



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**EFFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍAS AUTÓNOMAS
EN EL DISEÑO Y LA PLANIFICACIÓN MINERA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JULIO RENATO MAGRI RIVERA

**PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
WINSTON ROCHER ANDA
MAURICIO TELIAS HASSON**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

RESUMEN

Los actuales avances tecnológicos han hecho posible el desarrollo de tecnologías autónomas, capaces de operar sin la necesidad de que un operador humano intervenga. En el último tiempo y como una herramienta para sobrellevar los desafíos que enfrenta la industria minera, algunas empresas han decidido dar un salto tecnológico e implementar soluciones autónomas en sus operaciones. Estas implementaciones son recientes y escasas, por lo que la cantidad de información disponible es insuficiente en muchos aspectos y gran parte de la que existe es brindada por las mismas empresas proveedoras, por lo que cierto sesgo no sería extraño. El objetivo del trabajo es determinar qué parámetros del diseño y la planificación minera serán afectados por esta tecnología y cómo variarán ante este impacto.

El análisis de los efectos que tiene la implementación de tecnologías autónomas se basó en una primera etapa de recopilación de información relativa a este tipo de tecnologías, una etapa posterior de definición de los potenciales parámetros de diseño y planificación minera que podrían verse afectados por el uso de estas tecnologías, y una etapa final de validación de los efectos de estas tecnologías a través del caso de los camiones autónomos.

Los resultados del estudio indican que los mayores beneficios al incorporar tecnologías autónomas serían; un aumento en la seguridad y una mejora en las condiciones laborales de los empleados, una mayor utilización de los equipos, menores tasas de desgaste de los neumáticos, un consumo más eficiente de combustible y, como resultado de lo anterior, una mayor productividad de los equipos. Esto, principalmente asociado a las ventajas de usar tecnologías autónomas, con las cuales los operadores pasan a trabajar en una sala de control, lejos de las actividades potencialmente riesgosas. Al carecer de un operador, no son necesarios los tiempos de colación ni cambios de turnos y se elimina el factor humano en la toma de decisiones, además le brindan consistencia y continuidad a la operación.

Por otro lado, el principal perjuicio detectado al incorporar tecnologías autónomas sería en el diseño minero, el funcionamiento interno de estos equipos y las particularidades en su operación hacen necesario tener un diseño con mayores holguras, principalmente en términos del ancho de las rampas y de los frentes de carguío. En general y según la evidencia encontrada, el uso de este tipo de tecnologías se muestra como una alternativa factible para mejorar las operaciones mineras y enfrentar los desafíos que enfrenta la industria.

ABSTRACT

Current technological advances have made it possible to develop autonomous technologies, able to operate without the need for human intervention. In recent times and as a tool to overcome the challenges facing the mining industry, a few companies have decided to make a technological leap and implement autonomous solutions in their operations. These implementations are recent and scarce, so the amount of information available is insufficient in many ways and most of which is provided by the same suppliers, so some bias would not be surprising. The objective of the study is to determine which parameters of the design and mine planning will be affected by this technology and how they are going to vary. The validation of these effects is performed using the autonomous trucks as a case study.

The analysis of the effects of implementing autonomous technologies was based on a first stage of gathering information on these technologies, a later stage of defining design and mine planning parameters that could potentially be affected by the use of this technologies, and a final stage where this effects are validate through the study of autonomous trucks.

The results indicate that the greatest benefits due to the incorporation of autonomous technologies are an increased safety and improved working conditions for employees, the increased utilization of equipment, lower rates of tire wear, more efficient fuel consumption and, as a result, increased productivity of the equipment. This was mainly associated with the benefits of using autonomous technologies, with which operators go to work in a control room, away from potentially risky activities, the absence of an operator make snack times and shift changes unnecessary and eliminates the human factor in decision-making, also provide consistency and continuity to the operation.

On the other hand, the main disadvantage detected by incorporating autonomous technology would be in the mine design, the inner workings of these equipment and the particularities of their operation make it necessary to have a more loose design, mainly in terms of the width of the ramps and haulage fronts. In general, according to the evidence found, the use this kind of technologies is a feasible alternative to improve mining operations and meet the challenges facing the industry.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
TABLA DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE ECUACIONES	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del trabajo	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	3
1.4. Metodología	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Actuales desafíos de la industria minera.....	4
2.1.1. Costos de producción.....	4
2.1.2. Demanda de metales	5
2.1.3. Incertidumbre operacional	6
2.1.4. Fuerza laboral	7
2.1.5. Seguridad	7
2.2. ¿Qué es la automatización?.....	8
2.3. ¿Por qué automatización?	9
2.4. Dificultades de un sistema autónomo	10
2.5. Fuerzas impulsoras de la automatización en minería.....	10
2.6. Ciclo de desarrollo de una tecnología autónoma	11
2.7. Historia de la automatización en minería.....	12
2.8. Tecnologías autónomas utilizadas en minería	14
2.8.1. Camión de riego autónomo.....	15
2.8.2. Sistema de perforación autónoma.....	16
2.8.3. Tren Autónomo.....	18
2.8.4. LHD semi-autónomo	19
2.8.5. Camiones autónomos	21
2.9. Impacto social de la automatización	26
2.9.1. Empleo y educación.....	26
2.9.2. Desarrollo e inversión.....	27
3. PROYECCIONES	28
3.1. Disponibilidad de los equipos	28
3.2. Utilización de los equipos	31

3.3.	Productividad de los equipos	31
3.4.	Incertidumbre operacional	33
3.5.	Parámetros geométricos de diseño	33
3.6.	Costos operacionales.....	36
3.6.1.	Ingresos.....	36
3.6.2.	Costos operacionales	36
3.6.3.1	Costo mano de obra.....	37
3.7.	Consumo de combustible	39
3.8.	Vida de los neumáticos	41
3.9.	Seguridad	43
4.	VALIDACIÓN	46
4.1.	Disponibilidad mecánica de los equipos	47
4.2.	Utilización de los equipos	49
4.3.	Productividad de los equipos	51
4.4.	Incertidumbre operacional	53
4.5.	Parámetros de diseño	55
4.6.	Consumo de combustible	56
4.7.	Vida de los neumáticos	59
4.8.	Costos operacionales.....	61
4.9.	Seguridad	63
4.10.	Resultados de la validación	64
5.	CONCLUSIONES Y CONCLUSIONES.....	67
6.	BIBLIOGRAFÍA	69
	ANEXO Modelo de simulación (Juliana Parrerira).....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Costo unitario de producción de cátodos de cobre [cUS\$/lb] en Chile.	4
Figura 2. Consumo mundial de cobre refinado [kMt].	5
Figura 3. Proyecciones del crecimiento económico	5
Figura 4. Ley de Cobre [%] vs Producción de Cobre [kt].	6
Figura 5. Escasez de trabajadores calificados.	7
Figura 6. Número de trabajadores fallecidos según tipo de instalación (Sernageomin, 2014).	8
Figura 7. Línea de tiempo: Automatización en minería	13
Figura 8. Sistema de riego semi-autónomo	16
Figura 9. Sala de control perforadoras giratorias autónomas.	17
Figura 10. Tren de transporte de Río Tinto, Región de Pilbara, Australia Occidental.	18
Figura 11. Operación a control remoto line-of-sight.	19
Figura 12. Sala de control LHD autónomos.	20
Figura 13. Camión autónomo – Mina Gabriela Mistral.	23
Figura 14. Sistema de detección de obstáculos.	23
Figura 15. Diagrama Sistema de Acarreo Autónomo.	24
Figura 16. Camión autónomo Caterpillar.	25
Figura 17. Modelo de Clasificación de Horas.	28
Figura 18. Parámetros geométricos de un talud minero.	35
Figura 19. Radio de curvatura.	35
Figura 20. Parámetros geométricos en una rampa.	35
Figura 21. Distribución de costos en minas de cobre en Chile.	37
Figura 22. Precio Cobre e Índice real de Remuneraciones en Minería 1990 – 2007.	38
Figura 23. Precio Petróleo WTI (Sonami, 2014).	39
Figura 24. Consumo combustible y producción nacional de cobre (Zeballos, 2013).	40
Figura 25. Consumo de combustible por tipo de instalación (Zeballos, 2013).	41
Figura 26. Top Cad.	42
Figura 27. Sideflex.	42
Figura 28. Tasa de accidentabilidad según actividad económica.	44
Figura 29. Tasa de fatalidad según actividad económica.	44
Figura 30. Tasa de mortalidad de minería chilena 1983 – 2013.	45
Figura 31. Uso efectivo minera Gabriela Mistral (Navarrete <i>et al</i> , 2013).	54
Figura 32. Representación rampa doble sentido	55
Figura 33. Sistema de detección de obstáculos.	64
Figura 34. Impacto Porcentual.	65
Figura 35. Layout Modelo de Simulación.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Horas en mantención.	48
Tabla 2. Horas hábiles y Horas en mantención.	48
Tabla 3. Disponibilidad Mecánica.	48
Tabla 4. Horas de transporte, cambio de turnos, colaciones y demoras.	50
Tabla 5. Horas operativas y de reserva.	50
Tabla 6. Utilización.	50
Tabla 7. Número de ciclos y carga útil.	52
Tabla 8. Productividad.	52
Tabla 9. Consumo combustible por tipo de conductor y etapa del ciclo.	57
Tabla 10. Consumo combustible por tipo de conductor.	58
Tabla 11. Consumo de combustible.	58
Tabla 12. Desgaste de neumáticos por tipo de conductor y etapa del ciclo.	60
Tabla 13. Desgaste de neumáticos.	61
Tabla 14. Agresividad y estabilidad.	73

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo Horas de Calendario.	28
Ecuación 2. Cálculo Horas Inhábiles.	29
Ecuación 3. Cálculo Horas Hábiles.	29
Ecuación 4. Horas hábiles.	30
Ecuación 5. Disponibilidad de los equipos.	30
Ecuación 6. Utilización de los equipos.	31
Ecuación 7. Productividad diaria.	32
Ecuación 8. Productividad diaria.	32
Ecuación 9. Tasa de accidentabilidad.	43
Ecuación 10. Tasa de fatalidad.	43
Ecuación 11. Tasa de mortalidad.	43
Ecuación 12. Consumo de combustible.	74

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se refiere a los efectos de la implementación de tecnologías autónomas en el diseño y la planificación minera. La característica principal de las tecnologías autónomas es que, por medio de una administración inteligente de sus sistemas, son capaces de operar sin la necesidad de que un humano intervenga directamente.

Este tipo de tecnologías ha sido muy utilizada en diferentes industrias, entre las que destacan la industria aeronáutica, médica, de energía nuclear, de control de procesos, manufacturera, etc., sin embargo, hasta hace poco no era utilizada a gran escala en la industria minera. Pero eso está cambiando, muchos autores proponen a la automatización como la herramienta que le puede hacer frente a los actuales desafíos del complejo escenario que está enfrentando la industria: Alza en costos operacionales, producción que debe estar a la altura de una creciente demanda por metales, seguridad y envejecimiento de la fuerza laboral. Es por esto que este tipo de tecnologías está actualmente dando sus primeros pasos en la industria minera.

Este trabajo nace con la idea de entender el funcionamiento y los posibles efectos que pudiese tener la implementación de una tecnología que probablemente tenga cada vez un papel de mayor protagonismo en minería. Además se tiene el interés de estar en la frontera del conocimiento con respecto a las nuevas tendencias tecnológicas que se están abriendo paso en la industria minera.

La primera etapa del trabajo fue la recopilación de la información relativa a las tecnologías autónomas, sus aplicaciones en minería y sus posibles impactos en el diseño y la planificación de la operación. Al ser una tecnología de recientes y escasas aplicaciones, para poder obtener una buena cantidad de información las fuentes de búsqueda han sido diversas, entre las que se encuentran trabajos científicos, entrevistas a trabajadores de la industria, revistas de minería, folletos, boletines y manuales de empresas mineras y proveedoras, noticias en la prensa, entre otras.

La siguiente etapa consta de definir los parámetros claves para el diseño y la planificación minera que pudiesen experimentar cambios al implementar tecnologías autónomas. Estos serán los parámetros a estudiar.

A priori, existen en la literatura proyecciones de cómo se verían afectadas los parámetros claves definidos anteriormente. El último paso consiste en la validación de las proyecciones que se tienen sobre estos parámetros, lo que se realiza por un tema de acceso a la información, considerando como caso de estudio a los camiones autónomos usados en minería a cielo abierto.

El presente trabajo se divide en cinco capítulos principales. Un capítulo de antecedentes con respecto a la automatización y su insipiente uso en la industria minera. Luego un capítulo donde se listan y describen los parámetros claves a estudiar. El siguiente capítulo consiste en la validación realizada en base al caso de estudio y finalmente un capítulo con las conclusiones finales del trabajo.

1.1. Motivación del trabajo

Al considerar los desafíos que enfrenta la industria y el potencial papel protagónico de la automatización en la minería, nace la motivación de realizar el presente trabajo en el uso de tecnologías autónomas en minería. En particular, intenta determinar cuáles serán los cambios, tanto en el diseño como en la planificación de una operación minera, al implementar este tipo de tecnologías.

Para finalizar, se presenta una cita que pone de manifiesto la relevancia que algunos autores le asignan a la automatización.

“the challenges facing the industry today demand autonomous solutions. The rewards for being at the forefront of automation are great, but the penalties for inaction are far greater”

Albanese T, McGagh J, Future trends in mining, 2011.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es la validación del comportamiento que tendrán los parámetros claves en el diseño y la planificación minera al implementar tecnologías autónomas en una operación minera. Por medio de esta validación se espera clarificar y cuantificar el verdadero impacto de este tipo de tecnologías.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinación de los parámetros que se ven afectados por la implementación de tecnologías autónomas.
- Validación del comportamiento de los parámetros a estudiar por medio de un caso de estudio.

1.3. Alcances

Por un tema de cantidad y accesibilidad a la información, el estudio se centrará principalmente en la automatización en minería a cielo abierto, por lo que el transporte de mineral por medio de camiones autónomos será el caso de estudio escogido para llevar a cabo la validación. Se dejarán, por lo tanto, al margen del estudio otros equipos y operaciones automatizables como son la perforación, la tronadura, el riego de los caminos y la obtención de información topográfica, entre otras.

El estudio podría, según la información de la que se disponga y del tipo de parámetro a estudiar, tener un carácter más cualitativo que cuantitativo.

1.4. Metodología

La metodología seguida con el fin de alcanzar los objetivos propuestos anteriormente, consiste en las cuatro etapas siguientes:

1. Recopilación de toda la información relacionada al uso de tecnologías autónomas en minería. Es de particular interés la información relativa a los cambios experimentados o esperados por el uso de este tipo de tecnología.
2. Definición de los parámetros a estudiar.
3. Validación, por medio del caso de estudio, de los parámetros definidos en la etapa anterior.
4. Análisis de los resultados. Generación de las conclusiones y recomendaciones del estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1. Actuales desafíos de la industria minera

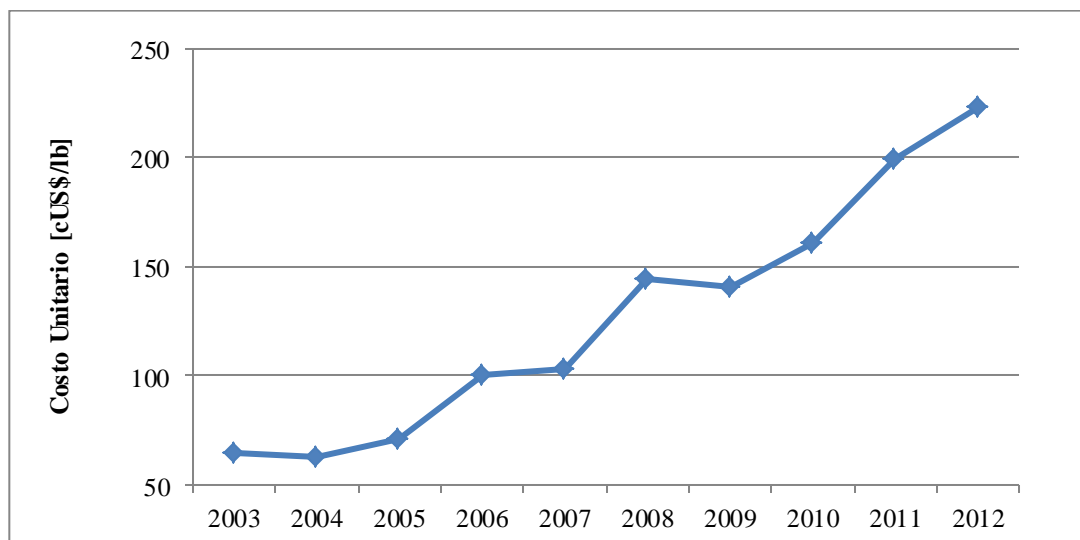
Actualmente la industria minera se desarrolla en un complejo escenario, en el cual se enfrenta a una serie de desafíos de distinta índole. La gama de desafíos abarca temas económicos, laborales y técnicos. A continuación se ahonda en algunos de los principales desafíos de la actividad.

2.1.1. Costos de producción

Los costos de producción de un metal corresponden a los costos directos e indirectos incurridos en la operación minera, concentración, fundición y refinación. Además este parámetro puede incluir la depreciación y los intereses.

El alza en los precios de los combustibles, energía, agua y otros insumos vitales para una operación minera, sumado a las mayores exigencias técnicas y de accesibilidad a los yacimientos aún no explotados, han provocado un drástico aumento en los costos de producción de los proyectos mineros. La figura 1 refleja esta alza por medio de los costos unitarios de la producción de cátodos de Cobre en Chile para la última década, tiempo durante el cual aumentó cerca de un 240% (Cochilco, 2013).

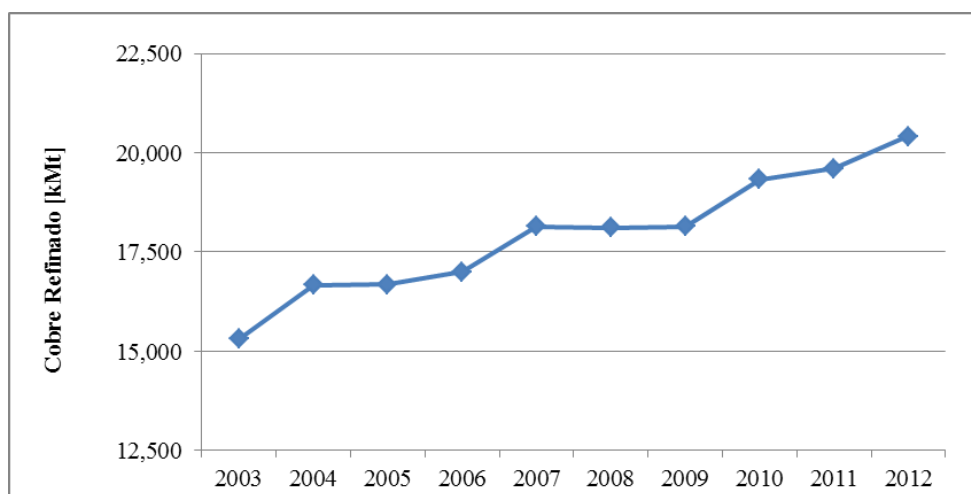
Figura 1. Costo unitario de producción de cátodos de cobre [cUS\$/lb] en Chile.



2.1.2. Demanda de metales

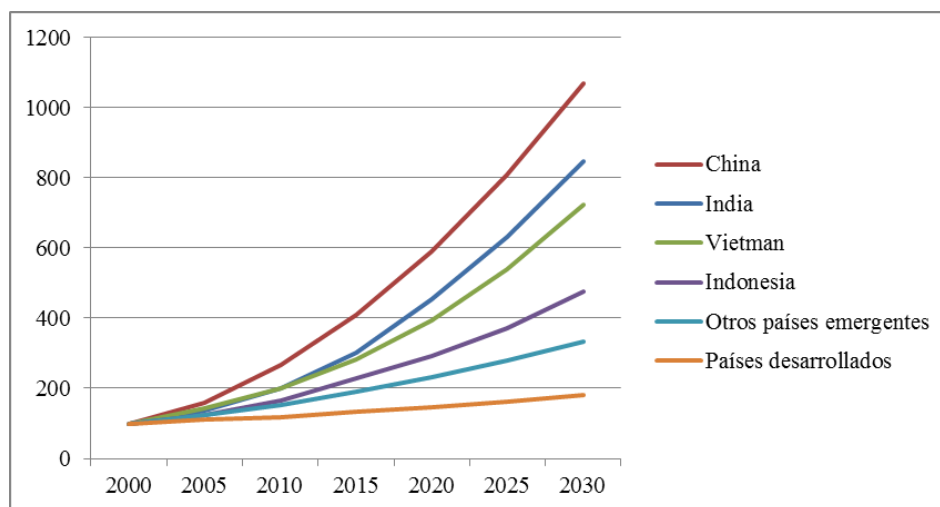
La industrialización y urbanización experimentada en la última década por China y otros países asiáticos emergentes han tenido un papel importante en el significativo aumento de la demanda global de metales. En el caso del consumo de cobre refinado este aumento ha sido del orden del 30% en los últimos diez años (Cochilco, 2013).

Figura 2. Consumo mundial de cobre refinado [kMt].



Como se puede apreciar en la figura siguiente las proyecciones indican un rápido y sostenido crecimiento económico de los países asiáticos (World Bank, 2010), por lo que en el mediano plazo se espera que la tendencia a la alza de la demanda de metales se mantenga.

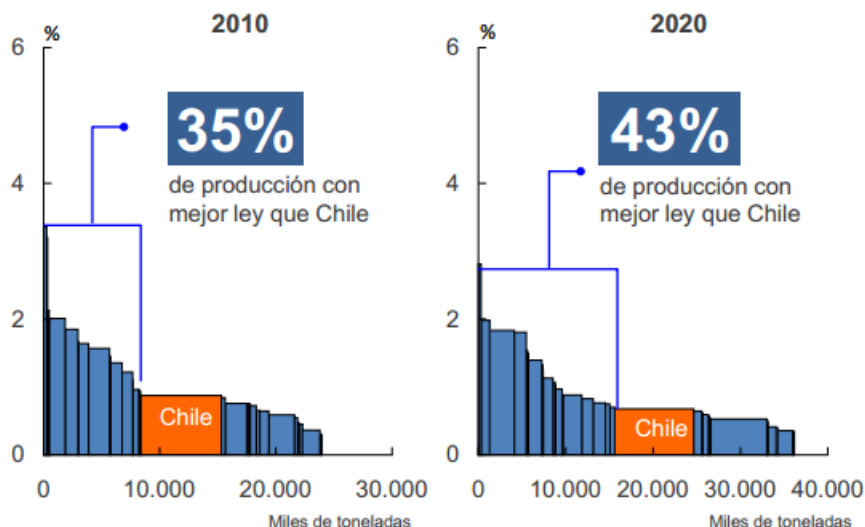
Figura 3¹. Proyecciones del crecimiento económico



¹ Datos normalizados a 100 en año 2000.

En general los minerales de alta ley son extraídos al comienzo de la explotación por lo que a medida que los yacimientos envejecen se produce un descenso en las leyes de metales. En el caso particular de Chile y el cobre, estimaciones indican que entre 2010 y 2020 la producción mundial de Cobre proveniente de países con leyes de cobre mayores que Chile aumentará del 35% al 43% (Wood Mackenzie, 2012).

Figura 4. Ley de Cobre [%] vs Producción de Cobre [kt].



Esta disminución de las leyes ha exigido un aumento en la productividad de las operaciones con el fin de estar a la altura de la creciente demanda de metales.

