una empresa global que tiene fábricas ubicadas en distintos puntos del mundo necesita transportar piezas de equipos, materiales, insumos, entre otros para la fabricación de los productos finales, lo que requiere un transporte marítimo o aéreo. El transporte aéreo tiene altos costos, por lo que el transporte marítimo es una de las principales opciones. Este tipo de transporte tiene asociado una alta incertidumbre en los tiempos de entrega, por efecto climático (clima en altamar). Estos retrasos pueden generar importantes demoras en la entrega de productos terminados a los clientes mineros, lo que puede afectar la reputación del proveedor.

6.2.3.5 Matriz de confrontación

Una vez visualizadas las distintas componentes del análisis FODA, se procede a desarrollar la respectiva matriz de confrontación considerando la escala de la Tabla 4, la misión y visión de Komatsu (ver página 76) y el criterio del autor del presente estudio en base a la experiencia en el Mining Equipment Innovation and Technology Group (MEIT) de Komatsu Holding South America.

Tabla 68 Matriz de confrontación de análisis FODA.

		Oportunidades							Amenazas								
		Auge minería subterránea en el mundo	Avance tecnológico acelerado	Cambio en la política minera y trabajadores participes activos en cambios tecnológicos de Codelco	Auge operaciones unitarias mineras automatizadas:	Auge electromovilidad en operaciones mineras	Suma	Porcentaje	Reducción número de proveedores con altas cuotas de mercado y buen posicionamiento	Inestabilidad o incertidumbre en el precio de las operaciones de las compañías mineras	Competidores consolidados con tecnología de potencial interés para las compañías mineras	Captura de los profesionales y técnicos de Komatsu por el cliente minero	Alta de costos o retrasos de transporte marítimo o aéreo	Suma	Porcentaje	Total F	Porcentaje F
		O1	O2	O3	O4	O5			A1	A2	A3	A4	A5				
Fortalezas																	
Compañía reconocida a nivel mundial por su destacada imagen corporativa y líder en equipos de minería a cielo abierto en Chile y en el mundo	F1	5	1	10	5	5	26	25%	5	5	1	5	1	17	25%	43	6%
Alto compromiso con la calidad y la confiabilidad de los productos y servicios entregados tanto en venta como en postventa	F2	5	10	5	5	5	30	29%	10	5	5	1	0	21	31%	51	7%
Alta experiencia técnica de los trabajadores que fabrican y diseñan los equipos	F3	1	1	1	5	5	13	13%	1	0	1	0	0	2	3%	15	2%
Alta concentración de operaciones de importancia estratégica para Komatsu a nivel global tanto en Santiago como en Antofagasta	F4	1	1	1	1	1	5	5%	1	1	0	0	5	7	10%	12	2%
Altas inversiones en temas de I+D+i para el desarrollo de productos, para responder a las necesidades del mercado y crear soluciones únicas y sin rival (Dantotsu)	F5	5	10	5	5	5	30	29%	10	1	10	0	0	21	31%	51	7%
Suma		17	23	22	21	21	104		27	12	17	6	6	68			
Porcentaje		16%	22%	21%	20%	20%			40%	18%	25%	9%	9%				
Debilidades																Total D	Porcentaje D
Baja experiencia de Komatsu como empresa en el segmento de minería subterránea masiva de roca dura (nuevo competidor)	D1	10	5	5	5	5	30	29%	10	5	5	1	0	21	25%	51	7%
Komatsu es visualizado como un proveedor con bajos niveles de interoperabilidad	D2	5	10	5	10	0	30	29%	10	0	1	0	0	11	13%	41	6%
Los equipos Komatsu, en general, implican mayor Capex para las compañías mineras	D3	5	1	10	1	1	18	17%	10	10	5	0	1	26	31%	44	6%
Bajo marketing propio de la unidad de minería subterránea de roca dura que permita posicionarla en forma diferenciada a la minería a cielo abierto	D4	5	0	5	5	5	20	19%	10	5	1	0	1	17	20%	37	5%
Posibilidad de fallas de comunicación entre distintas áreas por ser una empresa globalizada	D5	1	1	1	1	1	5	5%	1	1	0	1	5	8	10%	13	2%
Suma		26	17	26	22	12	103		41	21	12	2	7	83			
Porcentaje		25%	17%	25%	21%	12%			49%	25%	14%	2%	8%				
Total O		43	40	48	43	33	Total A	68	33	29	8	13					
Porcentaje O		6%	6%	7%	6%	5%	Porcentaje A	9%	5%	4%	1%	2%					

Elaboración propia.

De la Tabla 68 se puede destacar que el cuadrante más valorado es el cuadrante de las Fortalezas-Oportunidades (104 puntos), seguido muy cerca del cuadrante Debilidades-Oportunidades (103 puntos). Estos 2 cuadrantes se destacan por tener aspectos internos y externos con similares pesos porcentuales.

Para los cuadrantes de Fortalezas-Amenazas y Debilidades-Amenazas se aprecia claramente que la principal amenaza para Komatsu es A1 (Reducido número de proveedores con altas cuotas de mercado y buen posicionamiento) con un peso porcentual del 40% en el cuadrante F-A, un 49% en el cuadrante D-A y un 9% del total de las componentes en análisis.

Los principales aspectos para potenciar y las respectivas estrategias por cuadrante son las siguientes:

- **Cuadrante 1 o de Fortalezas- Oportunidades (Estrategia ofensiva):** La principal fortaleza que tiene Komatsu es su orientación hacia la calidad y la confiabilidad de sus productos (F2). El aprovechar el avance tecnológico acelerado (O2) permite a la compañía mejorar la calidad actual de los productos, disminuyendo sus costos por mayor disponibilidad de tecnología avanzada en el mercado. Otra fortaleza que potencia el uso de oportunidad es el desarrollo de I+D+i para generar productos Dantotsu.

De esta manera, la estrategia ofensiva en el corto plazo corresponde a una tipo “golpe de apropiación” considerando los equipos LHD híbridos, que con el avance tecnológico pueden ser producidos a menores costos, obteniendo así una posición primordial a la cual no tienen acceso los rivales. La misma estrategia ofensiva con equipos a hidrógeno en el mediano plazo con la introducción del camión a hidrógeno de 65 toneladas en El Teniente y equipos de excavación mecanizada en el largo plazo (Maldonado J., 2018).

- **Cuadrante 2 o de Debilidades-Oportunidades (Estrategia de reorientación):** La principal debilidad de Komatsu es la baja experiencia como empresa en el segmento de minería subterránea (D1). Sin embargo, una de las principales oportunidades visualizadas es el auge de la minería subterránea masiva (O1), lo que implica la necesidad de mayor cantidad de equipos de minería subterránea, necesidad que muchas veces no podrá ser cubierta por los actuales proveedores entregando así la

posibilidad del ingreso de nuevos competidores que tengan la capacidad de superar las barreras de entrada del segmento, que es el caso de Komatsu. Así la estrategia a seguir es la reorientación de los recursos de la empresa para potenciar la unidad de minería subterránea de roca dura, sin descuidar el core business de Komatsu que son los equipos de minería a cielo abierto.

- **Cuadrante 3 o de Fortalezas-Amenazas (Estrategia defensiva):** La principal amenaza y el factor de mayor peso para Komatsu (9% la A1 vs el 7% de los demás factores más relevantes) es el reducido número de proveedores con altas cuotas de mercado y buen posicionamiento (A1). Sin embargo, Komatsu es una empresa con un alto compromiso en la calidad, confiabilidad y mejora continuamente en base a soluciones integrales e innovadoras (F2 y F5).

De esta manera, la estrategia a utilizar para dar respuesta a esta amenaza es una estrategia del tipo defensiva, que considere adoptar acuerdos o contratos de exclusividad con los principales clientes, ampliar las líneas de equipos disminuyendo brechas que podrían utilizar los competidores y ofrecer capacitación gratis o a bajos costos (esta última medida apoya también la adopción de las nuevas tecnologías por parte de los operadores de los clientes).

- **Cuadrante 4 o de Debilidades-Amenazas (Estrategia de reorganización):** La principal amenaza es nuevamente el poder de mercado y el buen posicionamiento de una reducida cantidad de proveedores. Una forma de afrontar esta amenaza es superar el factor interno o principal debilidad que en el caso de Komatsu es el alto precio de mercado de sus equipos que representan mayor capex para sus clientes (D3). La estrategia de reorganización en este sentido debe traducirse en reducir los precios de mercado de los equipos Komatsu, para así ser más competitivos.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño de un Roadmap tecnológico permite visualizar y comprender de manera simplificada, visiones de una industria, aspectos relevantes del mercado, los principales equipos a implementar en determinados períodos, los principales procesos y tecnologías que habilitan los respectivos cambios y las posibles mejoras incrementales y quiebres tecnológicos.

La elaboración de este Roadmap permitió levantar información para aplicar mejores prácticas que permiten una mejor eficiencia en el proceso de planificación, gestión y comercialización de productos Komatsu en la minería subterránea de roca dura.

Las visiones de minería consultadas, tanto en la revisión bibliográfica como en las entrevistas a expertos, apuntaron hacia una minería masiva subterránea, full conectada e inteligente, con la transformación digital como protagonista, donde las operaciones estén 100% sensorizadas con monitoreo en tiempo real y con altos niveles de interoperabilidad entre procesos. De esta manera, se puede disponer de datos que entreguen información valiosa para la toma de decisiones y habiliten otros procesos como la automatización, que será importante para aumentar la seguridad en la minería subterránea, mejorar la productividad, la sustentabilidad y la continuidad operacional. Por otra parte, la electrificación de las operaciones permitirá reducir la emisión de gases contaminantes, disminuyendo así la huella de carbono y reduciendo los requerimientos de ventilación de las minas. Uno de los principales limitantes de esta visión integrada es no considerar a las personas dentro del proceso de cambio. En este sentido, la gestión del cambio se vuelve fundamental para los procesos de transformación que se esperan desarrollar. También es relevante considerar que la aplicación de las tecnologías para una minería 4.0 deben estar estrechamente relacionadas con cambios, menores o mayores, del diseño minero. El no considerar modificaciones en los actuales diseños mineros, aumenta la probabilidad del fracaso de la tecnología, no por las tecnologías en sí mismas, sino por el diseño minero que no permite el mayor provecho de ellas.

Dentro de las principales necesidades y desafíos de División El Teniente para mantener o mejorar su competitividad en el contexto de gran minería del cobre, se considera cumplir

con su plan de transformación que lo habilita para operar durante los próximos 50 años. Se destaca el fuerte compromiso de la División con el proceso de electromovilidad, tanto en vehículos logísticos, de apoyo y de producción, donde se considera implementar equipos híbridos, eléctricos a batería y a hidrógeno. La automatización de las operaciones es uno de los pilares fundamentales para El Teniente considerado el salto disruptivo que requieren y que están haciendo realidad. Se espera la incorporación paulatina de equipos teleoperados, semi autónomos y full autónomos dentro de los próximos 10 años. Para habilitar la automatización, División El Teniente espera operar con red de comunicaciones LTE. Mientras que otro desafío relevante es la integración de las operaciones en las salas CIO ubicadas en Rancagua.

Las tecnologías o procesos habilitantes claves para el ingreso de Komatsu al segmento de la gran minería subterránea son los equipos eléctricos (híbridos, a baterías y a hidrógeno), desarrollo de distintos niveles de automatización (habilitar equipos telecomandados, semi autónomos y full autónomos), compatibilidad de los equipos con redes Wifi, LTE o 5G (dependiendo de la faena en cuestión), sensores avanzados de consumos y signos vitales, sistemas de ubicación del tipo RFID O RTLS (TAG), orientación del trabajo hacia un mantenimiento predictivo, y equipos interoperables con equipos de otras marcas.

En referencia a los impactos esperados de las principales tecnologías para Komatsu, considerando indicadores como seguridad, productividad, capex, opex, sustentabilidad y continuidad operacional se visualiza lo siguiente:

- Los equipos híbridos representan un cambio incremental, con impacto bajo a medio, donde el esfuerzo para Komatsu es bajo, considerándose una inversión atractiva en el corto plazo.
- Los equipos a batería representan un cambio incremental, con impacto medio, donde el esfuerzo puede ser bajo o medio dependiendo de la faena. Si se considera El Teniente el esfuerzo es bajo, considerándose una inversión atractiva para Komatsu en el corto-mediano plazo.
- Los equipos a hidrógeno representan un cambio incremental, con impacto medio, donde el esfuerzo para Komatsu es bajo por poseer esta tecnología en equipos Caex,

considerándose una inversión atractiva en el mediano plazo para aplicar en El Teniente.

- Las Tuneladoras, sistemas de minería continua y la automatización y robótica global representan un quiebre tecnológico, con impacto alto, donde el esfuerzo también es alto, considerándose una inversión selectiva con rentabilidad a largo plazo.

Con respecto a la posición de mercado de Komatsu, se puede mencionar que ha sido entre un 6 a un 7% en el mercado latinoamericano y chileno entre los años 2016 y 2019. Para mejorar esta situación y crecer en este segmento se debe explotar al máximo sus ventajas considerando una estrategia de diferenciación y ofensiva, explotando su fortaleza de orientación hacia la calidad y la confiabilidad de sus productos y altas inversiones para desarrollar productos que respondan a las necesidades del mercado o que sean soluciones únicas y sin rival (filosofía Dantotsu). Komatsu debe aprovechar al máximo la oportunidad de auge de la minería subterránea y manejar con precaución la principal amenaza que es el reducido número de proveedores con altas cuotas de mercado y buen posicionamiento. Komatsu debe entregar soluciones reales al mercado, no sólo enfocarse en ser un vendedor de equipos y repuestos, sino apuntar a soluciones de integrales. La relación de confianza con el cliente, en particular con Codelco, se vuelve fundamental para el crecimiento de Komatsu en este segmento.

