



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

DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL
PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MINA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN Y
DIRECCIÓN DE EMPRESAS

CHRISTIAN JENSEN MONTT

PROFESOR GUÍA:
ENRIQUE JOFRÉ ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GERARDO DÍAZ RODENAS
LEONEL SIERRALTA JARA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magister en Gestión y
Dirección de Empresas
POR: Christian Jensen Montt
FECHA: 2019
PROFESOR Guía: Enrique Jofré Rojas

DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MINA

Uno de los temas más relevantes que hoy en día se encuentran en el tapete es el cambio climático. Considerando la relevancia de este tema, las compañías mineras han ido ajustando sus políticas corporativas, pero sin la generación de cambios mayores, puesto que las regulaciones ambientales en cuanto a emisiones no afectan mayormente a este sector. Sin embargo, es de esperar que un posible cambio en la legislación ambiental lo afecte próximamente. Por esta razón, el presente trabajo se propone tomar medidas que permitan a la gran minería, en Chile, enfrentar los nuevos desafíos ambientales de la mejor manera posible.

La metodología usada considera, estudiar el impacto que producen las emisiones contaminantes de la gran minería en Chile en relación con el inventario de emisiones de la Región Metropolitana para dar un contexto del proyecto en términos medioambientales y de salud. También se proponen metodologías para estimar las emisiones contaminantes para flotas de transporte minero a partir de los consumos medios de combustible. Se estudia el impacto que las tecnologías de bajas emisiones tendrían en las emisiones de CO₂ equivalente, para determinar la huella de carbono que este cambio tecnológico representaría para la flota de transporte en el caso de estudio. De forma concreta, se propone una estrategia del cambio tecnológico para reemplazar los motores de la flota de transporte de mina (de Tier1 a Tier4) y, a modo de ejemplo, se consideran los efectos que esta implementación tendría en la mina Los Bronces, ubicada en la Región Metropolitana.

Los resultados obtenidos muestran que las emisiones de material particulado (MP) y óxidos de nitrógeno (NO_x) de la gran minería son relevantes en la comparación con el inventario de emisiones de GEI de la Región Metropolitana, representando un 19% y un 112%, respectivamente. La implementación del cambio de motores de Tier1 a Tier4, en la gran minería, conseguiría una reducción en la huella de carbono de un 4.6% respecto del valor de línea base. El resultado indica un *ratio* de 1.7 veces el costo de inversión versus el costo por impuestos potenciales, lo que también hace que el proyecto sea atractivo desde el punto de vista económico. Se pudo concluir que el cambio tecnológico de motores diésel únicamente genera beneficios, tanto para el Estado como para las compañías mineras, lo que indica que este debe ser realizado.

Dedicatoria

A mi familia

Este trabajo no habría sido posible sin su apoyo, comprensión y cariño, por todo lo que sacrificaron, gracias.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	v
Índice de Ilustraciones	vii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivo	2
1.2.1. Objetivos específicos	2
1.2.2. Metodología	2
2. Marco Conceptual	4
3. Análisis estratégico	7
3.1. Análisis PESTAL	7
3.2. Análisis FODA	12
3.2.1. Fortalezas	13
3.2.2. Debilidades	14
3.2.3. Oportunidades	15
3.2.4. Amenazas	16
4. Situación Actual	18
4.1. Diagnóstico - Línea base en la minería	18
5. Estado del arte de la tecnología de bajas emisiones	20
5.1. Control de los NOx	20
5.2. Tecnología de bajas emisiones en el mundo (Tier4)	21
5.3. Camiones mineros de extracción en Chile	23
6. Identificación de brechas en emisiones en la minería chilena	25
6.1. Metodología para la estimación de las emisiones de flotas de transporte minero	25
6.1.1. Factor Temporal (Ft)	28
6.1.2. Factor de Carga del Motor Diesel (Fc)	30
6.1.3. Factor de Emisiones (Fe)	32
6.2. Estimación de las emisiones para la gran minería del cobre	33
7. Estrategia de implementación del cambio tecnológico	34
8. Evaluación económica del cambio tecnológico	37
8.1. Estimación del beneficio en emisiones del cambio tecnológico	45
8.2. Cálculo del beneficio económico de la reducción de enfermedades respiratorias	47

8.3.	Estimación del costo social por emisiones contaminantes en la minería chilena	52
9.	Mapa de <i>Stakeholders</i> del proyecto de cambio tecnológico	55
10.	Análisis de riesgo del cambio tecnológico	57
10.1.	Bajo desempeño de la tecnología	58
10.2.	Falta de recursos para invertir	58
10.3.	Falta de apoyo para implementar el cambio tecnológico	59
10.4.	Falta de soporte al producto (fábrica y representante local)	59
11.	Medidas de mitigación	60
11.1.	Programa de inspecciones preventivas	61
11.2.	Componentes de respaldo	61
11.3.	Plan de mitigación	61
12.	Condiciones de borde mínimo para ejecutar el cambio tecnológico	62
13.	Conclusión	65
14.	Bibliografía	68
15.	Anexos	70
15.1.	Formación de los NOx	70
16.	Especificaciones técnicas	77
16.1.	Especificaciones técnicas motores Cummins QSK60 Tier4 final	77
16.2.	Especificaciones técnicas camión Caterpillar Cat797F	78
16.3.	Especificaciones técnicas camión Caterpillar Cat795FAC	79
16.4.	Especificaciones técnicas camión Caterpillar Cat794AC	80
16.5.	Especificaciones técnicas camión Liebherr T282C	81
16.6.	Especificaciones técnicas camión Liebherr T284	82
16.7.	Especificaciones técnicas camión Komatsu 930E-4	83

Índice de Tablas

Tabla 1. Motores Tier4 operando en EEUU y Canadá en camiones Komatsu. Fuente: representantes locales en Chile.	22
Tabla 2. Camiones mineros por marca y capacidad utilizados en la gran minería de Chile. Fuente: Elaboración propia	24
Tabla 3. Market Share camiones mineros de más de 300 ton de capacidad en Chile. Fuente: Informe Encare Sección 2 mina rajo segundo semestre 2017. Elaboración propia.....	25
Tabla 4. Modelo de Gestión de tiempo ASARCO.	29
Tabla 5. Modelo de Gestión de Tiempo de Anglo American.	29
Tabla 6. Emisiones anuales estimadas material particulado MP y óxidos de nitrógeno NOx para las minas de las zonas norte y centro de Chile.	34
Tabla 7. Reducción de emisiones de la Flota de Transporte Komatsu K930E de Los Bronces producto del cambio tecnológico.	36
Tabla 8. Flujo de gastos para el caso de un motor Tier1	41
Tabla 9. Flujo de gastos para el caso de un motor Tier4	41
Tabla 10. Comparación de costos de capital y de operación para motores Tier1 y Tier4 para el caso de Los Bronces.	42
Tabla 11. Evaluaciones económicas para el caso unitario de las diferencias con sensibilizaciones.....	43
Tabla 12. Comparación de los costos anuales uniformes equivalentes para ambos casos con consumo de combustible idéntico.	44
Tabla 14. Contribución en la huella de carbono de Los Bronces del cambio tecnológico a motores diésel Tier4.....	46
Tabla 14. Costos por admisiones hospitalarias actualizados a 2018. Fuente: Holz (2000) y luego Bazán, Valenzuela y Vallejos (2014). Actualizado con IPC de Salud INE 2018.....	49
Tabla 15. Costos estimados por exposición a contaminantes para la comuna del Gran Santiago, valores actualizados al 2018. Elaboración propia con fuente en estudio de Barzán, Vallejos y Valenzuela 2014.....	51
Tabla 16. Costo social de contaminación en Chile por tipo de contaminante atmosférico. Fuente: Ley N° 20.780	53
Tabla 17. Costo social por emisiones contaminantes de material particulado y NOx en la minería chilena zona norte y zona centro.....	54
Tabla 18. Costo social estimado para Los Bronces por emisiones contaminantes por no contar con tecnología de bajas emisiones de motores diésel.	54

Tabla 19. Factores de conversión para distintos tipos de combustible a emisiones de CO2. Fuente: Informe huella de carbono institucional. Universidad de Antofagasta y CREA.	71
Tabla 20. Población chilena en ciudades con más de 100.000 habitantes. Fuente: INE 2016.	72
Tabla 21. Cálculo de población afectada por exposición a contaminación atmosférica MP10 por sobre 33 $\mu\text{m}/\text{m}^3$. Metodología desarrollada por Holz (2000) y actualizada por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014).	72
Tabla 22. Cálculo de población afectada por exposición a contaminación atmosférica MP10 por sobre 33 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ en el Gran Santiago. Metodología desarrollada por Holz (2000) y actualizada por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014).	72
Tabla 24. Evaluación Económica caso unitario sobre las diferencias MD T4 vs MD T1.	73
Tabla 25. Evaluación económica casi unitario MD T4 vs MD T1 consumo de combustible idéntico.	74
Tabla 26. Evaluación económica para el caso de implementación completo de motores Tier4 en Los Bronces	75
Tabla 26. IPC de Salud histórico, Chile. Fuente: INE.	76

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Distribución sectorial de consumo de energía Chile 2015. Fuente: Cochilco, informe consumo de energía 2016.	5
Ilustración 2. Distribución sectorial de consumo de energía por tipo de fuente. Fuente: Cochilco, informe consumo de energía 2016.	6
Ilustración 3. Distribución de Uso de Agua a nivel nacional. Fuente: Consumo de agua en la minería del cobre al 2017. Atlas del Agua, DGA 2016 (pág. 125).	10
Ilustración 4. Resumen análisis PESTAL para la implementación de tecnologías de bajas emisiones para camiones de extracción minera. Elaboración propia.	12
Ilustración 5. Consumo total de energía por área productiva en minería 2001-2016. Fuente: Informe de consumo de energía Cochilco 2016, p15.	18
Ilustración 6. Emisiones de GEI de la minería chilena. Fuente: Cochilco.	19
Ilustración 7. Inventario de Emisiones Región Metropolitana 2014. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente Chile.	20
Ilustración 8. Evolución de Normas de Emisiones EPA por Tier para motores diésel fuera de carretera. Fuente: EPA.	22
Ilustración 9. Distribución Motores T4 en Estados Unidos y Canadá. Fuente: distribuidores locales en Chile.	23
Ilustración 10. Norma Tier para motores diésel fuera de carretera de la EPA. Fuente: EPA, Estados Unidos.	27
Ilustración 11. Factores de carga de motor diésel para distintas faenas mineras de Chile. Fuente: Elaboración propia.	31
Ilustración 12. Histograma distribución factor de carga de motor diésel para la minería chilena. Elaboración propia.	32
Ilustración 13. Disponibilidad física camiones de 300 toneladas informe Encare Segundo Semestre 2017.	33
Ilustración 14. Utilización operativa disponible para camiones de 300 toneladas. Informe Encare segundo semestre 2017.	33
Ilustración 15. Programa de reemplazo de motores de la flota de transporte Komatsu K930E de Los Bronces. Elaboración propia.	35
Ilustración 16. Reducción de emisiones de NOx de la flota de transporte K930E de Los Bronces. Elaboración propia.	36
Ilustración 17. Reducción de emisiones de material particulado de la flota de transporte K930E de Los Bronces. Elaboración propia.	36
Ilustración 18. Emisiones de CO2 equivalente flota de transporte K930E Los Bronces. Proyecto de reemplazo de motores diésel Tier4. Elaboración propia.	37
Ilustración 19. Perfil de horas operacionales acumuladas por año para los motores diésel de la flota de transporte de Los Bronces.	38

Ilustración 20. Consumo de combustible de la flota de transporte K930E de Los Bronces, años 2015 al 2017. Fuente: Elaboración propia.	39
Ilustración 21. Comparación de gastos por cada naturaleza para motor Tier1 y Tier4 en Los Bronces. Fuente: elaboración propia.	40
Ilustración 22. Comparación de gastos en la vida de un motor Tier1 versus otro Tier4 en Los Bronces. Fuente: elaboración propia.	40
Ilustración 23. Contribución relativa de los equipos de la flota de transporte de Los Bronces a la huella de carbono.	45
Ilustración 24. Huella de Carbono Flota de Transporte de Los Bronces 2017-2018.	46
Ilustración 25. Evolución MP2.5 Región Metropolitana (1989 -2014)	50
Ilustración 26. Evolución concentración de material particulado en la Región Metropolitana de Santiago para MP 2,5 con límite 20 mg/m3.	51
Ilustración 27. Comparación de gastos estimados en impuestos verdes por emisiones contaminantes versus el plan de inversiones de motores diésel Tier4.	55

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Chile, como país miembro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), ha tomado un rol activo en la Conferencia de las Partes del acuerdo de París (COP 21) para el control y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que aumentan la temperatura en la tierra. Así, siguiendo la tendencia mundial que busca frenar el cambio climático, el país se ha comprometido a reducir en un 30% estas emisiones para el año 2030. En efecto, tal es el compromiso del país con este tema, que en diciembre de este año será por primera vez anfitrión de la Conferencia de las Partes (COP25).

El Estado de Chile, en sus políticas públicas, ha ido integrando cambios en las regulaciones ambientales con el objetivo de reducir las enfermedades provocadas por los gases contaminantes producto de la combustión, como son: NOx, SOx y material particulado MP2,5 y MP10.

No obstante lo anterior, actualmente no existe una normativa que obligue a las empresas mineras a implementar planes de mejoramiento de la calidad del aire. Estas únicamente deben controlar el polvo en suspensión producido por actividades mineras de perforación, voladuras, carguío, transporte de materiales, entre otros. Es válido, por lo tanto, pensar que en un futuro próximo esto pueda modificarse a nivel legislativo. Este posible cambio tendría un impacto en la industria minera por los costos asociados al cambio de tecnología requerido.

Además, en los últimos años la minería se ha enfrentado a un rechazo de las comunidades cercanas a los proyectos, tanto nuevos como en operación, donde comúnmente es asociada a empresas que contaminan y generan perjuicios para la comunidad y el entorno. En este contexto, la minería ha debido adaptarse y reforzar sus áreas de gestión de comunidades y medio ambiente para anticipar potenciales problemas que puedan significar el descontento de las comunidades y protestas o demoras en la obtención de permisos, ya sea para la continuidad operacional o el crecimiento. Por lo anterior, se han desarrollado proyectos que mejoran directamente la calidad de vida de las comunidades, se han creado mesas de trabajo con agrupaciones vecinales y comuneras, y también con la autoridad ambiental.

Considerando que hoy existe la tecnología que permite contar con motores diésel de alta potencia y de bajas emisiones –material particulado y óxidos de nitrógeno–, ya es posible hacer cambios significativos para reducir las emisiones contaminantes y avanzar hacia tecnologías verdes. Junto con el

beneficio que esto tendría para el planeta, se puede esperar también una buena recepción por parte de las comunidades, reflejándose esto en algo positivo en sí, lo que además puede resultar en un mayor apoyo para la obtención de permisos y la mantención de la licencia para operar.

1.2. Objetivo

Diseñar una estrategia para la reducción de emisiones contaminantes en el proceso de extracción de mina aplicado a la flota de transporte de la mina Los Bronces, próxima a la Región Metropolitana.

1.2.1. Objetivos específicos

- Determinar la contribución relativa que tiene el proceso de transporte en la minería con respecto al inventario de emisiones de la Región Metropolitana, puesto que los estudios realizados en ella se utilizarán como referentes.
- Estimar el beneficio potencial del cambio tecnológico en la flota de camiones de transporte, expresado como VAN para la faena Los Bronces.
- Estimar el valor estratégico potencial, como costo social y privado, que un cambio de legislación tendría para la minería del cobre y la mina Los Bronces.
- Estimar el beneficio potencial del cambio tecnológico en la flota de transporte de Los Bronces, expresado como porcentaje de reducción en la huella de carbono de la faena.

1.2.2. Metodología

En primer lugar, se determinará el estado actual de las emisiones contaminantes y los gases de efecto invernadero (GEI) de las flotas de transporte mineras a nivel nacional. Con esta información se podrá dimensionar el impacto relativo que ellas tienen en el medio ambiente, para así analizar la relevancia de realizar un cambio tecnológico en los motores diésel que usan como propulsor.