2.1.3. Incertidumbre operacional

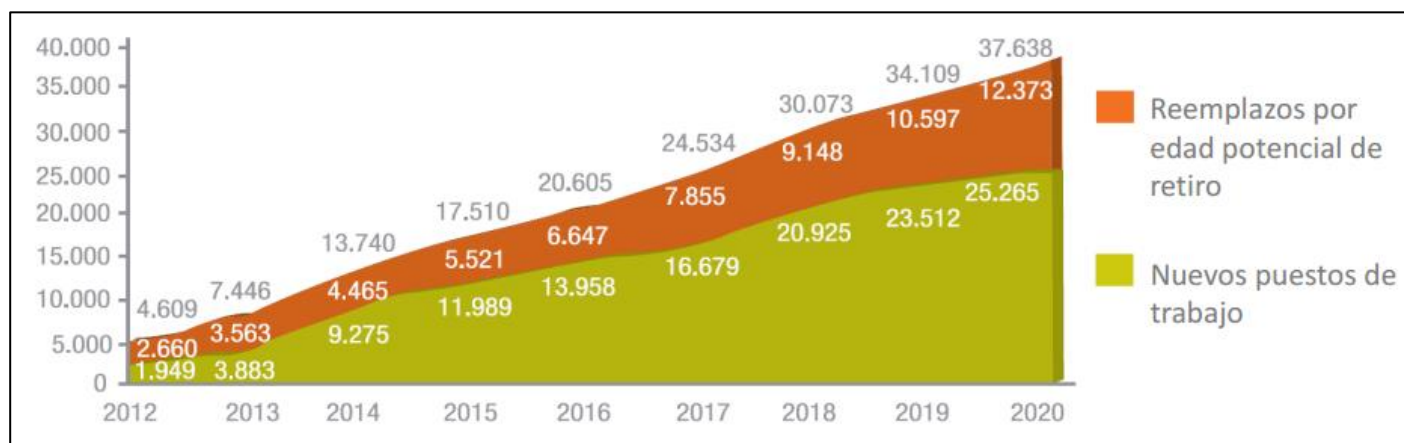
La incertidumbre operacional engloba todas las actividades, circunstancias e imprevistos que le agregan variabilidad a un proceso y hacen imposible saber con exactitud cómo este proceso se comportará en el futuro. En el caso particular de una operación minera la incertidumbre operacional es un problema que afecta directamente a la planificación y a la confiabilidad de sus planes.

Uno de los componentes de esta incertidumbre viene dado por la variabilidad inherente a la condición humana. La incapacidad de realizar tareas de forma sistemática y exactamente igual y los diferentes aspectos personales que afectan la toma de decisiones (concentración, humor, estado de alerta, etc.) producen esta indeseada variabilidad en la operación.

2.1.4. Fuerza laboral

El boom minero de los últimos años ha generado una escasez de trabajadores calificados en la industria minera alrededor del mundo. Además se observa un envejecimiento de la fuerza laboral y una insatisfacción con respecto a las condiciones del trabajo, por lo que al mismo tiempo que se hace más común la rotación de personal también se observa que las próximas generaciones son más reacias a la idea de trabajar lejos de sus familias y amigos en lugares aislados y con pocas comodidades, como generalmente son, las zonas mineras. Por lo tanto, actualmente los trabajadores calificados que se necesitan pueden ser más difíciles de buscar, aún más de retener y costosos de emplear. En el ámbito nacional y según el informe de fuerza laboral de la gran minería del año 2012, tan sólo para labores de extracción, procesamiento y mantenimiento se requerirán 38.000 trabajadores adicionalmente al 2020, lo que equivale a un incremento del 24% en la fuerza laboral (Consejo minero, 2013).

Figura 5. Escasez de trabajadores calificados.



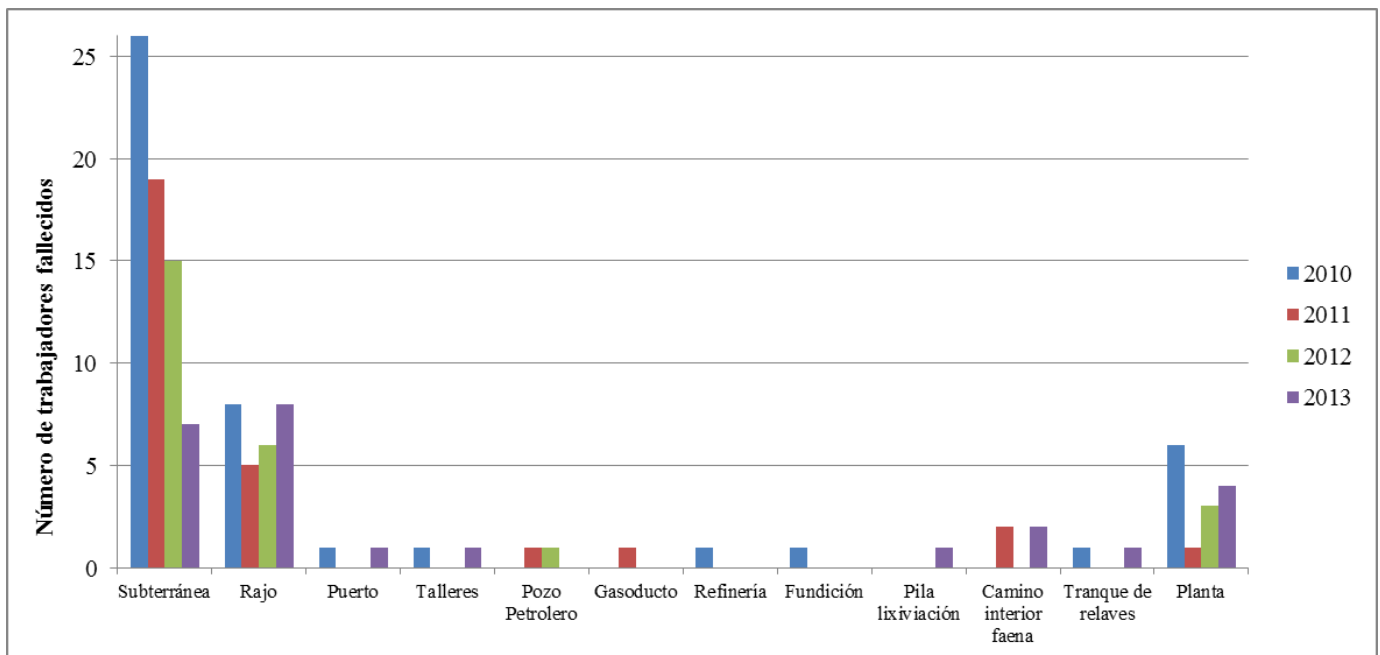
2.1.5. Seguridad

Con el paso del tiempo y un proceso de continua innovación y modernización la industria minera ha logrado, en parte, superar el estigma de ser una actividad riesgosa. Los datos indican que la minería chilena tiene una tasa de accidentabilidad varias veces inferior en comparación al resto de los grandes rubros económicos del país. Sin embargo, en términos de fatalidades se sigue encontrando en los primeros puestos (Sernageomin, 2014).

A pesar de los avances, la minería sigue siendo una actividad en que las condiciones de trabajo incluyen polvo, ruido, suciedad y en ocasiones espacios confinados y lugares alejados. Como se observa en la figura 6 la mayor cantidad de accidentes fatales ocurren en actividades de la mina subterránea, rajo y planta:

- En una operación a rajo abierto los riesgos principales son el desprendimiento de rocas, la falla de taludes y la interacción entre los trabajadores y grandes equipos móviles.
- En una mina subterránea existe riesgo de fallas de pilares, derrumbes, fuegos y la interacción con equipos móviles en espacios confinados.
- En una planta los trabajadores conviven con gases, polvo y químicos usados en el procesamiento de minerales. Además las tecnologías de procesamiento generan cada vez partículas más finas, que no sólo hay que tener en cuenta en términos de la salud de los trabajadores, sino también del medio ambiente.

Figura 6. Número de trabajadores fallecidos según tipo de instalación (Sernageomin, 2014).



2.2. ¿Qué es la automatización?

La automatización es definida como la administración inteligente de un sistema que, usando tecnología apropiada, es capaz de operar sin la necesidad de que un humano intervenga directamente. Lo anterior es generalmente logrado por medio de un sistema computarizado. (Lynas *et al*, 2011).

La automatización no es un concepto absoluto y es mejor entenderlo como una serie de niveles continuos, que van desde un control completamente manual hasta el extremo opuesto, un control completamente autónomo sin interacción humana. En el ámbito minero la automatización se clasifica en tres niveles (Horberry *et al*, 2010):

- Nivel bajo de automatización: Sistemas que son controlados completamente y en todo momento por el operador, la tecnología sólo proporciona asistencia o advertencias. Aproximadamente la mitad de los sistemas caen en esta categoría, lo que se explica porque estos son más sencillos de desarrollar e instalar. La mayoría de las tecnologías de este nivel son sistemas de alerta de colisiones e indicadores de mantenimiento.
- Nivel medio de automatización: Se incluyen sistemas controlados remotamente y semi-autónomos. En esta categoría el operador controla el sistema sólo en algunas etapas del proceso o bien lo hace desde un lugar cercano. Cerca de un cuarto de los sistemas pertenecen a esta categoría. Un ejemplo son los sistemas de detección de colisiones que detienen el equipo automáticamente cuando una colisión es considerada inminente.
- Automatización completa: En esta categoría el operador se encuentra físicamente lejos del equipo. Aun cuando el operador interactúa con el equipo por medio de la pantalla del computador, joysticks, sensores y otros controles e indicadores, éste funciona de manera autónoma. Alrededor de un cuarto de los sistemas corresponden a esta categoría. Un ejemplo son los camiones autónomos

2.3. ¿Por qué automatización?

Las principales expectativas que se tienen de la automatización y que han impulsado su implementación tanto en minería como en otras actividades son:

- La realización de tareas de manera más eficaz, confiable y precisa que un operador humano. Además de lograrlo a un menor costo.
- Un aumento en la seguridad, dada principalmente por la mayor confiabilidad del sistema. Sin embargo, la falla de algún sistema podría provocar lesiones, fugas de material tóxico y/o inflamable o la ruptura de algún equipo.
- Ahorro de tiempo y mayor eficiencia, la automatización disminuiría los tiempos perdidos, aumentando las horas efectivas de los turnos y así permitiendo lograr mayores productividades. Además reduciría las malas prácticas e ineficiencias y le otorgaría consistencia al sistema.

Considerando los desafíos del complejo escenario actual de la industria minera y las posibles ventajas de la automatización, varios autores proponen a esta tecnología como solución parcial o total de algunos o todos estos desafíos.

2.4. Dificultades de un sistema autónomo

La automatización tiene una larga historia marcada por muchos éxitos e igualmente notables fallas. A continuación se detallan las principales dificultades que se enfrenta al implementar un sistema autónomo:

- En ocasiones la implementación de una tecnología autónoma no logra generar los beneficios esperados, esto porque simplemente no reemplaza al operador, sino que también transforma el trabajo y agrega una serie de nuevas tareas.
- Otra causa de problemas con este tipo de tecnologías es una sobre dependencia de los operadores, en ocasiones estas tecnologías son usados en formas o tareas para las cuales no fueron diseñadas por los desarrolladores.
- A veces la automatización falla porque el rol del operador es subestimado, especialmente su habilidad para compensar situaciones inesperadas. De la misma forma, la poca experiencia y entrenamiento operando este tipo de tecnologías afecta su desempeño en este tipo de situaciones.
- Los operadores pueden adaptarse positiva o negativamente a las nuevas tecnologías. En la industria existe cierta preocupación con respecto a cómo serán aceptadas las tecnologías autónomas. Las tecnologías que no son aceptadas son más probables de ser mal utilizadas o incluso saboteadas, por lo que algún potencial beneficio podría no llegar a cumplirse.
- El principal problema con las mantenciones de los equipos autónomos radica en el diagnóstico de la falla, ya que al no haber operador nadie le puede explicar al equipo de mantenimiento qué es lo que le ocurre al equipo.

2.5. Fuerzas impulsoras de la automatización en minería

Las fuerzas claves que han impulsado la implementación de tecnologías autónomas se pueden clasificar en cuatro categorías (Rio Tinto, 2011):

1. La fuerza empresarial: Esta fuerza describe el amplio impulso estratégico de una empresa hacia la automatización. Esta fuerza es alimentada por una búsqueda imperiosa de optimizar la eficiencia operacional. Este tipo de compromiso con la automatización puede incluir iniciativas a gran escala, como son el programa “Mina del Futuro” implementado por Rio Tinto en Australia occidental y el programa para la automatización de Olympic Dam de BHB Billiton en el sur de Australia.

2. La fuerza de los fabricantes: Es la segunda fuerza impulsora clave de la automatización en la industria minera. El mercado de los productos autónomos es sustentado por los fabricantes de equipos originales (OEM)² y las pequeñas-medianas empresas (SME)³ que comercializan productos, equipos y servicios ligados a la automatización.

La demanda por estos productos, equipos y servicios surge, como se dijo anteriormente, de la continua búsqueda de las empresas por mejorar su eficiencia operacional, la cual es apoyada por los OEM's que buscan diferenciarse de sus competidores y aumentar su cuota de mercado.

Los nuevos avances tecnológicos que entran al mercado permiten un mayor avance de la automatización en la industria minera, y generan, a su vez, una mayor demanda por estas tecnologías.

3. La fuerza en terreno: La tercera fuerza impulsora proviene desde la misma operación minera.

La implementación de las tecnologías autónomas está a cargo de técnicos e ingenieros, quienes, como parte de su trabajo, buscan las soluciones más eficientes, confiables y económicas para los problemas que enfrenta la operación. Las soluciones autónomas proveen cada vez más seguido la respuesta buscada.

4. La fuerza de la investigación y desarrollo: Esta fuerza es aplicada por la industria para la búsqueda de avances tecnológicos a través de la investigación, desarrollo y demostración. Es cada vez más común que empresas firmen alianzas con organizaciones dedicadas a la investigación en busca de superar los problemas específicos de la empresa.

La naturaleza dominante de estas fuerzas y su amplio alcance hacen que un creciente uso de tecnologías autónomas sea inevitable.

2.6. Ciclo de desarrollo de una tecnología autónoma

Las tecnologías autónomas, independiente de la fuerza que las impulsó, tienen un ciclo de desarrollo bien definido. Los puntos claves de este ciclo son (Rio Tinto, 2011):

1. Concepción tecnológica: Esta es generalmente impulsada por la identificación de una necesidad del negocio.

² OEM: Del inglés Original Equipment Manufactores.

³ SME: Del inglés Small-to-Medium Enterprises.

2. Especificación de los requerimientos: Las características de la tecnología son definidas.

3. Diseño e implementación: La tecnología es implementada para notar los requerimientos identificados.

4. Prueba del prototipo: El prototipo es probado en un contexto limitado y se realiza un análisis HAZOP⁴.

5. Ensayo de campo: La tecnología es probada en terreno. Se identifican las deficiencias y son rediseñadas de ser necesario.

6. Implementación inicial: La tecnología es implementada en el contexto de producción. Es usual que miembros del equipo desarrollador estén presentes como apoyo a la tecnología. Esta etapa es también llamada como etapa niñera.

7. Lanzamiento del producto: La tecnología se lanza al mercado.

8. Operación y actualización: La tecnología cumple los requerimientos y es mejorada continuamente a través de la experiencia ganada.

9. Reemplazo: La tecnología es sustituida por otra.

2.7. Historia de la automatización en minería

Antes de entrar de lleno en la historia de la implementación de tecnologías autónomas en minería, es necesario definir de manera explícita las diferentes formas en que se puede operar un equipo:

- Manual: Un operador está a cargo de controlar el equipo en todas sus funciones y durante todo el ciclo de trabajo. Entra en la categoría de nivel bajo de automatización.
- Tele-comandado: La operación del equipo está a cargo por completo del operador, pero este opera desde una sala de control. Este tipo de operación pertenece al nivel medio de automatización.

⁴ HAZOP (Hazard and Operability): Es una examinación estructurada y sistemática de un proceso u operación con el objetivo de evaluar problemas que podrían representar riesgos para el personal o los equipos, o impedir el correcto funcionamiento de la operación.

- Autónoma: Toda la operación es realizada por medio de software y hardware, sin la necesidad de la intervención directo de un humano. Por lo que tiene un nivel de automatización completa.
- Semi-autónoma: Unión de las dos anteriores. Una parte del proceso la realiza un operador de forma tele-comandada y otra se lleva a cabo de manera autónoma. Por esta dualidad se considera de un nivel medio de automatización.

Con las definiciones anteriores establecidas, es posible apreciar de forma más sencilla la evolución que ha tenido la forma de operar los equipos a medida que se ha ido implementando la automatización en las últimas décadas.

A continuación se presenta una línea de tiempo que muestra los cinco grandes hitos de la automatización en la industria minera.



Figura 7. Línea de tiempo: Automatización en minería

El largo camino de la implementación de tecnologías autónomas en minería comienza en la década de los 60's. La mina subterránea de carbón General Blumenthal, ubicada en Alemania, pone en marcha durante el año 1967 el primer ferrocarril minero no tripulado. Este fue el primer gran avance llevado a cabo en minería con el objetivo de operar un equipo sin la necesidad de estar en él, corresponde al primera paso desde una tecnología manual a una tele-comandada.

Durante la década de los 70's, esta ferrocarril tele-comandado es también desarrollado tanto en otros países europeos como en Estados Unidos. Además, se desarrollan las primeras perforadoras automáticas, que corresponden, al igual que los ferrocarriles, a una tecnología tele-comandada. Estas perforadoras eran instaladas en posición por los operadores, programadas con el patrón de la malla de perforación y mientras los operadores se trasladaban a un lugar seguro terminaban el trabajo. La velocidad de perforación de esta tecnología es el doble que la operada manualmente.

A mediados de la década de los 70's, se desarrollan en Estados Unidos los primeros equipos subterráneos de extracción de mineral operados de manera tele-comandada. Estos eran usados para la extracción de carbón desde delgadas vetas y operados desde superficie con la

ayuda de dos cámaras. De esta forma se logra remover a los operadores de los frentes de extracción, propensos a colapsar por la baja calidad de la roca sedimentaria.

Es importante notar que esta baja calidad de la roca sedimentaria es, tanto la motivación como la razón de por qué estos tres primeros hitos fueron realizados en minería del carbón. Desde este momento, fueron necesarios cerca de 15 años, hasta mediados de la década de los 90's para que la tecnología de los LHD tele-comandados llegara a la minería de roca dura. Además, durante esta década se implementaron las shotcreteras automáticas y las máquinas emperadoras remotas.

A comienzos de la década del 2000, cuando la tecnología logró alcanzar los niveles requeridos de desarrollo computacional, ocurre el salto hacia lo equipos autónomos con el desarrollo de equipos LHD con esta tecnología, los cuales usan láseres que escanean y les permiten ver las paredes de los túneles y moverse de manera autónoma desde el punto de carguío hasta el lugar de descarga.

Hasta este punto las innovaciones asociadas a tecnologías autónomas se habían centrado en las operaciones subterráneas, sólo en los últimos años esta tecnología se ha abierto camino hacia la minería a cielo abierto. Esta demora se entiende por varias desventajas que tiene una operación a cielo abierto en comparación con una subterránea. Una operación a cielo abierto es afectada de manera mucho más directa por las condiciones climáticas, en poco tiempo un camino puede pasar de estar seco y compacto a húmedo y resbaladizo. También en ella interactúan una mayor cantidad de elementos, que son de mayor tamaño y se mueven a mayores velocidades, por lo que la magnitud de un potencial accidente es también mayor. Además, carecen de paredes, las cuales son utilizadas en operaciones subterráneas como restricciones para definir el movimiento de los equipos. Sin considerar las dificultades, la operación ideal para implementar tecnologías autónomas en minería a cielo abierto es el transporte de mineral por medio de camiones, ya que estos se mueven, a veces por semanas enteras, por las mismas rutas fijas y definidas.

2.8. Tecnologías autónomas utilizadas en minería

El desarrollo de tecnologías autónomas para la minería ha sido un tema de debate por más de una década. Antes, ni la tecnología ni las operaciones estaban listas para dar el gran salto hacia la automatización. Pero ahora que las empresas deben extraer el mineral tan rápida y eficientemente como sea posible para estar a la altura de una creciente demanda de metales, y los gigantescos avances de la tecnología en los últimos años han generado las condiciones propicias para poner a la automatización al servicio de la minería, distintas tecnologías autónomas se han abierto camino en la industria minera. Algunas de estas se describen a continuación:

2.8.1. Camión de riego autónomo

Durante mucho tiempo las operaciones mineras han controlado el polvo de los caminos de la misma manera: Se llena de agua el tanque del camión y luego se riega rápidamente su contenido en el camino. Sin embargo, la manera óptima de realizar esta tarea no es tan sencilla como pareciese, la idea es regar la cantidad correcta de agua, en el lugar preciso y de la forma apropiada.

Una mala práctica en el riego de caminos puede comprometer la seguridad de los operadores, gastar agua y energía y reducir la vida de los neumáticos de los camiones. Es por esto que distintas empresas han desarrollado tecnologías de riego inteligentes, que hacen del riego de caminos una tarea simple, segura y eficiente.

Un incorrecto riego de los caminos puede crear condiciones ideales para la ocurrencia de accidentes. Si el agua regada es insuficiente el polvo en suspensión aumenta, reduciendo la visibilidad de los operadores y afectando el buen funcionamiento de los sistemas de filtración del camión, afectando las condiciones de la cabina del operador. Por el contrario, si el riego es excesivo, la superficie se vuelve esponjosa y resbaladiza, causando que los camiones pierdan tracción y resbalen. Lo anterior puede causar que el motor y las ruedas trabajen de más, aumentando el consumo de combustible y reduciendo la vida de los neumáticos.

Para evitar los problemas señalados anteriormente se desarrolló un sistema de riego semi-autónomo. En él, el operador escoge desde un conjunto de condiciones de riego, el modo que mejor describa la situación en que se encuentra el camino. Usando unas boquillas de riego pequeñas y ajustables, el sistema automáticamente le aplica agua al camino en una forma de riego ideal para cada aplicación. Además esta tecnología se ajusta a la velocidad del camión. En caso de que el camión aumente o disminuya su velocidad, sensores electrónicos reconocen este cambio en la velocidad y el sistema regula el flujo de agua y establece un riego acorde a la nueva situación.

Una de las empresas que ha desarrollado este tipo de tecnología es Caterpillar. En la figura siguiente se observa el sistema de riego semi-autónomo instalado en un camión modelo 777D.

Figura 8. Sistema de riego semi-autónomo



Caterpillar ha encontrado que realizar el riego por medio de pulsos es más eficiente que usando las técnicas tradicionales. Los ingenieros de Caterpillar estiman que el ahorro de agua al usar este método es del 10%, además de lograr una disminución del 10% en el consumo de combustible.

2.8.2. Sistema de perforación autónoma

Las tareas muy repetitivas, que necesitan un funcionamiento constante y se llevan a cabo en zonas riesgosas, como lo es la perforación, son las candidatas ideales para ser automatizables. En el último tiempo distintas empresas han desarrollado tecnologías para cumplir esta meta.

Una de estas empresas es Sandvik, que en busca de estar a la altura de la demanda de sus clientes, ha desarrollado un sistema autónomo para sus perforadoras giratorias llamado AutoMine Rotary Drilling.