Las principales recomendaciones para Komatsu en referencia al caso de estudio de División El Teniente son:

- Avanzar decididamente hacia la interoperabilidad de los equipos, porque esta condición será fundamental para adjudicarse futuros contratos con Codelco y otras compañías mineras.
- **En extracción:**
 - a) Corto plazo: Foco de desarrollo y fabricación centrado en equipos de 10 toneladas eléctricos a baterías (62% del mercado chileno, aproximadamente un 30% del mercado global y equipo más importante para El Teniente). Disponibilidad de nivel 3-4 de automatización (semi autonomía)
 - b) Mediano a largo plazo: Foco de desarrollo y fabricación en equipos LHD de 14 toneladas (11% del mercado chileno, 19.5% a nivel global y equipo más importante

para El Teniente en este horizonte) y de 18 toneladas eléctricos a baterías (10% del mercado chileno, 13.6 % a nivel global y especial atención a la tendencia de auge de la minería masiva subterránea). Solucionar el problema del carguío para disponer de full autonomía.

▪ **En acarreo de material:**

- a) Corto plazo: No considerar desarrollo y fabricación de camiones UG de altas capacidades. Centrar esfuerzos en la electrificación de los camiones de menores a medianas capacidades, especialmente en camiones UG de 20 (20% del mercado chileno y 19% a nivel global) y de 30 toneladas (20% del mercado chileno y 21.3% del mercado global).
- b) Mediano plazo: Foco de desarrollo y fabricación de camiones UG de mayores capacidades, en particular para ingresar a El Teniente, considerar equipos de 60-65 toneladas a hidrógeno (48% del mercado chileno y 6.3 % del mercado global). Disponibilidad de nivel 5 de autonomía (full autónomo).

▪ **En desarrollo de túneles:**

- a) Corto plazo: Foco de desarrollo y fabricación de jumbos de avance medianos de uno brazo (18% del mercado chileno, 22.3% del mercado global), de dos brazos (73% del mercado chileno, 17.5 % del mercado global) y empernadores medianos (47 % del mercado chileno). Disponibilidad de nivel 2 de automatización (operación telecomandada).
- b) Mediano a largo plazo: Foco de desarrollo y fabricación de equipos de excavación mecanizada como las tuneladoras y el DynaMiner, en particular las máquinas tuneladoras por ser consideradas el posible quiebre tecnológico más relevante de los próximos 10 años para Codelco.

CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA

1. ABB, (2015). “Minería “Next Level”: Asegurar el futuro a través de operaciones integradas y tecnologías de la información”.
2. Acevedo J., (2017). “Simulación de sistema de transporte en minería de caving, aplicación al proyecto Nuevo Nivel Mina de División El Teniente”, Universidad de Chile.
3. AC3E, (2020). “Principales áreas de impacto para AC3E” Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
4. AC3E, (2018). “Memoria Anual AC3E:2018”, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
5. ADDERE Ltda., (2017). “Estudio de demanda de infraestructura de telecomunicaciones en el área geográfica de la Gran Minería del Norte y la Astronomía”, Subsecretaría de Telecomunicaciones, Gobierno de Chile.
6. Alipour P. *et al*, (2019).” Technology Roadmap for Industry 4.0. In: Industry 4.0: Managing The Digital Transformation”.
7. Allied Market Research, (2019). “Global Tunnel Boring Machine Market: Opportunities and Forecasts 2018-2025”.
8. AMTC, (2020). “Proyectos: Basales y de investigación aplicada con financiamiento de la industria”, Universidad de Chile, Chile.
9. AMTC, (2017). “Memoria 2015-2017”, Universidad de Chile, Chile.
10. Araneda O., (2020). “Tecnología y automatización minera en tiempos de Covid: ciclo de sesiones online 8SAT”, VIII Seminario de Acercamiento Tecnológico ACTI Codelco.
11. Araya D., (2018). “Diseño de un sistema de control de gestión para Codelco División El Teniente”, Universidad de Chile.
12. Báez F., (2014). “Tecnología e Innovación en Codelco”, 3° Workshop Internacional, Codelco.
13. Brem A. and Voigt K., (2009). “Integration of Market pull and Technology push in the corporate front end and innovation management—Insights from the German software Industry”.

14. Brox D. y Piaggio G., (2013). "Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros", Revista Construcción Minera, nº 3.
15. Canelo A., (2020). "Características y gestión del cambio para tecnología autónoma", Workshop: Desafíos en la validación e implementación de equipos autónomos en la gran minería, Centro Nacional de Pilotaje.
16. Carmona C.-a, (2020). "Entrevista a expertos: Aplicación de tecnologías en Minería Subterránea", Centro de Estudiantes Mineros de Chile.
17. Carmona C.-b (2020). "Automatización/Digitalización para una minería 4.0".
18. Catálogos Artisan, (2020). "Vehicles ", Artisan Vehicles.
19. Catálogos Caterpillar, (2020). "Subterráneo: roca dura", Caterpillar.
20. Catálogos Epiroc, (2020). "Productos y equipos para minería y construcción", Epiroc Chile.
21. Catálogos GHH, (2020). "Productos: La solución a medida para la minería subterránea y la industria de tunneling", GHH Fahrzeuge.
22. Catálogos Komatsu, (2020). "Equipos de minería subterránea de roca dura", Komatsu Latinoamérica.
23. Catálogos RDH Scharf, (2020). "Equipements Miniers – Equipos Mineros".
24. Catálogos Sandvik, (2020). " Productos y equipos de minería y excavación de roca", Sandvik Mining and Rock Technology.
25. CEMI, (2020). "CEMI'S Mining Innovation GPS (Mi-GPS) ", Sudbury, Canadá.
26. CEMI, (2017)., "Annual Report 2017: 10 Years of Excellence in Mining Innovation, Sudbury, Canadá.
27. CESCO, (2020). "Hacia una minería 4.0: Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente", Chile.
28. Centro Nacional de Pilotaje, (2019). "Nueva tecnología de automatización: Validación del sistema de navegación y carguío autónomo para LHDs", Chile.
29. Chang R. (2020). "Análisis estratégico FODA".
30. Cim Magazine, (2017). "Hardy rock revolution on the horizon".
31. Cobo C., (2019). "El concepto de tecnologías de la información. Benchmarking sobre las definiciones de las TIC en la sociedad del conocimiento", Zer Vol. 14 – Núm. 27 ISSN: 1137-1102 pp. 295-318.

32. Cochilco, (2019). “Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre 2018”, Chile.
33. Cochilco, (2015). “Caracterización de los costos de la gran minería del cobre”, Chile.
34. Cochilco, (2014). “Productividad en la Industria Minera en Chile”, Chile.
35. Codelco-a, (2019). “¡Nos transformamos hoy por el futuro de Chile!:Memoria anual 2019”.
36. Codelco-b, (2019). “Los tenientinos que harán historia operando el primer LHD híbrido en una mina subterránea en el mundo”.
37. Codelco, (2018). “Entrega de resultados 2018- Nelson Pizarro Contador, Presidente ejecutivo”.
38. Codelco, (2011). “El Teniente: Minería del Futuro”.
39. Codelco El Teniente, (2018). “Roadmaps Electromovilidad y Automatización”.
40. Codelco-Expande, (2019). “Desafío Codelco: Tecnologías para el control de fatiga y somnolencia”.
41. Comisión Nacional de Productividad, (2017). “Productividad en la Gran Minería del Cobre”, Santiago, Chile.
42. Consejo de Competencias Mineras, (2020). “Centro integrado de operaciones (CIO)”.
43. Consejo de Competencias Mineras, (2018). “Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera”.
44. Consejo Minero *et al.*, (2020). “Roadmap: Digitalización para una Minería 4.0”.
45. Consejo Minero, (2018). “Desarrollo de Proveedores de Clase Mundial”.
46. Cornejo J., (2018).” Manejo de materiales y plan de producción”, Universidad de Chile.
47. Corporación Alta ley, (2019). “Hoja de Ruta 2.0 de la Minería Chilena: Actualización y consensos para una mirada renovada”, Santiago, Chile.
48. CSIRO, (2019) “Annual Report 2018–19”, Australia.
49. CSIRO, (2017). “Mining equipment, technology and services: A Roadmap for unlocking future growth opportunities for Australia”.
50. CSIRO, (2014). “El Futuro de la Minería en Chile”.
51. Curry C., (2017). “Lithium-ion Battery cost and Market: Squeezed margins seek technology improvements and new business models”, Bloomberg NEFm.
52. De Lamberterie P., (2013). “Battery Comparison”, Komatsu.
53. División El Teniente, (2019). “Plan de Negocios y Desarrollo: PND 2019”.

54. Dixon J., (2001).” The “Market pull” versus “Technology push”.
55. Dorner V., (2020). “Electromovilidad y usos del cobre-División El Teniente”.
56. Durán D., (2015). “Management Estratégico. Su aplicación en la Gestión del Conocimiento y el Capital Humano”, Universitat de Barcelona, España.
57. El Teniente-a, (2019). “El Teniente incorpora palas chinas a su operación subterránea”.
58. El Teniente-b, (2019). “El Teniente expuso su compromiso con la electromovilidad”.
59. Emilsson H, (2012). “Electricidad que abre camino”, Sandvik.
60. FCA, (2012), “Material Operaciones II”, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
61. Forbes, (2020). “GLOBAL 2000: The World's Largest Public Companies”.
62. Franzen & Vogl, (2013). “Two decades of measuring environmental attitudes: A comparative analysis of 33 countries”, Global Environmental Change, Institute of Sociology - University of Bern, Switzerland.
63. Fuentes S. and Villegas F., (2014). “Block caving using macroblocks”, 3rd International symposium on block and sublevel caving: Caving 2014, Santiago, Chile, 23-52.
64. Fundación Chile, (2020). “Sobre Fundación Chile”, Santiago, Chile.
65. Fundación Chile, (2016).” Desde el cobre a la innovación Roadmap Tecnológico 2015-2035”.
66. García A., (2020). “Transformación Digital en la Industria Minera: Convergencia IT/OT en la minería, ciclo de sesiones online 8SAT”, VIII Seminario de Acercamiento Tecnológico ACTI Codelco.
67. García R. & Calantone R., (2002). “A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: A literature review. Journal of Product Innovation Management”.
68. Gerencia de Minas División El Teniente, (2019). “Workshop Komatsu GMIN”, Codelco División El Teniente.
69. Ginés P., (2020). “Fases del Proceso Tecnológico (Método de Proyectos)”, IES Infanta Elena de Jumilla, Murcia (España).
70. Gipuzkoa Berritzen - Innobasque, (2011). “Roadmapping: Una herramienta para definir estrategias de I+D+i de éxito”.

71. Gómez R. y Labbé E., (2019). "Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del "block caving". Boletín Geológico y Minero, 130 (1): 181-198.
72. González A. (2017). "Tipos de Instrumentos de Medición", Instituto de Tecnología Universitaria Antonio José de Sucre, Venezuela.
73. Guerrero A., (2017). "Simulación de sistema LHD automatizado mediante eventos discretos- Aplicación a minería de caving proyecto Nuevo Nivel Mina División El Teniente", Universidad de Chile.
74. Guzmán D., (2017). "Requisitos para la remotización en Codelco", Universidad de Chile.
75. Inobe, (2012). "Guía metodológica para la aplicación de la norma UNE-ISO 14064-1:2006 para el desarrollo de inventarios de Gases de Efecto Invernadero en organizaciones", Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca, Gobierno Vasco.
76. Instituto Regional de Seguridad y Salud en el trabajo, (2016). "Metodología y técnicas analíticas para la investigación de accidentes de trabajo", Comunidad de Madrid, España.
77. Interop, (2018). "Guía de comunicaciones inalámbricas para minería en rajo abierto".
78. Jara J., (2020). "Entrevista a expertos: Interoperabilidad y tecnología de empresas proveedoras".
79. Koekemoer R. (2019). "Perforación para desarrollo de roca dura", Capacitación IROC, Longview -Texas, USA.
80. Komatsu-a, (2020). "Productos Minería Subterránea".
81. Komatsu-b, (2020). "Lanzamiento Komatsu ZJ21 ZB21".
82. Komatsu, (2019). "Business Market Analysis Report Dec-2019".
83. Komatsu, (2018). "22HD Roadmap Hard Rock Mining".
84. Komatsu Cummins, (2018). "Reporte de Sustentabilidad: Grupo Komatsu Cummins 2018".
85. Komatsu Latinoamérica, (2014). "Historia Komatsu".
86. Komatsu Ltd., (2019). "Corporate Profile".
87. Leiva A. (2020), "Electromovilidad y usos del cobre- División El Teniente".

88. Lyten M., (2019). "Desarrollo de productos no diésel", Capacitación IROC, Longview -Texas, USA.
89. Macquarie Capital Ltd., (2018). "Commodity Market Outlook", Shanghai, China.
90. Maki B., (2019). "Cargadores LHD híbridos", Capacitación IROC, Longview -Texas, USA.
91. Maldonado J., (2018). "La estrategia empresarial: Su formulación, planeación e implantación".
92. Markets and Markets, (2017). "Mining Automation Market by Technique, Type (Equipment, Software, Communications System), Equipment (Autonomous Hauling/Mining Trucks, Autonomous Drilling Rigs, Underground LHD Loaders, Tunneling Equipment) and Region - Global Forecast to 2023".
93. Markides C. y Geroski P., (2004). "Fast Second: How Smart Companies Bypass Radical Innovation to Enter and Dominate New Markets", Jossey-Bass, San Francisco, USA.
94. McKinsey & Company, (2017). "Building an integrated technology roadmap to drive successful innovation".
95. McKinsey & Company, (2009). "Enduring Ideas: The three horizons of growth".
96. McNab K. and Garcia-Vasquez, (2011). "Autonomous and Remote Operation Technologies in Australian Mining", CSIRO Minerals Down Under National Research Flagship.
97. MINECON, (2017). "Investigación y Desarrollo en las empresas chilenas: Cuarta Encuesta Longitudinal de Empresas".
98. Minería en línea, (2020). "Conoce cómo funciona el nuevo motor a hidrógeno de Komatsu".
99. Mining 3, (2020). "Corporate Brochure", Australia.
100. Mining Equipment Innovation and Technology Group (MEIT), (2013). "Envisioning the Mining Development", Komatsu Holding South America Ltda.
101. Mining Equipment Innovation and Technology Group (MEIT), (2016). "Underground Mining Roadmap", Komatsu Holding South America Ltda.
102. Ministerio de Energía de Chile-a, (2020) "Cargadores eléctricos", Chile.
103. Ministerio de Energía de Chile-b, (2020). "Infografía: Comparación baterías ion-litio", Chile.