El análisis de la situación actual respecto de las emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI) en flotas de transporte de mina, se realizará a través de una estimación basada en el consumo de combustible promedio de cada una de ellas.

Para el cálculo de las emisiones contaminantes, se propondrá un método que se basará en las normas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés),

Luego se hará una comparación contra el inventario del total de emisiones de GEI en la Región Metropolitana, para así establecer el peso relativo que posee la gran minería como fuente de emisión, en particular, su sistema de transporte.

Se estimarán las emisiones de las flotas mineras empleando un modelo que permita usar el consumo de petróleo diésel de los equipos de transporte como parámetro para calcular las emisiones relativas.

La factibilidad técnica de un cambio de tecnología de motores diésel se realizará a través de la identificación de alternativas disponibles en el mercado a nivel mundial. Se definirá cuál es la mejor alternativa tecnológica a implementar dentro del conjunto de opciones disponibles, destacando las características clave que permitan tomar esta decisión.

Se hará un análisis estratégico del problema del cambio tecnológico con un análisis de PESTAL y, para más detalle, con un análisis FODA. Así se determinarán los riesgos asociados al cambio y las medidas de mitigación requeridas para que la implementación sea exitosa.

Se establecerá el caso de negocio a través de la evaluación del impacto que tendría en las faenas mineras que la legislación nacional de emisiones cambie y obligue a la implementación de motores diésel de bajas emisiones en la flota de mina. Lo anterior será comparado con una estimación del costo que tienen para el Estado las enfermedades producto de la exposición a contaminantes de GEI en la población de Santiago. Esto se basará en la metodología desarrollada por Holz (2000) y luego actualizada por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014).

Se estudiarán los costos estimados de inversión y operación, así como los beneficios potenciales que generaría el proyecto en el caso específico de la mina Los Bronces. Este beneficio será calculado como el VAN para las configuraciones de la flota de camiones mineros de Los Bronces.

Finalmente se generará un plan de implementación basado en un mapa de partes interesadas. Esto permitirá diseñar estrategias específicas para cada una de ellas, facilitando la implementación de esta tecnología en la mina Los Bronces.

De esta forma, se definirá un plan de inversiones e implementación que permita minimizar el tiempo de implementación del cambio en la flota de camiones de transporte de la mina Los Bronces.

2. Marco Conceptual

A continuación, se presentará un resumen del escenario de la actual problemática de las emisiones atmosféricas y su relación con la minería en Chile.

La contaminación atmosférica tiene efectos adversos para la salud. Varios estudios han cuantificado su impacto y relevancia en la salud de las personas. Estudios epidemiológicos demuestran que la exposición a contaminantes, específicamente al material particulado fino (MP10 y MP2,5), aumenta la mortalidad y morbilidad de la población. Los incrementos de los agentes contaminantes MP, NOx, CO, SOx y O3, han sido asociados a muertes producto de enfermedades cardíacas y respiratorias, así como también a enfermedades de índole crónico, como la bronquitis y el asma.

Estos agentes contaminantes están presentes en los grandes centros urbanos, por lo que se han podido relacionar las enfermedades y muertes a la exposición de concentraciones elevadas. Dentro de los contaminantes, el material particulado grueso (MP10) y fino (MP2,5) junto a los óxidos de nitrógeno (NOx), se han considerado como causantes de enfermedades, siendo los dos últimos los más dañinos.

El MP2,5 penetra los pulmones y llega a los alveolos pulmonares, generando un aumento del riesgo de mortalidad prematura por enfermedades cardiopulmonares. Los NOx, al combinarse con vapor de agua, generan ácidos nítricos débiles que irritan las vías respiratorias. Generan así enfermedades respiratorias, como la bronquitis, que se reflejan en las consultas hospitalarias durante episodios de alta contaminación. Los estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), han probado que no existen niveles mínimos seguros, es decir, donde no existan efectos nocivos para la salud. Por lo tanto, las normas deberían tender a los niveles más bajos posibles¹.

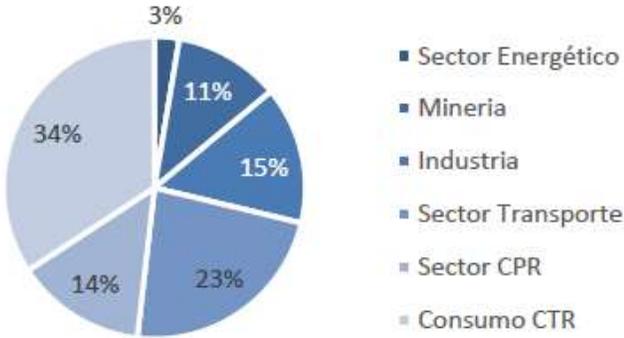
Estos dos agentes contaminantes se originan por la combustión de combustibles fósiles, en especial del petróleo diésel que proviene de fuentes fijas y móviles. Las fuentes fijas no se consideran para el caso del presente estudio, solo las móviles, que incluyen a los vehículos terrestres particulares, de carga y de transporte de pasajeros.

Las calles de los grandes centros urbanos se encuentran saturadas por la congestión vehicular, razón por la cual los fabricantes de vehículos han sido los principales precursores para la introducción de las tecnologías de bajas emisiones, EPA-Tier, correspondientes a las normas de Estados Unidos, o normas Euro, en el caso de la comunidad europea. En Santiago, desde el año 1989, la autoridad en asuntos medioambientales ha trabajado en implementar

¹ Organización Mundial de la Salud, año 2015.

normativas que contribuyan a la reducción de emisiones contaminantes, logrando una reducción del 60% entre 1989 y 2014. En este contexto, en septiembre del año 2012 entró en vigor una norma que solo permite la circulación de vehículos que cumplan la norma de emisiones Euro V en la Región Metropolitana, como parte del plan de descontaminación de la región.

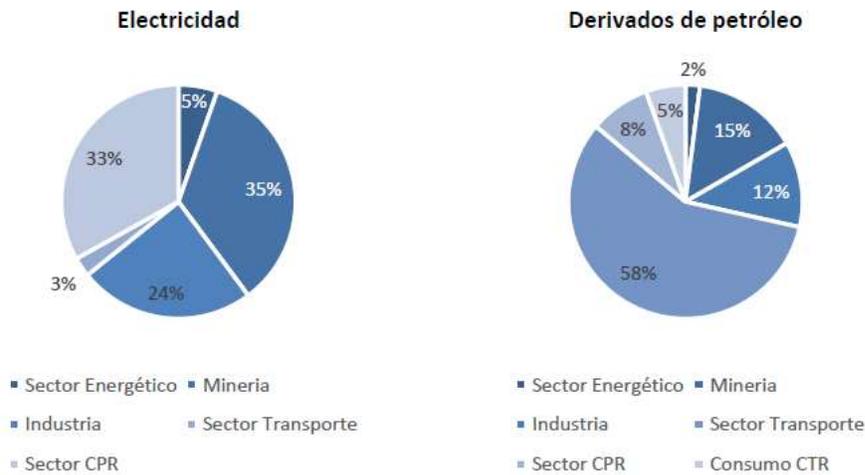
La minería está dentro de los seis mayores consumidores de energía en Chile. Según el "Informe de Consumo de Energía 2016 p.16" esta alcanzó un 11% del consumo total nacional.



Fuente: Balance Nacional de Energía (BNE), 2016

Ilustración 1. Distribución sectorial de consumo de energía Chile 2015. Fuente: Cochilco, informe consumo de energía 2016.

Dentro de las fuentes energéticas se consideran la energía eléctrica y los combustibles fósiles, que son, en su mayoría, petróleo diésel. Esto nos entrega un argumento fuerte para pensar que en la minería este tipo de fuentes de emisiones sera prontamente regulado, puesto que el consumo de combustible diésel se traduce en forma directa en la producción de Gases de Efecto de Invernadero (GEI), con emisiones contaminantes que, ya se ha visto, resultan nocivas para la salud.



Fuente: Elaborado por Cochilco en base a datos del Ministerio de Energía

Ilustración 2. Distribución sectorial de consumo de energía por tipo de fuente. Fuente: Cochilco, informe consumo de energía 2016.

El Estado de Chile se ha comprometido en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, COP 21, realizada en París en el año 2015, a reducir la emisión de gases de efecto invernadero en un 30% al año 2030. Esto se alinea con los planes de descontaminación atmosférica que se han generado en los últimos cinco años, que incluyen estaciones de medición y monitoreo en Santiago, Rancagua y Temuco.

Las grandes compañías mineras no están ajenas a las tendencias mundiales en relación con el cambio climático y ya han incluido dentro de sus políticas declaraciones explícitas de reducción de emisiones de GEI y la incorporación de tecnologías verdes. Se trata de un tema central dentro de las agendas de las grandes mineras en el país. Lo consideran además un tema de gran relevancia para una mejor relación con las comunidades en los entornos donde operan. Ilustrativa resulta la reciente oposición por parte de la comunidad a la construcción del proyecto Dominga en la Región de Coquimbo.

Es por estas razones que los tres grandes ejes que enmarcan este trabajo, enfocado mayoritariamente en el caso de la mina Los Bronces, son los siguientes:

1. Reducir el impacto ambiental mediante una baja de emisiones contaminantes, en especial, de GEI.
2. Colaborar con los objetivos de las comunidades y el Estado de Chile.
3. Generar una base sólida que permita pensar en minería sustentable para el largo plazo, bajo la mirada de reducción de emisiones contaminantes.

3. Análisis estratégico

Anglo American, al igual que otras grandes mineras que operan en Chile, posee políticas y estrategias que incluyen los grandes desafíos que enfrenta el mundo: tomar medidas que ayuden a revertir el cambio climático, desarrollar proyectos que incluyan la sustentabilidad entre sus pilares, contribuir con las comunidades aledañas a un proyecto, entre los más importantes.

Uno de sus principales objetivos es ser una empresa atractiva para los accionistas, consiguiendo mantenerse con activos de categoría de clase mundial, es decir, vida de 20 años y retorno sobre el capital empleado (ROCE) del 15% como mínimos.

Entre las estrategias que ha diseñado en función de este objetivo, específicamente en relación con su política de sustentabilidad, destaca el denominado "*Future Smart Mining*"².

El *Future Smart Mining* busca transformarse en un programa líder global para la minería sustentable a través de la innovación. Permite hacer un salto significativo en los resultados de toda la cadena de valor, teniendo como meta la generación de operaciones neutrales en emisiones de carbono y cero consumos de agua donde esta sea escasa.

El fundador de Anglo American, Sir Ernest Oppenheimer, dijo: "*El objetivo de este grupo es, y continuará siendo, la generación de ganancias para nuestros accionistas, pero de tal forma que se haga, a la vez, una contribución real y duradera para las comunidades donde operamos*"³.

Esta declaración se condice con los tres pilares que impulsan este proyecto de cambio tecnológico, los que han sido enumerados en el capítulo anterior.

3.1. Análisis PESTAL

El análisis PESTAL se utilizará para identificar –de forma macro– las fuerzas externas que afectan a la organización al proyecto en estudio. Esta herramienta considera los aspectos: Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Medio Ambientales y Legales. Esto es considerado este análisis como parte del análisis situacional.

² "Future Smart Mining": Nuestro camino hacia el futuro de la minería sustentable. www.angloamerican-chile.cl

³ <https://www.angloamerican.com/about-us/our-stories/100-years-of-anglo-american>

3.1.1. Factores Políticos

Como se ha visto, el Estado de Chile se ha comprometido en el acuerdo de París a reducir sus emisiones de GEI en 30% al 2030, lo que forzará la implementación de regulaciones más estrictas que permitan alcanzar la meta comprometida.

Hoy existe un reglamento que regula las emisiones contaminantes de los equipos móviles fuera de carretera y que afecta a los equipos de potencias hasta los 560kW, lo que deja fuera a los equipos de las flotas de transporte de mina de la gran minería del cobre⁴. Es muy probable que en el corto y mediano plazo (entre 3 a 10 años), se promulguen leyes adicionales al reglamento mencionado que obliguen a las compañías mineras a implementar tecnologías de reducción de GEI, lo que potencialmente podría impactar el negocio si es que el gasto de capital resulta considerable.

Asimismo, los planes de descontaminación de la Región Metropolitana consideran restricciones de emisiones hasta los 2000 msnm, las que hoy no se aplican a operaciones mineras, pero podrían afectarla en el futuro.

Por otro lado, es de esperar que todo proyecto que contribuya a la descontaminación de las ciudades cuente con el apoyo de las autoridades ambientales y pueda resultar beneficioso para obtener la aprobación de permisos requeridos para la continuidad operacional de las minas.

Por estas razones que, los factores políticos que pueden influir en el proyecto se consideran palancas positivas para las compañías mineras ante las regulaciones futuras. Esto considera, desde luego, la importancia de tomar medidas previas que permitan enfrentar los próximos cambios en políticas medioambientales de forma favorable.

⁴ Extracto de la resolución 1134 exenta, ANTEPROYECTO DE NORMA DE EMISIÓN PARA MAQUINARIA MÓVIL FUERA DE RUTA. Vigente desde el 08-11-2016.

“Por esta razón, y dada la necesidad de reducir las emisiones de la maquinaria móvil fuera de ruta que ingresan al país, la nueva propuesta normativa establece la exigencia de límites máximos de emisión para dicha maquinaria, equivalentes a Stage IIIA o Tier3, a partir del año 2019, y Stage 5 o Tier4, a partir del 2022.”

“Artículo 1: Establéese, para todo el territorio nacional, la norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta. Se entiende por maquinaria móvil fuera de ruta cualquier máquina móvil o equipo industrial portátil o vehículo con o sin carrocería, no destinados al transporte de pasajeros o mercancías por carretera, aptos para desplazarse sobre el suelo, con o sin carretera y que funciona en base a motores de combustión interna, de encendido por compresión, con una potencia neta instalada, igual o superior a 19 kW e inferior a 560 kW.”

3.1.2. Factores Económicos

La baja que ha experimentado la economía mundial ha puesto a las empresas mineras en una posición donde las inversiones de capital se han debido reducir, restringiéndose a solo lo necesario para operar.

Aquí un proyecto que tiene un impacto en el gasto de Capital, debido a que las tecnologías de menores emisiones vienen acompañadas de un costo mayor producto de los sistemas adicionales que deben ser incorporados para su gestión.

De acuerdo con lo establecido por las normas de emisiones de Estados Unidos en la EPA, los costos asociados a las nuevas tecnologías para la regulación de emisiones incrementarían el costo de capital en un 5%.

Frente a este escenario, los factores económicos se consideran una palanca negativa para este tipo de proyectos, sobre todo considerando que la legislación vigente no exige hacer un cambio.

Los motores de bajas emisiones, por los sistemas adicionales que se deben implementar, implican un costo mayor, lo que se transforma en una barrera de entrada para la implementación del cambio tecnológico, al impactar en el costo operacional de la faena (OPEX).

3.1.3. Factores Sociales

La minería como actividad económica no tiene una buena reputación en los grupos sociales. Se percibe como una industria que genera impactos ambientales importantes que resultan altamente perjudiciales para el medio ambiente y las personas. Es por esto que las comunidades que están ubicadas en el área de influencia donde existen operaciones mineras requieren de una atención especial.

Asimismo, es una realidad que las operaciones mineras conllevan el uso de recursos naturales, como el agua fresca, y generan contaminantes (tranques de relave, cambio en el entorno Rajo y botaderos, emisiones de riles, etc.). Sin embargo, en un peso relativo con respecto a otras industrias, estos son menores, pero esta realidad se desconoce.

Por ejemplo, muchas personas no están en conocimiento de que –en promedio– para producir un kilogramo de cobre fino se requiere de 85 litros de agua, mientras que para producir un kilo de paltas se requiere de 400 litros de agua.

El consumo de agua de toda la minería del cobre en Chile es de un 3%^{5 6}, mientras que la agricultura consume un 82%. Además, en la minería se recicla gran parte de este recurso y uno de los indicadores clave de desempeño más relevante es el *make-up* o relleno requerido que alcanza solo 0,5 m³/ton procesada.