Este sistema se puede usar en tres niveles de autonomía, en el nivel de mayor autonomía el operador puede manejar hasta 5 perforadoras simultáneamente y establecer el plan de perforación desde una cómoda y segura sala de control, para cuya ubicación no hay límites geográficos siempre y cuando se cuente con una conexión inalámbrica. La sala de control se muestra en la siguiente figura.

Figura 9. Sala de control perforadoras giratorias autónomas.



El transporte autónomo del equipo entre los distintos puntos de la malla de perforación se realiza mediante el uso de receptores cinemáticos en tiempo real⁵ de alta precisión de señal GPS. Con la ayuda de 4 cámaras para evitar riesgos (Hazcam)⁶ los operadores pueden identificar obstáculos en la trayectoria de la perforación, además el área de operación está rodeada por una geo-valla⁷ que impide que el equipo de perforación se mueva hacia una zona que pudiese resultar peligrosa. Cuando el equipo está en posición, la plataforma se eleva hasta el nivel deseado, se establece el ángulo del mástil y se inicia la perforación. El equipo agrega de forma autónoma las barras que sean necesarias para alcanzar la profundidad deseada, luego las remueve y se mueve hacia el siguiente punto. Además mientras el equipo está trabajando el sistema recoge valiosa información, como el tipo de geología, los tiempos y tasas de perforación.

Los desarrolladores de este equipo confían en que su implementación traerá una serie de beneficios a la operación minera. El más importante de estos posibles beneficios es un mejoramiento en términos de seguridad, al reducir el tiempo en que el operador debe estar en la plataforma de perforación realizando un trabajo repetitivo, logrando así minimizar la fatiga del personal y su exposición a situaciones de riesgo y mejorando sus condiciones laborales. También se espera un aumento en la productividad del equipo, al aumentar la utilización, reducir el riesgo de daño al equipo y aumentar la precisión de la perforación. Además, al contar con información en tiempo real de la operación y del funcionamiento del equipo, se espera que el proceso de perforación sea más inteligente, permitiendo mejoras en la toma de decisiones y en el mantenimiento de los equipos.

⁵ Navegación Cinética Satelital en Tiempo Real (Real Time Kinematic RTK): Técnica que se usa para mejorar la precisión en una posición obtenida usando un sistema basado en posicionamiento satelital. Se usa en conjunto con GPS, GLONASS y/o Galileo.

⁶ Hazard Avoidance Cameras (Hazcam): Cámaras fotográficas generalmente montadas en astromóviles para su uso en misiones de exploración espacial.

⁷ Geo-valla: Perímetro virtual de un área geográfica real.

2.8.3. Tren Autónomo

La trayectoria fija por la que se desplazan los trenes los hace un medio de transporte más adecuado para la automatización que otros equipos de transporte terrestre. Sin embargo, independiente del sector económico, existen muy pocos trenes completamente autónomos en el mundo. Esta escasez en la implementación de este tipo de tecnologías está principalmente asociada a las grandes distancias que los trenes necesitan para identificar y reaccionar frente a un obstáculo, y de esta forma detenerse en forma segura. Distancia que, según el Dr. David Clarke⁸, podría ser cercana a una milla (1,6 [km]).

Como parte de su programa “Mina del Futuro”, el grupo minero Rio Tinto implementará, en las minas de hierro de Pilbara, Australia Occidental, la primera red ferroviaria autónoma de transporte pesado de larga distancia del mundo. Actualmente la operación cuenta con 41 trenes, 148 locomotoras y 9.400 carros que transportan el mineral desde las minas a los puertos a través de una red de 1.500 [km]. El primer tren autónomo se presentará en 2014 y la finalización del programa AutoHaulTM se planea para un año más tarde. La operación será controlada desde el centro de operaciones de Perth, ubicado a más de 1.000 [km] de la operación.

Con una inversión de 518 [MUS\$] en trenes autónomos, la compañía espera poder expandir la capacidad de producción de Pilbara sin la necesidad de realizar una inversión mayor en trenes adicionales. Además espera conseguir mejoras en productividad, una mayor flexibilidad en la planificación del transporte a puerto y un uso más eficiente de combustible, que resulte en una disminución del costo energético y de la emisión de dióxido de carbono.

Figura 10. Tren de transporte de Río Tinto, Región de Pilbara, Australia Occidental.



⁸ Dr. David Clarke: Director del Centro de Investigación del Transporte de la Universidad de Tennessee, E.E.U.U.

2.8.4. LHD semi-autónomo

Los equipos LHD⁹ son utilizados en prácticamente todas las minas subterráneas para el carguío y el transporte de mineral. Generalmente miden entre 8 y 15 [m], pesan entre 20 y 75 [t], pueden ser eléctricos o diésel y usualmente operan a velocidades bajas, del orden de 20 – 30 [km/h]. Su estructura se divide en dos secciones unidas por una articulación, que le brinda una alta maniobrabilidad en los estrechos túneles subterráneos. La parte posterior del equipo contiene el motor y la parte frontal el balde.

El camino hacia los LHD autónomos ha incluido varios pasos de creciente automatización. El primer paso fue utilizar LHD operados a control remoto line-of-sight¹⁰ para trabajar en áreas sin soporte. En este caso el operador guía el equipo manualmente hasta el límite del área sin soporte, desciende y a continuación realiza el carguío del LHD de manera remota, siempre estando cerca y viendo directamente al equipo. Una vez cargado, el operador vuelve a subirse al equipo y lo guía manualmente. Este procedimiento es lento debido al continuo cambio entre operación manual y remota. Además, el balde es difícil de llenar debido a la poca visibilidad del operador, lo que afecta a la productividad de la operación. Más importante aún, no elimina el riesgo del operador ya que éste todavía debe trabajar cerca del equipo y de la zona sin soporte, tal como se observa en la figura siguiente.

Figura 11. Operación a control remoto line-of-sight.



El paso siguiente fue el desarrollo de LHD's operados a control remoto desde una sala de control, aumentando la seguridad de los operadores y mejorando sus condiciones laborales. Este sistema se basa en cámaras de video instaladas en el equipo, que le permiten al operador “ver” hacia adelante y hacia atrás. El LHD es operado remotamente durante todo el ciclo, sin embargo, el operador todavía puede guiar sólo un equipo a la vez. Al no estar físicamente en el equipo, el operador pierde sensibilidad en el control del LHD, lo que afecta a la velocidad del equipo y

⁹ LHD (Load Haul Dump): Carguío Transporte Descarga.

¹⁰ Línea de mira o línea de visión.

podría, como consecuencia, producir una disminución en la productividad en comparación a la operación manual. Además esta pérdida de sensibilidad también podría generar daños y un mayor desgaste al equipo.

El último paso consiste en el desarrollo de un sistema que permita la navegación autónoma de los equipos LHD's. Los operadores, desde la sala de control, todavía deben monitorear el funcionamiento de los equipos e intervenir en ciertos puntos del ciclo, pero con este sistema pueden operar más de un equipo de manera simultánea (Figura 5). Como estos equipos siguen fielmente instrucciones programadas y hay un mayor flujo de información entre el equipo y la sala de control, se tiene un mayor conocimiento sobre el funcionamiento y desgaste del equipo.

Figura 12. Sala de control LHD autónomos.



Es común que estos equipos operen en un ciclo semi-autónomo. En el cual el carguío se hace de manera tele dirigida y el transporte y vaciado de forma autónoma. Aun así, un operador es capaz de guiar más de un equipo al mismo tiempo.

Los principales beneficios esperados de esta tecnología son un aumento de la seguridad y una mejora de las condiciones laborales. Además algunas minas como Kiirunavaara y Malmberger de LAKB y Olympic Dam de BHP Billiton han reportado un aumento en su productividad y una disminución en la falla de los equipos, esto último dado que el equipo se mueve según las especificaciones del fabricante y no está sujeto a decisiones ni a las capacidades del operador.

Dado su extensivo uso en minería, son varias las compañías que comercializan distintos modelos de equipos LHD's, que varían en tamaño y capacidad. Caterpillar y Sandvik se destacan por sobre el resto en el desarrollo de LHD's autónomos, siendo Sandvik la pionera en este tipo de sistemas.

Sandvik usa en sus equipos el sistema AutoMine y, más recientemente, AutoMine Lite. El movimiento del equipo está basado en navegación absoluta. Su uso no requiere la instalación de infraestructura, sólo depende de navegación por estima¹¹ y las marcas naturales de la mina.

AutoMine contiene un sistema de navegación que continuamente determina la locación del equipo. Para verificar esta posición, el sistema usa láseres para escanear las paredes de los túneles y compararlos con un mapa de perfiles de los túneles. El sistema controla el transporte y el vaciado autónomo. Además, con la ayuda de una cámara entrega un video de alta definición que le permite al operador realizar el carguío de manera tele-dirigida.

La mina Kiruna de hierro, la polimetálica Garpenberg en Suecia y la cuprífera El Teniente son algunas de las operaciones que han implementado este tipo de tecnología.

El sistema usado por los LHD de Caterpillar es MineGem, lanzado en el año 2004. El sistema, al contrario de AutoMine, se basa una navegación reactiva y una localización oportunista, lo que significa que no existen rutas predefinidas, sino que, el sistema reacciona al ambiente y a las paredes de los túneles decidiendo cómo responder.

MineGem usa un sistema de detección por láser (laser detection and ranging system LADAR) para darle al operador información sobre el equipo. El operador además tiene acceso al audio del equipo y una clara visión brindada por dos cámaras instaladas en el LHD. Con la información entregada, el sistema puede decidir y dar órdenes como: moverse hacia delante, hacia atrás, mantener la misma velocidad, acelerar o frenar.

Varias minas alrededor del mundo han implementado este sistema, entre las que se encuentran las minas de oro Stawell y Jundee en Australia y la mina de hierro Malmberget en Suecia.

Cabe destacar que en Chile no sólo se ha implementado esta tecnología en mina El Teniente, recientemente Andina ha comenzado con programa para operar con una flota de 14 LHD Scooptram ST14 de Atlas Copco y Chuquicamata confirmó que su proyecto subterráneo también operará con LHD semiautónomos.

2.8.5. *Camiones autónomos*

El transporte de material en una operación minera a cielo abierto es realizado principalmente por medio de camiones. Éstos existen con distintos sistemas de transmisión (mecánico/eléctrico) y en una amplia gama de tamaños, llegando hasta las 450 [st] de capacidad.

¹¹ Navegación por estima (dead reckoning): Proceso por el cual se calcula la posición actual a partir de una posición determinada anteriormente.

Tradicionalmente la operación de estos camiones se ha realizado manualmente y aunque el concepto de camiones autónomos ha sido discutido por décadas, su desarrollo ha sido más desafiante de llevar a cabo. Sin embargo, un puñado de operaciones y fabricantes han abierto el camino para este tipo de tecnologías, la experiencia ganado por estos pioneros le ha brindado al concepto de camión autónomo cierto grado de maduración. Los avances tecnológicos alcanzados a la fecha han permitido que en la última década se haya comenzado a implementar los primeros camiones autónomos en minería.

Se espera que esta tecnología traiga consigo una serie de beneficios. Reducir el número de operadores trabajando en un ambiente potencialmente peligroso y aislado, logrando así aumentar la seguridad de los trabajadores. Reducir los costos operacionales y extender la vida de los neumáticos y frenos. Aumentar la productividad y eficiencia y reducir el consumo de combustible y las emisiones.

La indiscutible pionera en este tipo de equipos es la empresa japonesa Komatsu, quienes desarrollaron Front Runner, su sistema de acarreo autónomo (HAS¹²) y que se convertiría en 2008 en el primer sistema autónomo para camiones mineros comercializado en el mundo. Sin embargo, el camino hacia el desarrollo de estos equipos ha sido largo y complejo.

Durante la década de los 70, la idea de un sistema autónomo ya rondaba en Komatsu, con la proyección de reducir la cantidad de operadores de camiones que trabajaban en las canteras y minas de Japón. En la década de los 90 realizaron pruebas en las canteras y minas, después de las cuales determinaron que el sistema de acarreo autónomo no era el más adecuado para las minas japonesas y, por lo tanto, decidieron reenfocar su atención desde Japón a las minas de gran escala del exterior.

En el año 1995 Komatsu llevó a cabo su primera prueba en una mina de carbón de gran escala en Australia. Hasta ese momento el sistema sólo era capaz de administrar 4 camiones autónomos, por lo que el nuevo objetivo de la empresa fue aumentar este limitado número de unidades que podían estar bajo el control del sistema. Para esto se embarcaron en la tarea de desarrollar un sistema de gestión de la flota, sin embargo, no contaban con experiencia en el desarrollo de este tipo de softwares.

La empresa estadounidense Modular Mining System (MMS), desarrolladora del sistema de gestión de la flota DISPATCH®¹³ para equipos mineros, se unió al grupo Komatsu en el año 1996 con el objetivo de desarrollar el sistema de acarreo autónomo.

En el año 2002 la empresa aceptó oficialmente el plan de desarrollo del sistema de acarreo autónomo y su uso en grandes minas. El sistema fue desarrollado y probado durante 3 años y

¹² HAS: Del inglés Haulage Autonomus System.

¹³ DISPATCH®: Es una solución de administración minera proactiva que le permite al usuario implementar sus estrategias de producción utilizando un extenso grupo de herramientas mineras.

luego, en Diciembre de 2005, se inició la prueba de una flota de 5 camiones autónomos modelo 930E-AT de 320 [st] (292[t]) de capacidad nominal en un sector de prueba de la mina Radomiro Tomic, perteneciente a Codelco y ubicada en la segunda región Chile. La prueba duró casi 6 meses obteniéndose óptimos resultados.

En el mes de Enero de 2008, Komatsu hizo formalmente entrega de 11 camiones autónomos a la mina Gabriela Mistral, también perteneciente a Codelco y ubicada en la segunda región de Chile, convirtiéndose en la primera comercialización mundial del sistema de acarreo autónomo. Actualmente la mina Gabriela Mistral cuenta con una flota de 18 camiones autónomos modelo 930E-AT.

Figura 13. Camión autónomo – Mina Gabriela Mistral.



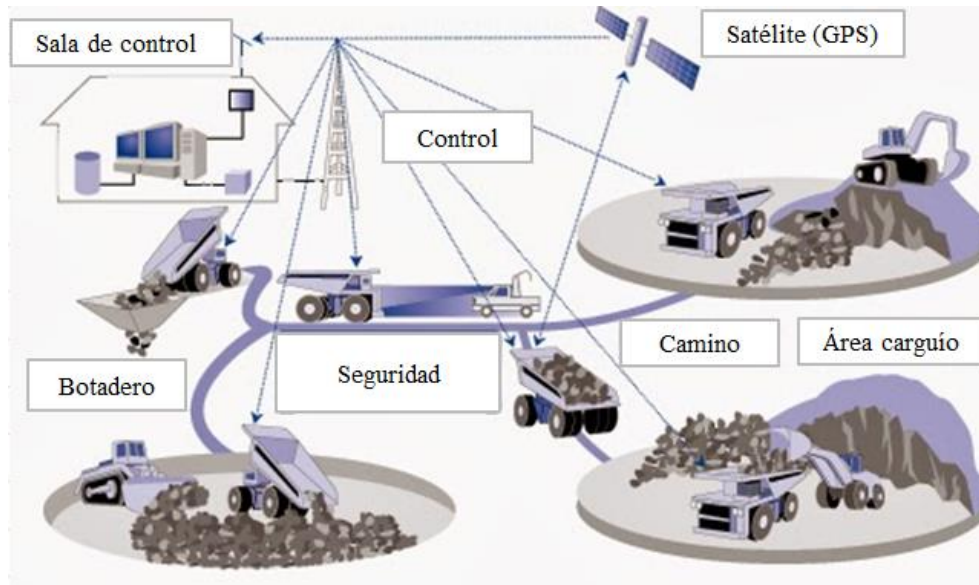
El sistema de acarreo autónomo equipa a cada camión con un sistema GPS de alta precisión, de manera que la posición de cada uno de los camiones sea conocida y controlada por la sala de control en todo momento. También tiene un sistema de red inalámbrico, que le permite mantener un flujo continuo de información con la sala de control. Además cuenta con un sistema de detección de obstáculos, que usando sensores le permite detectar la presencia de otros camiones, vehículos de servicios o personas que estén trabajando en la mina, en cuyo caso el camión reducirá su velocidad o se detendrá por completo.

Figura 14. Sistema de detección de obstáculos.



Estos sistemas le permiten al camión operar de manera segura en un ciclo de carguío, acarreo y descarga de manera autónoma, al mismo tiempo que interactúa con otros camiones, vehículos de apoyo y personas que se mueven por la operación minera. El diagrama general del sistema de acarreo autónomo se muestra a continuación.

Figura 15. Diagrama Sistema de Acarreo Autónomo.



Las empresas Codelco y Río Tinto son las mayores exponentes de este tipo de equipos desarrollados por Komatsu. La primera cuenta con una flota de 18 de estos camiones operando en su mina a cielo abierto de cobre Gabriela Mistral. En tanto la segunda, como parte de su programa “Mina del Futuro”, tiene un acuerdo con Komatsu para la entrega de 150 camiones autónomos para sus operaciones de hierro en Pilbara, Australia Occidental.

Otra empresa que ha logrado implementar su sistema autónomo de camiones es la estadounidense Caterpillar.

La primera muestra pública del camión autónomo de Caterpillar fue en la MINExpo¹⁴ de 1996, donde mostraron un video de 2 camiones autónomos trabajando en una cantera en Texas. Al mismo tiempo, en el centro de demostraciones Tinaja Hills los visitantes pudieron ver a un camión autónomo 777C demostrar sus capacidades. Caterpillar usó estas demostraciones para anunciar su intención de seguir el desarrollo de equipos autónomos.

El siguiente gran paso vino en 2010, cuando Caterpillar trabajaba con una flota de 4 camiones autónomos modelo 793 en un campo de pruebas en Arizona. Al año siguiente, tres de

¹⁴ MINExpo: Evento promocionado por la Asociación Nacional de Minería (National Mining Association) de Estados Unidos. Se realiza cada 4 años en el centro de convenciones de Las Vegas y se exhiben los últimos avances tecnológicos relativos a la industria minera.

esos camiones, dos 793F de 227 [t] y un 793D de 218 [t], fueron enviados a trabajar junto a un cargador frontal 994F (operado manualmente) a una prueba a gran escala en la mina de carbón Navajo, Nuevo México, perteneciente a BHP Billiton.

En Marzo de 2013 Caterpillar comunicó que había completado esta prueba de 21 meses, durante la cual sus tres camiones habían movido 2,3 [Mm³] de material. En base a la información recolectada a lo largo de la prueba y algunos cambios efectuados en el sistema autónomo, Caterpillar manifestó que les fue posible obtener importantes mejoras en los tiempos de ciclos y porcentajes de utilización de los camiones, además de la posibilidad de instalar flotas más grandes con fines comerciales.

Figura 16. Camión autónomo Caterpillar.



Un sistema GPS provee la información sobre la posición de los camiones y todas las rutas posibles de transporte son trazadas en base a datos satelitales. Mediante algoritmos se determina la ruta óptima para cada camión, mientras el mapa de la mina se actualiza continuamente.

Cada camión está equipado con un sistema de detección de obstáculos que le permite moverse eficientemente alrededor de distintos objetos. Usando la señal GPS y una red inalámbrica, el sistema de administración de la flota controla todos los equipos en la mina, incluyendo otros equipos y vehículos operados manualmente. Si los sensores del sistema de detección de obstáculos detectan algún vehículo o persona dentro del área de transporte de los camiones autónomos, estos se detienen inmediatamente.

Un sistema, llamado “Conciencia de proximidad”¹⁵ por Caterpillar, envía un continuo flujo de datos sobre la ubicación y velocidad de cada uno de los camiones y sobre la disponibilidad del cargador, evitando así las colas y los atrasos asociados.

¹⁵ Proximity Awareness en inglés.

El operador, trabajando en una sala de control puede ordenar, a uno, varios o todos los camiones de la flota, detenerse en caso de emergencia. Además, el operador puede intervenir para enviar a un camión a una mantención programada y a cargar combustible. Sin embargo, los camiones se dirigen y definen una velocidad apropiada de manera autónoma.

Dado los buenos resultados obtenidos en las pruebas realizadas en Nuevo México, BHP Billiton ha puesto en marcha una flota de 12 camiones autónomos 793F de Caterpillar en su mina Jimblebar de hierro en Pilbara, Australia. Otra de las empresas operando en Pilbara y usando camiones 793F, es Fortescue Metals, que implementó en el proyecto Salomon una flota de 6 camiones, ampliable hasta 45 en los próximos años.

2.9. Impacto social de la automatización

A continuación se ahonda en los potenciales impactos sociales de las tecnologías autónomas. Los efectos se agrupan según cómo interactúan las empresas mineras y las personas del lugar donde se opera.

2.9.1. *Empleo y educación:* Aún no hay evidencia clara sobre el impacto que las tecnologías autónomas podrían tener sobre el empleo. Si bien este tipo de tecnologías reduce el número de operadores en la mina, otros roles podría generarse en observación, prestación de servicios y mantenimiento de equipos autónomos.

Dentro de las operaciones que están en la mira de la automatización, el transporte por camiones es la que está tomando más fuerza, su importancia radica en que es la operación con mayor cantidad de puestos de trabajo en una operación a cielo abierto. Distintos autores estiman cifras de reducción en estos puestos de trabajo que alcanzan hasta un 75% (Bellamy *et al*, 2010), está última cifra para una automatización completa de la operación de transporte.

Por otro lado, es posible que la automatización de pie a la creación de nuevos roles en una operación minera, al mismo tiempo que incrementa las habilidades de los operadores que los desempeñaran. Estos nuevos roles deberían incluir programadores, planificadores, mantenedores, operadores y roles de soporte y logística. La mayoría de estos nuevos roles podrían llevarse a cabo desde ciudades grandes, lo que le brindaría la oportunidad de acercarse a la industria minera a grupos que tienen dificultades con trabajar en lugares aislados y/o en turnos.

Producto de esta creación de nuevos roles y del cambio que ocurriría en la naturaleza de los empleos, es posible que se generen nuevas necesidades en términos de educación y entrenamiento en el sector minero.

2.9.2. *Desarrollo e inversión:* La existencia de una operación minera puede presentar una oportunidad de desarrollo comercial para la economía regional, esto a partir de la adquisición de bienes y servicios de las empresas locales y del gasto de los empleados. Un beneficio económico le permite a la región la oportunidad de brindar una mayor variedad de bienes y servicios y una mejor calidad de vida a los empleados residentes y a sus familias.

La presencia de una mina y sus empleados generan otros desarrollos regionales. Las compañías mineras o los gobiernos pueden invertir en la región con el fin de apoyar o atraer operaciones mineras. Un ejemplo común de este tipo de inversión es la creación de un aeropuerto en ciudades o pueblos que sin operaciones mineras no tendrían la necesidad de tener este tipo de servicios.

Con el objetivo de mantener buenas relaciones con las comunidades y tener el respaldo social para la operación, las compañías mineras pueden decidir invertir directamente en las comunidades, a través de patrocinios y donaciones para proyectos de infraestructura y eventos. Actualmente, las compañías mineras están tomando un enfoque que logre estrechar su relación con las comunidades y apoyarlas en su desarrollo sustentable a largo plazo.

Si bien estos efectos son consecuencia de la minería como actividad y no únicamente de una operación que ha implementado tecnologías autónomas, el uso de este tipo de tecnologías podría permitir el desarrollo de nuevos proyectos mineros o la extensión de la vida de los ya existentes, logrando que nuevas zonas beneficien de estos efectos o lo hagan por más tiempo. Por otro lado, si la implementación se lleva a gran escala y los centros de operación son trasladados a ciudades mayores, las zonas mineras podrían perder este tipo de impacto positivo de la minería. Tal como sucede en el efecto que podrían tener la automatización en los empleos, tampoco es claro el real impacto que tendrían estas tecnologías en el desarrollo de las zonas mineras y la inversión puesta en ellas.