104. Mohammadi Z, Morteza & Larijani Hadi. (2015). "A Survey on Centralised and Distributed Clustering Routing Algorithms for WSNs", IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2015, Glasgow, Scotland.
105. Morales J.-a, (2019). "Migrando a Operaciones 2020-2030", Mining and Equipment – Innovation and Technology, Komatsu.
106. Morales J.-b, (2019). "Migrando al 2020-2030: Electro-movilidad", Seminario Productividad en la industria Minera: Pasado, Presente y Futuro, Red Alumni-Centro de Alumnos de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile.
107. OBS Business School, (2016). "¿Cómo identificar un proceso de innovación incremental?".
108. OECD and European Communities, (2005). "Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación".
109. OppCharge, (2017). "OppCharge: Fast Charging of Electric Vehicles".
110. Osorio P., (2020). "LTE-Big Data Analytics en Minería 4.0".
111. Oxford Education, (2018). "El Proceso Tecnológico".
112. Paredes E., (2012). "Sistema de monitoreo de fatiga: Tecnología al servicio de la seguridad", Gerencia Mina, Southern Copper, Perú.
113. Phaal R., (2004). "Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution", *Technological Forecasting & Social Change* 71, 5-26.
114. Phineal SpA., (2016) "Contrato tecnológico CORFO", Chile.
115. Piérola M., (2020). "Lecciones aprendidas en la implementación de proyectos de automatización en minería subterránea", Workshop: Desafíos en la validación e implementación de equipos autónomos en la gran minería, Centro Nacional de Pilotaje.
116. Portal Minero, (2020). "Roadmap Innovación Tecnológica para la Minería: Las claves para que la minería se suba al carro de la industria 4.0".
117. Probert *et al*, (2003). "Technology Roadmapping-developing a practical approach for linking resources to strategic goals", University of Cambridge.
118. Reporte Minero-a, (2020). "Covid-19: ¿Oportunidad para acelerar la automatización y digitalización?".
119. Reporte Minero-b, (2020). "Epiroc gana orden de equipos mineros y servicios para Chuquicamata Subterránea".

120. Revista Minería Chilena, (2020). “Faenas mineras: En acelerada transición a nuevas tecnologías”.
121. Rivera J., (2020). “Seguridad y regulación del hidrógeno en minería”, Centro de Energía UC, Pontificia Universidad Católica de Chile.
122. Rivera N., (2019). “El Teniente: El mejor negocio para Chile”, Seminario Productividad en la industria Minera: Pasado, Presente y Futuro, Red Alumni-Centro de Alumnos de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile.
123. Rojas P., (2020). “Entrevistas a expertos: Principales desafíos de Codelco en Innovación y Tecnología”.
124. Rubio D., (2020). “Machine Learning y Transformación Digital”, Datrics.
125. Ruiz de Solar J., (2020). “Entrevistas a expertos: Automatización y robótica en Minería Subterránea”.
126. Sandvik Mining, (2012). “Electric loaders”, MdeC Conference, Canadá.
127. Soto E., (2017). “Baterías: la siguiente revolución de la energía”, Phineal.
128. Stanford News, (2017). “Wireless charging of moving electric vehicles overcomes major hurdle in new Stanford Research”, Stanford University, United States.
129. Tercera sesión Roadmap Minería 4.0, (2020). “Roadmap: Innovación Tecnológica para la Minería 4.0”, Santiago, Chile.
130. The Boston Consulting Group Inc., (2010). “Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020”, Boston, USA.
131. The Royal Academy of Engineering, (2009). “Autonomous Systems: Social, Legal and Ethical Issues”.
132. Thomson *et al.*, (2012). “Administración estratégica: Teoría y casos”.
133. University of Queens, (2017). “Electric equipment”.
134. Urzúa R., (2019).” Komatsu Hard Rock Mining UG Overview”, MEIT, Komatsu Latinoamérica.
135. Urzúa R., (2017). “Migrando hacia la minería del futuro”, XX Congreso Symposium de Ingeniería en Minas (SIMIN), Universidad de Santiago, Chile.
136. UTFS, (2020). “¿Qué es telemática?”.
137. Valdivia P., (2019). “Electromovilidad minera H2”, Universidad Técnica Federico Santa María.

138. Valenzuela H. (2019). "El Impacto de la Interoperabilidad en la Industria Minera", Programa Interop, Summit de Minería Corfo 2019.
139. Vega E., (2020). "Aspectos de seguridad de los sistemas autónomos en minería subterránea", Workshop: Desafíos en la validación e implementación de equipos autónomos en la gran minería, Centro Nacional de Pilotaje.
140. Velasco B., (2010). "La gestión de la innovación: elementos integrantes y su aplicación en empresas innovadoras del País Vasco", Universidad del País Vasco.
141. Vergara Y., (2014). "Altura de columna en Block/Panel caving", Universidad de Chile.
142. Vicioli R., (2019). "Tecnología electrónica", Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
143. Virtual Consulting International (VCI), (2013). "Mining Innovatio State of Play 2013".
144. Yilmaz M., (2013). "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, 28 (5), 2151-2169.
145. Zabala G., (2007). "Robótica: Guía Teórica y Práctica", Argentina.

ANEXO A: RESULTADOS ENTREVISTAS A EXPERTOS

1.1 Expertos relacionados con la Industria Minera

1.1.1 Principales resultados entrevistas

Una vez realizadas las 3 entrevistas planificadas con Juan Jara (FCh), Carlos Carmona (Hexagon Mining) y Javier Ruiz del Solar (AMTC), se tienen los siguientes resultados principales:

- Se consideran relevantes los Roadmaps coordinados por Fundación Chile en los últimos años, porque son espacios de convergencia entre los distintos actores principales de la industria minera (compañías mineras, OEMs/ OTMs, Centros de investigación). Los principales desafíos y necesidades son la minería inteligente (desarrollo de estándares y digitalización), minería verde (uso eficiente del agua y la energía, calve la trazabilidad para obtener sellos verdes), minería segura (monitoreo en tiempo real del entorno y las personas, ciberseguridad para la gestión de la transformación digital) y la gestión del cambio (sin las personas, las tecnologías fallan irremediablemente). Se considera relevante el aumento de la automatización/teleoperación, la tendencia de las salas CIO en las ciudades, el covid como acelerador de las tecnologías de trabajo a distancia.
- Chile es considerado líder en minería a nivel mundial, buena parte de las tecnologías se prueban a nivel piloto o industrial en Chile (Chile como importador de tecnologías).
- Como proveedor mejor posicionado en minería subterránea se considera a Epiroc. También es importante Sandvik. Tener especial atención a nuevos probables competidores, sobre todo en temas de automatización, ya que esta tecnología está bien madura en otras industrias (principalmente la manufacturera).
- En 10 años, la minería subterránea tendrá alto nivel de información relacionada, habrá sistemas híbridos, algunos autónomos (camiones, martillos rompe roca full autónomos y LHD de producción semi autónoma), otros teleoperados (equipos de preparación principalmente), siempre habrá personas relacionadas al funcionamiento de los procesos, una mina 100% autónoma no es factible al menos en un horizonte de 20 años.

- La transformación digital será la mayor impulsadora de disrupciones tecnológicas y las redes de datos (LTE o 5G) serán esenciales, ya que estas redes permitirán habilitar todos los demás cambios en los procesos.
- Es importante conocer los procesos desde sus bases, si se quiere implementar cambios en ellos, se debe considerar a los operadores desde el inicio, se tiene que enseñar a los operadores a ser buenos usuarios de las nuevas tecnologías.
- La interoperabilidad es importante para permitir la compatibilidad entre las diferentes tecnologías de monitoreo, automatización y robótica. La innovación está llevando a la industria minera a proyectar ecosistemas más abierto, impulsado por las principales compañías mineras. La interoperabilidad es importante para OEMs como Komatsu, vender la interoperabilidad se considera un punto clave para el negocio que condiciona la venta de equipos en el futuro (relevante también participar en la elaboración de los respectivos estándares).
- En referencia a las salas CIO, su problema principal es que no siempre muestran la realidad de los procesos de la mina, por lo que no siempre se obtienen los resultados deseados.
- La proporción aproximada en que se verían favorecidos distintos KPI's por efecto de la automatización y la transformación digital, es en el orden de magnitud del 10%.

1.1.2 Interoperabilidad y tecnología de empresas proveedoras

- Juan Jara, Líder Programa Interoperabilidad, Fundación Chile.

1) De acuerdo con el contexto actual de la industria minera en Chile, ¿Cuáles son los principales desafíos y necesidades en materia de innovación y tecnología para las compañías mineras y las empresas proveedoras?

R: Los principales desafíos visualizados en la industria se pueden encontrar en los respectivos RoadMap que ha coordinado Fundación Chile (Desde el cobre a la innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035, su actualización y el Roadmap de Innovación Tecnológica para la Minería 4.0).

Se destacan:

1º Minería integrada e inteligente

- Disponer de procesos predecibles, estables y controlados, acotando y disminuyendo su variabilidad, tanto en producción como en mantenimiento. En este sentido, se visualiza una minería más automatizada.
- Es relevante mejorar la digitalización de los procesos, sin dejar de lado la ciberseguridad, se deben ofrecer capas de ciberseguridad. Se considera relevante la analítica, el desarrollo de digital twins.

2º Minería verde

- Trazabilidad de los distintos procesos, especialmente con el uso de agua y de energía a través de toda la cadena de valor. En la actualidad no existe trazabilidad del consumo de energía.
- Información transparente, disponible para los distintos stakeholders.
- Un dato relevante que considerar es que la Bolsa de Metales de Londres, al 2025, no tranzará metales que no cumplan con una “norma verde”, por lo que se considera relevante contar con el sello “verde”. En este contexto, la tecnología Blockchain que permite hacer trazabilidad de las transacciones, que posee altos niveles de robustez, permitiría colocar un sello al cobre producido (por ejemplo, mencionar que el producto se fabricó sin accidentes, cero emisiones de carbono, entre otros).

3º Minería segura

- Comunicación efectiva de los riesgos en tiempo real (más que hacer charlas donde se dan a conocer los riesgos a los trabajadores, se puede entregar un monitoreo de sus condiciones y de las condiciones del entorno en tiempo real, por ejemplo, la calidad del aire). Cobra relevancia la sensorización del entorno y de los trabajadores. Un paradigma que hay que romper en este sentido, es el que los operadores piensan que la empresa los está vigilando, se necesita cambiar este pensamiento y reemplazarlo por el sentido de seguridad en la operación.
- Minimizar el potencial al riesgo, en esta materia cobran relevancia los robots, tareas muy peligrosas están tendiendo a hacerse con este tipo de tecnologías. En minería

subterránea una de las operaciones, el “cachoreo”, es una candidata relevante en temas de utilizar robots.

- La simulación de riesgos es relevante en temas referentes a la prevención de riesgos. La analítica y el modelamiento predictivo utilizando cámaras se considera una opción.

4º Gestión del cambio

- El desarrollo del capital humano es una de las materias más relevantes a la hora de aplicar nueva tecnología. Los proveedores deben acompañar a las compañías mineras, indicar y ayudar como impacta en la mano de obra.
- La resistencia al cambio de las personas debe ser tratada oportunamente, se debe considerar desde un inicio a las personas. Cualquier Roadmap tecnológico debe resaltar el capital humano, ya que las transformaciones digitales no pasan sólo por temas de tecnologías, pasan por que la gente las use, si la gente no usa la tecnología no hay transformación digital.

2) ¿Cuál proveedor está mejor posicionado actualmente para los desafíos de desarrollo de tecnología en minería UG?

R: Se visualiza mejor posicionado a Atlas Copco/ Epiroc, ya que los temas de la electromovilidad y la automatización lo tienen bien maduro. Otro competidor relevante puede ser Sandvik. Un posible nuevo competidor que ingrese al mercado de minería es Bosch (empresa alemana), ya que en automatización están muy avanzados en maquinarias y en autos (Bosch junto a Volvo han trabajado en conjunto en temas de automatización).

3) Sobre el desarrollo de un GPS para minería UG, ¿cuál es su opinión de este desarrollo y su impacto?

R: Es un desarrollo relevante para minería subterránea, para tener claridad de la ubicación de las personas y los equipos. Es relevante la segregación. En este sentido, la industria automotriz está investigando como resolver problemáticas asociadas a la falta de GPS en ciertos lugares como puentes, túneles, entre otros, para implementar la full automatización de automóviles, tecnología que podría ser aplicada en minería

subterránea. Queda mucho por hacer, sobre todo la materia del posicionamiento de los equipos (GPS en minería subterránea es sólo un concepto).

4) Con respecto al concepto de interoperabilidad, ¿Por qué es importante? ¿qué tan interoperables se visualizan los principales proveedores de equipos subterráneos?

R: El tema de interoperabilidad es relevante y es importante que Komatsu participe de este tipo de proyectos, tal como lo está haciendo en la ISO con la propuesta de estándar de interoperabilidad para operar con equipos LHD. La importancia de la interoperabilidad radica en que la innovación está llevando a la industria minera a proyectar ecosistemas más abierto. La minería es poco arriesgada en términos tecnológicos, pero el cambio generacional derribará las principales barreras. Epiroc tiene una política mucha más abierta y cooperativa en temas de estándares que otras empresas. De esta manera, Komatsu debe considerar estar dispuesto a compartir información y ser compatible con distintos sistemas (no sólo con Modular Mining). La empresa RCT se considera relevante en temas de interoperabilidad, porque sus plataformas son agnósticas con cualquier marca.

5) ¿Cuál es el principal desafío en términos de redes de comunicaciones en minería subterránea?, ¿las actuales redes son suficientes para los desarrollos tecnológicos futuros?

R: En términos de redes, actualmente hay muchas faenas que están conformes con sus redes de comunicaciones inalámbricas (Wifi), sin embargo, cuando se apliquen nuevas tecnologías, se necesitan monitorear estas tecnologías (automatización), monitorear a los operadores, entre otros, para lo que la red Wifi no será suficiente. En minería subterránea se han hecho pilotos de redes LTE, por lo que Komatsu debe tener incorporada la compatibilidad con sistemas más modernos para no quedar atrás en el mercado (El Teniente tiene un piloto de red LTE).