Esta información no es conocida por la población debido a que las compañías mineras no se han preocupado de difundir el real impacto que generan en el medio ambiente, y que ante la falta de información se generan percepciones que no reflejan la realidad.

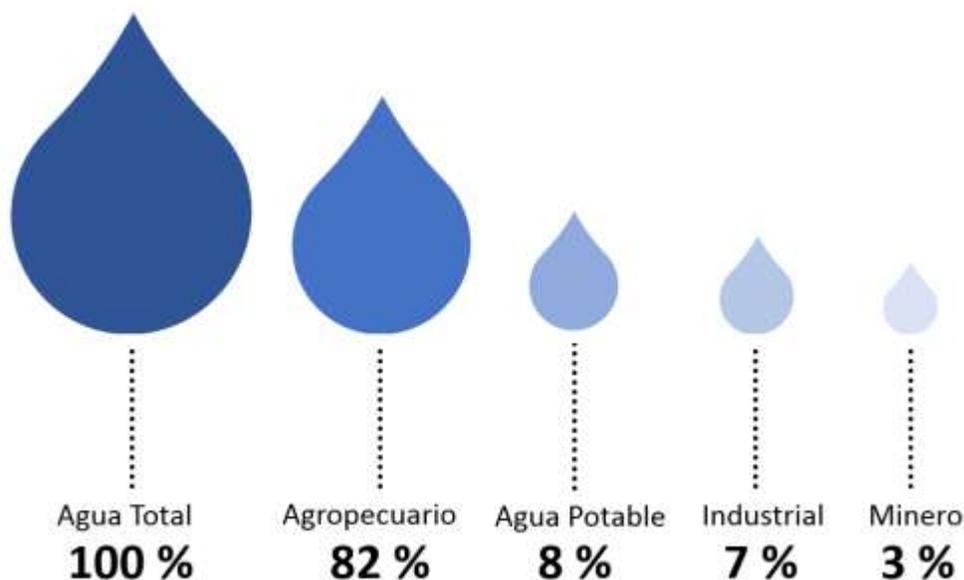


Ilustración 3. Distribución de Uso de Agua a nivel nacional. Fuente: Consumo de agua en la minería del cobre al 2017. Atlas del Agua, DGA 2016 (pág. 125).

En este contexto un proyecto de tecnologías de bajas emisiones, bien gestionado y con un marketing adecuado se transforma en una palanca positiva para la compañía minera.

3.1.4. Factores Tecnológicos

Los fabricantes de motores diésel industriales de alta potencia están desarrollando sistemas que permitan reducir las emisiones de Material

⁵ Atlas del Agua DGA 2016

⁶

<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20minería%20del%20cobre%20al%202017.pdf>

Particulado (MP) y óxidos de Nitrógeno (NOx) para cumplir con las regulaciones vigentes en los EEUU y la UE. Existen dos opciones tecnológicas para reducir los NOx. Estas son: a) los sistemas de post-tratamiento de gases de escape que requieren de catalizadores y urea, y b) la recirculación de gases de escape.

La tecnología de post tratamiento implica el uso de sistemas adiciones que deben ser instalados en los equipos mineros, aumentando su complejidad y las posibles fallas asociadas a ellos. Además, el uso de urea implica transporte de volúmenes importantes de esta sustancia desde los centros de producción a las faenas, aumentando los costos por la logística asociada. Los sistemas de recirculación de gases de escape, en tanto, requieren de menos logística, pero de más intervenciones de mantenimiento. Esto puede tener un impacto negativo en el desempeño del equipo y un aumento de los costos.

Ante la incertidumbre respecto del desempeño de estas tecnologías, es posible que la organización responsable de la producción no apoye su implementación pensando en el posible impacto en el negocio por un menor desempeño de los camiones de extracción. Si a esto además se le suman los impactos que se identifican en la logística por insumos adicionales, es probable que esto se transforme en una palanca negativa para el proyecto.

Los mayores costos estimados para estas tecnologías de bajas emisiones diésel van en contra de las metas de reducción de costos y mejoras en la eficiencia del negocio, lo que puede ser una barrera de entrada para la implementación de la tecnología de bajas emisiones en estudio.

3.1.5. Factores Medioambientales y Legales

Las operaciones mineras operan en sus faenas bajo las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) y las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) que les han sido aprobadas, las cuales estipulan los niveles de emisiones para la condición operacional de la mina. El cumplimiento de estas normativas ambientales por parte de las compañías mineras es relevante a la hora de evitar multas o restricciones de producción.

Los proyectos que reducen las emisiones permiten mejorar y superar los compromisos establecidos en las EIA y DIA. Esto se transforma en una palanca positiva a la hora de considerar nuevas leyes o restricciones ambientales, siempre que se hayan implementado con anticipación a la entrada en vigencia de la normativa.

3.1.6. Resumen análisis PESTAL

El análisis PESTAL del caso en estudio muestra, en la Ilustración 5, que solo existen dos aspectos negativos, los que se relacionan con la variable económica, en tanto que el resto de las variables se evaluaron indiferentes, positivas o muy positivas. Bajo este escenario no se ven riesgos mayores que impidan implementar el cambio tecnológico de bajas emisiones en el proceso de transporte de mina a pesar que no es algo exigido por las regulaciones actuales.

ANÁLISIS PESTAL		Muy Negativo	Negativo	Indiferente	Positivo	Muy Positivo
Político	Estabilidad Política Nacional				●	
	Compromiso con Reducción GEI					●
	Ministerio del Medio Ambiente				●	
Económico	Economía Mundial		●			
	Costos de Tecnologías de bajas emisiones		●			
	Impacto en negocio minero del cambio tecnológico			●		
Social	Movimientos sociales en contra de empresas contaminantes			●		
	Reputación de empresas mineras				●	
	Comunidades cercanas a operación				●	
Tecnológico	Fabricantes de motores diésel				●	
	Alternativas tecnológicas (2 opciones)				●	
	Incertidumbre desempeño largo plazo de la tecnología			●		
Legal y Ambiental	Legislación Ambiental mas restrictiva					●
	EIA y DIA toman mas tiempo en ser aprobadas				●	
	Impuesto Verde a la minería				●	

Ilustración 4. Resumen análisis PESTAL para la implementación de tecnologías de bajas emisiones para camiones de extracción minera. Elaboración propia.

3.2. Análisis FODA

El análisis FODA se centrará en el caso particular de aplicación de este cambio tecnológico en la mina Los Bronces. Para esto se considerarán los aspectos

relativos a esta realidad buscando entregar una visión general de cada aspecto clave de la implementación de este proyecto en la faena.

Los Bronces está ubicada en la Región Metropolitana de Santiago, a 3600 msnm, con acceso único a través de la ruta G21, más conocida como el camino de acceso a los centros invernales de Farellones.

En este contexto, se estudiarán las características de cada tecnología en el marco de la operación para determinar qué opción resulta mejor. Hoy existen solo dos alternativas disponibles para el control de las emisiones de contaminantes en motores diésel producto de la combustión:

- a) Con post tratamiento de gases de escape.
- b) Con recirculación de gases de escape.

Estas alternativas serán analizadas en profundidad en los puntos posteriores.

3.2.1 Fortalezas

La estrategia de Anglo American a nivel global busca enfrentar el cambio climático y, en línea con esto, la reducción de los GEI y las emisiones contaminantes. Por lo tanto, un proyecto de cambio tecnológico como este está 100% alineado con la visión de la compañía, por lo que debería contar, en este sentido, con el respaldo de la alta gerencia.

Otro aspecto a considerar entre las fortalezas del presente proyecto de implementación de tecnologías consideradas verdes, tiene relación con el personal propio de la faena. Este se beneficiará de forma directa al reducirse los niveles de los gases contaminantes a los que se ve expuesto. Actualmente esta exposición genera enfermedades respiratorias en temporada invernal y potenciales problemas de salud en el largo plazo. Las enfermedades comunes producto de resfríos, bronquitis, etc., que se relacionan con la exposición a contaminantes, tienen un impacto directo en la salud de las personas, como se ha observado, y en el negocio, si se considera el KPI de ausentismo.

En cuanto a la factibilidad de que las personas de la mina puedan llevar a cabo este proyecto positivamente, es importante señalar que el equipo de Los Bronces tiene experiencia en la implementación de cambios tecnológicos, lo que le permite enfrentar desafíos como el que se plantea en este estudio sin mayores dificultades.

La estrategia actual de mantenimiento de los equipos involucra al personal técnico propio de la mina, lo que ha permitido ir generando conocimiento y experiencia. Así, ante fallas o problemas de los equipos ellos los enfrentan y encuentran una solución, experticia ideal en un proyecto de este tipo.

Esta capacidad permite enfrentar el cambio tecnológico que se plantea, donde se reemplaza tecnología probada por otra de punta, de la cual aún no se tiene mucho conocimiento y no está madura.

La fuerza laboral del área de mantenimiento de la mina tiene un balance adecuado entre experiencia y juventud, donde las habilidades que tienen los técnicos más jóvenes en el manejo de herramientas computacionales se combina de forma perfecta con la experiencia de los técnicos senior que ya han enfrentado cambios tecnológicos.

En este escenario, la tecnología de post tratamiento de gases de escape es particularmente fuerte en el hecho que no se altera el ciclo de combustión para controlar las emisiones de NOx, los que son tratados en el flujo de salida del motor con adición de Urea y uso de convertidores catalíticos. Esta configuración permite un diseño más simple del motor, lo que se traduce en menos puntos de falla y menos componentes periféricos sobre él. En tanto, la tecnología de recirculación de gases de escape toma parte de los gases de la combustión y los reinyecta en el motor. Esto permite evitar el uso de urea y catalizadores, ambos elementos que requieren de modificaciones en el equipo y en la logística de la faena.

3.2.2. Debilidades

Las debilidades que se anticipan tienen relación que la tecnología no está madura y existe por esta razón falta de competencias técnicas a nivel local, es decir, en los representantes en Chile de la marca de los motores y también en la organización de la empresa minera.

Es factible pensar que la curva de aprendizaje se puede reducir. Sin embargo, los técnicos se irán enfrentando a nuevos problemas en la medida que los motores vayan acumulando horas de operación. Hoy existen solo algunas unidades operando a nivel mundial en operaciones con distinto nivel de exigencia. Las fallas se producirán dependiendo del nivel de *stress* a que las partes y piezas sean sometidas.

Asimismo, es esperable que los técnicos duden frente a fallas y que, por lo tanto, los tiempos de diagnóstico sean mayores a los necesarios solo para evitar cometer errores.

Con respecto a la tecnología de post tratamiento de gases de escape, el uso de urea es equivalente al 3%-5% del consumo de combustible⁷ lo que implica incluir este insumo dentro de la cadena logística de la faena, con su respectivo

⁷ Información del proveedor de motores Cummins. <https://www.cummins.com/engines/tier-4-final-751-hp-diesel-exhaust-fluid>

costo operacional. Además, el equipo requiere de la instalación de un estanque adicional, sistemas de control y gestión de la inyección de urea en conjunto con el uso de convertidores catalíticos. Todos estos elementos incrementan el costo operacional y obligan a la operación a incluir un proceso de gestión de insumos que son en base a amoniaco. Asimismo, el solo anticipar flujos de 30 a 40 metros cúbicos de urea por semana a través de la ciudad representa un riesgo y puede generar conflictos con las comunidades cercanas.

La tecnología de recirculación de gases de escape, en tanto, al tener que reinyectar una porción de los gases en la admisión, presenta el problema de la complejidad que el sistema tiene, puesto que requiere de múltiples válvulas y de un sistema de enfriamiento de gases para lograr la reducción de emisiones. Estos sistemas hacen del motor un conjunto más complicado de mantener y de difícil acceso para los técnicos.

3.2.3. Oportunidades

La oportunidad que se presenta con un proyecto de este tipo en la mina Los Bronces es poder adelantarse a un posible cambio de legislación que imponga mayores restricciones de emisiones equipos mineros, como se señalado con anterioridad. Al no estar forzados, en la actualidad, a implementar el cambio, el impacto en la organización y la velocidad de adopción de la nueva tecnología pueden ser administradas para reducir el impacto en la operación.

Las compañías mineras no se han visto afectadas mayormente por regulaciones ambientales en relación con las emisiones de contaminantes. Sin embargo, como se ha visto, es posible que dentro de los próximos años el Estado realice cambios en la legislación ambiental.

Como para cualquier cambio tecnológico el proceso de implementación toma tiempo, hoy existe una oportunidad para comenzar a trabajar de forma anticipada. El adelantarse a los cambios de las regulaciones permite reducir los impactos en los requerimientos de capital y suavizar, por lo tanto, la curva de gastos y de aprendizaje.

Es común que tecnologías de última generación tengan problemas que la fábrica deba ir corrigiendo en la medida que los equipos acumulan horas. El estar consciente de esta condición presenta una oportunidad para que se puedan ir enfrentando estas dificultades de forma sistemática.

Es posible pensar entonces que establecer un proceso de integración gradual de estos nuevos motores diésel se puede llevar adelante, permitiendo que las áreas de soporte como abastecimiento o finanzas e incluso los mismos proveedores puedan adecuarse a esta nueva tecnología. De igual forma posibilita al equipo técnico ir aprendiendo de ella al interactuar en forma

gradual con los componentes. Al no tratarse de una implementación forzada por ley⁸, el riesgo de los problemas de desempeño que la curva de madurez va a tener será menor en la flota de camiones, permitiendo que la operación pueda alcanzar los niveles de producción esperados.

Por otro lado, el tener la oportunidad de iniciar el cambio de tecnología de forma acotada, a través de un piloto, permitirá generar aprendizaje a nivel de personas y procesos. La implementación a baja escala permite a las personas aprender de la nueva tecnología y sus complejidades respecto del caso base y minimizar el impacto que ésta curva de puesta en marcha pudiese tener en el proceso productivo. Por el contrario, si en la implementación del piloto no se presentan dificultades y no se identifican problemas mayores, esto podría eventualmente acelerar la implementación en base al menor riesgo percibido.

Ambas tecnologías de reducción de emisiones son nuevas en la industria y no son de uso en Chile. Esto le permitirá a la faena explorar con ambos fabricantes la disponibilidad de realizar pruebas y desarrollar un negocio de servicios en torno al cambio tecnológico. En base a esta oportunidad que se presenta para las partes es posible que Los Bronces logre obtener mejores precios y cobertura de parte de las fábricas y no solo de los representantes locales.

En cuanto a la imagen que los proveedores tienen frente a las operaciones en Chile, es esperable que un proyecto de este tipo cuente con recursos especiales por parte de la fábrica, nuevos desarrollos y soporte en las áreas de ingeniería para reducir los puntos de falla y acelerar el paso por la curva de aprendizaje de la tecnología.

Por último, como se ha señalado con anterioridad, Anglo American tiene dentro de sus estrategias de negocio el trabajar de forma cercana con las comunidades. Así, busca que el desarrollo del negocio minero genere valor para la comunidad y así el proyecto se transforme en una relación de apoyo y necesidad mutua.

El desarrollar una implementación de tecnologías de bajas emisiones antes que sea mandatorio, resulta en un cambio proactivo que le permitirá a la compañía minera mejorar su imagen con la comunidad y la autoridad y generar beneficios a la salud de las personas que se encuentran en el entorno de la operación minera.

3.2.4. Amenazas

Las amenazas que se presentan en un proyecto de cambio tecnológico se pueden clasificar en dos grupos:

⁸ Existe la norma chilena exenta 1134 para motores diésel fuera de carretera hasta 560kW.

a) Las relacionadas a la tecnología en sí, como problemas en el desempeño, fallas prematuras, falta de experiencia de los representantes locales y los técnicos, resistencia por parte de la operación al enfrentar un impacto en el proceso productivo, etc. Es importante considerar que todos estos temas pueden generar una pérdida de credibilidad en el proyecto.

b) Las relacionadas con las regulaciones: Si bien hoy no están en la agenda, es posible que la introducción de este tipo de cambios movilice a las autoridades, obligando a generar un cambio en la industria completa.

Es difícil poder anticipar cuál de los dos grupos de amenazas tomará mayor relevancia. El trabajo táctico del proceso de implementación y la comunicación serán críticos para gestionar cada posible riesgo.