3. PROYECCIONES

Se espera que la implementación de tecnologías autónomas tenga un importante y amplio impacto en la operación minera. Este impacto sería tanto a nivel técnico, teniendo efectos en el diseño y la planificación minera, como a nivel social, influyendo en la vida de los trabajadores y en las comunidades vecinas. A continuación se ahonda en los principales parámetros de una operación minera.

3.1. Disponibilidad de los equipos

La disponibilidad mecánica es uno de los parámetros más comúnmente usado para medir el rendimiento de un equipo minero, tanto por la simplicidad de su definición como por la facilidad de interpretación que permite su resultado numérico.

Con el objetivo de definir explícitamente la disponibilidad mecánica se define el siguiente modelo de clasificación de horas:

Figura 17. Modelo de Clasificación de Horas.

Horas de Calendario			
Horas Hábiles			Horas Inhábiles
Horas Disponibles		Horas Mantención	
Horas Operativas		Horas Reserva	
Horas Efectivas	Horas Perdidas		

Donde:

- Horas de calendario (HC): Son las horas correspondientes al tiempo calendario natural como días, meses, años, etc., se dividen en horas hábiles e inhábiles. Ejemplo: En un año.

Ecuación 1. Cálculo Horas de Calendario.

$$HC = 24 \left[\frac{\text{horas}}{\text{día}} \right] \cdot 7 \left[\frac{\text{días}}{\text{semana}} \right] \cdot 52 \left[\frac{\text{semanas}}{\text{año}} \right] = 8.736 [\text{horas}].$$

- Horas Inhábiles (HI): Horas en que la faena suspende sus actividades productivas y/o mantención de sus elementos y/o infraestructura. Las razones que pueden provocar este tipo de horas son paralizaciones programadas (Domingos, festivos, vacaciones colectivas, etc.) e imprevistos (Causas naturales como lluvia, temblores, nieve, etc.,

falta de energía eléctrica, atrasos en la llegada del transporte de personal, ausentismo laboral por epidemias). Ejemplo: Una faena opera de lunes a viernes tres turnos de 8 horas y los sábados un turno. Cierra los domingos y 2 semanas al año.

Ecuación 2. Cálculo Horas Inhábiles.

$$HI = \left(1 \left[\frac{\text{días}}{\text{semana}} \right] \cdot 8 \left[\frac{\text{horas}}{\text{turno}} \right] \cdot 2 \left[\frac{\text{turnos}}{\text{día}} \right] + 1 \left[\frac{\text{día}}{\text{semana}} \right] \cdot 8 \left[\frac{\text{horas}}{\text{turno}} \right] \cdot 3 \left[\frac{\text{turnos}}{\text{día}} \right] \right) \cdot 50 \left[\frac{\text{semanas}}{\text{año}} \right] + \left(2 \left[\frac{\text{semanas}}{\text{año}} \right] \cdot 7 \left[\frac{\text{días}}{\text{semana}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{horas}}{\text{día}} \right] \right) = 2.336 \left[\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right].$$

- Horas hábiles (HH): Son las horas en que la faena está en actividad y/o en tareas de mantención de sus elementos de producción y/o infraestructura, en estas horas cada equipo o unidad está en operación, reserva o mantención. Siguiendo el ejemplo anterior:

Ecuación 3. Cálculo Horas Hábiles.

$$HH = \left(5 \left[\frac{\text{días}}{\text{semana}} \right] \cdot 8 \left[\frac{\text{horas}}{\text{turno}} \right] \cdot 3 \left[\frac{\text{turnos}}{\text{día}} \right] + 1 \left[\frac{\text{día}}{\text{semana}} \right] \cdot 8 \left[\frac{\text{horas}}{\text{turno}} \right] \cdot 1 \left[\frac{\text{turnos}}{\text{día}} \right] \right) \cdot 50 \left[\frac{\text{semanas}}{\text{año}} \right] = 6.400 \left[\frac{\text{horas}}{\text{año}} \right].$$

- Horas operativas (HO): Son las horas en que el equipo o unidad se encuentra entregado a su(s) operador(es), en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño y con una tarea asignada.
- Horas de mantención (HM): Horas en que el equipo no está operando. Esta definición considera las mantenciones programadas y las no programadas.
- Horas en reserva (HR): Son las horas en que el equipo o unidad, estando en condiciones electromecánicas de cumplir su función de diseño, no la realiza por no contar con un operador y/o frente donde operar. Por ejemplo cambios de turno, tiempos de colación, etc.
- Horas efectivas (HE): Son las horas en que el equipo o unidad está funcionando y cumpliendo su objetivo de diseño.
- Horas perdidas (HP): Son las horas en la unidad o equipo, estando en condiciones electromecánicas de cumplir con su objetivo de diseño, a cargo de su(s) operador(es) y con una tarea asignada, no puede realizarla por motivos ajenos a su funcionamiento intrínseco, como por tronadura, traslados, a la espera de equipos complementario,

carga de combustibles, tiempo en colas y en general por razones asociadas a la coordinación de las operaciones.

Estas definiciones están relacionadas entre ellas, siendo la más relevante:

Ecuación 4. Horas hábiles.

$$HH = HO + HM + HR$$

Una vez establecido lo anterior, se puede definir la disponibilidad mecánica de los equipos en función de los tiempos anteriores.

- Disponibilidad mecánica [%]: Se define como el porcentaje del tiempo durante el cual un equipo está en condiciones electromecánicas óptimas de realizar sus funciones específicas del total del tiempo de operación.

Ecuación 5. Disponibilidad de los equipos.

$$\textit{Disponibilidad mecánica} [\%] = \frac{HO + HR}{HH} \cdot 100 = \frac{HH - HM}{HH} \cdot 100$$

En busca de mejoras en su productividad y una reducción en sus costos por tonelada movida, la tendencia actual de la industria minera es hacia el gigantismo de sus equipos, cuya adquisición representa un elevado costo capital a la vez que aumenta la responsabilidad de cada unidad de funcionar correctamente. Es por lo anterior que, ahora más que nunca, es de vital importancia maximizar su disponibilidad mecánica y hacer valer su mayor inversión.

A partir de la ecuación 4 y considerando que las horas programadas de operación (HH) son constantes y no dependen de la operación, se observa que las horas operativas (HO) quedan definidas en función de las horas de mantención (HM) y de las horas de reserva (HR).

De acuerdo a la ecuación 5 existen dos opciones para aumentar la disponibilidad de los equipos: La primera es disminuir las horas de mantención (HM), es decir rebajar el tiempo en que el equipo no está mecánicamente disponible, ya sea por mantenciones programadas o no programadas. Los avances tecnológicos apuntan a sacar ventaja en esta dirección, se espera que el uso de equipos autónomos capaces de trabajar con altos niveles de consistencia permita disminuir los niveles esperados de desgaste y fallas de los equipos. La segunda opción es aumentar las horas de reserva (HR), aunque efectivamente esto genere un aumento en la disponibilidad mecánica de los equipos es importante notar que no es una situación deseable, ya que significa que tendería al caso en que el equipo está disponible todo el tiempo pero nunca está siendo operado para realizar su tarea específica, es decir, no sería un aporte a la operación.

3.2. Utilización de los equipos

Un equipo que está disponible mecánicamente, es decir, que está capacitado para llevar a cabo las funciones para las cuales fue diseñado, es raramente utilizado a lo largo de todo su tiempo disponible. Por ejemplo, el equipo en cuestión puede estar sin operador por cambios de turno o colaciones. El parámetro que mide esta eficiencia es la utilización, su definición se presenta a continuación y en función de las horas definidas anteriormente.

- Utilización del equipo [%]: Se define como, del tiempo que el equipo está en condiciones de operar, el porcentaje que efectivamente está siendo utilizado para sus funciones específicas.

Ecuación 6. Utilización de los equipos.

$$Utilización [\%] = \frac{HO}{HO + HR} \cdot 100$$

La utilización, también llamada uso de disponibilidad, mide el tiempo que el equipo está realizando sus funciones, definiendo así qué tan eficientemente está siendo operado. Sin embargo, es importante señalar que una alta utilización no asegura una alta productividad, pues la cantidad de horas operativas podría ser muy baja. Asimismo, tener una alta disponibilidad mecánica tampoco asegura por sí sola una alta productividad. Aunque ambos parámetros son valiosos, es sólo cuando se consideran en conjunto cuando aportan mayor información sobre el estado de la operación.

De la ecuación 6 se desprende que para obtener mayores porcentajes de utilización es necesario disminuir las horas de reservas (HR), es decir, reducir el tiempo en que el equipo, estando afuera del taller del mantenimiento, no está realizando sus funciones específicas. Lo anterior se espera conseguir con la implementación de tecnologías autónomas, pues no requieren del apoyo de un operador humano para realizar sus funciones y evitarían así las pérdidas asociadas a los cambios de turnos y horas de colaciones.

3.3. Productividad de los equipos

Dentro de los objetivos de las empresas mineras siempre se ha encontrado buscar alternativas que permitan aumentar la productividad, sin embargo, el alza actual de la demanda por metales ha añadido presión para alcanzar estos objetivos, como también se ha incrementado la importancia de la productividad de los equipos utilizados. Finalmente, los equipos definen la producción de la operación, por lo tanto, su productividad es uno de los parámetros claves en toda operación minera.

La productividad de los equipos, medida generalmente por turno o día, es el producto de la multiplicación de los dos factores que se definen a continuación.

- Horas efectivas (HE): Cantidad de horas del turno (o día) en que el equipo está cumpliendo su objetivo de diseño.
- Productividad efectiva (PE): Cantidad de material movido por el equipo en una hora efectiva.

Ecuación 7. Productividad diaria.

$$Productividad \left[\frac{t}{d} \right] = HE \left[\frac{h}{d} \right] \cdot PE \left[\frac{t}{h} \right]$$

O bien de los siguientes dos factores:

- N° de ciclos: Cantidad de ciclos de carga – transporte – descarga que logra completar el equipo durante un día.
- Carga útil: Cantidad de material con la cual el equipo es cargado en el comienzo de cada ciclo.

Ecuación 8. Productividad diaria.

$$Productividad \left[\frac{t}{d} \right] = N^{\circ} \text{ ciclos} \left[\frac{\text{ciclos}}{d} \right] \cdot Carga \text{ útil} \left[\frac{t}{\text{ciclo}} \right]$$

Como se puede observar en la ecuación 7 la productividad puede aumentar de dos formas: La primera es aumentando la cantidad de horas efectivas (HE), es decir, reduciendo las horas de mantenimiento (HM), las horas en reserva (HR) o las horas perdidas (HP). La segunda opción es aumentando la productividad efectiva (PE), que depende de las distancias que deben recorrer los equipos, su velocidad, su capacidad, los tiempos de carga y descarga, entre otras cosas. Idealmente los cambios implementados en una operación deberían lograr aumentar tanto las horas efectivas (HE) como la productividad efectiva (PE), obteniendo así un aumento en la productividad de los equipos, sin embargo, puede darse el caso que mientras uno de los factores aumente el otro disminuya, en dicha situación se tendría que estudiar cuál de los dos cambios es más relevante y determinar si efectivamente se logra un aumento en la productividad de los equipos.

De la misma forma, la ecuación 8 establece que para obtener una mayor productividad se debe aumentar el N° de ciclos que logra completar el equipo en un día o bien la carga útil que debe mover, esto último no depende del camión ya que es responsabilidad de los equipos de carguío. Por lo tanto la producción es función principalmente del N° de ciclos, que depende de la velocidad del equipo, las colas, los tiempos de acuatamiento, carga y descarga, detenciones,

demoras, entre otros factores. Como se estableció en las dos definiciones anteriores, varios de estos elementos podrían verse afectados con el uso de equipos autónomos, por lo que este tipo de tecnologías también podría generar un impacto en la productividad de los equipos.

3.4. Incertidumbre operacional

Una operación minera convencional es llevada a cabo por personas, por lo que tiene asociada cierta variabilidad inherente a la condición humana. No todos los operadores trabajan igual, la experiencia, capacidades y humor de cada uno influirá en el desarrollo de su trabajo. De la misma forma, ni siquiera el mismo operador trabajará siempre igual, pueden haber diferencias entre el trabajo realizado durante un turno de día y uno de noche, siendo el segundo, en general, más agotador. Más aún, pueden incluso haber diferencias durante el mismo turno, en el cual la última parte podría ser menos eficiente que la primera. Por lo mismo, existirán diferencias en la toma de decisiones por parte de los trabajadores, agregándole más variabilidad al desarrollo de la operación.

Esta variabilidad es uno de los problemas que enfrenta la industria minera, genera una incertidumbre en la operación que afecta tanto a la planificación de la mina como a los procesos de producción. Mientras mayor sea esta variabilidad, mayores serán los errores en la planificación. Por lo tanto, es de vital importancia tratar de reducir este aspecto dentro de la incertidumbre operacional todo lo que sea posible, logrando planificar de forma más precisa y obteniendo altos índices de cumplimiento de los planes.

Idealmente los turnos (o días) en una operación minera deberían ser todos exactamente iguales. Si los tiempos de ciclos, velocidades, cantidad de horas efectivas, producciones por turno y días se conocieran de antemano, no habría lugar a sorpresas y la tarea de planificar la mina sería mucho más sencilla. La opción que se baraja actualmente para disminuir la incertidumbre operacional es reemplazar en la medida de lo posible al factor humano en la operación, que tanto la toma de decisiones como la operación de los equipos sea realizada por equipos autónomos, capaces de moverse siempre a la misma velocidad, por exactamente la misma ruta y tomando siempre las mismas decisiones.

3.5. Parámetros geométricos de diseño

El diseño minero de un yacimiento define, considerando las condiciones económicas, los recursos geológicos y las restricciones técnicas, medioambientales y políticas, qué recursos y cómo serán extraídos. Dentro de los aspectos técnicos que permiten determinar el diseño minero se encuentran una serie de parámetros geométricos. En el caso de una operación a cielo abierto los parámetros geométricos que pudiesen variar al implementar tecnologías autónomas se detallan a continuación:

- Pendiente [%]: Corresponde a la inclinación del camino por el cual tiene que transitar los distintos equipos de la operación. Queda determinado por las especificaciones de los fabricantes de equipos y generalmente esta entre los 8 y 10%.
- Radio de curvatura ($R[m]$): Corresponde a la curvatura de un giro de la rampa. Queda definida por el radio del equipo que transitará por aquella rampa. Las diferencias entre los equipos autónomos y los operados manualmente pueden hacer necesarios cambios en la pendiente de los caminos y en el radio de curvatura de las rampas.
- Ángulo cara de banco ($\alpha_b[^\circ]$): Representa la inclinación con que queda la pared del banco. Este ángulo se mide desde la pata del banco a su propia cresta. Queda definido por la geotecnia y sus valores típicos son entre 65° y 75° .
- Ángulo inter-rampa ($\alpha_r[^\circ]$): Representa la inclinación con que queda el conjunto de bancos que se sitúa entre rampas. Este ángulo se mide desde patas de los bancos de los extremos. Depende de la geotecnia, del ancho de bermas y del ángulo cara de banco, sus valores típicos son entre 40° y 60° .
- Ángulo global ($\alpha_o[^\circ]$): Representa el ángulo de inclinación con que queda la pared final del rajo, incluyendo todas las singularidades geométricas existentes. Este ángulo se mide desde la pata del banco más profundo hasta la cresta del banco más alto de la explotación. Depende del ángulo inter-rampa y del número de rampas, es un resultante del diseño.
- Ancho rampa ($b_r[m]$): La rampa es el camino en pendiente que permite el tránsito de equipos desde la superficie a los diferentes bancos de extracción. Su ancho depende del tipo de camión y de si es una rampa en uno o dos sentidos, generalmente tiene un ancho entre 20 y 40 [m].
- Distancia de seguridad [m]: Corresponde a la distancia que se deja entre el camión y la berma o entre camiones. La precisión de los equipos de GPS que utilizan los camiones autónomos podrían generar diferencias tanto en los anchos de rampas como en las distancias de seguridad necesarias.

Estos parámetros son de vital importancia para la operación minera, ya que un cambio en estas puede significar una diferencia de millones de toneladas de estéril a extraer o de mineral no extraído. Lo que a su vez se traduce en millones de dólares gastados o perdidos.

Figura 18. Parámetros geométricos de un talud minero.

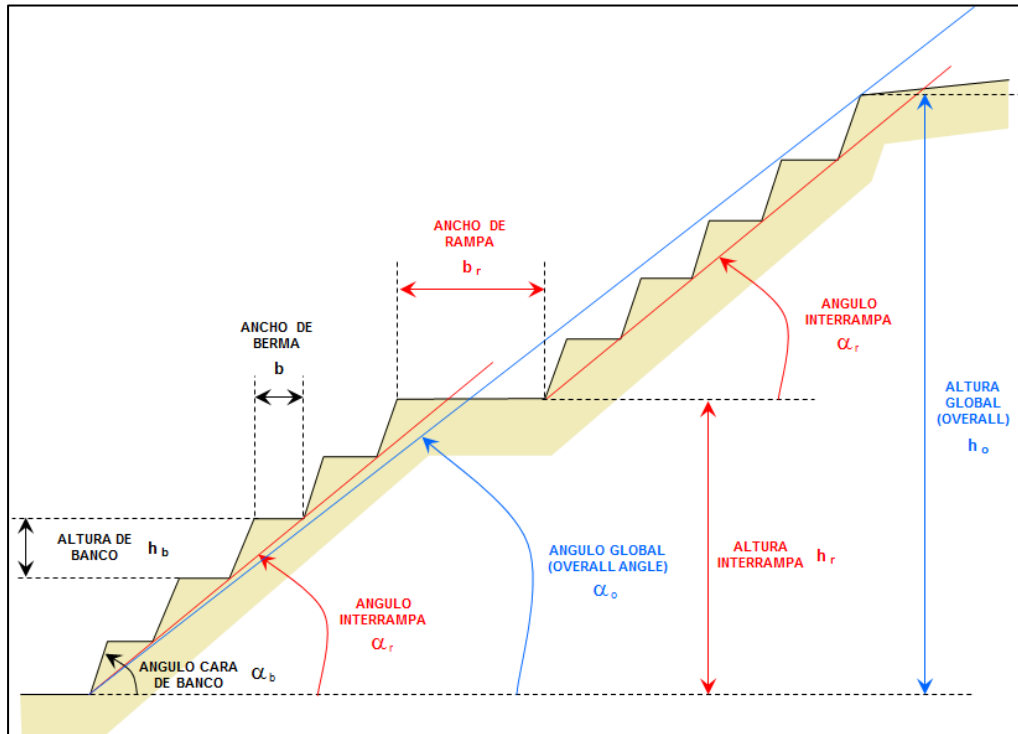


Figura 19. Radio de curvatura.

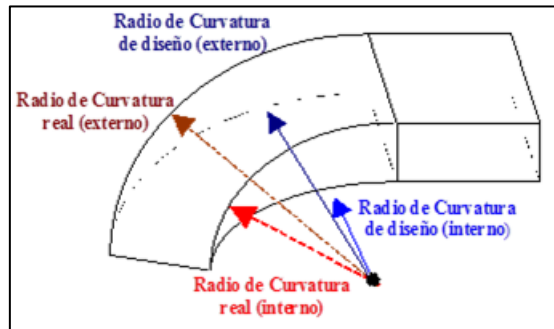
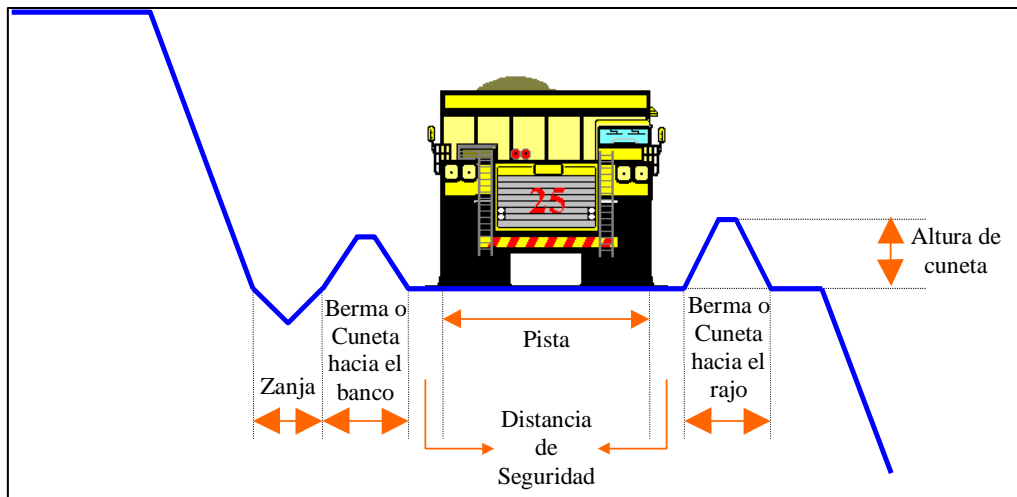


Figura 20. Parámetros geométricos en una rampa.



3.6. Costos operacionales

El negocio minero, tiene como objetivo generar un beneficio económico a través de la extracción de mineral. Este beneficio económico está definido, básicamente, por la diferencia entre los ingresos por el mineral extraído y los costos asociados a la operación.

3.6.1. Ingresos

Los ingresos obtenidos quedan definidos en función de

- Ley del mineral [%]: Porcentaje de concentración del elemento de interés. Depende de las condiciones geológicas del yacimiento.
- Producción [t]: Cantidad de material que es extraído en la operación. Está definido por la planificación minera.
- Precio $\left[\frac{US\$}{t}\right]$: Precio del elemento de interés. Queda definido por las condiciones del mercado.

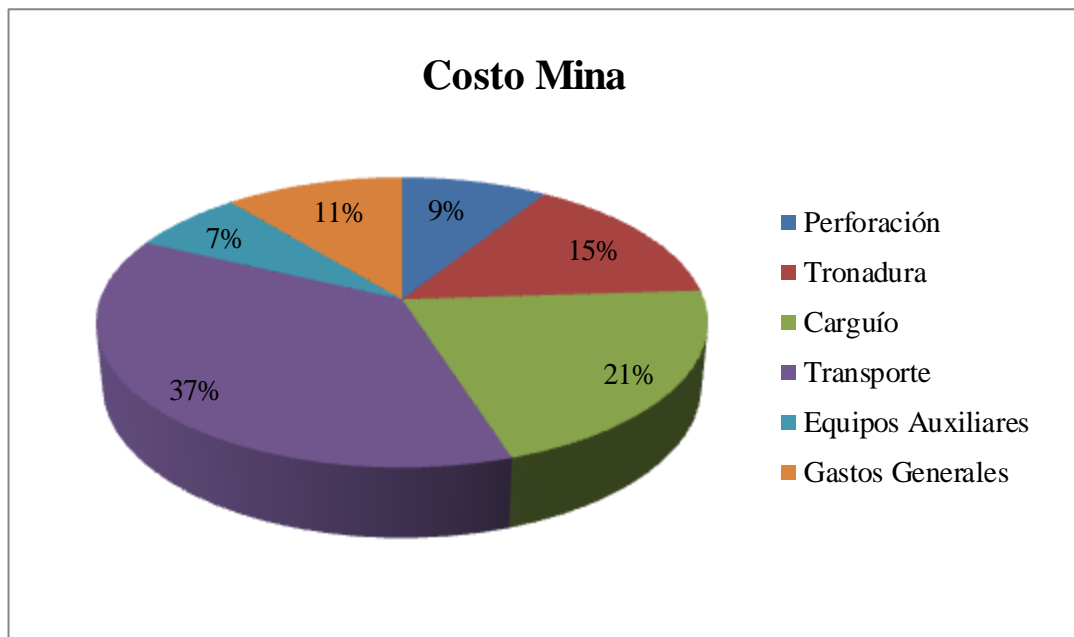
Considerando los elementos involucrados en los ingresos, que dependen de factores externos o que están definidos con anterioridad, el potencial impacto que podría tener la implementación de tecnologías autónomas no está en los ingresos, si no en los costos.