6) Desde su punto de vista, ¿Cuáles son las principales aplicaciones prácticas de la interoperabilidad?

R: La interoperabilidad tiene dos dimensiones, una que es tecnológica (que actualmente no se visualiza mucho valor en ella, ejemplo de ellos podría ser el caso de un LHD Komatsu que pueda tener partes chinas, que buscan un estándar, pero no es el foco en Chile ni en la minería) y otra es la interconexión de sistemas, la cual permita obtener valor de los datos (relevancia de la analítica). El acceso a la información es clave en la minería del futuro para mejorar productividad y seguridad principalmente. Los proveedores deben ponerse en el lugar de los clientes con el manejo de datos.

7) ¿Cómo se proyecta el desarrollo de estándares y protocolos de interoperabilidad en la minería chilena? ¿Se considerarán estándares internacionales o nacionales? ¿Cuál será el rol de Interop en esta materia?

R: La elaboración de estándares permite hacer un rallado de cancha para los proveedores de equipos y las operaciones mineras. Estos estándares pueden dejar dentro/ fuera del juego a los distintos proveedores. De esta manera, cobra relevancia participar en organizaciones como la ISO. En Chile se está trabajando en generar un Framework de interoperabilidad, que es otra capa, una capa más de inteligencia y de analítica, que debiera existir en la minería como un estándar con la cualidad de que todos los proveedores se puedan conectar, donde la ventaja será que cuando se actualice el sistema, no se afectará a los otros ya presentes (muchos proveedores y compañías mineras dispuestos a aplicarlo), en Chile se está haciendo mucho ruido en temas de interoperabilidad, los ojos de los Australianos y Canadienses se están posicionando en el país. Empresas como BHP y Rio Tinto están acelerando la interoperabilidad. Chile por primera vez presentó un proyecto a la ISO y fue aprobado, tiene que ver con la arquitectura de referencia para los sistemas autónomos de minería, lo hizo Interop y se sigue trabajando con la ISO en la actual.

La arquitectura se basa en la industria manufacturera 4.0, para luego aplicar en la industria minera (se adjunta la arquitectura de referencia en la sección interoperabilidad de la memoria).

8) ¿Qué relevancia tiene Chile en el contexto de la validación de tecnologías para la minería?

R: Chile es considerado líder en minería a nivel mundial, buena parte de las tecnologías se prueban a nivel industrial en Chile, ejemplo de ello son los camiones Komatsu en Codelco Gabriela Mistral. Chile tiene un sitio relevante en el contexto mundial, ya que controla buena parte de la demanda de equipos y tecnologías para aplicar en sus faenas. Para fomentar el desarrollo de tecnologías locales en Chile, se debe mirar de cerca el modo en que los australianos abordaron el negocio de la tecnología aplicada, sin embargo, es más difícil hacer una industria tecnológica en minería subterránea.

9) ¿En qué proporción aproximada se verían favorecidos KPI's como la productividad, seguridad, costos y continuidad operacional pensando en equipos de carguío y transporte en minería subterránea por efecto de la interoperabilidad?

R: Es difícil cuantificar la proporción, pero se espera lo siguiente:

1º Productividad y continuidad operacional

- Mejoraría la productividad por disponer de mayores niveles de continuidad operacional, porque la cadena de valor se podría visualizar de mejor manera, generando la posibilidad de eliminar ineficiencias (sinergia entre partes del negocio). Tener en cuenta que cuando se está hablando de integración de la cadena de valor, no se está hablando de las salas CIO (IT), cuando se habla de interoperabilidad nos estamos refiriendo, principalmente, a tecnologías operativas (OT) (el dispatch está en el límite de las tecnologías IT/OT). Para que se logre en el futuro la real integración de los procesos, donde cada uno de ellos tenga la capacidad de poder hablar con otro proceso sin intervención humana, la integración debe ser cerca de los procesos.

2º Costos

- Disminuirían, porque al generar estándares el cliente sabe realmente lo que está recibiendo, no hay un desgaste extra.

3º Seguridad

- Mayores niveles de seguridad, por el monitoreo en tiempo real del ambiente y las personas.

1.1.3 Automatización y robótica en Minería Subterránea

- Javier Ruiz del Solar, Director ejecutivo, AMTC.

1) De acuerdo con el contexto actual de la industria minera en Chile, ¿Cuáles son los principales desafíos y necesidades (tendencias) en materia de innovación y tecnología para las compañías mineras y los centros tecnológicos?

R: Es una pregunta que no tiene una única respuesta, la minería tiene distintas escalas (gran minería, mediana, pequeña) que tienen distintos requerimientos y todos pueden ser vistas de un punto tecnológico. Se considera relevante la sustentabilidad ambiental en la minería, pero si nos especializamos en temas de mina lo relevante es:

- Aumento de la automatización/ teleoperación de las operaciones mina y tiene distintas razones, uno es el tema operacional de aumento de productividad y reducir costos, la seguridad, hacer la operación más segura.
- Tendencia de las salas CIO en las ciudades (El Teniente lo tiene en Millán, Rancagua y ha crecido poco a poco) para reducir los tiempos de traslados y la comodidad de los operadores.
- El covid acelera el uso de tecnologías del trabajo a distancia y las empresas emplearán mano de obra local en mayor proporción.

2)En un horizonte de 10 años:

- **¿Cómo serán las operaciones mineras subterránea?**

R: Mayor automatización/ teleoperación en general. Los distintos procesos unitarios se irán automatizando, tanto de producción como de preparación. En la actualidad algunas faenas tienen LHD semi autónomos y martillos teleoperados en operación. Se proyecta la automatización de las perforadoras, procesos relacionados con la tronadura, se utilizarán descolgadores teleoperados. De a poco se irán automatizando equipos, unos enfocados a la full autonomía y otros a la teleoperación.

- **¿Qué grado de automatización tendrán? Es factible la full automatización?**

R: Depende de la operación, si es de producción o preparación. El caso de equipos LHD en producción lo más común será la operación semi autónoma. Por otra parte, los camiones ya están en modo full autónomo, en específico se proyecta el modo full autónomo en el NNM.

- **Cuál será el mayor cambio/innovación o quiebre tecnológico más importante que se introducirá?**

R: Los cambios no son muy rápidos en minería, por ejemplo, en la etapa de producción, los equipos se licitan antes de que empiece a construirse la mina o el panel correspondiente en el caso de Codelco. Codelco está haciendo aproximadamente 6 años viendo el retomar el tema de LHD semi autónomos para el NNM y se piensa que no cambiará mucho este modo de operar. En preparación, puede haber mayor flexibilidad por el trabajo con contratistas, ya que a medida que se hagan nuevas licitaciones se puede ir pidiendo otros requerimientos, pero todo va enfocado a equipos autónomos teleoperados. El AMTC está trabajando por ejemplo con martillos rompe rocas, si la automatización de ellos funciona, El Teniente puede agregar este parámetro en una licitación futura (no que sea teleoperado, sino que full autónomo). El quiebre tecnológico serán las redes de datos, que son esenciales, se empieza a usar redes inalámbricas de mayores anchos de banda y en pocos años más se estará usando 5G en minería subterránea.

3)En cuanto tiempo más se podrá tener una mina UG 100% autónoma?

R: En los próximos 20 años esto no estará logrado, no estamos cerca del 100% de autonomía. Las operaciones de preparación son las más complejas, además que hay muchas cosas de infraestructura, que se tienen que ir instalando, hay insumos, colocar cables, eso no se puede hacer autónomamente, tienen que haber personas dentro. Lo que si habrá es un tema mixto entre personas y equipos que operen en ciertos momentos en modo autónomo y otros teleoperado (semi autónomos es la prioridad).

4) ¿De qué manera impactarán a la minería subterránea la transformación digital, la aplicación de redes del tipo LTE - 5G y una sensorización más robusta?

R: Las redes de datos son relevantes. En la actualidad se utilizan redes Wifi en subterránea, pero existen varios pilotos de LTE o 5G. Lo que no se sabe es que, si se irá de Wifi a LTE, se quede hartos años con LTE para posteriormente implementar 5G o se haga una apuesta más disruptiva de pasar de Wifi a 5G en alguna faena. La Wifi no es el futuro, el futuro, igual que en Rajo, es LTE y 5G. De aquí a 5 años, se estará operando con LTE o 5G en gran parte de las faenas mineras de gran minería (los pilotos serán ahora, en el corto plazo).

Con respecto a la sensorización, aumentará, primero para la detección temprana de situaciones riesgosas, por ejemplo, la posible inundación con agua/barro y estallidos de roca, hay muchos sensores y se seguirá trabajando en esa línea, también en modelos (mezcla sensores y modelos para poder predecir mucho antes). Sensorizar el flujo gravitacional también es importante para predecir el comportamiento del material. Las minas del futuro deben ser más sensorizadas porque la operación es más segura y además se puede modelar mejor lo que sucede en la mina, lo que permite planificar y gestionar de mejor manera.

5) ¿Qué opina sobre la electromovilidad en minería subterránea?

R: La electromovilidad es un deseo de la minería subterránea, principalmente por temas de ventilación. Que la electromovilidad se aplique depende netamente de las soluciones que puedan dar los proveedores como Komatsu, el ideal sería que los equipos tuvieran la misma autonomía que los equipos a diésel, pero la tecnología todavía no da para eso, el principal desafío es de los fabricantes, el día que llegue un fabricante con un LHD que funcione 8 horas cargando material y es eléctrico, se compraría de inmediato. La facilidad que se tiene para desarrollar estos equipos es que no es necesario realizar las pruebas dentro de las minas, si el equipo eléctrico funciona bien en pruebas en superficie funcionará sin complicaciones en minería subterránea (lo que no ocurre en automatización, por ejemplo).

6) ¿A qué nivel se espera aplicar la inteligencia artificial en operaciones mineras subterráneas en los próximos 5 años?

R: La inteligencia artificial se está aplicando bastante en la actualidad. El estilo de proyectos es orientado a predecir comportamientos, cuando se predice mejor, se tienen mejores índices de operación. Esto estará aplicado en los distintos equipos y la utilización de IA aumentará en esta línea.

6) Sobre el desarrollo de un “GPS para minería UG”, ¿cuál es su opinión de este desarrollo y su impacto?

R: Depende cual sea su uso. Para el caso de los equipos no sería tan necesario, porque cuando los equipos operan autónomamente o teleoperado en general se pueden localizar bien y no hay muchos grados de libertad para que puedan estar en distintos lugares, el “GPS” se podría utilizar para hacer tracking de personas, pero eso ya se puede hacer con sistemas RFID, que hace la misma triangulación con rooster que uno puede instalar. No se ve aquí un nuevo gran desarrollo, aquí sería que la industria minera se decida a usar lo que ya existe.

7) Desde su punto de vista, ¿Cuáles son las principales aplicaciones prácticas de la automatización y robotización? ¿Cuáles son las principales dificultades para su aplicación en la minería subterránea en equipos LHD?

R: En automatización, lo que se mencionó anteriormente automatización/ teleoperación de equipos de producción principalmente y de preparación. En relación con la robótica, el uso principal de robots en el corto plazo es hacer modelos 3D, ejemplo de ello es el levantamiento topográfico de túneles con robots (otro caso es la utilización de drones, que puede incorporar la dimensión vertical del túnel). La principal dificultad para los equipos LHD es el carguío. El carguío es difícil porque las cargas son distintas, variando incluso entre carga y carga. Por ejemplo, el material húmedo o compacto genera complicaciones importantes (situación de carga en punto de extracción), los operadores tienen la sensibilidad o la habilidad de aplicar ciertos “trucos” para cumplir con el carguío, esa interacción que requiere de feedback es complicado hacer autónomamente. Otra dificultad relevante del desarrollo de la automatización completa es el período de pruebas de pilotaje y/o industrial, ya que se necesita probar los equipos dentro de una mina

subterránea, condición que no siempre se cumple. Para un proveedor de equipos el tener una mina propia para pruebas puede ser relevante.

8) ¿En qué proporción aproximada se verían favorecidos KPI's como la productividad, seguridad, costos y continuidad operacional pensando en equipos de carguío y transporte en minería subterránea con la transformación digital y la automatización?

R: Es difícil casarse con un número, pero se puede decir que, en orden de magnitud, las eficiencias aumentan en un 10%, 10% menos consumo de neumáticos, 10% menos consumo de combustible, 10% de mayor producción, esto porque existen distintos estudios, algunos mencionan el 7 % otros el 12%, entonces la orden de magnitud sería del 10%, depende de los equipos que se utilicen y de la faena en particular.

Las métricas de seguridad son difíciles de cuantificar, sus implicancias económicas pueden ser muy importantes, pero se tiene que analizar el caso a caso.

1.1.4 Aplicación de tecnologías en Minería Subterránea

- Carlos Carmona, Gerente General Hexagon Mining

1) De acuerdo con el contexto actual de la industria minera en Chile, ¿Cuáles son los principales desafíos y necesidades (tendencias) en materia de innovación y tecnología para las compañías mineras y las empresas proveedoras?

R: Se tienen muchos desafíos, se pueden destacar los siguientes:

- Para Chile, la minería del futuro se piensa que es la minería subterránea, porque los actuales rajos en algún momento dejarán de ser rentables y pueden pasar a ser una operación subterránea.
- Aumentar la competitividad de la industria minera en Chile (está complicada, la tecnología será clave, los quiebres tecnológicos, incorporación de maquinaria de última generación, enfoque en innovación tecnológica, optimización de la mantención).
- Aumentar la productividad en al menos un 18% para llegar a costos directos de unos 1.4 [USD] la libra.

- Desarrollo sustentable, el tema del agua, la energía y las comunidades ha tomado vital relevancia en los últimos años, se requieren cambios de la forma de hacer minería (los procesos no han cambiado mucho en los últimos 20, 30 años). El “pasar desapercibido” como operación requiere tecnología de punta, en miras de obtener los “permisos sociales”.
- Los yacimientos chilenos en su mayoría tienen bajas leyes, son complejos, en condiciones geográficas complicadas, son antiguos y pueden generar problemas con la comunidad por los requerimientos de minería sustentable. Aquí la tecnología cumplirá un rol importante.
- Desarrollo de la minería inteligente considerando el desarrollo de estándares de interoperabilidad y digitalización. La definición de estándares (necesidad de conocer de procesos mineros y entender las tecnologías) marcará el rumbo de la industria, evitando la pérdida de tiempos.
- Para crear valor en el negocio minero se requiere monitorear, automatizar y robotizar los activos mineros.