Por otro lado, las amenazas que presentan las dos alternativas tecnológicas son equivalentes, pero con impacto en distintos sectores.

El post tratamiento de gases de escape implica riesgos al requerir de una logística necesaria para abastecer de urea a los equipos y, en este sentido, mayores costos. Además, los flujos de urea hacia la faena pueden provocar problemas con las comunidades y su entorno frente a posibles accidentes durante el transporte. Este tema es considerado como muy sensible y de riesgo mayor para la operación.

Por otro lado, en el caso de la tecnología de recirculación de gases de escape, existen potenciales problemas en el desempeño que podrían tener los motores por su mayor complejidad. Estos quedan circunscritos a la operación, que puede verse expuesta a fallas y problemas con el consiguiente impacto en la disponibilidad de la flota.

En consideración de esto, como balance final del análisis FODA se puede concluir que la tecnología de bajas emisiones disponible para motores diésel que presenta menos externalidades negativas es la que utiliza un sistema de tratamiento de emisiones en el motor. El caso de estudio se basará en las consideraciones que tiene su uso en minería y, en específico, en su aplicación en la mina Los Bronces.

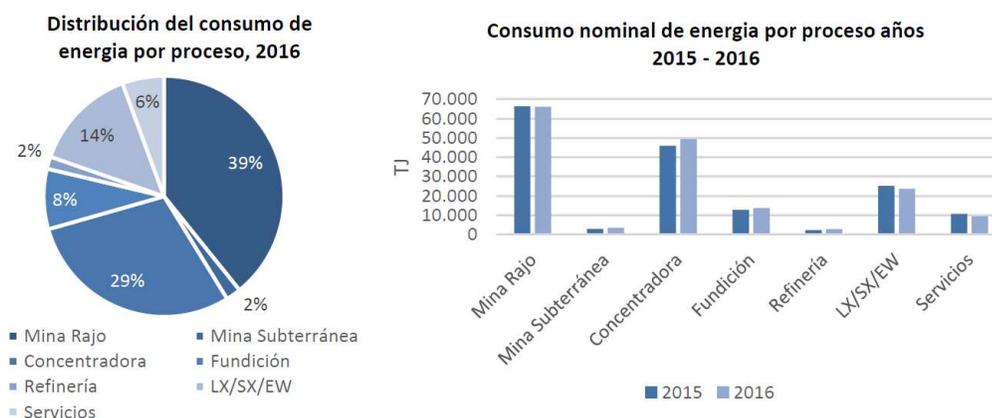
Los análisis presentados (PESTAL y FODA) permiten establecer que la tecnología que presenta menos riesgos externos a la faena Los Bronces es la que utiliza recirculación gases de escape y sería la recomendada para una implementación local.

4. Situación Actual

4.1. Diagnóstico - Línea base en la minería

Las emisiones de gases de efecto de invernadero en la minería han ido en alza desde hace años, pero a partir del año 2012 se produjo un salto en su nivel de crecimiento. Esto se muestra en la Ilustración 7, donde las emisiones de GEI superan los cinco millones de toneladas métricas de CO2 equivalente por año.

Al desglosar los GEI producidos por la minería, se puede observar que las mayores emisiones provienen de fuentes móviles: camiones, equipos de apoyo, perforadoras y equipos de carguío, donde el mayor porcentaje corresponde a las flotas de transporte de material desde el rajo. Existe una relación directa entre el consumo de energía y las emisiones de CO2 equivalente. En la Ilustración 6 se puede apreciar este impacto, donde el 39% de toda la energía consumida en la minería chilena corresponde al proceso mina rajo, que comprende a las fuentes móviles ya descritas.



Fuente: Elaborado por Cochilco

Ilustración 5. Consumo total de energía por área productiva en minería 2001-2016. Fuente: Informe de consumo de energía Cochilco 2016, p15.

En la Ilustración 7 se muestran las emisiones de gases de efecto de invernadero de la minería. Estos han ido en aumento en los últimos años, con un incremento de un 55% entre el año 2007 y el 2016.

Este crecimiento se explica por la naturaleza de la minería de rajo. Con los años, los rajos se profundizan, aumentando las distancias de acarreo. Asimismo, las leyes bajan, demandando mayores volúmenes tratados en planta para mantener los niveles de producción de cobre fino.

No es posible pensar que en los próximos diez años esta situación vaya a revertirse, únicamente, y con una visión bastante optimista, podría pensarse en una desaceleración del crecimiento. Es por esto que se hace tan factible la realización de un cambio en la legislación considerando, además, que ya existe un anteproyecto que norma las emisiones para vehículos fuera de carretera hasta potencias de 560 kw o 420 hp⁹. Incluso es posible que ya se pueda estar incubando esta idea en los grupos gubernamentales para apalancar los compromisos de reducción de GEI adquiridos en la cumbre COP21.

Bajo este escenario la propuesta de un cambio de tecnología se presenta como inevitable en el mediano-largo plazo.

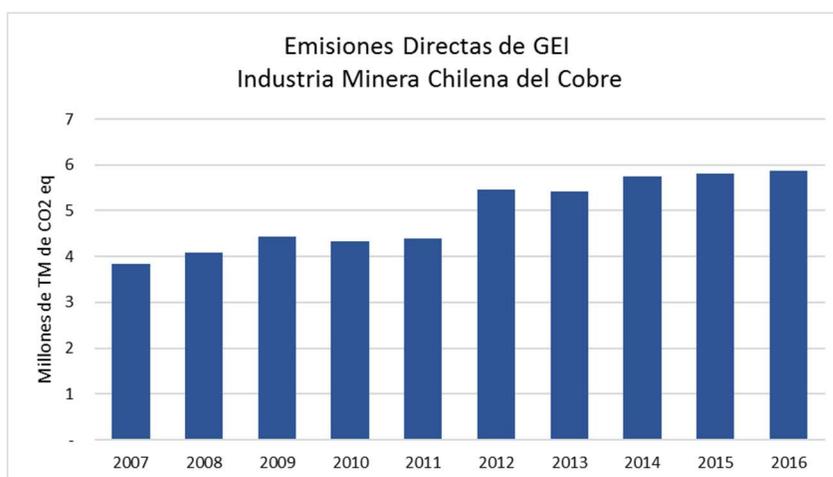


Ilustración 6. Emisiones de GEI de la minería chilena. Fuente: Cochilco.

Si las emisiones de GEI de la minería se proyectan desde los consumos de combustible de sus flotas mineras de rajo y se considera que las emisiones contaminantes se pueden calcular a través del consumo de combustible, entonces es posible hacer la relación que estas variables tienen con respecto del inventario de emisiones de la Región Metropolitana de Santiago y así poner en perspectiva su real dimensión e impacto.

Este estudio considera las emisiones contaminantes para las variables material particulado (MP) y óxidos de nitrógeno (NOx), que en el caso del inventario de emisiones de la Región Metropolitana del año 2014 (ver Ilustración 8), para el transporte corresponden 22% a MP10, 23% a MP2.5 y 66% a NOx.

⁹ Resolución 1134 Exenta, ANTEPROYECTO DE NORMA DE EMISIÓN PARA MAQUINARIA MÓVIL FUERA DE RUTA, <https://www.leychile.cl/N?i=1096428&f=2016-11-08&p>

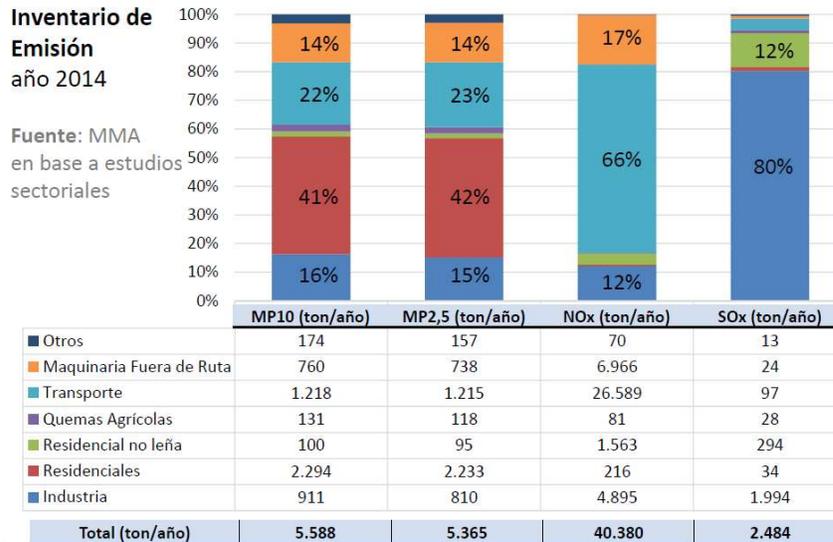


Ilustración 7. Inventario de Emisiones Región Metropolitana 2014. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente Chile.

Este escenario justifica la relevancia de hacer una comparación relativa entre las emisiones resultantes del transporte en la gran minería del cobre y el resto de las emisiones contaminantes en la Región Metropolitana.

5. Estado del arte de la tecnología de bajas emisiones

5.1. Control de los NOx

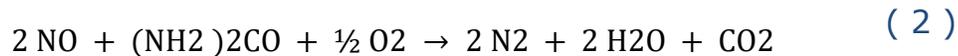
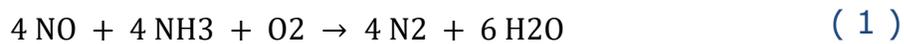
Las técnicas desarrolladas por los fabricantes de motores diésel para controlar las emisiones de los NOx se pueden clasificar en dos grupos:

a) Medidas Primarias:

Consisten en hacer modificaciones en la combustión para reducir la formación de los NOx. Se controlan las variables que gobiernan la combustión, temperatura de llama y relación de aire combustible. Las técnicas más usadas para controlar las temperaturas de combustión consideran la recirculación parcial de los gases de escape, que al ser inertes reducen la temperatura de la llama y eliminan la posibilidad de la formación del NOx. Esta solución se combina con sistemas de inyección de control electrónico que se ocupa de la relación de aire combustible y así se logra una alta eficiencia en la eliminación de los NOx en su generación.

b) Medidas Secundarias:

Son aquellas consistentes en el tratamiento de los gases de escape para eliminar los NO_x, consideradas como post tratamiento de gases de escape o reducción catalítica selectiva (SCR por sus siglas en inglés). El proceso de SCR, que utiliza urea (solución de amoniaco) como agente reductor, es hoy en día la tecnología más utilizada y desarrollada en el mundo, pues permite eliminar eficaz, selectiva y económicamente los NO_x presentes en los gases de escape de motores diésel. Existen dos reductores utilizados para los procesos de post tratamiento, el amoniaco (NH₃) y la urea ((NH₂)₂CO), ambos reaccionan con el NO para generar nitrógeno libre, vapor de agua y CO₂. Las ecuaciones reducción-oxidación 6 y 7 se describen a continuación.



5.2. Tecnología de bajas emisiones en el mundo (Tier4)

La Agencia de Protección del Medioambiente de EEUU (EPA por sus siglas en inglés), en sus normas de emisiones de gases contaminantes, considera el material particulado y los óxidos de nitrógeno principalmente, y ha definido distintos niveles de emisiones máximas por fases denominados Tier, que van desde el Tier1 al Tier4. Cada uno de estos niveles Tier representa una etapa donde se restringen las emisiones máximas permitidas los motores de combustión interna, para cada tipo de combustible, segmento de potencia y tipo de uso consideradas como las fuentes de emisión.

En la historia de la normativa EPA para los motores fuera de carretera de alta potencia, las primeras normativas Tier1 entraron en vigor en el año 1994 y se implementaron completamente el año 2000. Las siguientes fases de implementación, las normas Tier2 fueron introducidas entre los años 2000 y 2006. Para el caso de los motores diésel de equipos fuera de carretera, la normativa Tier3 no fue implementada y se pasó de la Tier2 directamente a la Tier4 con punto intermedio denominado Tier4 provisional. Finalmente, las normas Tier4 se implementaron entre el año 2006 y 2015. Este plan para reducir las emisiones contaminantes es exclusivo para los EEUU de Norteamérica. La siguiente Ilustración ilustra la evolución de los distintos Tier para el caso de los motores diésel fuera de carretera y de alta potencia (>900 kW), como se describió anteriormente.

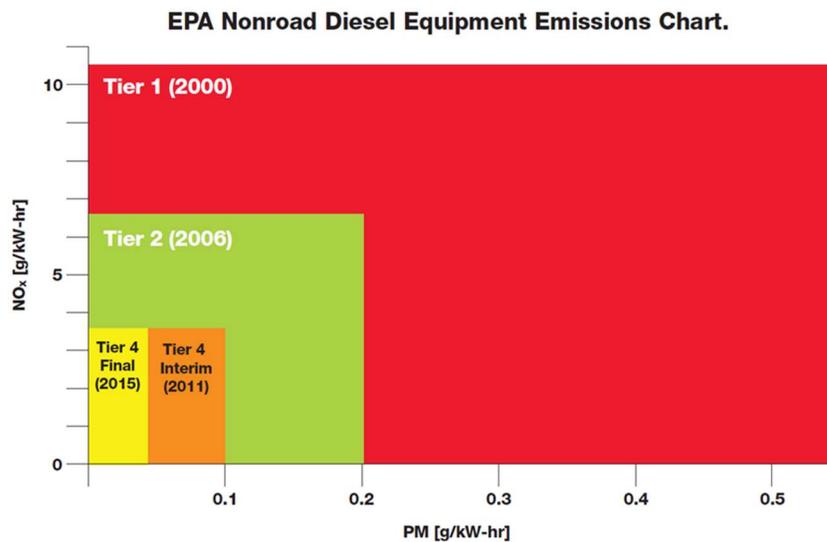


Ilustración 8. Evolución de Normas de Emisiones EPA por Tier para motores diésel fuera de carretera. Fuente: EPA.

En minería, el país líder en tecnologías de bajas emisiones a nivel mundial es Estados Unidos. Movilizado por la EPA y su regulación ambiental, aquí compiten las marcas Caterpillar, Cummins y MTU todos en el rango de potencia de 2700 HP para los camiones marca Komatsu de 300 toneladas métricas.

Cummins y MTU se encuentran probando unidades de bajas emisiones en varias minas dentro de Estados Unidos y Canadá, las cuales no superan las 30 unidades en total.

El siguiente listado corresponde a las unidades antes mencionadas que están actualmente en operación en Estados Unidos y Canadá sobre camión Komatsu K930E y K830E¹⁰.

Tabla 1. Motores Tier4 operando en EEUU y Canadá en camiones Komatsu. Fuente: representantes locales en Chile.

MTU S4000 T4				Cummins QSK60 T4			
	Mina	Ubicación	Cant		Mina	Ubicación	Cant
USA	US Borax	California	1	Canada	Heavy Metal	Alberta	3
	Kennecott	Salt Lake City	1		Coalspur	Alberta	1
	Bald Mountain	Nevada	1		Rainy River	Ontario	8
	Cliffs	Michigan	1		Teck Coal	Alberta	3
	United Taconite	Minesota	1		USA	Wyodak	Wyoming
	Bridger Coal	Wyoming	1	Marigold		Nevada	4
			Total	6	AZPG	Arizona	2
				Total		22	

¹⁰ Se consideran los camiones marca Komatsu modelos 830E y 930E para tener una muestra más representativa. El número de motores instalados sobre camión es pequeño considerando la población mundial total.