3.6.2. Costos operacionales

Los costos asociados a la operación minera dependen de la forma en que esta se realiza, lo que los convierte en el ítem sobre el cual nuevas tecnologías podrían tener una mayor influencia.

En una operación minera, las etapas de carguío y transporte son las más relevantes al considerar tanto la inversión de adquisición de equipos como a los costos de operación. En el caso de una operación a cielo abierto representan aproximadamente el 50% de los costos de extracción. En la siguiente figura se presenta la distribución porcentual de los costos en minas chilenas de cobre a cielo abierto (Guzmán, 2012).

Figura 21. Distribución de costos en minas de cobre en Chile.



Esto nos muestra que nuevas tecnologías capaces de reducir los costos son especialmente interesantes en la operación de transporte, he aquí la importancia de estudiar la opción de implementar camiones autónomos.

3.6.3.1 Costo mano de obra

En la figura anterior, además, se puede observar que los costos generales en las minas de cobre chilenas operadas a cielo abierto alcanzan el 11%. Dentro de estos costos se encuentran los sueldos de los trabajadores, los cuales podrían parecer pequeños porcentualmente, sin embargo, de igual forma son relevantes.

El costo asociado a los sueldos de los trabajadores en una operación es básicamente la suma de los productos entre la cantidad de trabajadores en cada función por el sueldo asociado a cada actividad.

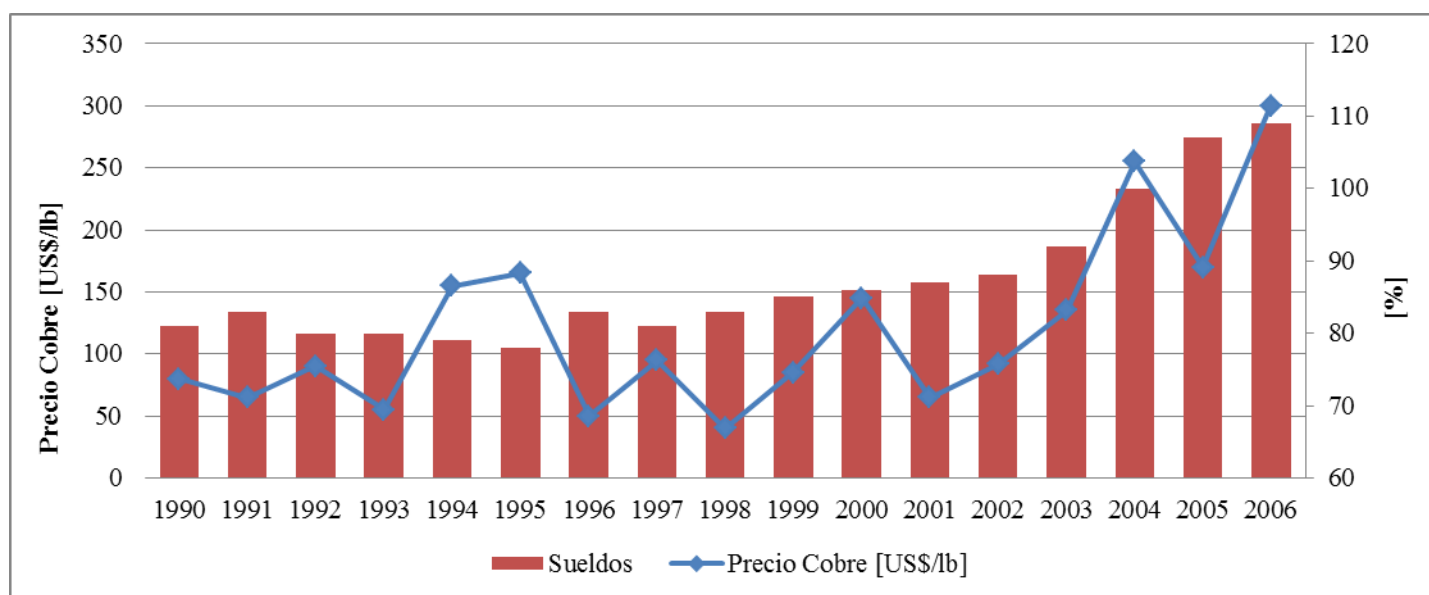
En los comienzos de la minería eran necesarias muchas personas para realizar el trabajo que hoy en día realiza un equipo mecanizado, la consigna era: Muchos hombres = Una máquina. La mecanización de la minería prometió cambiar esto, y lo logró, llegando al estado: Un hombre = Una máquina. La promesa actual de la automatización es llevar esto aún más allá: Un hombre = Muchas máquinas. Esta promesa, como establecen D. Bellamy y L. Pravica, debería reducir considerablemente la cantidad de operadores necesarios para operar una mina.

Además hay que considerar que los operadores de equipos pasarán de trabajar operando un equipo pesado a trabajar en una sala de control, en un ambiente altamente tecnológico y

computarizado. Este cambio de perfil, como sugieren los autores anteriores, podría traer consigo un aumento en los salarios de los operadores. De la misma forma, los mantenedores tendrán a cargo equipos más sofisticados y con una mayor cantidad de sistemas incorporados, por lo que también podría existir, como compensación por realizar una tarea de mayor dificultad, un cambio en sus sueldos. Por último hay que considerar que las diferencias descritas tanto en el trabajo de los operadores como de los mantenedores acarrear la necesidad de llevar a cabo capacitaciones al personal, que pueden ser costosas y largas.

Aun cuando estos cambios de perfil pudiesen generar un cambio en los sueldos recibidos, en general, estos cambios guardan mayor relación con el precio del elemento de interés. En el caso de Chile y el cobre, la siguiente figura muestra la evolución del índice real de remuneraciones de la minería¹⁶ y el precio del cobre para el periodo 1990 – 2007. Durante el sub-periodo 1990 – 2002 los sueldos de los trabajadores registraron un crecimiento anual promedio de 0,9% y una correlación con el precio del cobre de -0,77, por otro lado, durante el sub-periodo 2003 – 2007 se registró una tasa de crecimiento promedio anual de 5,03% y una correlación con el precio del cobre de 0,93, lo que conlleva a que durante el periodo 1990 – 2007 exista una correlación entre los sueldos y el precio del cobre de 0,68.

Figura 22. Precio Cobre e Índice real de Remuneraciones en Minería 1990 – 2007.



Si bien las fluctuaciones del precio del cobre no son la causa directa ni única de las variaciones en las remuneraciones medias del sector minero, sí cuantifica la estrecha relación existente entre ambas variables.

¹⁶ Para la construcción del índice de remuneraciones reales se usó el índice nominal deflactado por IPC (base 100 = 2007).

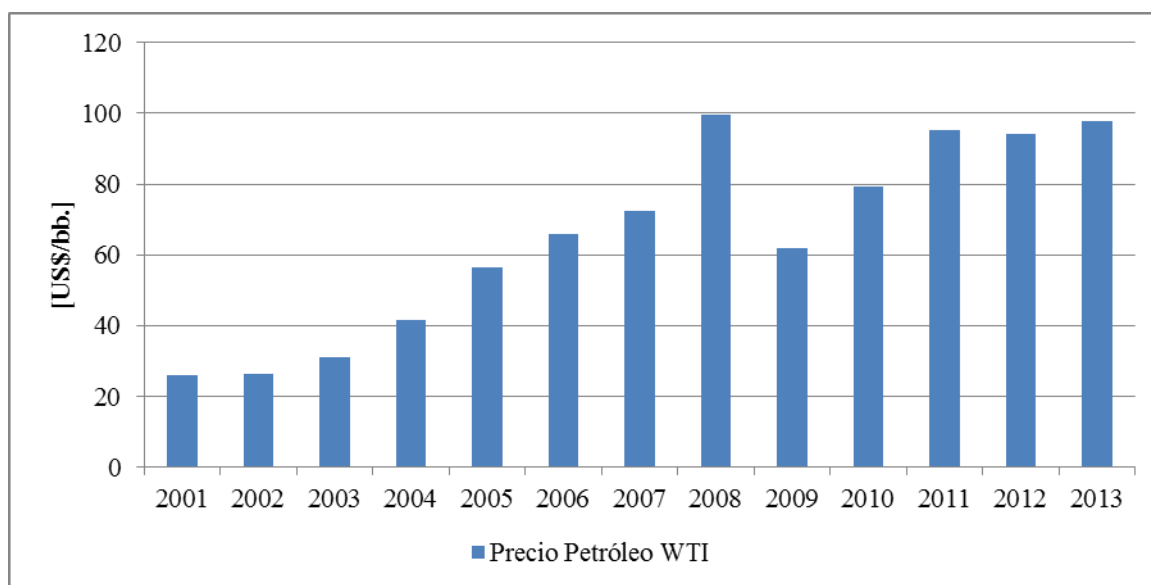
Por lo tanto, en tiempos de precios altos un trabajo menos tecnológico podría ser mejor remunerado que un trabajo altamente computarizado en tiempos de precios bajos. Es por esto que el efecto de implementar tecnologías autónomas sobre los costos asociados a sueldos no se estudiará en mayor detalle.

3.7. Consumo de combustible

El actual precio de los combustibles y la mayor rigurosidad de las restricciones medioambientales le han añadido importancia al tema del consumo de combustible. Es por esto que hoy en día es muy relevante que se estudien alternativas que le permitan a la industria aumentar la eficiencia en el uso de estos.

La figura siguiente muestra el precio del petróleo WTI¹⁷ durante el periodo 2001 – 2012. Se observa que el precio casi se cuadruplicó durante este periodo de tiempo, es de esperar, por lo tanto, que los precios de los combustibles puedan continuar con una tendencia creciente.

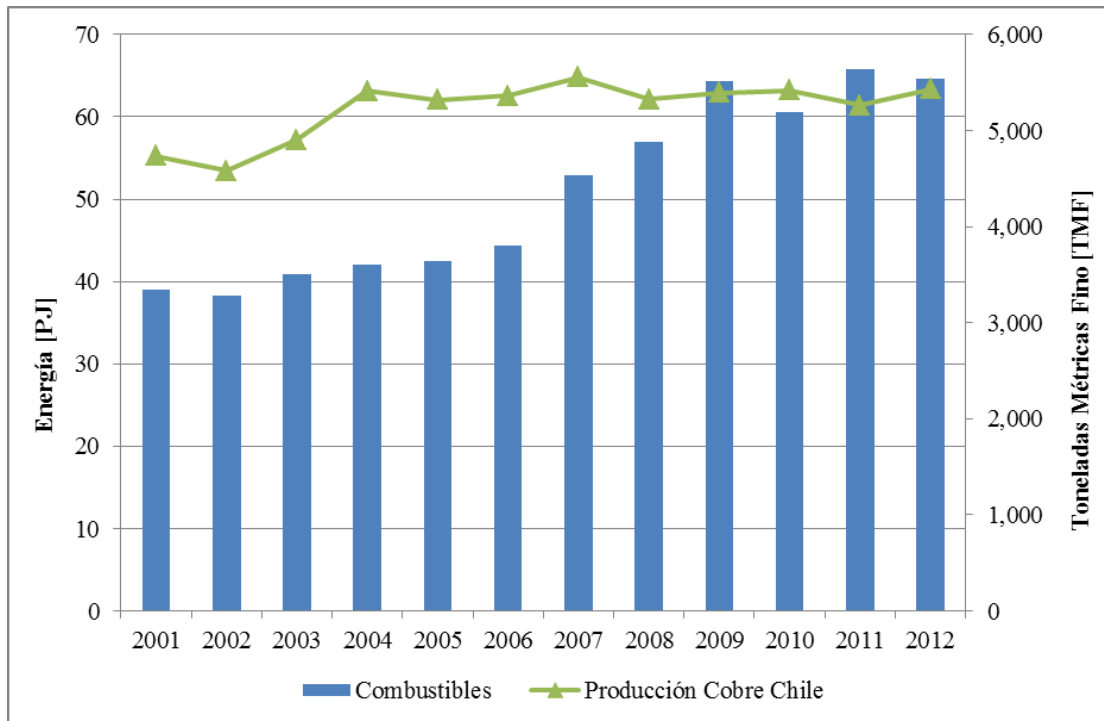
Figura 23. Precio Petróleo WTI (Sonami, 2014).



No sólo el precio de los combustibles ha subido, sino que también su consumo. La industria chilena del cobre consumió durante 2001 cerca de 39 [PJ] de energía en forma de combustible, mientras que durante 2012 el consumo fue de 64,6 [PJ]. Lo anterior equivale a un incremento del 65,8%, a una tasa anual promedio del 5,8%. Sin embargo, este aumento en el consumo de combustible no va de la mano con un mucho más leve crecimiento en la producción nacional de cobre, que el mismo periodo creció un 14,7%.

¹⁷ Petróleo West Texas Intermediate.

Figura 24. Consumo combustible y producción nacional de cobre (Zeballos, 2013).

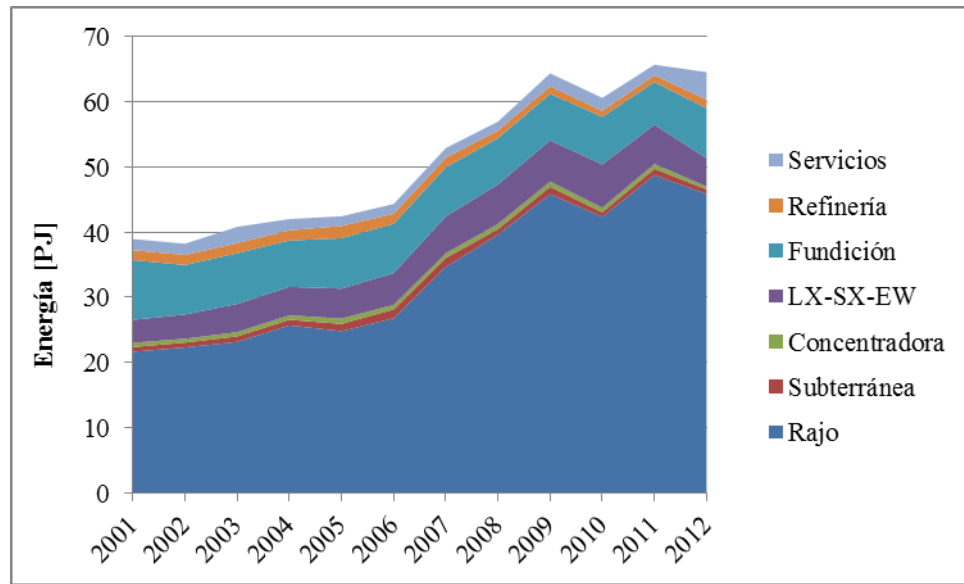


Es importante hacer notar dos efectos que influyen en este comportamiento:

- Ley del mineral: Entre 2000 y 2012 la ley promedio de cobre a nivel nacional bajaron desde un 1,29% a un 0,86% (Zeballos, 2013).
- Dureza del mineral: Durante el mismo periodo, el índice de trabajo (W_i) promedio aumentó desde 14,24 [kWh/tc] a un 16,81 [kWh/tc] (Zeballos, 2013).

Aun cuando este aumento en el consumo de combustible sea causado por efectos no controlables por la operación, es necesario estudiar nuevas opciones tecnológicas con el fin de disminuir su consumo. Esto es relevante especialmente en el caso de operaciones a cielo abierto. Como se observa en la figura a continuación, un rajo es el tipo de instalación minera que más consume combustible con aproximadamente un 71% del consumo total de la industria chilena del cobre. El principal causante de esta tendencia es la gran cantidad de camiones que operan en este tipo de minas y su bajo rendimiento.

Figura 25. Consumo de combustible por tipo de instalación (Zeballos, 2013).



Queda de manifiesto que el mejor lugar para implementar nuevas tecnologías con el objetivo de reducir el consumo de combustible en la industria es en las operaciones a cielo abierto.

3.8. Vida de los neumáticos

El fuerte desarrollo de la actividad minera ha llevado al uso de una mayor cantidad de camiones y, por ende, también de neumáticos. Esto ha provocado dos problemáticas: Un elevado costo de inversión asociado a los neumáticos y, una vez que llegaron al fin de su vida útil, una inmensa cantidad de estos en desuso y sin un destino final definido. Es por esto que, tanto económica como medioambientalmente, la tarea de alargar la vida útil de los neumáticos es de especial importancia.

Algunos de los problemas más recurrentes que atentan contra la vida de los neumáticos son: Una presión de inflado incorrecta, que la carga y velocidad del equipo sobrepase el rango recomendado, caminos en malas condiciones, entre otras.

Dentro de las técnicas usadas en la industria para obtener mayores vidas útiles de los neumáticos, se encuentran:

- Top Cad: Consiste en recuperar el caucho gastado, mediante el recauchaje preventivo del neumático. Esto se realiza una vez ejecutada la rotación de neumáticos, en la cual los neumáticos delanteros, al alcanzar el 30% de desgaste en neumáticos de camiones y

50% en neumáticos de cargadores, pasan hacia el eje trasero. Su objetivo es brindar una mayor protección al neumático aumentando de esta forma su vida útil.

Figura 26. Top Cad.



- Sideflex: Sistema compuesto de un anillo de acero que soporta un escudete circular de plaquetas. Es fabricado de un polímero liviano usado en la industria automotriz. El polímero tiene “memoria”, por lo que las plaquetas de sideflex se pueden flexionar y deformar ante cualquier impacto para luego volver a su forma original, protegiendo así los neumáticos y brindándoles una mayor vida útil.

Figura 27. Sideflex.



Además de estas opciones complementarias, el uso de tecnologías autónomas, capaces de moverse a velocidades más constantes que los equipos tradicionales y por exactamente las mismas rutas, se perfilan como una alternativa para lograr reducir el desgaste de los neumáticos y aumentar de esta forma su vida.

3.9. Seguridad

La seguridad se define como la ausencia de riesgo. En base a esta definición y considerando que aún existen algunas actividades con cierto grado de riesgo asociado, la industria minera no es una actividad completamente segura.

Cada año, ocurren cientos de accidentes relacionados al transporte de mineral, que terminan en un significativo número de muertes y heridos, como también costos por reparación, reemplazo de equipos y tiempos muertos. Muchos de estos accidentes son provocados por micro sueños, manifestaciones de la fatiga de los operadores. Estudios han demostrado que un significativo número de micro sueños ocurren durante los turnos de noche. Un número importante de estos accidentes son generados cuando el camión se desvía del centro del camino o cruza hacia la pista del sentido opuesto.

A nivel industrial se definen un par de parámetros para facilitar la comparación en términos de seguridad entre distintos rubros productivos. Los más importantes son:

- Tasa de accidentabilidad: Porcentaje de empleados lesionados del total de trabajadores.

Ecuación 9. Tasa de accidentabilidad.

$$Tasa\ de\ accidentabilidad\ [\%] = \frac{N^{\circ}\ lesionados}{N^{\circ}\ trabajadores} \cdot 100$$

- Tasa de fatalidad: Porcentaje de empleados fallecidos cada 10.000 horas hombre.

Ecuación 10. Tasa de fatalidad.

$$Tasa\ de\ mortalidad\ [\%] = \frac{N^{\circ}\ fatalidades}{10.000\ horas\ hombre} \cdot 100$$

- Tasa de mortalidad: Cantidad de empleados fallecidos por cada 100.000 trabajadores.

Ecuación 11. Tasa de mortalidad.

$$Tasa\ de\ mortalidad = \frac{N^{\circ}\ fatalidades}{100.000\ trabajadores}$$

Si bien, en el caso de Chile, la industria minera tiene una menor tasa de accidentabilidad que otros importantes rubros económicos, estos tienden a ser de mayor gravedad, por lo que al considerar la tasa de fatalidad, la minería pasa al segundo lugar entre las principales actividad económicas del país.

Figura 28. Tasa de accidentabilidad según actividad económica.