2) En un horizonte de 10 años:

- **¿Cómo serán las operaciones mineras subterránea?**

R: Minería profunda y a gran escala, una minería inteligente, donde la integración y el conocimiento de la tecnología y la toma de decisiones se basarán en la información relacionada (siempre se ha tenido información, pero no al nivel de relación que se tendrá en el futuro). Lo importante es que las máquinas hagan el trabajo, los softwares agreguen la inteligencia y las personas controlen todo esto.

- **¿Qué grado de automatización tendrán?**

R: Principalmente sistemas híbridos, combinación de sistemas autónomos, convencionales o semi convencionales, siempre tendrá que haber personas involucradas. El diseño minero es uno de los principales condicionantes de la automatización, en la actualidad los equipos semi autónomos están confinados a áreas específicas, no es lo general. Los telecomando se espera su masificación en los próximos 5 años, después los semi autónomos o autónomos en LHD o perforadoras, cuando se

solucionen los problemas de interfases de los equipos, los temas culturales y los sistemas de posicionamiento robusto. Cada vez se van agregando más variables al sistema, componentes que son propias de los procesos mineros (importante conocer bien los procesos mineros, por eso son importantes los ingenieros de minas). Se espera que al 2030 se tengan sistemas realmente autónomos en producción (full autónomos), pero no de forma masiva en todas las operaciones mineras.

- **¿Cuál será el mayor cambio/innovación o quiebre tecnológico más importante que se introducirá?**

R: La transformación digital será la mayor impulsadora de disrupciones tecnológicas, generando valor en las organizaciones comprometiendo a las personas con el cambio (cambio cultural).

- 3) ¿Cuál ha sido su experiencia para abordar la resistencia de las personas que se produce por la implementación de nuevas tecnologías?**

R: Llegar al proceso, convencer a los procesistas/operadores que tienen que cambiar la forma de hacer cosas, no es de la noche a la mañana. Los detalles de los procesos son importantes, si no se inicia el cambio de proceso con los operadores no se produce el cambio (información debe fluir de abajo hacia arriba, desde los procesos, los grados de complicación dados por los detalles de los procesos complican los cambios tecnológicos). Otro punto relevante es como evitar la invasibilidad hacia los trabajadores, por esto relevante la asistencia/ formación de los operadores (ejemplo medición de presión de las personas, puede generar “miedo” a que los despidan por la probabilidad de encontrar algún problema de salud, ante ese tipo de situaciones el cambio tecnológico se debe enfrentar).

- 4) ¿Qué recomendaciones se tiene para un OEM como Komatsu en este sentido?**

R: Iniciar en base del proceso es relevante, Komatsu en su línea de productos no puede dejar de asistir a los operadores (asistencia constante), para llegar, por ejemplo, a la automatización de los equipos.

Es importante el factor humano, no se puede reemplazar, hay que enseñar a los operadores a ser un buen usuario tecnológico.

5) ¿Cuál es su visión con respecto a los CIO (Centro integrado de operaciones), sus fortalezas y complicaciones?

R: Las salas CIO comienzan a implementarse en la década de los 90 en Chile, se homologaron de las salas de control que se ocupaban en la industria del petróleo, específicamente en la Exxon móvil (Actual Anglo American Los Bronces), donde se instalaron las primeras salas de control con monitoreo en tiempo real “sin mirar la mina”, la idea era mirar la mina en forma virtual para poder gestionar la mina en base a un buen modelo matemático que permitía representar la “realidad”. El problema principal que existe con este tipo de centros es que no siempre muestran la realidad de los procesos de la mina, por lo que no siempre se obtienen los resultados deseados.

6) ¿De qué manera impactarán a la minería subterránea la transformación digital y la aplicación de redes del tipo LTE - 5G?

R: El camino a la minería inteligente viene dado por la transformación digital, iniciando desde lo analógico hasta llegar a lo automatizado, en este contexto, la interoperabilidad es habilitante y el motor de la digitalización. El primer impacto serán los datos, digitalizar la información. La transformación digital cambiará definitivamente la industria minera.

El gran problema de la minería subterránea de los próximos 3 a 5 años serán los sistemas de comunicación interior mina, muchas de las soluciones existen, por ejemplo, el control de acceso, monitoreo de personas/equipos, sistemas anticolidión, monitoreo geomecánico, signos vitales de equipos (tecnologías existen). El gran problema es como los integro, para que sean compatibles y cuáles son los sistemas de comunicaciones interior mina de manera que todas estas cosas puedan fluir por un solo sistema de comunicaciones, no que haya una tremenda infraestructura que no sea utilizada (que la infraestructura no se convierta en basura tecnológica).

Si se quiere implementar por ejemplo Internet de las cosas (IoT), primero se requiere avanzar en temas de ciberseguridad lo que todavía no está resultado

Las redes LTE y el 5G son el futuro en minería subterránea (en el área de producción no es tan complicado aplicarlas, pero en zonas de desarrollo es más complicado).

Los servicios de mantención de infraestructura tienen que ser considerados y colocados en un sitio importante para que las comunicaciones no fallen nunca, porque es mucha la inversión y el riesgo si no se mantiene correctamente la infraestructura (las compañías mineras no le han entregado la importancia necesaria a la fecha, lo que tiene que cambiar).

Si hay pérdidas de comunicación, los equipos deben tener la opción de almacenar la información en el equipo para que no se complique lo cotidiano. Las redes de comunicación condicionan la confiabilidad de las operaciones (continuidad operacional).

7) Sobre el desarrollo de un “GPS para minería UG”, ¿cuál es su opinión de este desarrollo y su impacto?

R: Komatsu debe tener claro cuál es el sistema de posicionamiento al cual se van a adecuar o que la empresa requiere, de manera que cuando lleguen los equipos y se necesite monitorear la posición de los equipos se tengan sistema de localización, en Open pit es el GPS y en subterránea TAG u otros (además del tipo de sistema de comunicación Wifi, LTE o 5G).

8) ¿Cuál es el estado actual de la “Minería inteligente” en las empresas mineras?

R: Las compañías mineras coinciden que estamos en la fase de “monitoreo en tiempo real”, lo cual se espera que dure 2 a 3 años, muchas licitaciones que se hacen hoy en día, esperan como capturar la información en tiempo real de los diferentes procesos y los llevo a una sala de control, antes se hacía con telemetría, pero ahora se espera desarrollar con otras tecnologías como LTE (tecnologías que permiten más tráfico de datos), para que de esta manera se pueda tener asociado videos, representación gráfica, KPI de operación/mantención, la información proveniente de sensores (más completo e integrado). También partió la operación asistida, que significa que al operador se le está colocando tecnología de asistencia, sistema anticollisiones, sistemas de frenado automático, con el operador arriba del equipo.

9) Desde su punto de vista, ¿Cuáles son las principales aplicaciones prácticas de la interoperabilidad? ¿Cuáles son las principales dificultades para su aplicación en la minería subterránea?

R: La interoperabilidad es importante para permitir la compatibilidad entre las diferentes tecnologías (monitoreo, automatización y robótica), si no hay compatibilidad, se encarecen los reemplazos y la mantención, perdiendo competitividad, de esta manera, las compañías mineras están buscando soluciones tecnológicas integrales multimarca, abriendo los mercados en este sentido. Los estándares tecnológicos de interoperabilidad permitirán la compatibilidad y escalabilidad lo que reducirá los costos para las compañías mineras. Las principales aplicaciones de la interoperabilidad tanto en open pit como UG, será la transferencia de datos, el intercambio de información y la transferencia de control entre los distintos procesos independiente de los desarrolladores creadores o proveedores. En este sentido, la interoperabilidad es importante para OEMs como Komatsu, vender la interoperabilidad se considera un punto clave para el negocio que condiciona la venta de equipos en el futuro (Komatsu necesita clarificar y mostrar su estrategia de crecimiento hacia la autonomía en minería subterránea). Las principales dificultades son el actual contexto de soluciones propietarias.

10) ¿En qué proporción aproximada se verían favorecidos KPI's como la productividad, seguridad, costos y continuidad operacional pensando en equipos de carguío y transporte en minería subterránea con la transformación digital y la interoperabilidad?

R: Un estándar de interoperabilidad tecnológica en la operación de carguío y transporte, podría generar incrementos de productividad en extracción por sobre el 10%, una reducción de un 2% en costos de mantención al año, la reducción de un 3% en costos de operación anual. Con el tema de transformación digital, más que nada existirán nuevos KPI's de los procesos, es complicado cuantificar el incremento de los KPI por este concepto.

1.2 Expertos de Codelco

1.2.1 Principales resultados entrevistas

Una vez realizadas 2 entrevistas planificadas con personas de Codelco, Sebastián Carmona (Gerente Corporativo de Innovación) y Patricio Rojas (Consultor Corporativo de Inversiones), se tienen los siguientes resultados:

- Los principales desafíos y necesidades para Codelco son el monitoreo, la predicción y el modelamiento de las condiciones geomecánicas, enfocado en extracción de columnas de grandes alturas y la prevención de eventos de estallidos de roca y agua/barro, la automatización de los equipos y procesos y la electromovilidad.
- Las operaciones subterráneas de Codelco, en los próximos 10 años, serán con menos personas en su interior, automatizadas y conectada completamente. El nivel de automatización dependerá de la operación unitaria en particular.
- El mayor quiebre tecnológico de los próximos 10 años, si se obtienen buenos resultados en las pruebas que se están realizando, será el desarrollo de túneles con tuneleras de gran tamaño (TBM) dentro del footprint de la explotación, que permite obtener mejores productividades (mayores avances).
- Con respecto a la electromovilidad, se espera que todos los equipos a 10 años si o si serán a batería. La estrategia de baterías fijas o intercambiables Codelco no la tiene definida actualmente, pero los proveedores tienen mucho que decir en esta materia.
- La actual política de inversiones de Codelco está orientada a implementar tecnologías con riesgos controlados, de esta manera se acepta un riesgo para incorporar nuevas tecnologías y mejorar de esta manera la competitividad de la Corporación, considerando una palanca clave la incorporación de nueva tecnología a las operaciones.
- La minería continua no está sobre la mesa en estos momentos y lo más probable que no se retome en los próximos 10 años, los esfuerzos están más focalizados en los equipos actuales, a las tuneleras y al preacondicionamiento.

- Las redes actuales (Wifi) no son suficientes. Se están haciendo pilotajes de red LTE y es la red que se espera consolidar en El Teniente. No se visualiza en la actualidad implementar redes 5G en Teniente.
- La interoperabilidad será una de las condiciones de borde para los futuros contratos. Komatsu se visualiza menos interoperable que otros proveedores.

1.2.2 Principales desafíos de Codelco en Innovación y Tecnología

- Sebastián Carmona, Gerente Corporativo de Innovación, Codelco.

1) De acuerdo con el contexto actual de la industria minera en Chile, ¿Cuáles son los principales desafíos y necesidades en materia de innovación y tecnología para Codelco en minería subterránea?

R: El desafío más importante en operaciones subterráneas es la geomecánica asociada a entender el flujo gravitacional, las columnas de gran altura, para obtener un método más productivo, de menores costos y más seguro. La predicción y monitoreo de los eventos de estallido de roca y bombeos agua/barros es relevante.

2) En un horizonte de 10 años:

- **¿Cómo serán las operaciones mineras subterránea?**

R: Con menos personas en su interior, automatizadas y conectada completamente.

- **¿Qué grado de automatización tendrán? Es factible la full automatización?**

R: Tendrán distinto grado de automatización dependiendo de la operación, pero en 10 años muchas de las operaciones pueden ser full automatizadas.

- **Cuál será el mayor cambio/innovación o quiebre tecnológico más importante que se introducirá?**

R: El principal cambio es automatizar y robotizar la perforación y tronadura, principalmente en etapas de preparación o desarrollo de túneles, ya que se considera que estas etapas son el principal cuello de botella más que la extracción de mineral en sí. Lo que más está a la vista es la excavación mecanizada.

3) Qué opina sobre la electromovilidad en minería subterránea? ¿Cuál es la tendencia en Codelco? ¿Baterías fijas o baterías intercambiables?

R: Todos los equipos a 10 años si o si serán a batería. La estrategia de baterías fijas o intercambiables Codelco no la tiene definida actualmente, pero los proveedores tienen mucho que decir en esta materia. Se tienen muchos desafíos como la rapidez de la carga rápida de los equipos y el costo de los equipos, prácticamente el costo de la batería es el mismo que el equipo, por lo que en la actualidad es difícil tener una flota completa con este tipo de equipos, pero de a poco se irán incorporando a las faenas.

4) ¿Cuál es la visión de la minería continua que se tiene en Codelco?

R: La verdad Codelco quedó bastante dolido con el proyecto de minería continua hace 5 años, por lo que se espera que temas de minería continua, a ese nivel, no se retomen en los próximos 10 años.

5) ¿Cuál es el estado actual de la “¿Minería inteligente” y la transformación digital en Codelco, de qué manera impactarán?

R: Big Data, Data Analytics, IoT, Cloud, modelos de inteligencia artificial, Machine Learning, se están implementando hace 3 años en Codelco. Todos estos temas se encuentran bastante desarrollados y apuntan principalmente a mejorar la productividad y seguridad.

6) ¿Cuál es su visión con respecto a los CIO (Centro integrado de operaciones), sus fortalezas y complicaciones?

R: Tienen la fortaleza de dar seguridad, dar la posibilidad de encontrar los óptimos globales, apoyar la toma de decisiones. Las dificultades principales son que no siempre reflejan la realidad de algunos procesos y en esos casos se deben tomar medidas a nivel más local (siempre existe un tira y afloja entre la operación y los CIO).

7) ¿Cuál ha sido su experiencia para abordar la resistencia de las personas que se produce por la implementación de nuevas tecnologías? ¿Los trabajadores están aceptando el cambio tecnológico en Codelco?