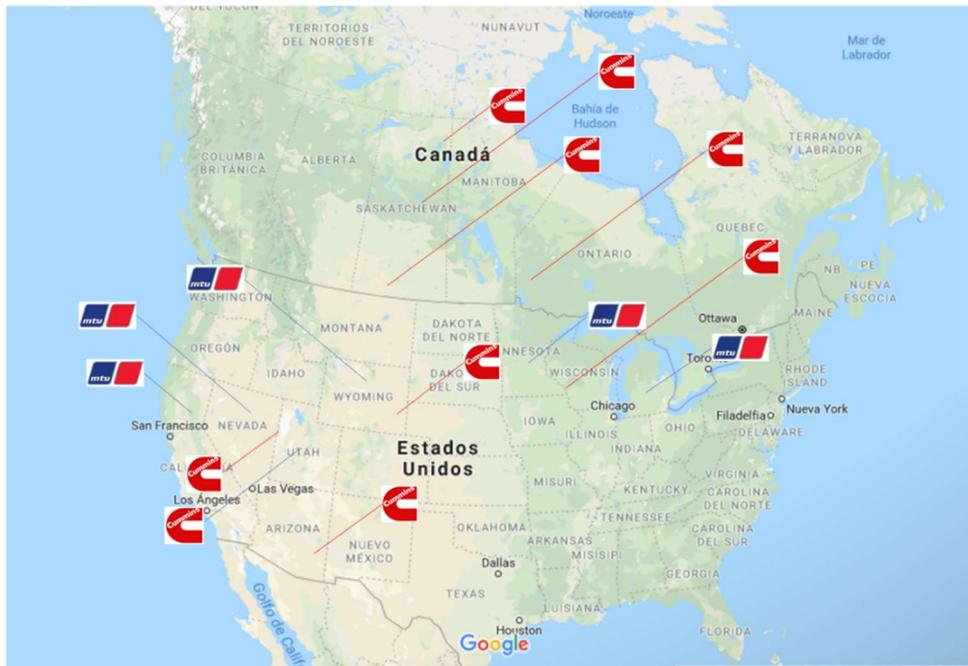


Ilustración 9. Distribución Motores T4 en Estados Unidos y Canadá. Fuente: distribuidores locales en Chile.

Ambos fabricantes han desarrollado distintas estrategias para reducir los contaminantes de sus motores. Para el material particulado, la estrategia es idéntica y se basa en el uso de sistemas de inyección de riel común de alta presión (*Common Rail* en inglés) y control electrónico.

Sin embargo, para el caso de los NOx las estrategias han sido opuestas:

- i) La marca MTU ha decidido usar medidas de control primario, es decir, siguiendo el camino de la recirculación de gases de escape, técnica que ataca la formación del NOx en la cámara de combustión.
- ii) En el caso de la marca Cummins, se ha decidido usar medidas secundarias que se hacen cargo de las emisiones una vez estas han sido generadas en la cámara de combustión, a través de un sistema de post tratamiento de gases de escape en base a la reducción catalítica selectiva mediante la inyección de urea.

5.3. Camiones mineros de extracción en Chile

En la gran minería del cobre en Chile se utilizan camiones de extracción que van desde las 180 toneladas métricas de capacidad hasta las 360 toneladas métricas.

Hoy existen en el país tres grandes competidores en el mercado de los camiones de extracción para la categoría denominada *ultra class* o de más de 300 toneladas métricas de capacidad: Komatsu, Caterpillar y Liebherr.

Cada una de las marcas posee una línea de productos que se detalla a continuación:

Tabla 2. Camiones mineros por marca y capacidad utilizados en la gran minería de Chile. Fuente: Elaboración propia

Fabricantes Camiones Mineros en Gran Minería de Chile	Clase 200 ton		Clase 240 ton		Ultra Class > 300 ton	
	180t	220t	260t	290t	320t	360t
KOMATSU	730E	830E	860E	930E	960E	980E
				930E SE		
CAT	789D	793F		794AC	795F AC	797F
LIEBHERR						T 282C
						T 284

Las motorizaciones diésel de estos camiones también se distribuyen en tres grandes actores: Cummins, Caterpillar y MTU; Cummins es partner de Komatsu, Caterpillar tiene el motor integrado dentro de su línea de producto y MTU es partner de Liebherr.

Es interesante el caso MTU, que ha desarrollado una línea de negocio basada en el repotenciamiento de equipos mineros, mayoritariamente camiones, donde se retira un motor de marca distinta y es reemplazado por uno de marca MTU. Esto se da mayoritariamente en equipos de la marca Komatsu y ha sido una estrategia para incrementar su participación en el mercado de la gran minería en Chile.

Los motores que poseen los camiones son Tier1 y Tier2, por lo que generan grandes emisiones. En el caso particular de Caterpillar, los motores disponibles hoy en Chile llegan hasta Tier2 en esta clase de máquinas, pero es posible que en el futuro dispongan de tecnologías más avanzadas en el país. Las empresas Cummins y MTU, en tanto, han estado desarrollando unidades de bajas emisiones, Tier4, certificadas por la EPA en Estados Unidos, pero estas no son exigibles por ley hoy en Chile.

De acuerdo con las publicaciones disponibles en la industria chilena, la distribución de mercado de los camiones mineros se reparte en: 52% para Caterpillar, 44% para Komatsu y 4% para Liebherr. El total de equipos considerados alcanza las 1592 unidades¹¹.

¹¹ Fuente: Editorial Editec SA, Catastro de equipos mineros 2013/214, p336.

Ahora, si se consideran solo los camiones con capacidad mayor a 300 toneladas la distribución cambia. El resumen se presenta en la siguiente tabla¹²:

Tabla 3. Market Share camiones mineros de más de 300 ton de capacidad en Chile. Fuente: Informe Encare Sección 2 mina rajo segundo semestre 2017. Elaboración propia.

Camiones Mineros de >300 ton		
Marca	Unidades	Market Share
Caterpillar	235	39%
Komatsu	361	59%
Liebherr	6	1%
Otros	6	1%
Total	608	100%

En este segmento, la marca que más predomina es Komatsu y, como antes se destacó, estos equipos se propulsan con motores Cummins o MTU de potencias que van desde los 2600 hasta los 3850 HP dependiendo del modelo y la aplicación.

Debido a que los camiones de la marca Caterpillar no operan con motores de otra marca y considerando que para la clase de más de 300 toneladas aun no tienen un motor de bajas emisiones disponible en Chile no serán considerados en este estudio. Tampoco la marca Liebherr, cuya participación de mercado es menor al 10%. Este estudio, por lo tanto, se enfocará solo en las flotas de camiones de marca Komatsu que son los más numerosos en la minería chilena.

Así, el análisis se centrará en estudiar cómo implementar una estrategia para instalar motores de bajas emisiones en camiones Komatsu de más de 300 toneladas métricas, donde el modelo más común es el camión K930E, que es utilizado en la mina Los Bronces.

6. Identificación de brechas en emisiones en la minería chilena

6.1. Metodología para la estimación de las emisiones de flotas de transporte minero

Existen dos grandes organismos reguladores de las emisiones de gases contaminantes, en Europa y los Estados Unidos. Este último país se rige por la *Environmental Protection Agency* (EPA, por sus siglas en inglés), que es el que

¹² *Market Share* camiones mineros, Fuente: Encare Sec2 mina rajo Segundo semestre2017, p9.

consideramos para el presente estudio, debido a que los mayores fabricantes de equipamiento minero usado en Chile provienen de ese país.

Es importante en este punto recordar que los objetivos de reducción de emisiones de las normas de la EPA se denominan Tier, y van de Tier1 a Tier4, siendo cada una de ellas una etapa de implementación en el tiempo de emisiones más estrictas.

En este estudio solo se tomarán en cuenta dos de los contaminantes considerados en las normas Tier, que son los más relevantes para el caso de emisiones de motores de combustión interna, el material particulado MP y los óxidos de nitrógeno o NOx. Las normas establecen límites máximos para ambos con plazos de entrada en vigor definidos por cada Tier, como se mencionó antes.

Las normas Tier, además de hacer restricciones crecientes a las emisiones, hacen distinción del tipo de motor diésel y su potencia. Para el caso de los equipos mineros la norma a usar corresponde a los motores fuera de carretera y de potencias mayores a los 900 kW. La tabla siguiente muestra las emisiones para motores diésel fuera de carretera para cada rango de potencia y las emisiones máximas por cada Tier.

Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards

	Rated Power (kW)	Tier	Model Year	NMHC (g/kW-hr)	NMHC + NOx (g/kW-hr)	NOx (g/kW-hr)	PM (g/kW-hr)	CO (g/kW-hr)	Smoke ^a (Percentage)	Useful Life (hours /years) ^b	Warranty Period (hours /years) ^b
Federal	130 ≤ kW < 225	1	1996-2002	1.3 ^j	-	9.2	0.54	11.4	20/15/50	8,000/10	3,000/5
		2	2003-2005	-	6.6	-	0.20	3.5			
		3	2006-2010	-	4.0	-	0.20	3.5			
		4	2011-2013 ^h	-	4.0	-	0.02	3.5			
			2014+ ⁱ	0.19	-	0.40	0.02	3.5			
	225 ≤ kW < 450	1	1996-2000	1.3 ^j	-	9.2	0.54	11.4			
		2	2001-2005	-	6.4	-	0.20	3.5			
		3	2006-2010	-	4.0	-	0.20	3.5			
		4	2011-2013 ^h	-	4.0	-	0.02	3.5			
			2014+ ⁱ	0.19	-	0.40	0.02	3.5			
	450 ≤ kW < 560	1	1996-2001	1.3 ^j	-	9.2	0.54	11.4			
		2	2002-2005	-	6.4	-	0.20	3.5			
		3	2006-2010	-	4.0	-	0.20	3.5			
		4	2011-2013 ^h	-	4.0	-	0.02	3.5			
			2014+ ⁱ	0.19	-	0.40	0.02	3.5			
	560 ≤ kW < 900	1	2000-2005	1.3 ^j	-	9.2	0.54	11.4			
		2	2006-2010	-	6.4	-	0.20	3.5			
		4	2011-2014	0.40	-	3.5	0.10	3.5			
			2015+ ⁱ	0.19	-	3.5 ^k	0.04 ^l	3.5			
	kW > 900	1	2000-2005	1.3 ^j	-	9.2	0.54	11.4			
		2	2006-2010	-	6.4	-	0.20	3.5			
		4	2011-2014	0.40	-	3.5 ^k	0.10	3.5			
			2015+ ⁱ	0.19	-	3.5 ^k	0.04 ^l	3.5			

Ilustración 10. Norma Tier para motores diésel fuera de carretera de la EPA. Fuente: EPA, Estados Unidos.

El cálculo de las emisiones contaminantes considera dos tipos de metodologías:

a) Metodología en ruta: Busca capturar las condiciones de operación que tienen los vehículos que circulan por caminos públicos y que se enfrentan a ciclos de aceleración, velocidad constante, desaceleración y espera. Cada uno de estos regímenes hace que sus motores de combustión interna generen distintos niveles de emisiones.

b) Metodología fuera de ruta: Considera a los vehículos fuera de carretera que son comúnmente equipos de construcción, como cargadores frontales o motoniveladoras. Esta metodología se basa en el tiempo operativo y un

promedio de la potencia a la que estos equipos operan, lo que permite estimar las emisiones.

Ambas metodologías buscan determinar el tiempo que los motores de combustión interna se encuentran en cada etapa de su régimen de trabajo, donde las emisiones de contaminantes dependen de consumo de combustible específico para esa condición dada. Finalmente, las emisiones contaminantes dependerán del tiempo de funcionamiento, la potencia o carga a la que está sometida el motor y a la naturaleza de este representado por el factor de emisiones.

La fórmula para estimar las emisiones que se utilizará en este estudio considera la metodología fuera de carretera descrita de la siguiente forma:

$$\text{Emisiones} = F_t * F_c * P_n * F_e \quad (3)$$

F_t : Factor temporal expresado en horas operacionales anuales.

F_c : Factor de carga del motor, expresado en porcentaje del tiempo operacional que está a máxima potencia o al máximo consumo de combustible.

P_n : Potencia nominal motor diésel, expresada en [hp].

F_e : Factor de emisiones expresado en [g/kw-hr]

6.1.1. Factor Temporal (F_t)

El factor temporal F_t se determina considerando las horas nominales anuales de la flota multiplicados por la disponibilidad física media anual y por el uso de la disponibilidad física media anual. Esto también se conoce en la industria como el tiempo operacional de la flota, en este caso corresponde a la flota de transporte. Estos tres parámetros vienen dados por el modelo de tiempo que es utilizado en cada sitio, típicamente se utilizan modelos de tiempo del tipo ASARCO.

Anglo American posee un modelo de gestión de tiempos que se asemeja al modelo de ASARCO con la diferencia que se incluyen tiempos no controlables. Así, si el tiempo controlable es igual al tiempo calendario, entonces son iguales al tiempo nominal del modelo ASARCO. Esto se explica en las tablas siguientes, donde se comparan ambos modelos.

Tabla 4. Modelo de Gestión de tiempo ASARCO.

Modelo de Gestión de Tiempo ASARCO

Tiempo Nominal								
Tiempo Disponible					Tiempo No Disponible			
					Mant. Programada		Mant. No Programada	
Tiempo Operativo				Tiempo Reserva	Mant. Preventiva	Mant. Planificada	Fallas Mant.	Fallas Op.
Tiempo Efectivo	Demoras							
		Programadas	No Programadas	Pérdida Op.				

* Fuente. Elaboración propia

Tabla 5. Modelo de Gestión de Tiempo de Anglo American.

Modelo de Gestión de Tiempo de Anglo American

Tiempo Calendario										
Tiempo Controlable								Tiempo No Controlable		
Tiempo Físicamente Disponible					Tiempo No Disponible				Eventos no controlables	No programado para producir
Tiempo Operativo			Tiempo Perdido		Mant. Programada	Mant. No Programada	Detención Op. No Programada	Detención Op. Programada		
Tiempo Operación Efectiva	Operación Secundaria	Demoras	Reservas	Consecuencia						

* Fuente. Elaboración propia

De estos modelos se determinan la disponibilidad física y el uso de la disponibilidad física de la siguiente forma:

a) ASARCO:

$$H \text{ Nominales} = \text{Tiempo Calendario} * \# \text{ de Equipos} \quad (4)$$

$$DF = \frac{\text{Tiempo Disponible}}{\text{Tiempo Nominal}} \quad (5)$$

$$U DF = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Disponible}} \quad (6)$$

b) Anglo American:

$$H \text{ Nominales} = \text{Tiempo Controlable} * \# \text{ de Equipos} \quad (7)$$

$$DF = \frac{\textit{Tiempo Físicamente Disponible}}{\textit{Tiempo Controlable}} \quad (8)$$

$$U DF = \frac{\textit{Tiempo Operativo}}{\textit{Tiempo Físicamente Disponible}} \quad (9)$$

Así se determina el factor de tiempo reemplazando los factores 10,11,12,13,14 y 15 en la fórmula 16, donde el tiempo controlable es la porción que excluye los días no programados para producción y eventos de fuerza mayor.

$$F_t = H \textit{ Nominales anuales} * DF_{\textit{ media anual}} * U DF_{\textit{ media anual}} \quad (10)$$

6.1.2. Factor de Carga del Motor Diesel (Fc)

El factor de carga del motor diésel F_c , representa la severidad operacional a la que este componente está sometido y se relaciona en forma directa con la potencia que se demanda durante la operación. Como la potencia generada por el motor diésel es directamente proporcional al consumo de combustible, a mayor consumo de combustible promedio, mayor es la potencia media producida y por lo tanto mayor la severidad a la que está sometido este componente.

En la gran minería del cobre en Chile existen distintas configuraciones de rajos mineros: Muy antiguos y profundos, como es el caso de la mina Chuquicamata, en que el tiempo de salida del fondo de rajo es de aproximadamente una hora; y otros más nuevos como es Sierra Gorda con ciclo subiendo cargados de menos de 30 minutos. Para ambos casos, los factores de carga de sus motores diésel son 50% y 25% respectivamente.

El caso más extremo (Chuquicamata), que tiene un factor de carga para el motor diésel del 50%, se puede explicar de la siguiente forma: Se debe considerar que el motor está el 50% del tiempo de operación al 100% de su potencia. En un ejemplo práctico, si consideramos un motor diésel de 2700 hp nominales típico de camiones de 300 toneladas, su consumo a máxima potencia es de 493 litros por hora con lo cual, si este tiene un factor de carga del 50%, su consumo medio sería de 246 litros por hora.