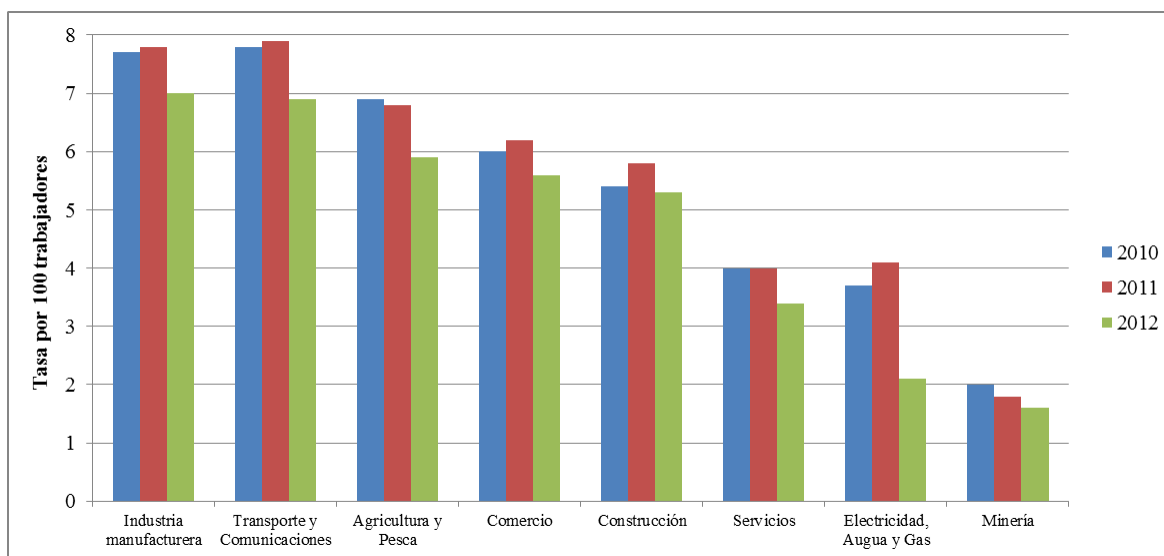
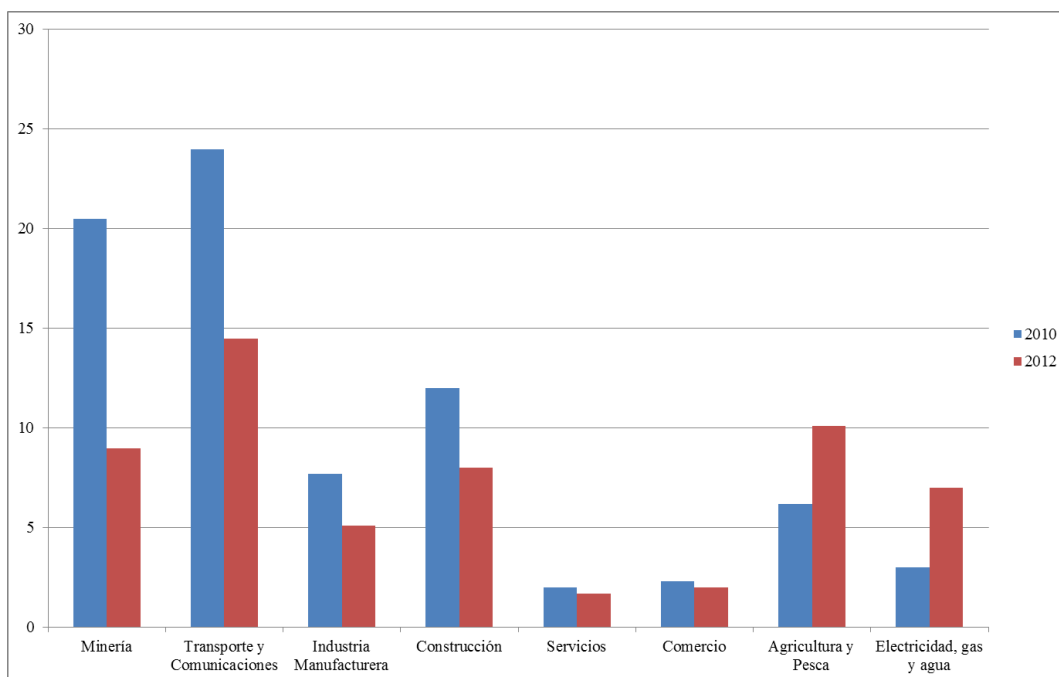


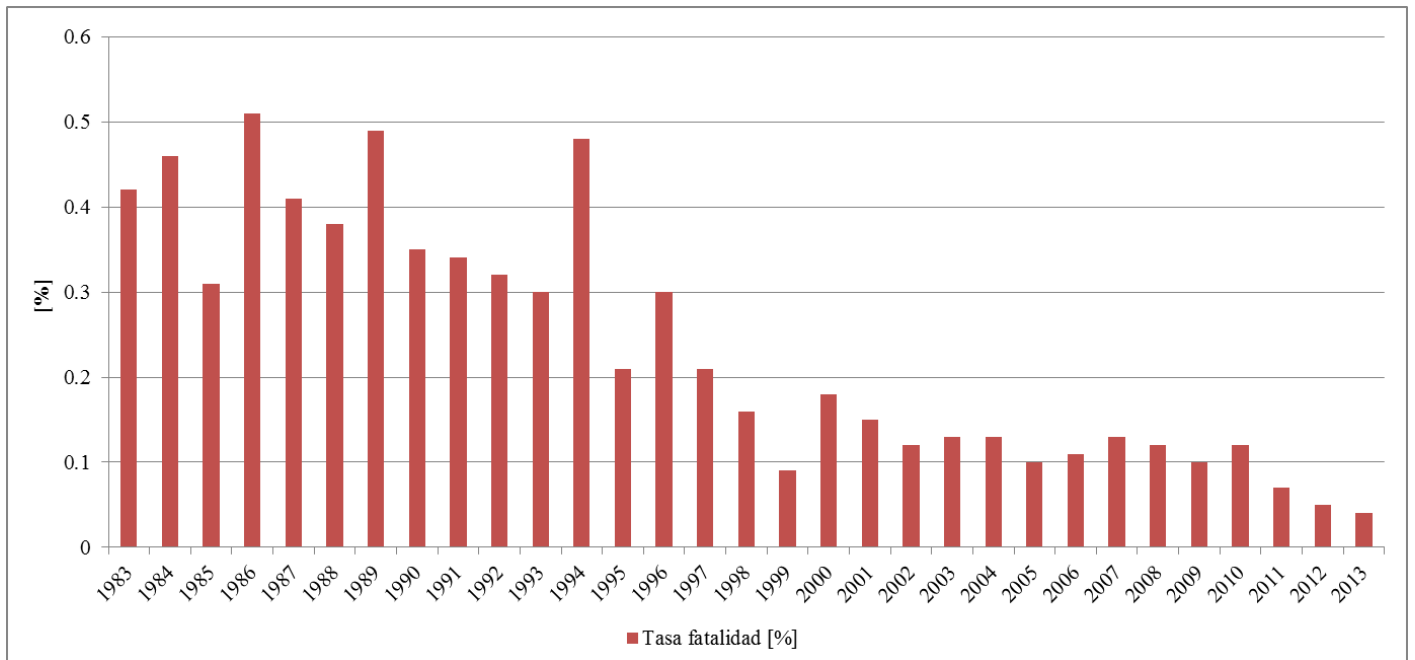
Figura 29. Tasa de fatalidad según actividad económica.



A pesar de las cifras anteriores y tal como se pueden observar en la figura siguiente la minería ha logrado disminuir paulatinamente su tasa de mortalidad, esto al implementar

protocolos y reglamentaciones más estrictas de seguridad y tecnologías que alejan a los trabajadores de los lugares y actividades más riesgosas.

Figura 30. Tasa de mortalidad de minería chilena 1983 – 2013.



Siendo la seguridad de sus trabajadores la preocupación principal de toda operación minera, cualquier opción que pueda generar una mejora en este ámbito debe ser considerada y estudiada.

4. VALIDACIÓN

Las tecnologías autónomas son postuladas como una de las posibles soluciones a los diferentes desafíos que enfrenta la industria minera, por lo que se espera que su implementación en una operación minera tenga un importante y amplio impacto en la operación minera. Este impacto sería tanto a nivel técnico, teniendo efectos en el diseño y la planificación minera, como a nivel social, influyendo en la vida de los trabajadores y en las comunidades vecinas.

De las tecnologías autónomas que están siendo implementadas en minería, los camiones autónomos capturan gran parte de la atención de los académicos. Por lo que, en base a la cantidad de información y estudios disponibles, son escogidos como el caso de estudio para validar el impacto en los parámetros a estudiar.

El uso de tecnologías autónomas a gran escala en operaciones mineras ha tenido una breve y reciente historia. Es por lo anterior que la cantidad de información con respecto a los efectos que tiene su implementación en el diseño y la planificación minera no abunda, en especial la información cuantitativa y la que existe, en general, no se encuentra disponible para el público general. Considerando esta limitación, la validación tendrá un carácter más cualitativo y se basará principalmente en las siguientes fuentes:

- Trabajos científicos sobre automatización, sus aplicaciones e impacto en minería. En particular los trabajos de Tom Albanese, John McGagh, Drew Bellmy, Luka Pravica y John Meech.
- Boletines informativos de empresas relacionadas a la automatización. Empresas proveedoras de tecnologías autónomas como Komatsu y Caterpillar y empresas que han implementado estas tecnologías como Codelco y Rio Tanto.
- Declaraciones de personas involucradas a centros de investigación, empresas mineras o proveedoras de tecnologías autónomas. Entre las que destacan John Meech, académico de la universidad de British Columbia (UCB), Marcelo Navarrete, superintendente de planificación de minera Gabriela Mistral y Darko Louit, gerente general de Komatsu Chile.
- Modelo de simulación: Tesis doctoral presentada por Juliana Parreira en Agosto de 2013 “An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System”. El estudio tiene como objetivo comparar, en base a parámetros KPI, la operación de transporte con camiones manuales y autónomos en una operación a cielo abierto. El modelo de simulación incluye un sub modelo del comportamiento del conductor, del consumo de combustible y del

desgaste de los neumáticos. Este modelo fue escogido para la etapa de validación por haber sido realizado para la obtención de un alto grado académico y en una institución de prestigio (University of British Columbia), además de abarcar muchos temas comunes con el presente estudio y estar disponible para su uso. Más detalles sobre el modelo se encuentran en la sección anexos.

4.1. Disponibilidad mecánica de los equipos

Como se describió en el capítulo 3 la disponibilidad mecánica de los equipos depende de las horas de mantención, que incluyen el tiempo en que el equipo está en el taller ya sea por mantenciones planeadas o no planeadas.

Una de las grandes ventajas de operar con equipos autónomos es la consistencia que le brindan a la operación y el mayor control que se tiene sobre esta. Al carecer de un operador humano los equipos autónomos se mueven a velocidades más constantes, evitando las continuas aceleraciones y desaceleraciones que caracterizan a una operación de camiones manual. Además este tipo de equipos trabaja bajo las condiciones para las cuales fue desarrollado y su operación no depende de la experiencia, capacidades o humor de su operador.

Esta consistencia en la operación de los equipos, según algunos autores (Albanese, 2011), provocaría una disminución en los niveles esperados de desgaste y fallas de los equipos, logrando disminuir el número de fallas, es decir, aumentar el tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés), y así reducir las horas de mantención. Es importante señalar que los autores que han establecido a la disponibilidad mecánica como uno de los parámetros que se verán beneficiados por la implementación de tecnologías autónomas son pocos y la información con respecto a su impacto no abunda. Es más, ninguno de estos autores ha puntualizado sus sospechas en términos porcentuales, por lo que de generar una mejora en la disponibilidad mecánica no se ha encontrado información con respecto a la magnitud de esta.

Por otro lado, los equipos autónomos son más sofisticados, pues tienen incorporados una serie de sistemas que hacen posible su funcionamiento, este mayor número de sistemas se traduce en una mayor cantidad de posibles focos de fallas, pues donde hay más cosas, más cosas pueden fallar. Además, la mayor sofisticación de los equipos autónomos y el hecho de que el personal de mantenimiento tenga menos experiencia con ellos podrían aumentar el tiempo que toma realizar las mantenciones (MTTE, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, incluso en el caso que la autonomía de los equipos logre disminuir el número de mantenciones a realizar, no es seguro de que el tiempo que los equipos pasen en el taller de mantenimiento sea menor.

A continuación se presenta una tabla que contiene el promedio de horas de mantenciones planeadas y no planeadas según los resultados obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira.

Tabla 1. Horas en mantención.

Elemento		Manual	Autónomo
Media Mantenciones Planeadas	[h/d/camión]	2,6	2,8
Media Mantenciones No Planeadas	[h/d/camión]	1,3	1,4

Se puede observar que tanto para mantenciones planeadas como no planeadas, las diferencias obtenidas para camiones autónomos y manuales son pequeñas. Los camiones autónomos pasan 0,2 [h] más en mantenciones planeadas y 0,1 [h] más en mantenciones no planeadas.

En la tabla siguiente se presentan las horas hábiles y en mantención tanto para camiones autónomos como para manuales a partir de los resultados obtenidos por Juliana Parreira en su modelo de simulación.

Tabla 2. Horas hábiles y Horas en mantención.

Parámetro	Manual	Autónomo
HH [h]	24	24
HM [h]	3,9	4,2

Se observa que las horas de mantención (HM) son muy similares y la diferencia entre camiones autónomos y manuales es sólo de 0,3 [h]. Con estos datos es posible calcular la disponibilidad mecánica obtenida para los distintos tipos de camiones.

Tabla 3. Disponibilidad Mecánica.

Parámetro	Manual	Autónomo
Disponibilidad Mecánica [%]	83,7%	82,4%

Considerando las simulaciones realizadas por Juliana Parreira y usando las ecuaciones definidas anteriormente, se obtiene una disponibilidad mecánica de 83,7% para los camiones manuales y de 82,4% para los autónomos. Es decir que, en este caso, el impacto de la tecnología autónoma fue negativo en un 1,3%.

La información recolectada con respecto al impacto que tienen las tecnologías autónomas en la disponibilidad mecánica es ambigua y escasa. La consistencia de la operación hace pensar que el desgaste del equipo y la cantidad de fallas debería disminuir, por otro lado, la mayor cantidad de sistemas con que están dotados los equipos autónomos crean más focos de posibles fallas y un posible mayor tiempo en las mantenciones. En base a lo anterior, no existe información suficiente para validar un impacto positivo de los camiones autónomos en la disponibilidad mecánica.

4.2. Utilización de los equipos

Tal como se explicó en el capítulo 3 la utilización de los equipos depende de las horas de reserva, que incluyen las horas en que el equipo, a pesar estar en óptimas condiciones mecánicas, no está realizando sus funciones específicas, por ejemplo tiempo en colas, cambios de turno, colaciones, cargado de combustible, esperas por tronadura, entre otras.

Una de las mayores ventajas que se espera de la automatización es que este tipo de equipos, al no depender de un operador humano, lograría evitar pérdidas de tiempos asociadas a las necesidades humanas, como cambios de turnos y colaciones. Además, si se cumple la proyección de que los equipos autónomos consumen menos combustible, se podría ahorrar tiempo en el carguío de combustible.

Con respecto al efecto de la automatización sobre la utilización de los equipos, varios autores han expresado cualitativamente sus sospechas y trabajadores de la industria han declarado el impacto porcentual en sus faenas. Entre ellos destacan:

- D. Bellamy y L. Pravica, quienes señalan que al usar camiones autónomos en una operación a cielo abierto se evitarían tiempos muertos por cambios de turnos, colaciones y pausas higiénicas, con lo cual se podrían ganar anualmente cerca de 23 días de operación.
- John Meech, profesor de la Universidad de British Columbia, quien expresó durante una conferencia en 2012 su estimación de que la implementación de camiones autónomos generará un aumento de entre 10% y 20% en la utilización de los equipos.
- Marcelo Navarrete, superintendente de planificación de minera Gabriela Mistral, quien declaró a la prensa en 2013 que los camiones estaban operando con una utilización del 85%, lo que correspondía a una mejora del 15%.

A diferencia de lo que sucede en el caso de la disponibilidad mecánica de los equipos, existe una mayor cantidad de información con respecto al efecto que tienen las tecnologías autónomas en la utilización. Además, dicha información procede de varios autores, de los cuales algunos, como los anteriormente señalados Drew Bellay, Luka Pravica y John Meech, incluso publicaron cualitativamente sus creencias.

En la tabla siguiente se presentan los resultados promedios de horas de cambio de turno, de colaciones, de demoras del proceso y de transporte, obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira. Las demoras del proceso incluyen los tiempos en colas, de cargado de combustible, perdidas por tronadura, entre otras.

Tabla 4. Horas de transporte, cambio de turnos, colaciones y demoras.

Elemento		Manual	Autónomo
Media Cambio Turno	[h/d/camión]	0,4	0
Media Colaciones	[h/d/camión]	1,9	0
Media Demoras Procesos	[h/d/camión]	2,2	2,1
Media Total Transporte	[h/d/camión]	15,6	17,6

Se observa que las mayores diferencias se encuentran en que los camiones autónomos, al no contar con un operador humano, obtienen 0 [h] promedio de cambios de turno y colaciones, a diferencia de los operados manualmente que obtienen 0,4 [h] y 1,9 [h] respectivamente. En cambio, en términos del promedio de tiempo en demoras del proceso las diferencias son muy pequeñas, siendo 0,1 [h] mayor para los camiones manuales. Considerando estas 3 fuentes de tiempos perdidos y las horas de mantención estudiadas en la sección de la disponibilidad mecánica se obtiene el tiempo total de transporte. Este último parámetro es 15,6 [h] para los camiones manuales y 17,6 [h] para los autónomos, logrando operar estos últimos 2 [h] más durante un día.

En la siguiente tabla se presentan las horas operativas y de reserva para los camiones manuales y autónomos a partir de los resultados obtenidos por Juliana Parreira en su modelo de simulación.

Tabla 5. Horas operativas y de reserva.

Parámetro	Manual	Autónomo
HO [h]	15,6	17,6
HR [h]	4,5	2,1

De la tabla anterior se puede observar que las horas totales de transporte corresponden a las horas operativas, es decir, a las horas en que los camiones están realizando efectivamente las funciones para las cuales fue desarrollado. Por otro lado, la suma de los tiempos de cambio de turno, colaciones y demoras de proceso equivalen a las horas de reserva (HR), con un total de 4,5 [h] para los camiones manuales y de 2,1 [h] para los autónomos, es decir una diferencia favorable para los camiones autónomos de 2,4 [h]. A partir de estos datos es posible calcular la utilización obtenida para los distintos tipos de camiones.

Tabla 6. Utilización.

Parámetro	Manual	Autónomo
Utilización [%]	77,7%	89,2%

En base a los resultados de las simulaciones realizadas por Juliana Parreira y usando la ecuación de la utilización definida anteriormente, se calcula una utilización de 77,7% para los camiones manuales y de 89,2% para los autónomos. Por lo tanto, en este caso, el impacto de la tecnología autónoma fue positivo en un 11,5%.

El anterior 11,5% de beneficio de los camiones autónomos en la utilización, está en el rango 10% - 20% predicho por John Meech y bastante cercano al 15% de beneficio obtenido en Gabriela Mistral, según declaraciones de Marcelo Navarrete. Además la utilización de 89,2% obtenida para los camiones autónomos se acerca a la de 85% declarada por el mismo Marcelo Navarrete para los camiones autónomos de Gabriela Mistral.

En base a la información recolectada y considerando que los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas por Juliana Parreira se encuentran en los rangos predichos por autores y cercanos a las declaraciones de faenas donde operan equipos autónomos, se valida el beneficio de la implementación de este tipo de equipos en la utilización alcanzada en la operación. Esto principalmente por la menor cantidad de horas de reserva (HR) que tienen los equipos autónomos, ya que al carecer de un operador manual se ahorran los tiempos de colaciones y cambios de turno.

4.3. Productividad de los equipos

Según lo visto anteriormente la productividad de un equipo es el producto de la carga útil que transporta y la cantidad de ciclos que logra realizar por unidad de tiempo. Por un lado, la carga útil es independiente del camión y no debería haber diferencias entre cargar un equipo autónomo y uno manual, por otro lado, la cantidad de ciclos es variable, depende de la operación del equipo y es el parámetro que realmente determina la productividad de este.

Una de las ventajas de los equipos autónomos, como se vio anteriormente, es que al carecer de un operador humano se evitan tiempos de colaciones y cambios de turno y de esta forma son capaces de trabajar durante más horas cada día, es decir, aumentar la cantidad de horas efectivas de operación. Además los camiones autónomos operan consistentemente a lo largo del turno y del día, a diferencia de los operadores humanos, que se enfrentan al cansancio y fatiga de las largas jornadas laborales. Por estas razones los equipos autónomos deberían ser capaces de realizar una mayor cantidad de ciclos por unidad de tiempo.

Por otro lado, como desventaja de los camiones autónomos se tiene que estos operan a velocidades menores que los equipos manuales, por lo que es posible que el tiempo necesario para realizar un ciclo sea mayor. Además, el sistema de detección de obstáculos que los camiones autónomos tienen incorporados los hace reducir la velocidad o detenerse completamente cuando detecta algo anómalo a su alrededor, una piedra en el camino, otro camión o un equipo de servicio podrían gatillar una detención no deseada. Estas detenciones perjudican a la operación, incrementado en tiempo de ciclo de los equipos.

Al igual que con la utilización de los equipos, de la información recolectada sobre tecnologías autónomas, buena parte toca el tema de un posible aumento en la productividad de

los equipos, por lo que existe bastante información sobre este punto, tanto cualitativa como cuantitativa.

En relación al efecto de la automatización sobre la productividad de los equipos, varios autores han manifestado sus estimaciones y trabajadores de la industria han declarado a la prensa sobre el impacto porcentual en sus faenas. Se destacan:

- John Meech, profesor de la Universidad de British Columbia, quien expresó en 2012 que el uso de camiones autónomos generará un aumento de entre 15% y 20% en la productividad de los equipos.
- Darko Lout, Gerente general de Komatsu Chile, quien declaró a la prensa en Enero de 2014 que de acuerdo con estudios de Codelco los camiones habían aumentado su productividad en un 25%.

A continuación se presenta una tabla con los resultados promedios de N° de ciclos y carga útil obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira. El N° de ciclos se mide por día y la carga útil por ciclo.

Tabla 7. Número de ciclos y carga útil.

Elemento		Manual	Autónomo
Media N° Ciclos	[ciclos/d]	18,9	23,1
Media Carga Útil	[t/ciclo]	223,9	222,1

Se puede observar que los camiones autónomos logran realizar 23,1 ciclos de carga – transporte – descarga por día, mientras los camiones manuales sólo 18,9 ciclos. Esta es una diferencia sustancial, pues el equipo autónomo logra realizar más de 4 ciclos extras cada día. Por otro lado, como se esperaba, la carga útil difiere entre camiones manuales y autónomos sólo en 1,8 [t], diferencia que debería reducirse mientras el tiempo de simulación aumente.

En la siguiente tabla se presentan la productividad promedio por día de los camiones manuales y autónomos a partir de los resultados obtenidos por Juliana Parreira en su modelo de simulación.

Tabla 8. Productividad.

Parámetro	Manual	Autónomo
Productividad [t/d]	4.231	5.130

Los aproximadamente 4 ciclos más que logra ejecutar los camiones autónomos y una carga útil cercana a las 223 [t], equivalen a una productividad 900 [t/d] mayor para los equipos autónomos. Específicamente la productividad para los camiones manuales fue de 4.231 [t/d] y la

de los autónomos 5.130 [t]. En base a estos resultados, el efecto de la tecnología autónoma es positivo en un 21,2%.

El 21,2% de impacto positivo de los camiones autónomos en términos de productividad, está muy cercano pero levemente por sobre el rango 15% - 20% estimado por John Meech y un poco por debajo del 25% de beneficio declarado por Darko Louit a principios de este año sobre la experiencia en minera Gabriela Mistral.

Basándose en la información encontrada y en que los resultados obtenidos por Juliana Parreira se encuentran muy cercanos a los rangos estimados por autores y a las declaraciones realizadas sobre faenas donde operan equipos autónomos, se valida la mejora en la productividad al implementar camiones autónomos. Este beneficio viene asociado principalmente a la mayor cantidad de horas efectivas que operan los camiones autónomos que lograr sobreponerse a las menores velocidades y a las detenciones por seguridad que tienen asociados los camiones autónomos.

4.4. Incertidumbre operacional

Anteriormente se destacó el impacto que tienen la incertidumbre operacional en la planificación minera, y la importancia que tiene intentar reducir esta incertidumbre por medio de la eliminación, dentro de lo posible, de la variabilidad de la operación. Una de las opciones que se encuentran en estudio para intentar controlar la incertidumbre operacional es la implementación de tecnologías autónomas.

Una de las ventajas de los equipos autónomos es la constancia de su operación y que su toma de decisiones no depende del factor humano, por lo tanto ante las mismas circunstancias siempre decidirán lo mismo. En particular, los camiones autónomos siempre se mueven a la misma velocidad y por exactamente las mismas rutas, además no necesitan tiempos de colaciones o cambios de turno, por lo que le dan mayor continuidad a la operación. Por otro lado, las detenciones de los camiones autónomos al encontrarse con algún obstáculo atentan contra esta continuidad y consistencia de la operación autónoma.