R: Los trabajadores están aceptando los cambios tecnológicos y tienen una disposición positiva al desarrollo de los distintos proyectos de innovación.

8) Cuál es el principal desafío en términos de redes de comunicaciones en minería subterránea?, ¿las actuales redes son suficientes para los desarrollos tecnológicos futuros? (impacto LTE y 5g)

R: Las redes actuales no son suficientes. Se están haciendo pilotajes de red LTE y es la red que se espera consolidar en El Teniente. No se visualiza en la actualidad implementar redes 5G en Teniente.

9) Con respecto al concepto de interoperabilidad, ¿Por qué es importante? ¿qué tan interoperables se visualizan los principales proveedores de equipos subterráneos?

R: Es relevante para Codelco, porque permite compatibilizar distintas tecnologías y equipos. Los principales proveedores tienen distintos niveles de interoperabilidad, pero Komatsu se visualiza menos interoperable que otros proveedores.

10)Expectativas de mejoras de KPI (productividad, seguridad, costos y continuidad operacional) por efecto del cambio tecnológico?

R: Los respectivos cambios tecnológicos generan variaciones de KPI de productividad, seguridad, costos entre un 5 a un 10 %.

1.2.3 Principales desafíos de Codelco mirados desde la perspectiva Inversional

- Patricio Rojas, Consultor Corporativo de Inversiones, Codelco.

1) De acuerdo con el contexto actual de la industria minera en Chile, ¿Cuáles son los principales desafíos y necesidades en materia de innovación y tecnología para Codelco en minería subterránea?

R: Se tiene una serie de desafíos y necesidades en minería subterránea, donde los principales son:

1º Confirmar el tema de extracción de columnas de gran altura.

2º Equipos autónomos: Si bien se están implementando en Chuquicamata, los equipos tienen que cumplir con las productividades y los costos que se prometieron.

3º Electromovilidad: Se considera su aplicación principalmente para reducir de esta manera la ventilación.

4º Fracturamiento hidráulico: Mayor dominio de esta técnica se tiene que optimizar. Se tiene que encontrar la configuración ideal de aplicación.

5º Modelación del macizo rocoso: Modelar en forma micro los distintos esfuerzos, para anticipar estallidos de rocas, para obtener mayor productividad en los desarrollos con rocas complejas como macizos rocosos con tipo de roca primaria y con altos esfuerzos, para mejorar el avance traducido en metros de túnel.

6º Estimación de granulometrías en minería subterránea.

2) En un horizonte de 10 años:

▪ ¿Cómo serán las operaciones mineras subterráneas?

R: Un Sueño de los ejecutivos de Codelco es tener una minería subterránea sin ninguna persona adentro de la mina, con todos los operadores trabajando desde fuera de la mina, con equipos eléctricos. Es difícil cumplir este sueño en los 10 años, pero se irá en esta línea en el futuro, mayor automatización de equipos y procesos.

▪ ¿Qué grado de automatización tendrán? Es factible la full automatización?

R: El Teniente apunta a la utilización de equipos autónomos. Se considera un desafío clave consolidar esta tecnología, sobre todo teniendo en cuenta las condiciones operacionales. Las principales barreras operacionales que se observan para la operación de camiones y equipos LHD son la existencia de calles en mal estado, condiciones de polvo (Chuquicamata) o agua/barro (El Teniente) que pueden interferir en la toma de datos de los sensores de los equipos, lo que lleva a tener mayores tiempos o mayor cantidad de mantenciones.

▪ ¿Cuál será el mayor cambio/innovación o quiebre tecnológico más importante que se introducirá?

R: Si se obtienen buenos resultados en las pruebas que se están teniendo, el desarrollo de túneles con tuneladoras de gran tamaño (TBM) que permitan hacer los

footprint de las minas en poco tiempo, con menores costos a la perforación y tronadura, obteniendo mejores productividades será un importante quiebre tecnológico será un importante quiebre tecnológico. En general, los principales problemas que tienen estos equipos son su incapacidad de hacer ángulos agudos, tener que desarmarlas/armarlas dentro de los túneles (pérdida de horas operativas efectivas), si éstos se solucionan, se pueden tener importantes mejoras.

- Para los métodos de alta productividad como el Block/Panel caving que tienen roca secundaria (como Chuquicamata), el quiebre de la roca no es el principal condicionante (la roca quiebra muy bien), por lo que el desarrollo de túneles pasa a ser muy importante para la operación.

3) ¿Cuál es la política de inversiones que tiene Codelco en temas de tecnología e innovación?

R: Hay un tema relevante del directorio, que es tratar de incorporar mejor tecnología a los proyectos, alineado con la estrategia de transformación de Codelco. Antiguamente la política de inversiones era que todos los proyectos debían ser con tecnología probada. Eso se cambió, ahora se considera una política con riesgos controlados (no con tecnología ultra probada), de esta manera se acepta un riesgo para incorporar nuevas tecnologías y mejorar de esta manera la competitividad de la Corporación, considerando una palanca clave la incorporación de nueva tecnología a las operaciones.

4) ¿Cuál es la visión de la minería continua que se tiene en Codelco?

R: La minería continua no está sobre la mesa en estos momentos, básicamente por los resultados obtenidos en los proyectos anteriores, los esfuerzos están más focalizados en los equipos actuales, a las tuneladoras y al precondicionamiento.

5) ¿Cuál es su visión con respecto a los CIO (Centro integrado de operaciones), sus fortalezas y complicaciones?

R: Los CIO son una realidad en Codelco, se han implementado en prácticamente todas las divisiones de Codelco.

6) ¿Cuál es la noción de los trabajadores en relación con la transformación tecnológica que está teniendo Codelco?

R: En general, los operadores, están siendo partícipes de los cambios que está promoviendo Codelco, más que un miedo a la transformación tecnológica existe un clima de colaboración en la corporación, sobre todo el último tiempo.

7)Cuál es el principal desafío en términos de redes de comunicaciones en minería subterránea?, ¿las actuales redes son suficientes para los desarrollos tecnológicos futuros? (impacto LTE y 5g)

R: La industria minera siempre debe estar con los mejores estándares en redes de comunicaciones, ya que apuntan directamente a mejorar la productividad y reducir los costos. La aplicación de este tipo de redes debe ser una realidad en el futuro para Codelco.

8) ¿A qué nivel se espera aplicar la inteligencia artificial en Codelco en los próximos 5 años?

R: En minería subterránea se aplica muy poco, se aplica más en el procesamiento de minerales, metalurgia extractiva en la actualidad, pero los próximos años se espera avanzar fuerte en operaciones mina

9) Con respecto al concepto de interoperabilidad, ¿Por qué es importante?

R: Codelco se caracteriza por hacer alianzas con los distintos proveedores para desarrollar e implementar nuevas tecnologías. Una de las condiciones de borde en este contexto, será justamente la interoperabilidad. Esto puede dejar dentro/fuera a un determinado proveedor, aquí radica la importancia para los proveedores.

ANEXO B: PROYECTOS DE ORGANIZACIONES ESTUDIADAS

1.1 CEMI

- **Programa Lean Mining:** Se focaliza en aumentar el ROI y VAN de la minería subterránea en su totalidad. El programa deberá incluir tecnologías que permitan:
 - a) Acelerar el desarrollo de túneles.
 - b) Aumentar la tasa de flujo de mineral y roca.
 - c) Reducir energía asociado al movimiento del macizo rocoso.
 - d) Mejorar el grado y el volumen del mineral transportado.
 - e) Reducir la energía total requerida para ventilar minas
 - f) Extraer valor de la data que se genera en las operaciones mineras.

1.2 AMTC

- **Levantamiento topográfico rápido de túneles (en límite de ser comercial, TRL 7-8):** Con motivo de poder disponer de un sistema de referencia común registrable (modelamiento subterráneo), se utiliza un software de alta complejidad que tiene como referencia una metodología que permite administrar, almacenar y procesar nubes de puntos.

El sistema consiste en un láser topográfico montado en un robot móvil que escanea el entorno del túnel con una alta resolución de datos (1 scan de 10 millones de puntos cada 15 metros y 1.5 millones de puntos por metro de túnel) y una velocidad de adquisición de 4 [m/minutos] (250 metros en 4 horas).

Fue utilizado en División El Teniente, específicamente en el loop de camiones en transporte intermedio de la mina Esmeralda.

- **Autonomía en equipos LHD:** Este proyecto se desarrolla junto a la empresa GHH (proveedor de equipos LHD) y el cofinanciamiento de GIZ (Alemania). Las pruebas industriales se realizaron en 2 etapas (septiembre 2017 – enero 2018 y septiembre 2018 – enero 2019) en la Mina 21 de mayo, que tiene un método de explotación por Sublevel Stopping, la cual pertenece a la Compañía Minera San Gerónimo, ubicada en la cuarta región de Coquimbo. Estas tecnologías se encuentran en proceso de patentamiento. Se divide en 3 etapas principales:
 - a) Primera etapa navegación (Comercial, entre TRL 8-9): Una vez desarrollado el ambiente tridimensional simulado de la autonomía del equipo LHD, la primera

funcionalidad en ser implementada fue la navegación autónoma. Como principales resultados se tuvo que el equipo LHD “se trasladara en modo autónomo y de forma consistente, en un túnel estrecho, irregular y sin carpeta de rodado, a través de una galería de 250 metros de longitud desde el punto de entrada hasta el caserón y viceversa” (Centro Nacional de Pilotaje,2019).

- b) Segunda etapa de carguío (Demostración, entre TRL 6-7): Teniendo en cuenta el desafío de poder cargar autónomamente material quebrado con granulometría variable sometido a altos esfuerzos verticales, se desarrollaron pruebas a nivel de laboratorio y de escala industria, donde “Se consigue una tasa de 73% de cargas exitosas, sin intervención del operador, en un caserón de producción, estrecho y de difícil acceso (en curva)” (Centro Nacional de Pilotaje,2019).
- c) Validación de tele operación asistida (Comercial, entre TRL 7-8): Como un subproducto de la autonomía del equipo, se tiene un mecanismo auxiliar de las maniobras de navegación y carguío respectivamente.

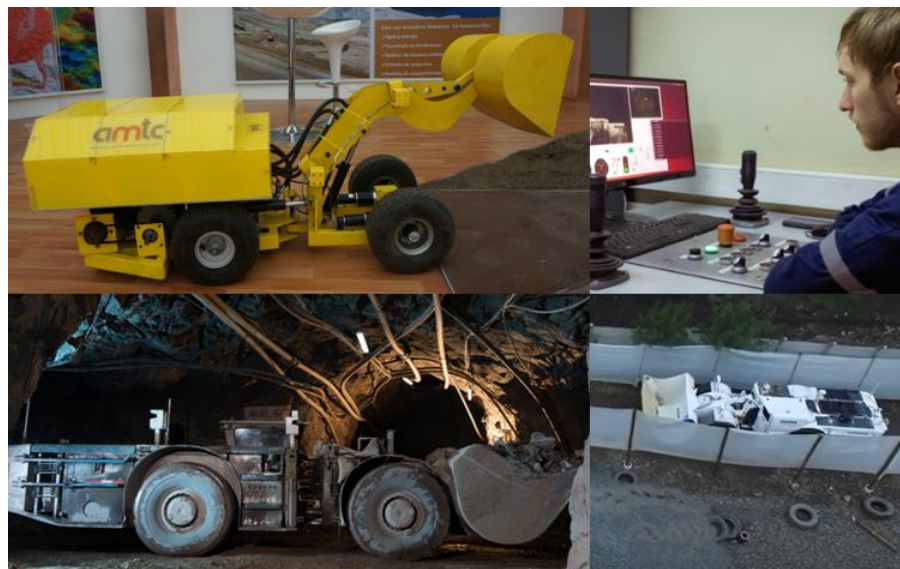


Figura 91 Autonomía en equipos LHD proyecto AMTC.

Fuente: Centro Nacional de Pilotaje (2019).

1.3 AC3E

- **Ilves y Karhu Systems:** Se desarrollan equipos electrónicos necesarios para el desplazamiento de un vehículo eléctrico liviano bajo concepto de citycar, resolviendo el problema de diseño y construcción del convertidor estático (encargado de controlar el motor de un vehículo eléctrico), considerando un sistema de almacenamiento basado en baterías de litio, gestionando de esta manera, la energía encargada de mover el auto.

“ILVES System”, es un convertidor estático para el control de un motor eléctrico para vehículos (convertidor para gestionar la energía desde las baterías hasta el motor “brushless DC” del vehículo eléctrico), mientras que “KARHU System” es un banco de baterías de litio con “Battery Management System” (BMS), el cual permite almacenar la energía eléctrica generada por sistemas fotovoltaicos para ser utilizada en el autoconsumo en sistemas estacionarios para la generación distribuida para sistemas de ERNC menores a 100 [kW] (Phineal SpA. , 2016).

- **Prospección tecnológica en el sector energético - Electromovilidad:** Desarrollado para el Ministerio de Energía de Chile, este proyecto consistió en hacer un análisis del estado del arte, tanto en investigación como desarrollo industrial y patentamiento entorno a electromovilidad, con el objetivo de Identificar las principales tecnologías que se deben considerar para permitir la integración de la electromovilidad a nivel social e industrial en Chile.
- **Diseño de Redes Eléctricas Inteligentes para la Minería (Smart Grid):** Este proyecto se realiza en conjunto con la empresa Antofagasta Minerals, donde el rol de AC3E es estudiar, diseñar y validar la propuesta de diseño de redes eléctricas inteligentes, siendo su área de impacto las materias de Energía y conversión de potencia.

Se considera que las actuales herramientas que existen en simulación de redes eléctricas en tiempo real, si bien permiten optimizar diferentes aspectos de generación de energía, no permiten tomar en cuenta factores económicos de la red, ni tampoco permiten generar recomendaciones sobre el consumo o generación interna de la energía (AC3E, 2018).

De esta manera es relevante la implementación de Smart Grid en minería, para tener un mejor control sobre la distribución de la energía dentro de las operaciones, habilita la masificación de uso de los equipos eléctricos y entrega la posibilidad de actuar rápidamente ante problemas de caída de tensión o insuficiencia de energía en la red.