La fórmula 16 establece el factor de carga de motor diésel F_c de esta forma.

$$F_c = \frac{\text{Consumo de Combustible Medio}}{\text{Consumo de combustible a Max potencia}} \quad (11)$$

Se hizo una recopilación de información para determinar el estado de este parámetro para establecer un promedio aceptable para usar en este estudio y así poder estimar las emisiones que fueran representativas para estos efectos.

La Ilustración 12 muestra los factores de carga de motores diésel para distintas faenas mineras en Chile. Se usarán estos factores para establecer un factor de carga que represente un promedio de la industria minera.

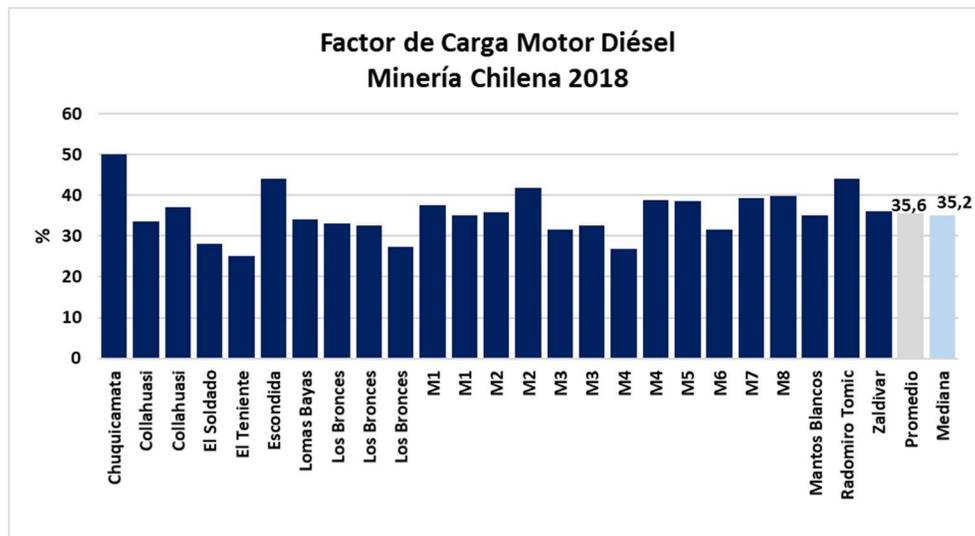


Ilustración 11. Factores de carga de motor diésel para distintas faenas mineras de Chile. Fuente: Elaboración propia.

La data disponible se distribuyó por segmentos de factor de carga para el motor diésel y se concluye que el rango más representativo para la minería en Chile está entre el 32% y 38% (ver Ilustración 13).

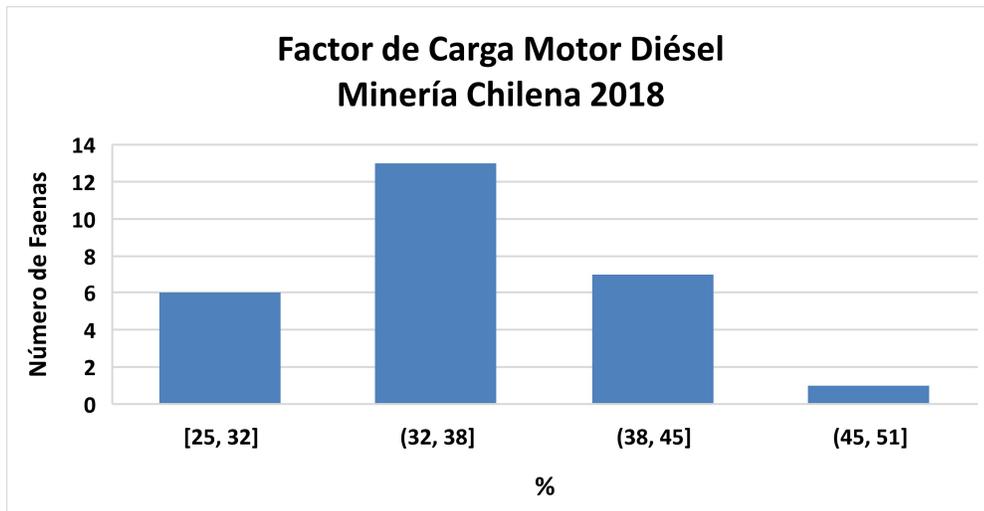


Ilustración 12. Histograma distribución factor de carga de motor diésel para la minería chilena. Elaboración propia.

Se pudo determinar que, en promedio, las flotas de camiones mineros en Chile presentan un factor de carga de motor diésel del 35%, valor que será usado para este estudio.

6.1.3. Factor de Emisiones (Fe)

El factor de emisiones está determinado por la naturaleza y el tipo del motor diésel, dependiendo de la aplicación, potencia nominal y nivel de emisiones que cumple (Tier). Para el caso en estudio, los motores son del tipo fuera de carretera y de la clase de alta potencia diésel para aplicación de equipamiento minero.

Los factores de emisiones más importantes y que se evaluarán en este estudio son dos: óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (MP). Como se indica en las tablas de la EPA, estos factores de emisiones para motores de alta potencia¹³ son:

- (1) $3.500 \left[\frac{g}{kw-h} \right]$ para emisiones de óxidos de nitrógeno NOx
- (2) $0.040 \left[\frac{g}{kw-hr} \right]$ para emisiones de material particulado fino MP2,5

¹³ EPA Non Road high power compression engines.

6.2. Estimación de las emisiones para la gran minería del cobre

Las minas de la gran minería del cobre que operan camiones de extracción (CAEX) de capacidad mayor a 300 toneladas se distribuyen en: zona norte (desde Arica a Vallenar) y zona centro (desde La Serena hasta Rancagua).

Considerando la fórmula (9), se calculan las emisiones para este grupo de faenas tomando los siguientes parámetros:

Las horas operativas promedio de la industria se calculan usando los datos de la base de datos del reporte de *benchmarking* Encare segundo semestre de 2017, donde se consideran las horas nominales anuales (8760), la disponibilidad física y la utilización operativa disponible.

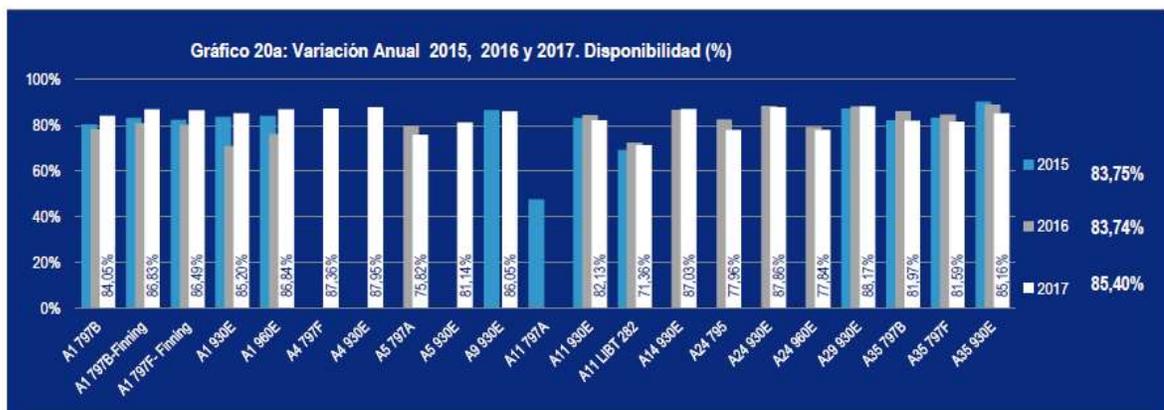


Ilustración 13. Disponibilidad física camiones de 300 toneladas informe Encare Segundo Semestre 2017.

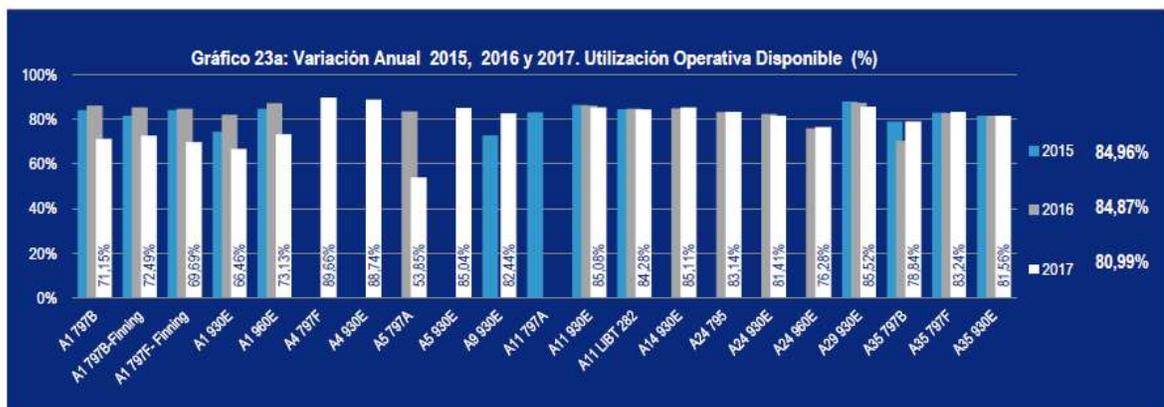


Ilustración 14. Utilización operativa disponible para camiones de 300 toneladas. Informe Encare segundo semestre 2017.

Por lo tanto, las horas operacionales anuales promedio para camiones de extracción que se considerarán para el cálculo del factor temporal F_t por equipo

serán 6059 horas. Como ya se determinó anteriormente el factor de carga promedio anual para el motor diésel F_c a utilizar será de un 35%.

El factor de emisiones se obtiene de la Ilustración 16 para MP y NOx considerando la normativa EPA para motores diésel fuera de carretera de rango de potencia mayores a 900kw (1200 hp). La tabla siguiente muestra las emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno estimadas para cada sector de la gran minería del cobre para la clase de camiones ultra class (+300 ton).

Tabla 6. Emisiones anuales estimadas material particulado MP y óxidos de nitrógeno NOx para las minas de las zonas norte y centro de Chile.

Faena	Factor Temporal (Ft) (hrs/año)	Factor de carga Motor Diesel (Fc)	Factor de Emisiones (Fe NOx) (g/kw-h)	Factor de Emisiones (Fe PM) (g/kw-h)	Emisiones NOx (ton/año)	Emisiones PM (ton/año)
Regiones IV, V, RM, VI	6.059	35%	10,5	0,54	6.682	333
Regiones I,II,III	6.059	35%	10,5	0,54	35.356	1.818

Si se comparan las emisiones estimadas para la gran minería del cobre para las flotas de camiones de más de 300 toneladas de acuerdo con la metodología planteada, se obtiene que las emisiones de material particulado (MP10 y MP2,5) son 2.151 ton/año, equivalentes a un 19.6% de las emisiones de la Región Metropolitana (inventario 2014). En el caso de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) las emisiones estimadas para los camiones son 43.346 (ton/año) un 7% más que las emisiones de la Región Metropolitana.

Esta comparación con el inventario de emisiones de la Región Metropolitana permite demostrar que las fuentes de emisiones para equipos móviles (motores diésel) de la gran minería de Chile son relevantes.

Por lo tanto, una estrategia de gestión de sustentabilidad a largo plazo debería considerar la implementación de tecnologías de bajas emisiones en las flotas de transporte de la gran minería.

7. Estrategia de implementación del cambio tecnológico

Como estrategia de implementación de cambio de tecnología de motores diésel en la flota de camiones de Los Bronces, se propone iniciar el proceso instalando solo cuatro unidades. Con esto se espera generar un aprendizaje sin poner en riesgo el resultado operacional.

La secuencia de implementación considera incorporar diez unidades el segundo año y así sucesivamente, debido a que una de las variables clave es minimizar el tiempo de implementación. Así, cada año se hará el reemplazo de, aproximadamente, una unidad mensual de acuerdo con el programa de cambio de motores que tiene la faena. Este programa le permitirá a Los Bronces contar con el 100% de los camiones K930E en un periodo de siete años, como se puede observar en la Ilustración 16.

Es importante considerar que dentro de la flota de camiones de Los Bronces existente diez unidades que cumplen con regulaciones Tier2. De acuerdo con las normas EPA, estos, a diferencia de los motores Tier1, presentan una reducción de las emisiones de MP, pero no de los NOx. Por esta razón se cambiarán una vez que todas las unidades Tier1 sean reemplazadas.

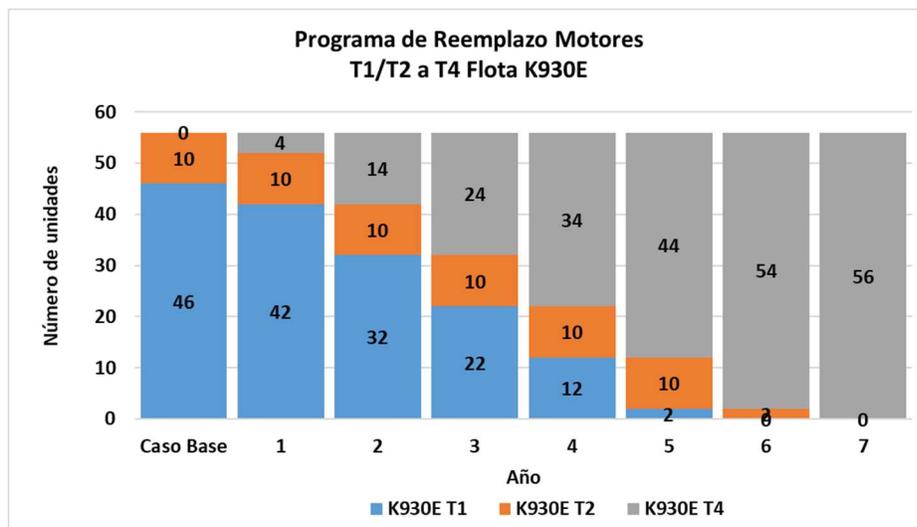


Ilustración 15. Programa de reemplazo de motores de la flota de transporte Komatsu K930E de Los Bronces. Elaboración propia.

Este programa de reemplazo generará una reducción sistemática de las emisiones contaminantes de la flota de camiones, con una baja de emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno significativas, llegando a una reducción de un 92% y un 64% respectivamente, al séptimo año.

La reducción incremental de emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno estimada para este programa de implementación propuesto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7. Reducción de emisiones de la Flota de Transporte Komatsu K930E de Los Bronces producto del cambio tecnológico.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7
NOx	100%	95%	82%	70%	57%	44%	37%	36%
PM	100%	93%	74%	55%	37%	18%	10%	8%

El impacto en las emisiones de la flota de transporte de Los Bronces (Komatsu K930E) es mayor en el caso del material particulado que en las emisiones de NOx. La reducción total de material particulado es de un 92% y en el caso del NOx es de un 64%. Esto se aprecia en las ilustraciones 17 y 18 respectivamente. Estas reducciones están directamente relacionadas con la naturaleza de los motores diésel y las regulaciones establecidas por la EPA.

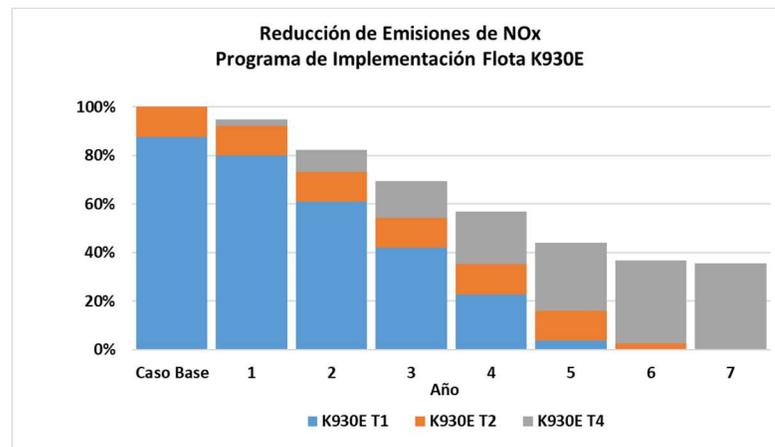


Ilustración 16. Reducción de emisiones de NOx de la flota de transporte K930E de Los Bronces. Elaboración propia.