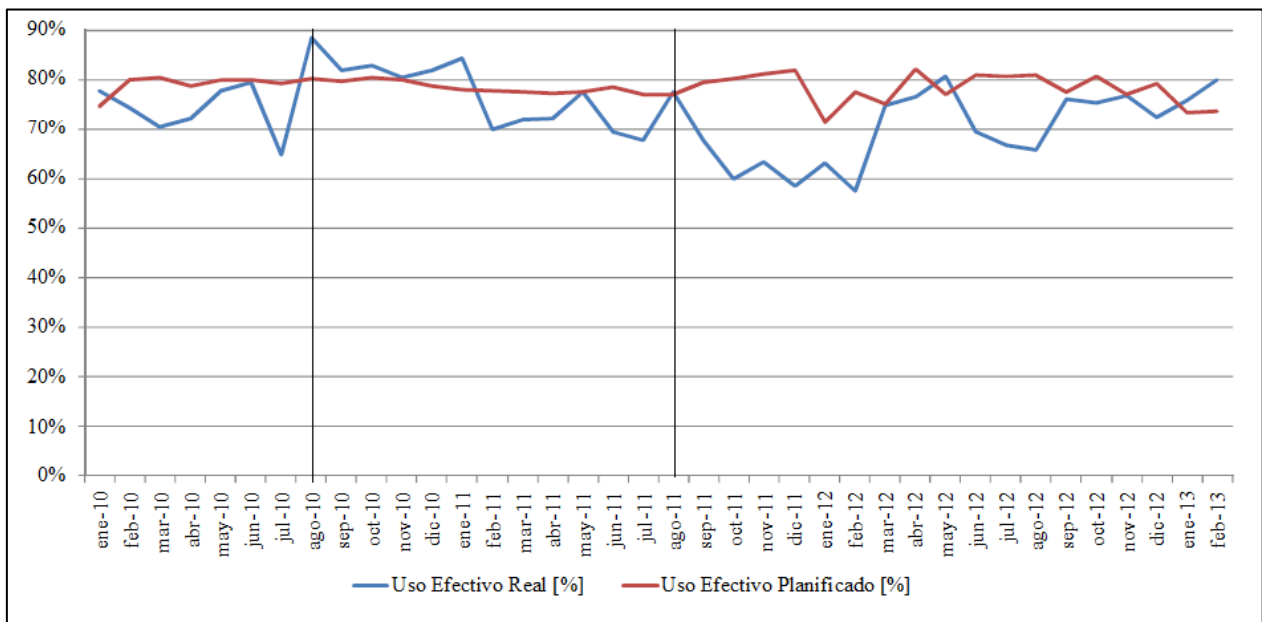
De la poca información existente con respecto a este tema, el trabajo que más extensamente lo trata es el paper “Mine planning for Autonomous Haulage System” elaborado por Marcelo Navarrete y Chang Ja Kim y presentado en el seminario Mine Planning de 2013.

En el trabajo presentan la experiencia de minera Gabriela Mistral en relación a la planificación minera con un sistema de transporte no tradicional como es su flota de camiones autónomos. En un principio en minera Gabriela Mistral se implementó el transporte autónomo pero se usó una planificación minera tradicional, con el tiempo se fueron incorporando las

especificaciones técnicas y particularidades de los camiones autónomos a la planificación, logrando mejores resultados en la operación.

Según los autores, un indicador que refleja el entendimiento y la optimización de la operación es el uso efectivo de los camiones, el cual es planificado y posteriormente medido en la operación. A continuación se presenta el uso efectivo de los camiones autónomos de minera Gabriela Mistral. Entre Julio de 2010 y Julio de 2011 se realizó una pausa técnica en la operación autónoma para estudiar e incorporar mejoras al sistema, esta pausa permite comparar las diferencias entre el sistema manual y el autónomo.

Figura 31. Uso efectivo minera Gabriela Mistral (Navarrete *et al*, 2013).



Se observa que durante el primer periodo usando camiones autónomos, existen grandes diferencias entre el uso efectivo planificado y el real, esto producto de que en ese momento la planificación realizada era tradicional y no considerabas las particularidades de los equipos autónomos. Durante la pausa técnica se estudiaron los cambios necesarios para incorporar las mencionadas particularidades a la planificación. En los primeros meses después de volver al sistema autónomo se implementaron los cambios estudiados, mientras se avanzaba en el entendimiento de la lógica del sistema autónomo. Finalmente, en los últimos meses de 2012 y los primeros de 2013 se obtienen mejores resultados, con valores cercanos entre el uso efectivo planificado y el real.

Como conclusión, los autores señalan que el mayor control que se tiene sobre la operación y el reemplazo del elemento humano en la toma de decisiones, han mejora los niveles de incertidumbre del sistema minero, logrando una mayor confiabilidad en los planes de producción de la operación.

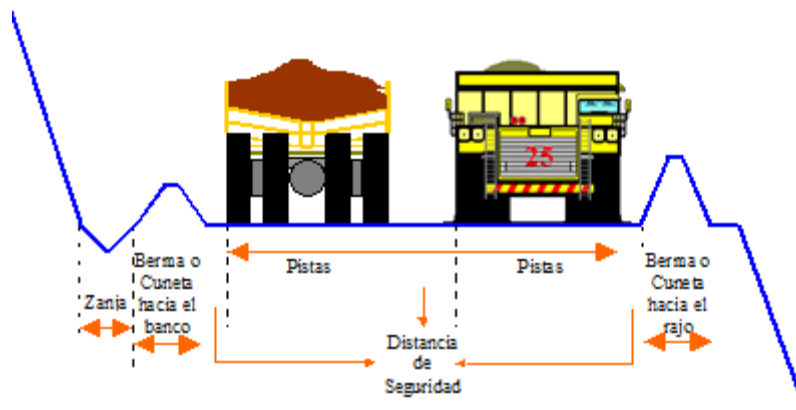
Aunque las características de los equipos autónomos, hacen pensar que podrían efectivamente reducir la variabilidad de la operación y así reducir los niveles de incertidumbre, al sopesar la escasa información relativa a este tema y a lo poco concluyente de la información entregada por el uso efectivo de los camiones de Gabriela Mistral, se considera evidencia insuficiente para validar un impacto positivo de los equipos autónomos en términos de incertidumbre operacional.

4.5. Parámetros de diseño

Como se estableció en el capítulo 3 los parámetros de diseño definen que material y cómo será extraído, por lo que su variación puede repercutir en millones de toneladas que se extraerán o que se dejaran de extraer, lo que a su vez se traduce en millones de dólares de diferencia. Esta es la razón por la cual es tan relevante su correcta definición.

Los camiones autónomos se basan en el sistema de posicionamiento global (GPS), que actualmente cuenta con una precisión del orden de 1 [cm], mucho mayor que la de un operador de un equipo pesado. Dada esta característica, D. Bellamy y L. Pravica señalan que una de las mayores contribuciones de los equipos autónomos sería, en el caso de una mina explotada a cielo abierto, la disminución de las distancias de seguridad entre camiones y entre camión y berma.

Figura 32. Representación rampa doble sentido



Lamentablemente esta proyección estuvo lejos de cumplirse en el caso de minera Gabriela Mistral. El camión autónomo identifica si una rampa es de uno o dos sentidos en base a su ancho. En el caso de Gabriela Mistral, si el camión mide un ancho de 28 [m] o más, considerará a la rampa como doble sentido. Más aún, existe una relación entre el ancho de la rampa y la velocidad del camión. Mientras mayor sea el ancho de la rampa, el camión considerará que puede ser más arriesgado dado el mayor margen de error y transitará a una mayor velocidad. La preferencia de Gabriela Mistral por maximizar la velocidad de sus camiones y un requerimiento de Sernageomin producto de un accidente, han llevado a la faena a tomar la decisión de aumentar el ancho de sus

rampas hasta los 35 [m]. Por el momento, minera Gabriela Mistral está privilegiando la velocidad de sus camiones sobre la optimización de su diseño.

Además de operar a menores velocidades, los camiones autónomos también tienen mayores radios de giro, pues no son capaces de realizar giros demasiado cerrados. El radio de giro define el ancho de acuatamiento, que debe ser menor que el ancho de carguío. Por lo que un mayor radio de giro repercute en mayores frentes de carguío. En el caso de Gabriela Mistral los frentes de carguío son de 70 [m], un valor levemente mayor que el de otras minas de similares características.

Además de las dificultades y limitaciones propias del camión, minera Gabriela Mistral ha tenido que enfrentar un desafío propio del sistema autónomo. Cuando los camiones están operando en ciertas zonas muy cercanas a las paredes del rajo, el ángulo de la pared no permite una óptima comunicación entre los satélites y los camiones, haciendo que estos se detengan.

En base a la experiencia de minera Gabriela Mistral, en la cual se ha visto que las rampas han tenido que ensancharse en busca de mayores velocidades de los camiones, que los frentes de carguío han tenido que crecer para compensar la menor maniobrabilidad de los camiones autónomos y que los ángulos usados típicamente en la industria han generado problemas en la comunicación del sistema autónomo, se rechaza el supuesto impacto positivo que tendría la implementación de camiones autónomos en los parámetros de diseño. Este impacto negativo está asociado principalmente a la mayor holgura necesaria en el diseño minero para una eficiente operación de los camiones autónomos y las nuevas limitaciones que deben ser consideradas en pos de una óptima comunicación entre los camiones y los satélites.

4.6. Consumo de combustible

Según lo establecido anteriormente y en vista del alto precio de los combustibles y de las mayores restricciones medioambientales, el consumo de combustibles es un parámetro de vital importancia en el actual escenario de la industria minera. Por lo tanto, cualquier opción que ayude a mejorar la eficiencia del uso de estos debe ser considerada.

Según señalan D. Bellamy y L. Pravica, los equipos autónomos son más eficientes que los equipos tradicionales en términos de consumo de combustible. Esto porque los operadores humanos tienden a moverse de un destino a otro a máxima velocidad y con continuas aceleraciones y desaceleraciones, a diferencia de los camiones autónomos, que se mueven a velocidades más constantes. Más aún indican que este mayor eficiencia sería, por si sola, suficiente para justificar un cambio de tecnología.

Otra de las ventajas de los camiones autónomos, como destacan T. Albanese y J. McGagh, es que este tipo de equipos podrían disminuir la emisión de gases de efectos

invernadero (GHG, por sus siglas en inglés), importantes, especialmente hoy en día, al enfrentar restricciones medioambientales más estrictas.

Además, al carecer de un conductor humano, los camiones autónomos están libres de ciertas malas prácticas en la industria. Por ejemplo, se sabe que una práctica entre los operadores es dejar el motor andando mientras no se está trabajando para que ese tiempo sea contabilizado como operativo, consumiendo combustible innecesariamente. Este tipo de prácticas serían eliminadas al implementar equipos autónomos.

Las desventajas de los camiones autónomos están asociadas al sistema de detección de obstáculos, el cual, es pos de la seguridad de la operación, detiene el camión ante cualquier posible situación de riesgo. Estas detenciones le quitan continuidad a la operación y eficiencia al consumo de combustible. En el caso particular de minera Gabriela Mistral, otro de los problemas que están enfrentando es la gran cantidad de colas que se forman en su operación y los tiempos perdidos que esto supone.

De la información recolectada sobre tecnologías autónomas, existen varios autores que hablan sobre una posible reducción en el consumo de combustible, sin embargo sólo uno ha expresado sus estimaciones cualitativamente. A continuación se presentan las principales estimaciones y declaraciones realizadas por trabajadores de la industria e investigadores del tema.

- John Meech, profesor de la Universidad de British Columbia, quien expresó en 2012 que el uso de camiones autónomos generará una disminución de entre 10% y 15% en el consumo de combustible de los equipos.
- Marcelo Navarrete, superintendente de planificación de minera Gabriela Mistral, ratifica el menor consumo de combustible que han mostrado los camiones autónomos en esa faena.

Los resultados obtenidos por Juliana Parreira con respecto al consumo de combustible según tipo de conducción y etapa del ciclo de transporte, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9. Consumo combustible por tipo de conductor y etapa del ciclo.

Elemento		Pasivo	Normal	Agresivo	Autónomo
		Media	Media	Media	Media
Consumo combustible	En espera [L/h]	26.6	27	26.8	27
	Cargado [L/h]	384.3	384.2	384.4	381.5
	Vacío [L/h]	80.8	79.3	77.8	69.5

En la tabla anterior se observa que el consumo de combustible cuando el camión está en espera es independiente del comportamiento (pasivo, normal o agresivo) del operador y de si el equipo es autónomo o manual, lo que tiene sentido pues el camión se encuentra detenido. Algo

similar sucede en el caso en que el camión se encuentra cargado, en esta condición no existe mucha libertad para ser notoriamente más agresivo o pasivo de lo normal. La clara diferencia se genera cuando el camión se encuentra vacío, en esa situación un equipo operado por un conductor pasivo consumirá más combustible y esta cantidad se irá reduciendo levemente a medida que el conductor aumente su agresividad al volante, obteniéndose diferencias de 3 [L/h] entre el camión operado por un conductor pasivo y uno agresivo. Aún mayor es la diferencia al comparar el consumo de combustible de un camión autónomo, el cual consume cerca de 10 [L/h] menos que el operado manualmente cuando se encuentra vacío, este principalmente a que mantienen una velocidad más constante y con menos aceleraciones y desaceleraciones.

En la tabla siguiente se presenta el consumo de combustible en [L/ciclo] para cada uno de los comportamientos del conductor y para los camiones autónomos obtenidos a partir del modelo de simulación de Juliana Parreira.

Tabla 10. Consumo combustible por tipo de conductor.

Elemento		Pasivo	Normal	Agresivo	Autónomo
		Media	Media	Media	Media
Consumo combustible	Total [L/ciclo]	184.8	180.1	183.1	173.2

Se puede observar que con respecto a los camiones operados manualmente, un comportamiento normal por parte del operador genera el consumo de combustible más eficiente, a diferencia de los comportamientos más extremistas, ya sea pasivo o agresivo, que consumieron un par de litros más en cada ciclo. Por el lado de los camiones autónomos, estos siguen siendo más eficientes que los operados manualmente en el consumo de combustible por ciclo de operación. A partir de estos datos y ponderando por la cantidad de conductores con cada comportamiento, se calcula el consumo por tipo de camión por ciclo y por tonelada movida.

Tabla 11. Consumo de combustible.

Parámetro	Manual	Autónomo
Consumo [L/ciclo]	182.4	173.2
Consumo [L/t]	0.83	0.78

Los resultados del modelo de simulación muestran que el consumo de combustible de los camiones operados manualmente es de 182,4 [L/ciclo] y de 0,83 [L/t], mientras que el de los camiones autónomos es de 173,2 [L/ciclo] y 0,78 [L/t]. Esto corresponde a un ahorro por parte de los camiones autónomos de 9,2 [L/ciclo] y de 0,5 [L/t], lo que equivale a un efecto positivo del 5,7% medido por ciclo y del 6,1% medido por tonelada.

El consumo de combustible medido en [L/t] considera la productividad de los distintos tipos de camiones, por lo que en un intento por aislar el real impacto de la autonomía del equipo, se privilegiará para el análisis el consumo de combustible medido en [L/ciclo]. Dicho lo anterior,

el impacto de los camiones autónomos es de un 5,7%, que se encuentra un poco por debajo pero siguiendo la misma tendencia que predijo John Meech.

Basándose en la información encontrada y en los resultados obtenidos de las simulaciones hechas por Juliana Parreira, se valida el impacto positivo de la implementación de camiones autónomos en el consumo de combustible durante la operación. Este impacto proviene principalmente de una operación más consistente y a velocidades más constantes. Si además la productividad de los equipos autónomos mejora, el impacto en el consumo de combustible medido por tonelada movida podría ser aún mayor.

4.7. Vida de los neumáticos

Lograr una larga vida de los neumáticos, para así poder reducir costos, es una fuente de constante atención en una operación minera. Además, una vez finalizada la vida útil de los neumáticos, su destino final se convierte en un serio problema para las operaciones mineras.

El hecho de que los camiones se muevan siempre a las mismas velocidades, que estas sean más constantes y por exactamente las mismas rutas, debería ayudar a disminuir la tasa de desgaste de los neumáticos y así conseguir vida de neumáticos más largas. Por otro lado, los camiones autónomos están equipados con un sistema que les permite clasificar las rutas según dificultad, por lo que el equipo se moverá a una velocidad menor por una ruta compleja y a una mayor a través de una ruta sencilla, otra cualidad que debería ayudar a extender la vida de sus neumáticos.

Como una potencial desventaja de los camiones autónomos, D. Bellamy y L. Pravica señalan que este tipo de equipos, al carecer de un operador humano que tome decisiones, son incapaces de esquivar rocas en el camino por lo que la vida de sus neumáticos debería reducirse. Sin embargo, estos camiones tienen incorporados un sistema de radar, el cual detecta cualquier roca u objeto en el camino y detiene el camión. Por lo tanto, el problema no radica en que los neumáticos se dañen al pasar por encima de las rocas, si no, en que el camión se detenga continuamente, haciendo de la limpieza de caminos una tarea de vital importancia en una operación con camiones autónomos. Finalmente, esta potencial desventaja se convierte en una ventaja y hace crecer las sospechas de que los equipos autónomos podrían reducir las tasas de desgaste de sus neumáticos.

Al igual que con el tema del consumo de combustible, de la información encontrada varios autores se refieren a la posibilidad de que los camiones autónomos logren disminuir el desgaste de sus neumáticos, sin embargo sólo uno ha expresado cualitativamente sus sospechas. A continuación se presentan las principales estimaciones y declaraciones por parte de trabajadores e investigadores.

- John Meech, profesor de la Universidad de British Columbia, quien expresó en 2012 que con el uso de camiones autónomos se logrará reducir entre un 5% y 15% la tasa de desgaste de sus neumáticos.
- Marcelo Navarrete, superintendente de planificación de minera Gabriela Mistral, declaro en Octubre de 2013 que la vida de los neumáticos de los camiones autónomos se había extendido de 6.000 a 8.000 [h].
- Alexis Méndez, gerente general de minera Gabriela Mistral, declaró en Marzo de 2014 que la faena había alcanzado la cifra record de 12.932 [h] de vida para sus neumáticos.

Es importante señalar que, sin bien a primera vista los datos de minera Gabriela Mistral hacen creer en una extensión gigantesca de la vida de los neumáticos, estos datos son el resultado de un proyecto de la faena que tiene como objetivo alcanzar mayores vidas de los neumáticos y que involucra la implementación de otros sistemas y herramientas, como son Top Cad y Sideflex. Por lo tanto, es necesario aislar el efecto de las tecnologías autónomas para poder estudiar su real efecto en la operación.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por Juliana Parreira sobre la tasa de desgaste de los neumáticos según tipo de conducción y etapa del ciclo de transporte.

Tabla 12. Desgaste de neumáticos por tipo de conductor y etapa del ciclo.

Elemento		Pasivo	Normal	Agresivo	Autónomo
		Media	Media	Media	Media
Desgaste neumáticos	En espera [mm/h]	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
	Cargado [mm/h]	0.0303	0.0306	0.0304	0.0298
	Vacío [mm/h]	0.0066	0.0073	0.0067	0.0063

Se observa en la tabla anterior que, al igual con el consumo de combustible, cuando el camión está en espera el desgaste de los neumáticos es independiente del comportamiento (pasivo, normal o agresivo) del operador y de si el equipo es autónomo o manual, lógico pues el camión se encuentra detenido. La misma tendencia se mantiene cuando el camión está cargado, ya que las posibilidades de distintos comportamientos al volante se reducen y el desgaste de los neumáticos es bastante similar. La gran diferencia se genera cuando el camión está vacío, condición en la cual los neumáticos de un camión operado manualmente, independiente del comportamiento del conductor, tendrá mayores tasas de desgaste que los camiones autónomos. Esta diferencia en el desgaste de neumáticos es de aproximadamente 0,0005 [mm/h] y se explica en gran parte por una operación más consistente y una menor variabilidad en la velocidad del equipo.

A partir de los datos anteriores y ponderando por la cantidad de conductores con cada comportamiento, se calcula el desgaste de los neumáticos por tipo de camión. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13. Desgaste de neumáticos.

Parámetro	Manual	Autónomo
Desgaste [mm/ciclo]	0.015	0.014

Los resultados del modelo de simulación muestran que el desgaste de neumáticos de los camiones operados manualmente es de 0,015 [mm/h] y de 0,014 [mm/h] para los camiones autónomos. Esto equivale a un efecto positivo del 7,6% por parte de los camiones autónomos, porcentaje que se encuentra dentro del rango predicho por John Meech.

En base a la información encontrada y en que el resultado del modelo de simulación de Juliana Parreira se encuentra dentro del rango predicho por investigadores, se valida el impacto positivo de la implementación de camiones autónomos en el desgaste de sus neumáticos. Esto principalmente asociado a una operación más constante, con menos variaciones en la velocidad de los equipos y al sistema de detección de impacto con que están equipados este tipo de camiones.

4.8. Costos operacionales

Tal como se estableció anteriormente los costos asociados a la operación son la variable sobre la cual se tiene mayor control, por lo que es el sector de mayor interés para aumentar el beneficio del negocio minero.

Dentro de la información recolectada sobre tecnologías autónomas, después de una mejora en los estándares de seguridad, una posible disminución de los costos operativos es el efecto más nombrado entre los autores. Los costos operacionales engloban a varios sub costos como los costos salariales, costos de combustibles, costos de mantenimiento y reparación, costos de neumáticos, entre otros. A continuación se analizan cada uno de estos sub costos.

- **Costos salariales:** La principal ventaja de las tecnologías autónomas es que no necesitan un operador humano, por lo que una de las mayores diferencias al usar este tipo de tecnologías es la reducción en la cantidad de personal. Algunos autores proponen que el cambio de tecnología crearía nuevos puestos de trabajo, sin embargo, es poco probable que estos nuevos de trabajo compensen la menor cantidad de operadores necesarios para llevar a cabo la operación.

En el caso particular de minera Gabriela Mistral, Marcelo Navarrete ha declarado que los 17 camiones autónomos son operados por un solo trabajador desde la sala de control y que su salario no ha variado.

Considerando que los salarios de los trabajadores no variarán en demasía, pues los cambios en los salarios obedecen a fuerzas mayores que un cambio de tecnología, y que son necesarios muchos menos trabajadores para operar los equipos autónomos, debería haber una reducción en los costos asociados a los salarios de los trabajadores.

- Costos de combustibles: Estos costos van ligados al consumo de combustibles de los equipos. En el caso particular de los camiones autónomos, anteriormente se validó una reducción, probablemente del orden del 5% al 10%, en el consumo de combustibles de estos equipos. Por lo tanto, debería haber una disminución del mismo orden en los costos de combustibles.
- Costos de mantención y reparación: Estos costos están asociados a las mantenciones planificadas y no planificadas realizadas a los equipos. Como no se encontró evidencia suficiente para validar una mayor disponibilidad mecánica de los equipos, tampoco se tiene la información necesaria para validar una reducción en los costos de mantención y reparación. El único autor que establece un rango es John Meech, quien estima que estos costos deberían disminuir un 8%.
- Costos de neumáticos: Anteriormente se validó una reducción, probablemente entre el 5% y el 15%, en la tasa de desgaste de los neumáticos usando camiones autónomos. Si el desgaste de neumáticos es menor, será necesario comprar neumáticos menos frecuentemente, por lo que también debería generarse una disminución de entre el 5% y el 15% en los costos de neumáticos.

Basándose en la información presentada, en la cual se establece la posible disminución de varios sub costos que componen los costos operacionales, es probable que la implementación de tecnologías autónomas, en particular de camiones autónomos, traiga consigo una reducción en los costos operacionales. Sin embargo, al no existir suficiente información con respecto a cómo podrían variar otros sub costos que integran los costos operacionales, no es posible validar todavía una disminución de los costos operacionales.

Por otro lado y al margen de los costos operacionales, hay que tener en cuenta que los camiones autónomos suponen una mayor inversión inicial, además de que los operadores deben ser capacitados para sus nuevos roles. Con respecto a esto último, varios autores creen que las capacitaciones serán muy cortas, especialmente para los jóvenes, pues están más acostumbrados a realizar tareas ligadas a la computación.

También es importante considerar que si las operaciones mineras llegan a ser operadas desde centros de control, alejados de la faena propiamente tal y próximas a centros urbanos, también se reducirían costos asociados a los campamentos, pasajes aéreos, transporte a la mina, etc.

4.9. Seguridad

Se sabe que la principal preocupación de toda empresa minera es asegurar la seguridad de sus trabajadores y brindarles las mejores condiciones laborales posibles. Una forma eficaz de aumentar la seguridad en una operación minera es establecer una distancia entre los trabajadores y la actividad potencialmente riesgosa, logrando así eliminar la fuente de peligro para los trabajadores.