1.4 Mining 3-CRC Mining

- **Carga eléctrica inalámbrica de LHD:** Considerando las restricciones de operación de los LHD eléctricos que típicamente son alimentados a través de cables de arrastre (se daña el cable, es poco flexible, mantenimiento vigilante) o sistemas de batería (densidad de corriente relativamente baja, intercambio regular de baterías), se intenta brindar una solución que permita mayor flexibilidad operativa.

La solución desarrollada entre Mining 3 y Caterpillar corresponde a un sistema modular de transferencia de energía que carga de forma inalámbrica a las baterías de los LHD, tanto en funcionamiento estático, como dinámico, eliminando las pérdidas de productividad por el intercambio de baterías y los problemas de mantención de los cables de arrastre, funcionando continuamente. Los principales beneficios son tener la misma flexibilidad de un equipo diésel, con menor emisión de gases contaminantes y con confiabilidades mucho más altas (Mining 3, 2020).

- **Sistema habilitador de posicionamiento (TRL 2):** La estimación de la posición de los vehículos en la minería subterránea sigue siendo un desafío importante y que puede determinar el futuro de la automatización de los equipos en minería subterránea (los métodos actuales poseen bajas confiabilidades, no son flexibles, son sensibles a las condiciones ambientales).

Con este proyecto se busca disponer de un método confiable de detección y clasificación, de equipos y personal, el cual dispondrá de un sistema de posicionamiento económico y confiable basado en una cámara que permita localizar y rastrear vehículos con una precisión de 1 metro y un sistema multisensor que entregue el posicionamiento del vehículo de forma precisa (en centímetros) para habilitar la automatización sin infraestructura previa como se necesita en la actualidad. Buscará prevenir colisiones, eliminar completamente el monitoreo en base a receptores GPS, permitiendo un mejor incremento operativo en la mina, mejorando así la productividad (Mining 3, 2020).

ANEXO C: VIABILIDAD DE TECNOLOGÍAS EN OPERACIONES MINERAS

1.1 Electromovilidad

1.1.1 Parámetros baterías y tiempos de carga

Tabla 69 Parámetros de principales baterías presentes en el mercado de automóviles.

Parámetro	Baterías de ion-Litio disponibles al 2013						Poli anión	Sales fundidas
	Metales oxidados							
	Lithium Cobalt Oxide (LCO)	Lithium Manganese Oxid (LMO)	Lithium Titanate Oxide (LTO)	Lithium Nickel Manganese Cobalt (NMC)	Lithium Manganese Phosphate (LMP)	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA)	Lithium Iron Phosphate (LFP)	
Ciclo de vida [número de ciclos]	>1000.0	>300.0	>4000.0	>1000.0	>2600.0	>1200.0	>2000.0	>2800.0
Vida calendario [años]	10.0	6.0	20.0	15.0	20.0	20.0	13	8.0
Voltaje típico de celda [V]	3.7	3.8	2.3	3.6	3.5	3.6	3.3	2.6
Número de celdas por batería [-]	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6	6.0
Capacidad de celdas [Ah]	26.0	32.0	50.0	52.0	50.0	55.0	33	-
Energía específica [Wh/kg]	200.0	140.0	90.0	145.0	175.0	132.0	100	90.0
Densidad de energía [Wh/L]	200.0	200.0	200.0	210.0	230.0	250.0	220	160.0
Poder específico[W/kg]	342.0	265.0	272.0	300.0	385.0	340.0	370	155.0
Capacidad específica [Ah/kg]	160.0	130.0	168.0	180.0	160.0	185.0	140	-
Costo celda [\$USD/kWh]	380.0	370.0	300.0	380.0	400.0	280.0	400	300.0
Costo de embalaje [% costo celda batería]	80.0%	80.0%	80.0%	80%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%

Fuente: De Lamberterie P. (2013).

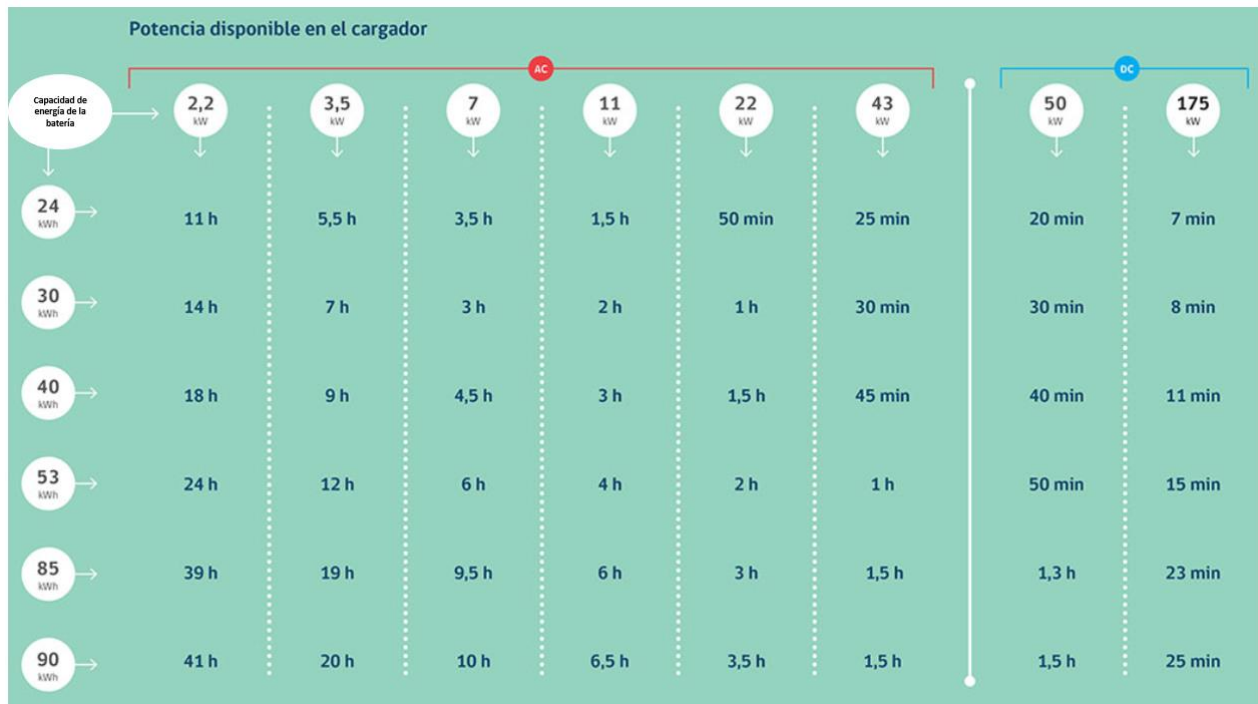


Figura 92 Tiempos de carga.

Fuente: Ministerio de Energía de Chile-a (2020).

1.1.2 Proveedores de baterías industriales

Los principales proveedores de baterías de acuerdo con Lyten M. (2019):

- **Voltabox:** Totalmente enfocado en tecnologías de iones de litio Fosfato de hierro litio (LFP), Níquel-manganeso-cobalto (NMC) y Litio-titanato-óxido (LTO). Tiene soporte en Norteamérica e internacional. Sus soluciones de sistemas de baterías se focalizan en:
 - a) Desarrollo de soluciones.
 - b) Especificaciones de clientes de forma personalizada.
 - c) Necesidades de las aplicaciones
 - d) Requerimientos ambientales
 - e) Ser socio y asesor de componentes auxiliares eléctricos y de tren motriz.
- **K2 Energy:** Desarrolla soluciones personalizables para celdas, módulos y sistemas de baterías, sólo trabaja con proceso químico LFP y ofrece opciones de alta energía y potencia en celdas cilíndricas.

- **Saft:** Empresa que tiene más de 100 años de experiencia en una amplia gama de procesos químicos de baterías incluyendo NMC y LFP. Dispone de una amplia gama de celdas, módulos y sistemas de baterías para muchas aplicaciones.
- **Akasol:** Proveedor de baterías para Medatech, que desarrolló el sistema de propulsión eléctrico para la empernadora Maclean. Tiene robustas soluciones de refrigeración líquida para altas temperaturas.
- **Enerdel:** Ofrece soluciones estándar y personalizadas., desarrollando celdas, módulos y sistemas de baterías compuestos de fundas LFP y NMC. Ofrece opciones de refrigeración líquida para sus paquetes de baterías
- **Cummins:** Empresa fabricante de motores, ahora también un proveedor de baterías. El 2019, lanza al mercado sistemas de batería para buses en 2019, con versión de rango extendido en 2020.Sistema escalable con paquetes de proceso químico NMC con refrigeración modular de flujo cruzado.
- **XALT Energy:** Empresa con más de 15 años de experiencia en la producción de celdas para aplicaciones de transporte y red eléctrica. Sistemas de baterías de refrigeración líquida con celdas de fundas NMC y LTO. Está incursionando en aplicaciones de servicio pesado con algunas aplicaciones en minería de superficie.

1.2 Interoperabilidad

1.2.1 Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad en Minería

Esta organización materializará su foco de interoperabilidad considerando los siguientes componentes (Fundación Chile, 2016):

- Desarrollo de una propuesta de arquitectura de interoperabilidad minera. A través de este componente se busca liderar desde Chile el desarrollo de una arquitectura que agrupe e identifique las familias de estándares, la metodología a utilizar para su desarrollo y valide los elementos considerados en la arquitectura actual para la interoperabilidad en minería.
- Capacidad de integración de proveedores y empresas mineras, cuyo objetivo es identificar un modelo de evaluación de capacidades de integración y un mecanismo de evaluación para proveedores y compañías mineras.

- Desarrollo, validación e implementación de estándares para interoperabilidad plug & work, que busca producir un conjunto de estándares, guías y herramientas de adopción y certificación de clase mundial para la interoperabilidad de procesos mineros actuales considerando operaciones manuales.
- Desarrollo, validación e implementación de estándares para interoperabilidad plug & work, que busca producir un conjunto de estándares, guías y herramientas de adopción y certificación de clase mundial para la interoperabilidad de procesos mineros actuales y futuros, considerando operaciones telecomandadas semi-autónomas y autónomas.

1.3 TICAR

1.3.1 Automatización

1.3.1.1 Clasificaciones de automatización

De acuerdo con The Royal Academy of Engineering (2009) y Guzmán D. (2017), las principales formas de clasificar la automatización son:

- **Por grado de control**

- a) Directo: El personal humano tiene el control total o parcial.
- b) Supervisado: El equipo hace lo que el operador comanda, pero no está involucrado directamente.
- c) Automático: El equipo lleva a cabo procesos fijos predefinidos por el operador, pero sin intervención de este (ejemplo un elevador).
- d) Autónomo: Sistemas que tienen la capacidad de adaptarse, aprender y tomar decisiones independientes de un operador humano.

- **Forma de operar los equipos mineros**

- a) Manual: Un operador es la persona que supervisa la máquina y toma las medidas de control necesarias.
- b) Control remoto: El operador tiene contacto visual directo la mayor parte del tiempo con el objetivo controlado, los comandos son enviados eléctricamente vía cable o inalámbricamente vía radio.
- c) Teleoperación: Operar un vehículo a distancia, pero en minería el término puede ser extrapolado a “operar un vehículo o máquina estacionaria a distancia”. La

teleoperación de un vehículo tiene varias características que lo diferencian de una operación a control remoto:

- La teleoperación de un vehículo demanda una navegación confiable.
- La teleoperación de un vehículo requiere una generación de comandos eficientes de movimiento.
- La teleoperación de un vehículo requiere sensores de localización.

d) **Sistemas automático y semi-automático (semi autónomo):** El término automático se refiere generalmente al reemplazo total o parcial de una función llevada previamente por operadores, ya sea física o mentalmente. Lo anterior referido a la capacidad que tienen los software y hardware computacionales, según realiza una clasificación en relación con cuatro etapas del proceso de toma de información y decisiones del ser humano:

- Adquisición de información.
- Análisis de la información.
- Decisión y selección de la acción.
- Implementación de la acción.

El término semi-automático, es utilizado para hacer referencia a un proceso donde parte de este se desarrolla en forma automática y otra parte en forma manual (ejemplo carguío en LHD con navegación autónoma).

e) **Sistemas autónomos:** Son equipos y sistemas que son capaces de realizar una serie de operaciones donde la secuencia es determinada por el resultado de una operación previa o por una referencia de circunstancias externas que son monitoreadas y medidas por el mismo sistema, no teniendo intervención de operadores.

1.3.1.2 Esquemas de automatización de Sandvik

CEMIN MINA UVA

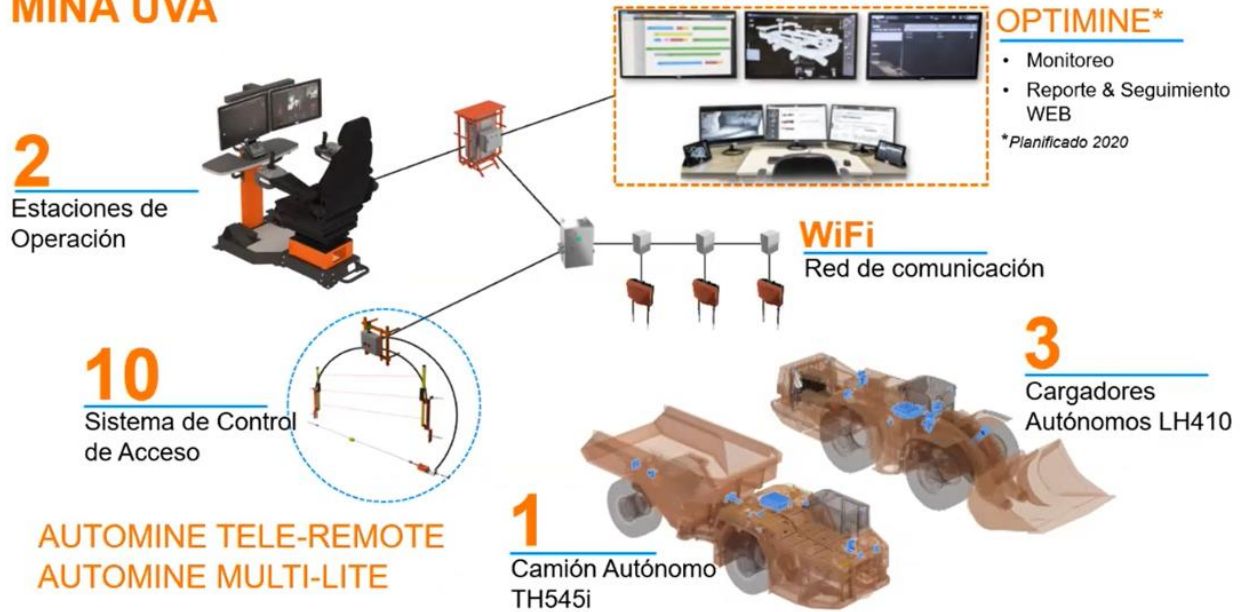


Figura 93 Automatización en faena minera UVA de CEMIN.