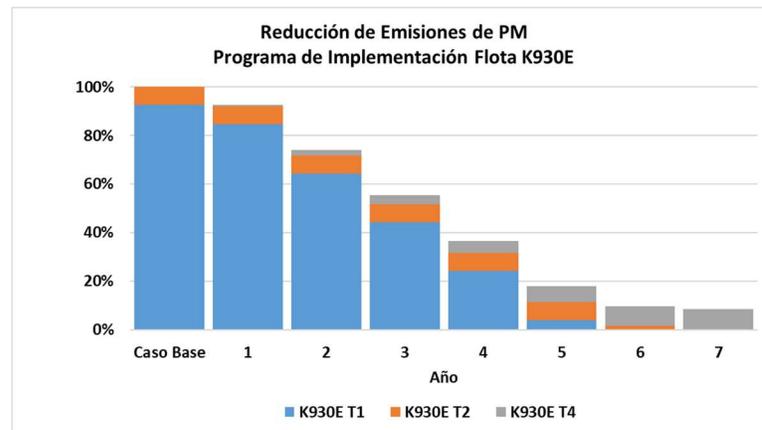


Ilustración 17. Reducción de emisiones de material particulado de la flota de transporte K930E de Los Bronces. Elaboración propia.

Como se mencionó antes, la reducción de emisiones contaminantes trae consigo una mayor eficiencia en el consumo de combustible, lo que se traduce en menor consumo unitario y, por lo tanto, en menores emisiones de GEI (CO₂ eq). Al incorporar este parámetro en la secuencia de implementación planteada, se observan reducciones progresivas de las emisiones de CO₂, cuando se proyecta el consumo de combustible de forma constante para el periodo de implementación. Esto se muestra en la ilustración 19.

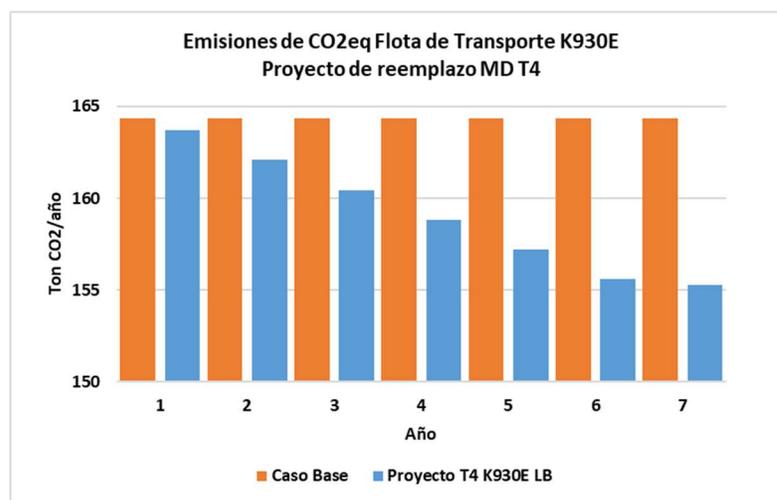


Ilustración 18. Emisiones de CO₂ equivalente flota de transporte K930E Los Bronces. Proyecto de reemplazo de motores diésel Tier4. Elaboración propia.

8. Evaluación económica del cambio tecnológico

La evaluación económica considerará la evaluación del problema desde una visión macro de la industria minera, para luego ir al caso de estudio en la mina Los Bronces.

Se evaluarán dos aspectos clave: el impacto que tienen las emisiones contaminantes en la población y el costo para el Estado considerando la población del gran Santiago. Luego se estimarán las emisiones de material particulado (MP) y óxidos de nitrógeno (NO_x) también para la industria minera y el caso de estudio, y finalmente se determinará el impacto en la huella de carbono de Los Bronces al implementar este proyecto.

La mina Los Bronces en el plan quinquenal de mantenimiento de la flota de transporte principal, camiones Komatsu K930E, reemplaza, en promedio 12 motores por año. Este plan de reemplazo corresponde a la secuencia normal por término de campaña de vida útil de estos componentes. Cada motor diésel tiene una vida promedio de aproximadamente 25.000 horas operacionales. Si

se considera que las horas operacionales anuales son 6059 horas operativas, entonces la vida de cada motor es de alrededor 4 años (ver Ilustración 20).

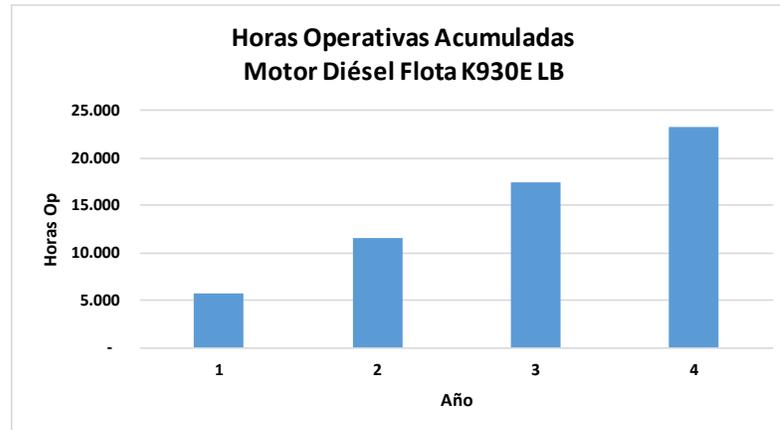


Ilustración 19. Perfil de horas operacionales acumuladas por año para los motores diésel de la flota de transporte de Los Bronces.

La evaluación económica se basa en los costos estimados que tiene el reemplazo de una tecnología por la otra: el cambio de un motor Tier1 por uno Tier4. Este cambio requiere evaluar los costos de capital más los costos operacionales durante la vida útil del motor, variables que se resumen en:

- Valor de adquisición del componente (motor diésel).
- Costos asociados al cambio de fabricante, adaptaciones necesarias para el montaje del motor en el equipo (configuración del módulo de potencia).
- Costo operacional del motor (combustible, partes, piezas y lubricantes).

Se realiza una evaluación de los costos de implementación basados en las estimaciones de gastos que comprenden cada una de las partidas descritas anteriormente, dejando de lado las que son comunes para ambos, a saber, la mano de obra. Los gastos de capital consideran el valor de motor diésel, armado y la configuración del módulo de potencia que es la integración del motor diésel con el radiador y generador eléctrico sobre la estructura de soporte que se monta sobre el equipo conocido como sub-chasis.

Los gastos operativos del motor diésel se dividen en los ítems de mantenimiento (lubricantes, filtros y repuestos) y el consumo de combustible. El consumo de combustible es un ítem de gasto importante que impacta directamente el costo mina y la tecnología de bajas emisiones incorpora dentro de los beneficios un menor consumo de combustible, que de acuerdo a ambos fabricantes es del orden de un 5%. En el caso de la operación en Los Bronces

el consumo histórico como mediana y promedio en los años 2015 al 2017 ha sido de 181 litros por hora operativa, como se muestra en la Ilustración 21.

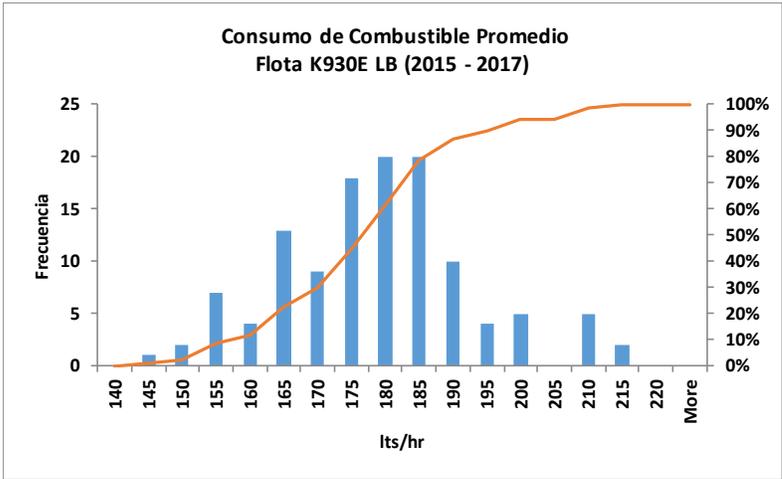


Ilustración 20. Consumo de combustible de la flota de transporte K930E de Los Bronces, años 2015 al 2017. Fuente: Elaboración propia.

Considerando el consumo medio histórico de 181 litros por hora, el consumo de combustible esperado para el motor Tier4 será de 171 litros por hora operativa, lo que se utilizará en la evaluación económica. Hay que destacar que esto obedece a promedios históricos y a las referencias obtenidas de los catálogos de los fabricantes. Es algo que tiene que ser verificado en el futuro.

La tabla siguiente compara cada una de las partidas antes descritas considerando que los ítems de gasto variable, que son repuestos y consumo de combustible, pero se consideran los promedios proyectados por año para una operación constante de 6059 horas operacionales. Destaca de la Ilustración siguiente que el gasto anual de combustible esperado es del mismo orden de magnitud que la inversión y los otros gastos son marginales.

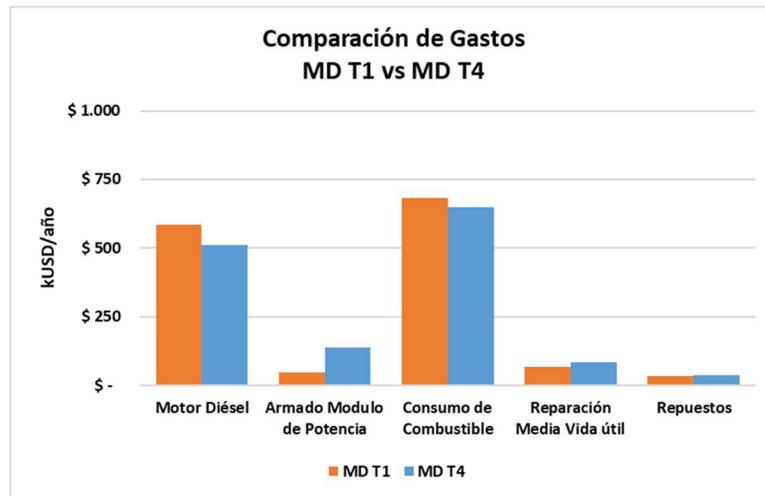


Ilustración 21. Comparación de gastos por cada naturaleza para motor Tier1 y Tier4 en Los Bronces. Fuente: elaboración propia.

Se presentan de esta forma una comparación de gastos anuales considerando el año cero como el año de inversión y luego los siguientes cuatro años de operación de los motores. Ver Ilustración 23.

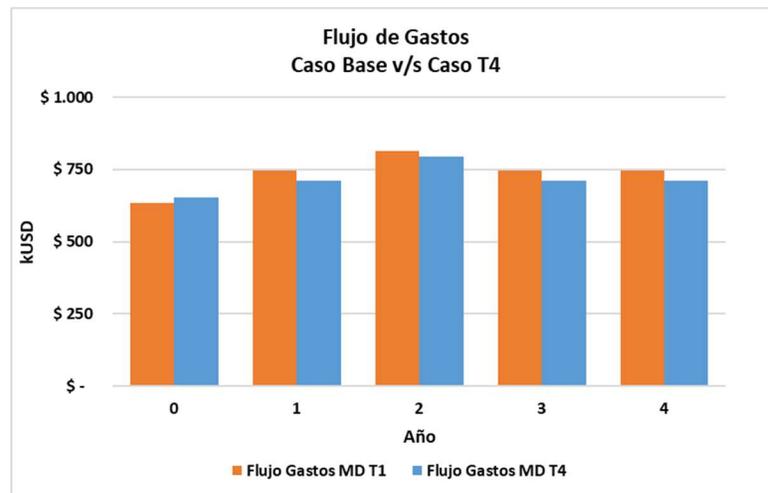


Ilustración 22. Comparación de gastos en la vida de un motor Tier1 versus otro Tier4 en Los Bronces. Fuente: elaboración propia.

Se utilizarán dos metodologías para evaluar el beneficio económico del proyecto, inicialmente en la comparación unitaria, es decir, una unidad contra unidad: el costo anual uniforme equivalente CAUE y valor actualizado neto VAN de la diferencia entre el caso T4 y T1. La diferencia se ingresa al modelo económico como ingresos por ahorros, los que son principalmente por menor consumo de combustible. Las tablas siguientes (8 y 9) muestran los gastos

para cada una de las partidas que impactan a cada motor y se calcula el valor actualizado neto del flujo de gastos y el CAUE.

Tabla 8. Flujo de gastos para el caso de un motor Tier1

Motor T1						
Año		0	1	2	3	4
Costo Unitario (inversión)	kUSD	\$ 584				
Costo configuración modulo	kUSD	\$ 49				
Costo Repuestos	kUSD		\$ 33	\$ 33	\$ 33	\$ 33
Costo midlife	kUSD			\$ 69		
Gasto Combustible	kUSD/año		\$ 687	\$ 687	\$ 687	\$ 687
Flujo Gastos MD T1	kUSD/año	\$ 633	\$ 720	\$ 789	\$ 720	\$ 720
Tasa		8%				
VAN (8%)	\$	3.078				
CAUE	\$	929				
Consumo medio ultimos 3 años	lt/hr		181			

Tabla 9. Flujo de gastos para el caso de un motor Tier4

Motor T4						
Año		0	1	2	3	4
Costo unitario (inversión)	kUSD	\$ 512				
Costo configuración modulo	kUSD	\$ 140				
Costo Repuestos	kUSD		\$ 36	\$ 36	\$ 36	\$ 36
Costo midlife	kUSD			\$ 86		
Gasto Combustible	kUSD/año		\$ 649	\$ 649	\$ 649	\$ 649
Flujo Gastos MD T4	kUSD/año	\$ 652	\$ 686	\$ 772	\$ 686	\$ 686
Tasa		8%				
VAN (8%)	\$	2.997				
CAUE	\$	905				
Consumo medio ultimos 3 años	lt/hr		171			

Como resultado CAUE para el caso del motor diésel Tier4 es 3% menos que en el caso del Tier1 (kUSD 905 versus kUSD 929). Esto muestra que la tecnología Tier4 presenta un menor costo anual uniforme equivalente, resultando en un mejor negocio. Esto se apalanca en un menor consumo de combustible, resultado de una tecnología de inyección más avanzada y un mejor control de la combustión.

Cuando se evalúan las diferencias entre ambos casos, se observa que el motor diésel Tier4 tiene un mayor costo de inversión, pero menores costos de operación. La tabla siguiente resume cada una de las partidas más relevantes de costos (capital y operacionales) omitiendo las partidas que son idénticas para cada caso.

Tabla 10. Comparación de costos de capital y de operación para motores Tier1 y Tier4 para el caso de Los Bronces.

Tipo Gasto	Descripción		MD T1	MD T4	Delta
Capex	Motor Diésel	kUSD	\$ 584	\$ 512	-\$ 72
	Armado Modulo de Potencia	kUSD	\$ 49	\$ 140	\$ 91
	Total	kUSD	\$ 633	\$ 652	\$ 19
Opex	Repuestos	kUSD	\$ 33	\$ 36	\$ 3
	Media Vida Util	kUSD	\$ 69	\$ 86	\$ 17
	Combustible	kUSD	\$ 687	\$ 649	-\$ 38
	Total	kUSD	\$ 789	\$ 772	-\$ 17

Al integrar todo en el modelo económico, se determina el VAN del caso unitario (uno contra uno) para las diferencias, donde las variables del modelo económico son las siguientes:

- **Inversión:** Corresponde a la diferencia entre ambos casos. Incluye el costo del motor más la configuración como módulo de potencia.¹⁴
- **Ingresos:** Corresponden a los ahorros de costo como resultado de un menor consumo de combustible, un menor consumo de repuestos y un costo de media vida útil¹⁵ más bajo.

El VAN con una tasa de descuento del 8% es kUSD 88 en la vida del componente con una tasa interna de retorno del 163% y un *payback* de 0,7 años. Al sensibilizar las variables principales en un 10% mayor inversión y en un 10% menos ingresos (gasto en combustible principalmente), el caso de negocio sigue siendo positivo (ver anexo).