La implementación de tecnologías autónomas promete retirar a los operadores desde el interior de la mina y de los equipos pesados para trasladarlos hacia salas de control, creando la distancia descrita anteriormente entre el personal y la actividad potencialmente riesgosa. La operación de los equipos autónomos es controlada desde una sala de control, lejos de la operación de los camiones y donde los operadores pueden estar cómodamente sentados y disfrutando del aire acondicionado. Con lo cual se logra tanto una mejora en la seguridad de los trabajadores como en sus condiciones laborales.

Además de alejar a los trabajadores de los riesgos de una operación minera, los camiones autónomos tienen la ventaja de estar equipados con sistemas que hacen muy poco probable que estén involucrados en un accidente. Tienen un sistema de clasificación de rutas según dificultad, el cual les permite escoger una velocidad acorde a qué tan complicada es la ruta que deben seguir, si esta es sencilla, optará por una velocidad mayor que en el caso de que la ruta sea de mayor dificultad. Además tienen incorporado un sistema de detección de obstáculos, que identifica cualquier objeto en el camino, ya sea otro camión, una roca o un equipo de servicio e inmediatamente obligará al camión al reducir su velocidad o a detenerse completamente. Por lo tanto, es muy poco probable que un camión tenga un accidente, ya sea por un descarrilamiento o una colisión.

Figura 33. Sistema de detección de obstáculos.



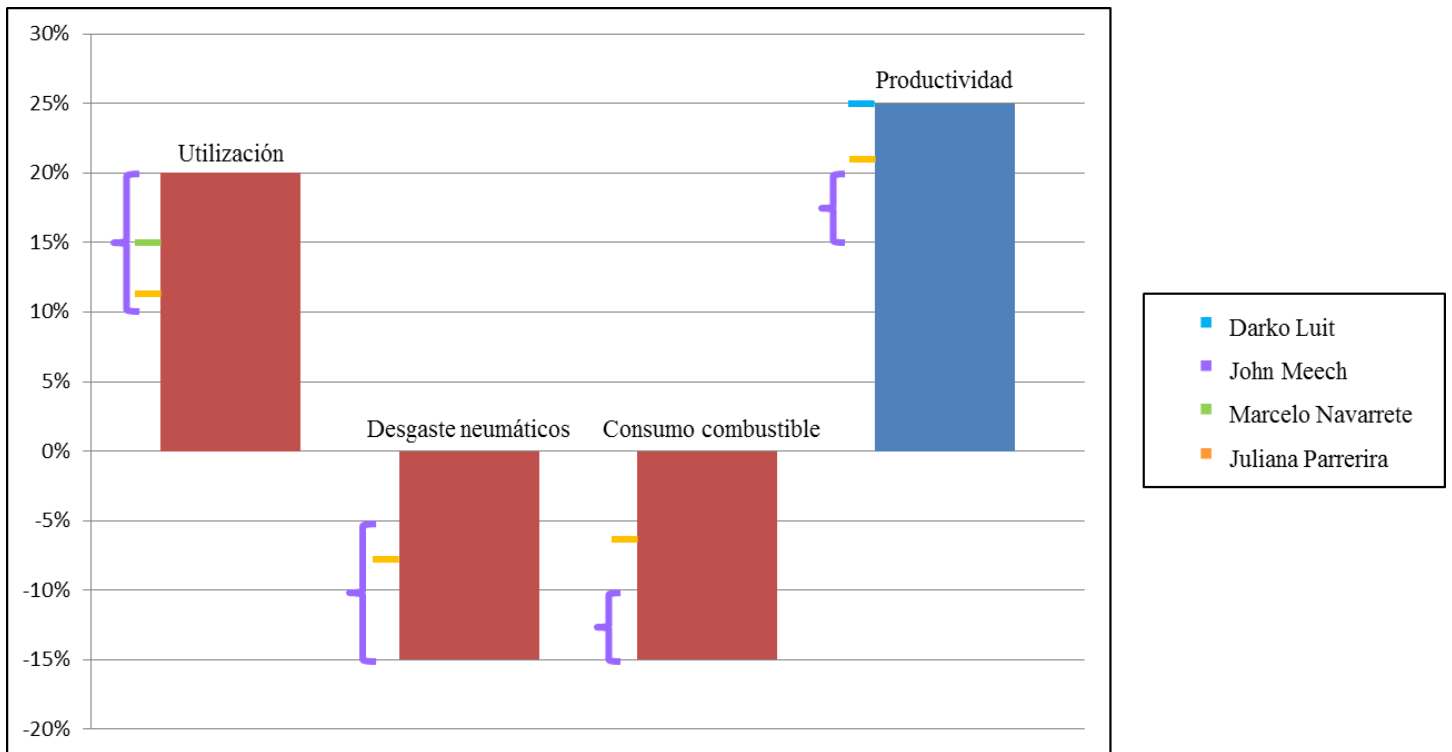
Es necesario destacar que el sueño de una operación minera totalmente automatizada, en la cual todos los equipos y operaciones son controladas desde un centro de control en una gran ciudad y donde ninguna persona deba trabajar en la mina es, por el momento, imposible, pues todavía es necesario el trabajo de personas dentro de la mina, como por ejemplo el personal de mantenimiento.

De los posibles beneficios que pudiese generar la implementación de tecnologías autónomas, la seguridad es con respecto a la cual existe mayor cantidad de información y más consenso entre los expertos. En base a la información recolectada, la distancia que se genera entre los operadores y las actividades riesgosas y los sistemas incorporados por los equipos autónomos, se valida el impacto positivo que tienen este tipo de tecnologías en la seguridad de una operación minera.

4.10. Resultados de la Validación

Para resumir y en base a la información recolectada y a la validación realizada anteriormente, los principales cambios cuantificables en términos de un impacto porcentual en los parámetros mineros al implementar tecnologías autónomas se presentan en la siguiente figura. En ésta cada columna representa uno de los efectos cuantificables de los camiones autónomos, las marcas de colores representan un resultado, cifra o rango declarado por algún autor o trabajador.

Figura 34. Impacto Porcentual.



- Utilización: Usando camiones autónomos, principalmente porque no son necesarios los cambios de turno ni las horas de colación, deberían operar con una utilización del orden del 10% al 15% mayor que los equipos manuales. Aunque hay información que indica que el efecto en este parámetro podría ser un poco mayor, se opta por un rango que intenta representar la intersección de la información recolectada. Se utiliza en mismo criterio para determinar los rangos de impacto de los demás parámetros estudiados.
- Desgaste de neumáticos: En base a una operación más consistente y con menor variabilidad, los camiones autónomos deberían tener una tasa de desgaste de neumáticos de entre 5% y 10% menor que los camiones operados manualmente.
- Consumo de combustibles: Nuevamente, una operación más consistente y con menor variabilidad permitiría a los camiones autónomos consumir entre un 5% y 10% menos combustible que su símil manual.
- Productividad: Como consecuencia de los cambios anteriores, los camiones autónomos deberían trabajar con productividades del orden de 20% mayores que los camiones manuales.

Además, en base a la información recolectada, el mayor beneficio del uso de tecnologías sería en la seguridad y las condiciones laborales de los trabajadores, que trabajarían cómodamente en salas de control y lejos de las actividades potencialmente riesgosas.

Por otro lado, el principal perjuicio que se ha detectado con respecto al uso de camiones autónomos es en el diseño de la mina, el cual debido a la forma en que piensan este tipo de tecnologías y a sus particularidades deberá ser más holgado y tomar en consideración nuevas restricciones.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de la presente investigación se logró verificar algunos de los aspectos más relevantes que se deben considerar entre la operación de equipos autónomos y operados manualmente. En particular, en el estudio de camiones autónomos fue posible clarificar 6 efectos claves, mientras que para los otros 3 la información recolectada se consideró insuficiente.

Se validó un efecto positivo de la operación con camiones autónomos del orden de un 10% al 15% en utilización, de entre un 5% y 10% en el desgaste de neumáticos y el consumo de combustible y del orden de un 20% en la productividad. Además se validó un efecto positivo en términos de seguridad y negativo en relación al diseño de la mina. Por otro lado, no se consideró concluyente la información con respecto a la incertidumbre operacional, los costos operacionales y la disponibilidad mecánica.

La principal dificultad que se enfrentó al desarrollar este trabajo fue la información sobre las tecnologías autónomas. La reciente incorporación de este tipo de tecnologías en la industria minera y la incógnita con respecto al impacto que pueden tener en la operación, reducen la cantidad de aplicaciones de las cuales obtener información real. Asimismo, las operaciones que han decidido implementar estas tecnologías son reacias a entregar su información, que es considerada confidencial por la misma escases de información al respecto.

Relacionado al punto anterior, la información disponible corresponde a la experiencia de ciertas aplicaciones, por lo que lo que sucedido en estas operaciones no necesariamente representa una tendencia global. El impacto y los efectos que generan las tecnologías autónomas al ser implementadas dependen de las particularidades y condiciones específicas de cada faena. Por lo que tienen más sentido hablar de una tendencia del impacto o un rango del impacto porcentual que de una cifra exacta.

Ligada a la importancia de las condiciones y particularidades de cada mina, también influirá en el efecto que tengan las tecnologías autónomas la forma que estas fueron implementadas. Implementar este tipo de tecnologías en una operación nueva es diferente que hacerlo en una operación donde hay que reemplazar un sistema de transporte ya existente. En general y según la información recolectada, la estrategia seguida por las empresas que han incorporado estas tecnologías ha sido implementar la flota completa de una sola vez en el caso de operaciones nuevas, e ir incorporando los equipos autónomos en etapas sucesivas en el caso de faenas que ya están en operación.

Otra complicación que se tuvo durante el desarrollo del trabajo fue intentar aislar el real impacto de las tecnologías autónomas, a menudo se encontró con información donde no queda clara la responsabilidad directa que tienen estas tecnologías en los parámetros estudiados. Hay

parámetros que son afectados por las tecnologías autónomas, que dependen de otros parámetros que también lo son, por lo que separar el real impacto que tienen estas tecnologías sobre el primer parámetro se vuelve una tarea complicada. Además, la información entregada o la forma en que es entregada por las empresas relacionadas a las tecnologías autónomas podrían tener fines propagandísticos y publicitarios, lo que también dificulta la tarea de aislar el real efecto de la tecnología. Por ejemplo, si un camión autónomo y uno manual tienen distintas productividades [t/d], estudiar el consumo de combustibles en [L/t] estaría mezclando la variación de ambos parámetros.

Además y ligado al efecto publicitario que pudiese afectar a la información recolectada, la magnitud de los efectos provocados por las tecnologías autónomas podrían estar un poco sobreestimadas, mientras que la dificultad de su implementación y operación podría estar un poco subestimada. Esto último es de vital importancia, hay que tener claro que la implementación de estas tecnologías es un proceso largo y con dificultades propias de los equipos y de la poca experiencia trabajando con ellos, además, una vez implementadas, los efectos que tengan sobre la operación podrían no ser tan importantes como se esperaba.

Aún con las dificultades recién descritas, en base a la información recolectada y a la validación realizada anteriormente, se concluye que las tecnologías autónomas, en particular los camiones autónomos, son opciones que podrían traer interesantes beneficios una vez implementadas en una operación minera, por lo que se recomienda continuar el estudio con datos reales de una faena que las haya implementado. Es de especial interés una faena que haya operado con ambos tipos de tecnologías para poder llevar a cabo una mejor comparación.

Para finalizar y ajeno a la parte técnica, al embarcarse en un proyecto implementación de tecnologías autónomas es importante considerar el impacto social que podría existir. Como se ha establecido anteriormente, una de las ventajas de los equipos autónomos es que no necesitan de un humano para operar, por lo que se reduciría el personal necesario. En base a lo estudiado, en general la población tiene una opinión positiva con respecto a estas tecnologías, sin embargo y entendiblemente, los operadores de equipos pesados están en contra de estas, pues temen que serán reemplazados y perderán sus empleos. Las empresas mineras siempre buscan mantener buenas relaciones con las comunidades de las zonas donde operan, por lo que el impacto social se convierte en una variable importante a estudiar.

Además, en base a la información recolectada, el mayor beneficio del uso de tecnologías sería en la seguridad y las condiciones laborales de los trabajadores, que trabajarían cómodamente en salas de control y lejos de las actividades potencialmente riesgosas.

Por otro lado, el principal perjuicio que se ha detectado con respecto al uso de camiones autónomos es en el diseño de la mina, el cual debido a la forma en que piensan este tipo de tecnologías y a sus particularidades deberá ser más holgado y tomar en consideración nuevas restricciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Albanese T, McGagh J, 2011, “Future Trends in Mining”, SME Mining Engineering Handbook.
- [2] Ahumada A, 1980, “Esquemas de Explotación del Rajo Chuquicamata y su Respectiva Evaluación Económica”.
- [3] Anuario de estadísticas del Cobre y otros metales: 1993 – 2012, elaborado por COCHILCO.
- [4] Atlas Copco, Mining & Construction, 2013, “Autonomy in the Andes – Chile’s copper giant Codeco puts scooptram ST14 to the test”.
- [5] Bailac, Recauchaje preventivo de neumáticos top cap, <http://www.bailac.cl/demo/recauchaje-preventivo-de-neumaticos-top-cap>, consultado el 23 de Abril de 2014.
- [6] Bellmy D, Pravica L, 2010, “Assessing the Impact of Driverless Haul Truck in Australian Surface Mining”.
- [7] Burger D. J, 2006, “Integration of the Mining Plan in a Mining Automation System Using State-of-the-Art Technology at De Beers Finsch Mine”.
- [8] Caterpillar, 2007, Revista Viewpoint: Perspectives on Modern Mining.
- [9] Caterpillar, 2008, Revista Viewpoint: Perspectives on Modern Mining.
- [10] Caterpillar, 2009, Revista Viewpoint: Perspectives on Modern Mining.
- [11] Cuadra P, Huerta P, “Extracción a rajo abierto: Del macizo rocoso a la roca mineralizada”, https://www.codecoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_extraccionarajoabierto.asp, consultado el 3 de Mayo de 2014.
- [12] Darling P, 2011, “Mining: Ancient, Modern, and Beyond”, SME Mining Engineering Handbook.
- [13] Pérez E, 2012, Módulo I: Operaciones Mineras, Asignatura: Introducción a la Accidentabilidad Minera, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago.
- [14] Fisher B, Schnittger S, 2012, “Autonomous and Remote Operation Technologies in the Mining Industry: Benefits and Costs”, BAE Research Report.

- [15] Gustafson, A, 2011, “Automation of Load Haul Dump Machines”, Lulea University of Technology.
- [16] Horberry T, Burgess-Limerick R, Steiner L, 2010, “Human factors for the design, operation, and maintenance of mining equipment, New York: CRC Press.
- [17] Herrera, J, 2009, “Introducción al Mantenimiento Minero”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- [18] Kara D, 2013, “Rio Tinto Rolls Out Ambitious, Autonomous, Mine of the Future”.
- [19] Komatsu, 2009, “Sistema de Acarreo Autónomo”, Revista Views.
- [20] Komatsu, 2010, “Número Especial del AHS”, Revista Views.
- [21] Komatsu, 2012, “Komatsu y Río Tinto Celebran un Acuerdo para la Utilización de 150 Camiones Autónomos en las Operaciones de Mineral de Hierro de Pilbara hasta el Año 2015”, Revista Views.
- [22] Komatsu, 2012, “Komatsu y Río Tinto Levan la Relación Comercial al Próximo Nivel”, Revista Views.
- [23] Lavrinc D, 2013, “It’s not a lack of technology that’s keeping trains from going driverless”.
- [24] Louit D, “Procesos productivos”, www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_extraccion_carguioytevaulacion.asp, Centro de Minería PUC, consultado el 28 de Mayo de 2014.
- [25] Lukacs Z, 2000, “Standard definitions for the benchmarking of availability and utilization of equipment”.
- [26] Lynas D, Horberry T, 2010, “Exploring the Human Factors Challenges of Automated Mining Equipment”, Minerals Industry Safety and Health Centre, Sustainable Minerals Institute, University of Queensland.
- [27] Lynas D, Horberry T, 2011, “Human Factors Issues with Automated Mining Equipment”, Minerals Industry Safety and Health Centre, Sustainable Minerals Institute, University of Queensland.

- [28] Lynas D, Horberry T, 2011, "Literature review: Emerging Human Factors Trends Regarding Automated Mining Equipment", Minerals Industry Safety and Health Centre, Sustainable Minerals Institute, University of Queensland.
- [29] McNab K, Garcia-Vasquez M, 2011, "Autonomous and remote operation technologies in Australian mining".
- [30] Melville T, 2014, "Safety is mining's top priority".
- [31] Navarrete M, Kim C, 2013, "Mine Planning for Autonomous Haulage System", Codelco, Chile.
- [32] Nebot, E, "Surface Mining: Main Research issues for Autonomous Operations", Australian Centre for Field Robotics, CRC Mining University of Sydney.
- [33] Ortiz O, Canchari G, Giraldo E, 2008, "Influencia de Sistemas de Trabajo y de Tiempos Perdidos en el Cálculo de Equipo para el Minado a Cielo Abierto del Yacimiento Antilla, Apurimac".
- [34] Paraszczak J, 2005, "Understanding and assessment of mining equipment effectiveness".
- [35] Parreira J, Meech J, 2011, "Autonomous Haulage Systems – Justification and Opportunity".
- [36] Parreira J, Meech J, 2012, "Simulation of an Open Pit Mine to Study Autonomous Haulage Trucks".
- [37] Parreira J, 2012, "An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System".
- [38] Randolph M, 2011, "Current Trends in Mining", SME Mining Engineering Handbook.
- [39] Rio Tinto, 2011, "Australasian Mining Review: The future of automation, technologies in the Australian resources industry".
- [40] Rio Tinto, 2012, "Rio Tinto invests US\$518 million in autonomous trains for Pilbara iron ore rail network in Western Australia".
- [41] Roberts J, Duff E, Corke P, 2001, "Reactive Navigation and Opportunistic Localization for Autonomous Underground Mining Vehicles".
- [42] Sandvik, 2013, "Autonomous Rotary Drilling".

- [43] Sonami, Precio petróleo WTI, http://www.sonami.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=222&Itemid=108, consultado el 14 de Mayo de 2014.
- [44] Schunnesson H, Gustafson, A, Kumar, U, “Performance of Automated LHD machines: A Review”, Lulea University of Technology.
- [45] Viewpoint Perspectives on Modern Mining, 2008, “Construcción de Tecnologías para las Minas del Futuro”, A publication of Caterpillar Global Mining.
- [46] Walker S, 2014, “Autonomy Gradually Gains Momentum”, E&MJ.
- [47] Zeballos J, 2013, “Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre al año 2012”.

ANEXO MODELO DE SIMULACIÓN (JULIANA PARRERIRA)

El estudio fue realizado en base a una faena minera a cielo abierto y a la información entregada por la compañía, las cuales no pueden ser identificadas por razones de confiabilidad. El modelo abarca sólo una parte del sistema de transporte e incluye 3 sub modelos: Un sub modelo del comportamiento del conductor, uno del consumo de combustible y uno del desgaste de los neumáticos.

- Sub modelo del comportamiento del conductor: Los camiones de la flota en estudio se asumen con la misma eficiencia mecánica, lo que marca la diferencia es la forma en que son operados por los conductores. El objetivo de este sub modelo es generar diferencias controladas en el comportamiento del conductor para así obtener resultados válidos para el consumo de combustible, desgaste de los neumáticos, tiempo de ciclos y productividades que imiten los de la mina Lucy.

Para poder comparar un sistema de transporte de camiones autónomos y uno tradicional, la autora creó un sub modelo para simular los diferentes tipos de conductores que operan durante los turnos de 12 horas en un periodo de 14 días. El sub modelo considera 2 atributos: La agresividad de la conducción y la estabilidad de la velocidad.

Algunos conductores son agresivos mientras otros son pasivos. El factor de agresividad es definido en el rango de -1 a 1 para definir como un conductor particular opera un equipo particular, siendo 0 el comportamiento normal. El segundo término, el factor de estabilidad determina el grado en que los anteriores términos, pasivo – normal – agresivo, cambian durante la simulación. En la siguiente tabla se muestra cómo interactúan el factor de agresividad y el de estabilidad.

Tabla 14. Agresividad y estabilidad.

Factor de agresividad	Estabilidad		
	Muy estable	Normal	Variable
Pasivo	De -1 a -0.8	De -1 a -0.5	De -1 a -0.2
Normal	De -0.1 a 0.1	De -0.25 a 0.25	De -0.4 a 0.4
Agresivo	De 0.8 a 1	De 0.5 a 1	De 0.2 a 1

- Sub modelo del consumo de combustible: El consumo de combustible se calcula en base a los datos de los proveedores y física fundamental. Son numerosos los factores que contribuyen al consumo de combustibles, la carga del equipo, la velocidad, peso, aceleración, aerodinámica, neumáticos, calidad del combustible y caminos, tiempos de espera, alineación e inflado de los neumáticos, pendiente de los caminos, comportamiento de los caminos, temperatura exterior, clima y mantenimiento.

El consumo de combustible puede ser calculado por distintos métodos. Hays (1990) sugiere la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Consumo de combustible

$$F_C = \frac{S_{FC} P L_F}{F_D}$$

Donde:

F_C : Tasa de consumo de combustible [L/h].

S_{FC} : Consumo específico de combustible.

P : Potencia del motor [kW].

L_F : Factor del motor.

F_D : Densidad del combustible.

S_{FC} es la relación de flujo de combustible por la potencia útil del motor. Si la potencia útil es medida como la potencia neta del cigüeñal, S_{FC} es llamado BSFC, que mide que tan eficientemente es usado el combustible en el motor para producir trabajo.

El modelo calcula la velocidad instantánea y luego determina la velocidad y fuerza del motor y el BSFC para calcular el consumo de combustible. Al final de la corrida de la simulación, el modelo entrega el consumo total de combustible para cada vehículo y tipo de conductor.

- Sub modelo del desgaste de neumáticos: El desgaste depende de la habilidad del conductor, de las condiciones climáticas, del mantenimiento, entre otros. La selección del neumático: Tamaño, huella, material y un buen mantenimiento también son atributos importantes. Para el modelo se usan típicos neumáticos 40 R57 para camiones CAT 793D.

El desgaste de los neumáticos ocurre principalmente en base a 3 mecanismos que se ven afectados por los factores de carga, velocidad y temperatura del neumático: Abrasión, corte e impacto y ablación. Este parámetro se puede medir en profundidad de desgaste [mm], en vida útil [h] o [km], en tasa de desgaste [mm/10.000 t] o [mm/10.000 km].

Para aplicar el modelo primero se debe calibrar para una mina en particular, para lo cual son necesarios 3 datos, la máxima velocidad, la máxima carga y la máxima tasa de desgaste [mm/10.000 km].

El modelo incluye dos palas y 9 camiones CAT 793D, 3 dedicados al transporte de mineral y los restantes 6 al de estéril. El sector de la operación modelado está compuesto por ocho rutas: Pala mineral – Chancador, Pala estéril – Botadero, Botadero – Pala mineral, Chancador – Botadero, Pala estéril – Estacionamiento, Pala mineral – Estacionamiento, Botadero – Estacionamiento y Chancador – Estacionamiento, de las cuales las últimas 4 son usadas para la mantención, carga de combustible, cambios de turnos y colaciones. El periodo de simulación es de 14 días.

Figura 35. Layout Modelo de Simulación.