Fuente: Vega E. (2020).



Figura 94 Esquemas de automatización con Optimine de Sandvik: A) Loop Camión mina UVA; B) 3 LHD en Diablo Regimiento, El Teniente.

Fuente: Vega E. (2020).

1.4 Sistemas control antifatiga y somnolencia

Los sistemas de control de fatiga y de somnolencia tienen como principal propósito aumentar la seguridad de las operaciones mineras, preocupándose principalmente de los

factores humanos que permiten la aparición de condiciones latentes en las causas inmediatas de los diferentes accidentes (Ver Figura 95).

Considerando los factores humanos, los estados de prisa, frustración, fatiga y complacencia pueden causar o contribuir a la aparición de errores críticos como tener la mente/ojos fuera de las tareas, falta de equilibrio, de tracción o de agarre incrementando el riesgo de lesiones, incidentes y accidentes.

En la industria del transporte, el 57% de los accidentes fatales son causados por la fatiga del conductor, mientras que en minería la fatiga se considera la causa número uno de los choques de vehículos pesados como Caex. Se estima que, en Estados Unidos, cada año ocurren 100,000 choques causados por conductores que se han quedado dormidos al volante generando más de 1,500 muertos y 71,000 heridos (Paredes E., 2012).

La fatiga se considerada uno de los estados más peligrosos cuando se maneja un vehículo minero, porque interfiere directamente en el adecuado procesamiento de información y la toma de decisiones, los turnos mineros, en especial los nocturnos, requieren que los conductores tengan un nivel de alerta suficiente para la operación de los equipos y reaccionar adecuadamente ante cualquier evento (Paredes E., 2012).

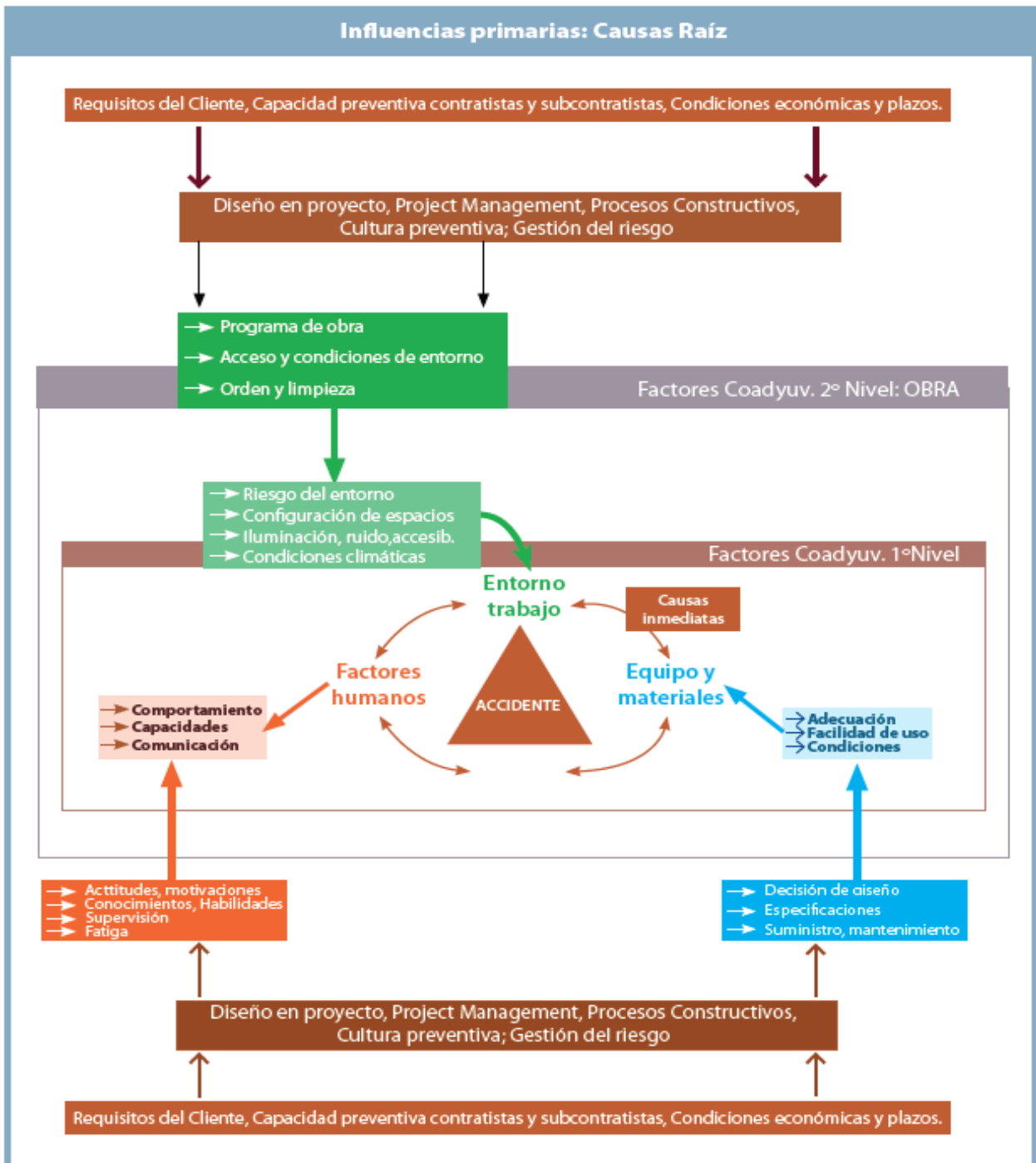


Figura 95 Modelo causal de accidentes en obras de construcción, Jerarquía de influencias.

Fuente: Instituto Regional de Seguridad y Salud en el trabajo (2016).

Un operador fatigado es un riesgo, para sí mismo, y para los demás. De esta manera, los sistemas de monitoreo de fatiga y somnolencia (ver Figura 96) permiten monitorear e

identificar eventos de fatiga y distracción por medio de dispositivos instalados en la cabina del operador, el cual activa una alarma de sonido cuando el operador se encuentra fuera de los parámetros de operación establecidos (Paredes E., 2012).

Los principales criterios de selección de estas tecnologías para Codelco-Expande (2019) son:

- Capacidad de monitoreo en línea y en tiempo real.
- Compatible con los vehículos livianos y pesados utilizados en minería.
- De fácil mantenibilidad.
- Capacidad para emitir alertas en tiempo real, tanto al trabajador como al sistema de control.
- Registrar y almacenar la data histórica de los casos detectados.
- No invasivo, que no afecte la integridad y salud del trabajador y las actividades productivas.



Figura 96 Diagrama básico de Sistema de monitoreo de fatiga.

Fuente: Paredes E. (2012).

ANEXO D: MATRIZ ESFUERZO/IMPACTO

Tabla 70 Principales tecnologías o procesos traccionantes para Komatsu en Matriz Esfuerzo/Impacto.

Tecnología o proceso	Seguridad	Productividad	Capex	Opex	Sustentabilidad	Continuidad operacional
Equipos híbridos	Bajo: No hay gran variación en seguridad	Medio: Equipos más eficientes que diésel	Medio: Menor necesidad de desarrollos en ventilación.	Alto: Menor costo de ventilación y uso más eficiente combustible, menor mantención	Medio: Reduce emisiones de gases, menor ruido, pero usa diésel (en menor proporción)	Medio: Menor necesidad de mantención (menos piezas móviles)
Equipos eléctricos a baterías	Bajo: No hay gran variación en seguridad.	Medio: Equipos más eficientes que diésel	Medio: Menor necesidad de desarrollos en ventilación.	Alto: Menor costo de ventilación y uso más eficiente combustible, menor mantención	Alto: Reduce emisiones, menor ruido, independiente del diésel	Medio: Menor necesidad de mantención (menos piezas móviles)
Equipos a hidrógeno	Medio: Puede aumentar probabilidad de incendio en espacios confinados	Medio: Equipos más eficientes que diésel	Medio: Menor necesidad de desarrollos en ventilación.	Alto: Menor costo de ventilación y uso más eficiente combustible, menor mantención	Alto: Reduce emisiones, menor ruido, independiente del diésel.	Medio: Menor necesidad de mantención (menos piezas móviles)
Tuneladoras	Alto: Menor exposición trabajadores, elimina utilización de explosivos, menor perturbación en el macizo rocoso	Alto: Mayor cantidad de metros de avance por día en desarrollos	Alto: Por el alto nivel de especificidad del equipo, con respecto a la mina en particular y el método mecanizado en sí	Medio: Disminuye requerimientos de ventilación por tronadura, pero utiliza intensivamente energía	Medio: Reduce la emisión de sustancias contaminantes, pero utiliza intensivamente energía	Alto: Menor cantidad de interferencias operacionales (cambia ciclo tradicional de operación de los desarrollos)
Sistemas de minería continua	Alto: Menor exposición trabajadores, elimina utilización de explosivos, menor perturbación en el macizo rocoso	Alto: Elimina tiempos muertos de las operaciones batch, moviendo mayor cantidad de material	Alto: Altas inversiones iniciales, vida útil mayor	Medio: Disminuye requerimientos de ventilación por tronadura, pero utiliza intensivamente energía	Medio: Reduce la emisión de sustancias contaminantes, pero utiliza intensivamente energía	Alto: Elimina ineficiencias de la operación batch, mayor cantidad de horas operativas efectivas
Automatización y robótica	Alto: Menor exposición trabajadores, permite acceso a zonas peligrosas	Alto: Mayor movimiento de material por mayor cantidad de horas operativas efectivas	Alto: Necesidad de reconfigurar diseños mineros, implementar sensores y monitoreo avanzado y red de comunicación de alta confiabilidad	Medio: Operación de equipos es más homogénea, menor mantención, mayor consumo de combustible	Bajo: No hay gran variación en sustentabilidad en relación con emisiones, pero la energía es usada de forma más eficiente (operación homogénea)	Alto: Alta continuidad operacional por menores interrupciones por colaciones, cambios de turno, etc.

Elaboración propia.

Tabla 71 Principales tecnologías o procesos habilitadores para Komatsu en Matriz Esfuerzo/Impacto.

Tecnología o proceso	Seguridad	Productividad	Capex	Opex	Sustentabilidad	Continuidad operacional
Transformación digital	Medio: Mayor valor de los datos permite proteger a las personas y los activos, reducir/previsualizar condiciones de peligro (monitoreo/simulación), pero la información queda más vulnerable a ciberataques	Alto: Activos y personas son más eficientes, habilita otros procesos/tecnologías	Medio: Para su efectividad requiere implementar sensores y monitoreo avanzado y red de comunicación de alta confiabilidad	Bajo: Una vez hechas las inversiones, el principal costo es el mantenimiento	Alto: Permite incrementar la eficiencia en el uso del agua y de la energía y medir la huella de carbono	Alto: Mayor conexión y comunicación entre equipos/procesos aumenta las horas operativas efectivas
Interoperabilidad	Medio: Mejora la interacción entre equipos, personas e infraestructura, mejor comunicación de condiciones peligrosas	Alto: Agilización de procesos mina, impacta directamente la productividad por la sinergia entre los procesos y productos (elimina ineficiencias).	Bajo: Considera la adopción de protocolos, pero no requiere grandes inversiones en capital	Bajo: Se Reducen los costos operacionales, porque el cliente sabe lo que recibe	Medio: Apoya la eficiencia del uso del agua y la energía	Alto: Permite más horas efectivas de operación por mayor conectividad entre personas, equipos y procesos
Monitoreo y sensorización	Alto: Permite reducir o visualizar condiciones peligrosas del ambiente	Medio: Habilita otros procesos como la automatización y transformación digital	Alto: Considera la implementación de redes de comunicaciones más robustas (LTE o 5G) y sensores a lo largo de toda la operación	Bajo: Una vez hechas las inversiones, el principal costo es el mantenimiento	Medio: Permite incrementar la eficiencia en el uso del agua y de la energía y habilita la medición exacta de la huella de carbono	Alto: Permite más horas efectivas de operación por mayor conectividad entre personas, equipos y procesos
Minería subterránea masiva	Medio: Mayor conocimiento del macizo rocoso, tanto del fracturamiento hidráulico, el manejo de columnas de mayores alturas	Alto: Mayores velocidades de extracción por manejo de columnas de mayores alturas, menos puntos colgados por FH	Bajo: Considera sistemas y métodos ya implementados a menor a mayor escala	Bajo: Considera sistemas y métodos ya implementados a menor a mayor escala	Bajo: Considera sistemas y métodos ya implementados a menor a mayor escala	Medio: Menor ocurrencia de puntos colgados que permite tener mayores horas efectivas de operación
Gestión del cambio	Alto: Una cultura organizacional orientada a la seguridad, disminuye considerablemente la accidentabilidad	Medio: Personas más involucradas en los procesos permite operar/gestionar/planificar de mejor manera	Medio: Programas de entrenamiento, de reubicación, capacitación, requieren inversiones importantes tanto en capital, como en tiempo	Medio: Mayor eficiencia en la utilización de los equipos o control de los procesos, pero restringido a los equipos/tecnología utilizada	Alto: Trabajadores y altos ejecutivos comprometidos con el cuidado y la preservación del medio ambiente, aplican tecnologías o procesos en esta línea	Medio: Eliminación de ineficiencias tanto en la operación, la gestión y la planificación, aumenta las horas efectivas de operación

Elaboración propia.