Se consideró un caso más desfavorable, donde el motor Tier4 tiene un consumo de combustible idéntico al del motor Tier1. Este escenario considera que el beneficio que ofrece la nueva tecnología de un mejor control del uso de combustible no se verá reflejado, aunque se conseguirán menores emisiones de contaminantes. Se presenta a continuación:

¹⁴ El módulo de potencia incluye el radiador, generador y sub-chasis, que es la forma en que se monta como conjunto en el camión Komatsu K930E.

¹⁵ Media vida útil se considera al mantenimiento que se realiza cuando se cumple la mitad de las horas de vida esperada, 12.000-14.000 horas y donde se reemplazan inyectores y turbos para poder lograr llegar a su final de campaña.

Tabla 11. Evaluaciones económicas para el caso unitario de las diferencias con sensibilizaciones.

Caso Unitario Proyecto T4 - T1 (diferencias)			
		(+10% inversión)	(-10% Ahorros)
NPV (8,00%)	kUSD 88	83,8	75,3
IRR	169%	149%	148%
PAYBACK (años)	0,6	0,7	0,7

Motor T4 v/s T1 (diferencias consumo combustible idéntico)			
		(+10% inversión)	(-10% Ahorros)
NPV (8,00%)	kUSD 3,2	1,3	1,1
IRR	14%	9%	9%
PAYBACK (años)	2,7	3,2	3,2

Al comparar las tecnologías, como resultado se obtiene que el VAN y la TIR siguen siendo positivos, pero el *payback* del proyecto se incrementa a 2.7 años. Por lo tanto, se puede concluir que el cambio de tecnología resulta indiferente desde el punto de vista económico y beneficioso para la reducción de emisiones contaminantes.

Con lo anterior se valida que el cambio de motores de tecnología de bajas emisiones, para el caso unitario, sería un buen negocio al tener un *payback* menor a la vida del motor en el caso más desfavorable. El reemplazo de la flota completa, sería, por tanto, también positivo, independientemente si se produjera o no un cambio en la normativa de emisiones.

La evaluación del el CAUE, para este escenario, en tanto, arroja un resultado negativo para el proyecto, como se puede ver a continuación:

Tabla 12. Comparación de los costos anuales uniformes equivalentes para ambos casos con consumo de combustible idéntico.

Motor T1

Año		0	1	2	3	4
Costo Unitario (inversión)	kUSD	\$ 584				
Costo configuración modulo	kUSD	\$ 49				
Costo Repuestos	kUSD		\$ 33	\$ 33	\$ 33	\$ 33
Costo midlife	kUSD			\$ 69		
Gasto Combustible	kUSD/año		\$ 687	\$ 687	\$ 687	\$ 687
Flujo Gastos MD T1	kUSD/año	\$ 633	\$ 720	\$ 789	\$ 720	\$ 720

Tasa	8%
VAN (8%)	\$ 3.078
CAUE	\$ 929

Consumo medio ultimos 3 años	lt/hr	181
------------------------------	-------	-----

Motor T4

Año		0	1	2	3	4
Costo unitario (inversión)	kUSD	\$ 512				
Costo configuración modulo	kUSD	\$ 140				
Costo Repuestos	kUSD		\$ 36	\$ 36	\$ 36	\$ 36
Costo midlife	kUSD			\$ 86		
Gasto Combustible	kUSD/año		\$ 687	\$ 687	\$ 687	\$ 687
Flujo Gastos MD T4	kUSD/año	\$ 652	\$ 724	\$ 810	\$ 724	\$ 724

Tasa	8%
VAN (8%)	\$ 3.123
CAUE	\$ 943

101%

Consumo medio ultimos 3 años	lt/hr	181
------------------------------	-------	-----

No obstante lo anterior, se puede concluir que el cambio tecnológico propuesto tiene un CAUE positivo, asumiendo la realidad del primer escenario, de la misma forma que el VAN y TIR, siempre bajos los supuestos ya establecidos.

Finalmente se desarrolló la evaluación completa del caso económico donde se reemplazan los 56 motores de flota Komatsu K930E de Los Bronces. En esta evaluación se incluye un escalamiento por IPC y tasa de cambio. Además, se incluyen las inversiones sucesivas con sus respectivas depreciaciones.

Como es de esperar este caso presenta un resultado positivo con un VAN de MUSD 3,92 y una TIR de 166,5%. El *payback* es de solo 0,12 años debido a que la primera inversión corresponde solo a cuatro unidades. Al sensibilizar el costo de inversión y los ahorros esperados, ambos en 10% el VAN y TIR siguen siendo positivos (ver anexo).

8.1. Estimación del beneficio en emisiones del cambio tecnológico

El caso de negocio para la aplicación de la tecnología de bajas emisiones en motores diésel de la flota de transporte de la mina Los Bronces, considera solo aquellas partidas en que se estima habrá diferencias en comparación con el caso base.

El parámetro de mayor relevancia para determinar el beneficio en la reducción de emisiones de gases contaminantes, se relaciona con el consumo de combustible. Las emisiones de GEI, medidas como de CO₂ equivalente, se determinan en base al consumo de combustible o la cantidad de litros quemados en un año y se traducen en emisiones de CO₂ equivalentes a través de un factor de conversión. El factor de conversión para petróleo diésel es de 2676 kg CO₂/m³¹⁶ por cada m³ de combustible utilizado por el motor.

La huella de carbono de la flota de transporte de la faena para los años 2017 y 2018 se muestra en la Ilustración 24. El aporte de la flota de camiones Komatsu, K930E, representa entre un 79% y un 83%, dependiendo del perfil de la mina y del factor de carga del motor diésel. En la Ilustración 25 se muestra la contribución relativa de la huella de carbono de las distintas marcas de camiones que operan en la mina.

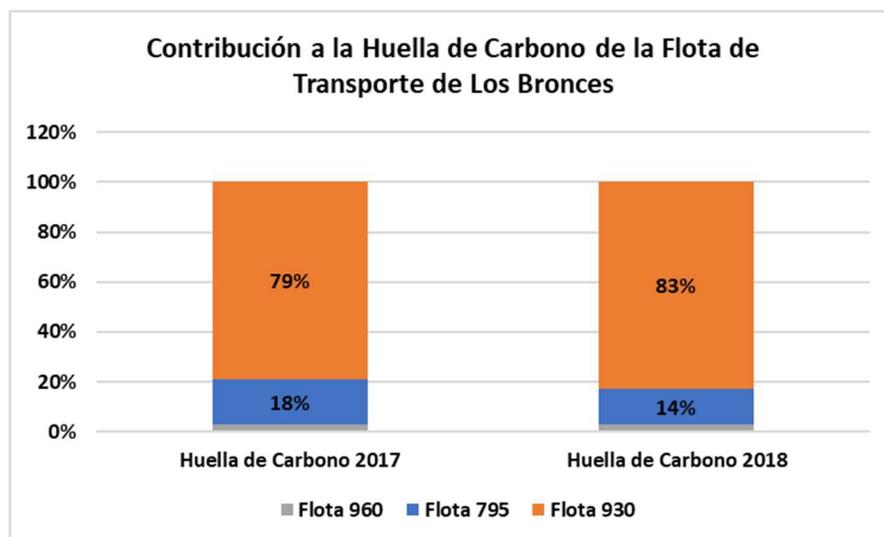


Ilustración 23. Contribución relativa de los equipos de la flota de transporte de Los Bronces a la huella de carbono.

¹⁶ Informe Medición Huella de Carbono Institucional 2016 y 2017, Universidad de Antofagasta. Pag. 7.

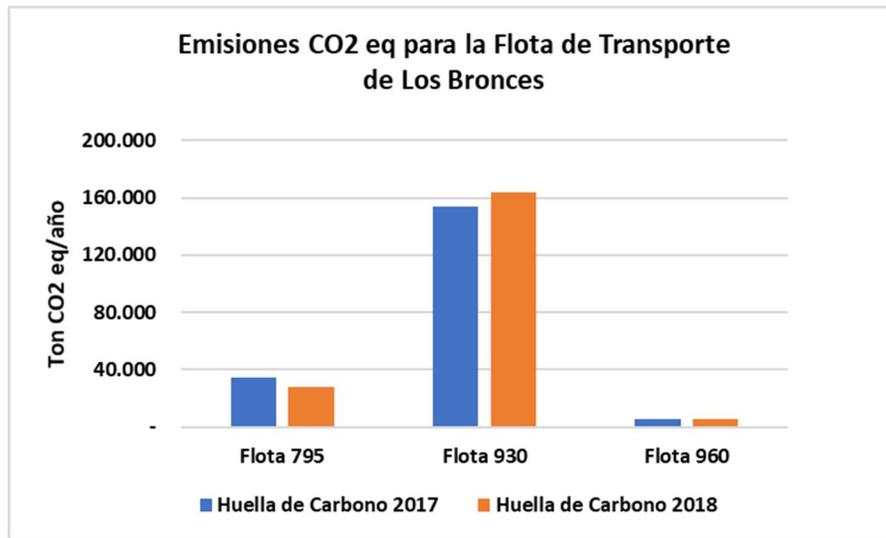


Ilustración 24. Huella de Carbono Flota de Transporte de Los Bronces 2017-2018.

Con el cambio de tecnología de motor diésel, de Tier1 a Tier4, la proyección de reducción de la huella de carbono de la flota Komatsu K930E arroja un 4.6% (ver tabla 14). Esto demuestra que con la implementación del proyecto efectivamente se reducirían las emisiones de CO2 equivalentes.

El programa de reemplazo propuesto en la evaluación económica considera, como una de las variables clave del proyecto, que la nueva tecnología es capaz de reducir el consumo de combustible en una media de 5% respecto del caso base; esto se traduce en una reducción de las emisiones de CO2 en la misma proporción.

Tabla 13. Contribución en la huella de carbono de Los Bronces del cambio tecnológico a motores diésel Tier4.

Emisiones 2018 LB	Ton CO2/año	Distribución Mina	Distribución Total	Contribución Tier4
Perforación	12.159	5%	1%	
Carguío	30.146	12%	3%	
Transporte	197.625	76%	19%	4,6%
Servicios	19.702	8%	2%	
Total Mina	259.633	100%	25%	
Total Planta	777.128		75%	3,5%
Total Faena	1.036.761		100%	0,87%

De la tabla anterior se observa que la reducción en la huella de carbono del proyecto para la mina Los Bronces solo representará un 0,87% respecto del inventario total al 2018.

A pesar que esto prueba que el cambio tecnológico representa un beneficio para Anglo American al alinearse con el objetivo del Estado de Chile para reducir las emisiones de GEI, se requerirá contar con otras iniciativas para alcanzar el objetivo de reducción de un 30% al 2030.

Hay que destacar que debido a que la contribución de las emisiones provenientes del proceso de mina, solo son la cuarta parte de las emisiones totales de la faena minera, entonces las compañías tendrán que buscar otras formas de lograr mayores reducciones para alcanzar el objetivo del 2030.

8.2. Cálculo del beneficio económico de la reducción de enfermedades respiratorias

La EPA ha desarrollado cálculos para estimar las enfermedades y muertes anticipadas que la población puede experimentar por exposición a concentraciones de emisiones contaminantes por sobre las normas establecidas. Así Holz en el 2000 y luego Barzán, Valenzuela y Vallejos en el 2014, determinaron los costos por este concepto usando las funciones de dosis respuesta:

$$dHi = b * POPi * dA \quad (12)$$

dHi : Cambio en el riesgo de la población a causa del efecto en la salud i

b : Ponderador de la función de daño o pendiente de la función dosis respuesta

POPi : Población en riesgo a causa del efecto i

dA : Cambio en la contaminación atmosférica (bajo estudio)

La fórmula ya reducida a los parámetros bajo estudio queda de la siguiente forma:

$$N = \beta * \left(\Delta \frac{MP 2,5}{100} \right) * TM * PE$$

Donde:

N: es el número de casos anuales producto de la exposición.

β : es un parámetro (ver anexo).

MP: material particulado 2,5 micrones o inferior.

Δ : variación del material particulado

TM: tasa de mortalidad

PE: población expuesta

Estos resultados se basan en las estadísticas de ciudades con más de 1.000.000 de habitantes. Sin embargo, la EPA los cuantifica para los Estados Unidos de la misma forma cuando en el año 2004 anuncia la norma que entraría en vigor para los motores diésel de fuera de carretera que corresponden a los que se usan en equipo minero. Aquí los beneficios estimados por año eran de MUSD 80.000 y los costos asociados estimados de solo MUSD 2.000.¹⁷.

Esta metodología se usará para determinar el impacto del proyecto en la población chilena y los beneficios en la reducción de enfermedades y muertes prematuras producto de la exposición a contaminantes. Los costos hospitalarios se calcularán actualizado la tabla del estudio de Barzán, Valenzuela y Vallejos en el 2014, a través de corrección por inflación y tipo de cambio peso-dólar.

Siguiendo la metodología utilizada en el estudio realizado por Barzán, Valenzuela y Vallejos en el 2014, se actualizarán los datos de la tabla de costos utilizando el IPC para salud índice obtenido del INE y su evolución en el tiempo desde su estimación original por Holz (2000).

¹⁷ EPA420-F-04-032, mayo 2004.

Tabla 14. Costos por admisiones hospitalarias actualizados a 2018. Fuente: Holz (2000) y luego Bazán, Valenzuela y Vallejos (2014). Actualizado con IPC de Salud INE 2018.

	Holz, 1998		Figuroa, 2010		Ajuste al 2014		Ajuste al 2018			
		(Peso 2010)		(Peso 1998)		(Peso 2014)	Peso (2018)	USD		
Admisión Hospitalaria respiratoria	\$	768.453	\$	978.703	\$	1.133.467	\$	1.396.431	\$	2.039
Costos Directos	\$	669.719	\$	854.639	\$	997.791	\$	1.229.279	\$	1.795
Costos indirectos	\$	98.734	\$	124.064	\$	135.676	\$	167.153	\$	244
Hospitalización Cardiovascular	\$	15.426.714	\$	19.683.872	\$	22.969.515	\$	28.298.442	\$	41.312
Costos Directos	\$	15.303.887	\$	19.529.534	\$	22.800.731	\$	28.090.501	\$	41.008
Costos indirectos	\$	122.827	\$	154.338	\$	168.784	\$	207.942	\$	304
Urgencia Respiratoria	\$	35.533	\$	44.765	\$	49.513	\$	61.000	\$	89
Costos Directos	\$	5.913	\$	7.546	\$	8.810	\$	10.854	\$	16
Costos indirectos	\$	29.620	\$	37.219	\$	40.703	\$	50.146	\$	73
Días de Actividad Restringida	\$	7.480	\$	9.399	\$	10.279	\$	12.664	\$	18
Bajas en niños	\$	79.943	\$	100.846	\$	112.181	\$	138.207	\$	202
Costos Directos	\$	20.103	\$	25.654	\$	29.951	\$	36.900	\$	54
Costos indirectos	\$	59.840	\$	75.192	\$	82.230	\$	101.307	\$	148
Bronquitis Aguda	\$	65.816.117	\$	82.704.640	\$	90.462.297	\$	111.449.550	\$	162.700
Costos Directos	\$	174.989	\$	223.306	\$	260.710	\$	321.195	\$	469
Costos indirectos	\$	65.641.128	\$	82.481.334	\$	90.201.587	\$	111.128.355	\$	162.231
Respiratorios Agudos	\$	4.192	\$	5.309	\$	6.004	\$	7.397	\$	11
Costos Directos	\$	2.096	\$	2.675	\$	3.123	\$	3.848	\$	6
Costos indirectos	\$	2.096	\$	2.634	\$	2.881	\$	3.549	\$	5
Asma	\$	79.349	\$	100.293	\$	112.508	\$	138.610	\$	202
Costos Directos	\$	29.982	\$	38.261	\$	44.670	\$	55.033	\$	80
Costos indirectos	\$	49.367	\$	62.032	\$	67.838	\$	83.576	\$	122
							clp/usd			685

Bajo estos criterios, y usando los datos de población del gran Santiago al 2017 (base Censo 2017), se calcula el número de casos potenciales para la población expuesta a concentraciones de MP10 mayores a 33 mg/m³. De acuerdo a lo establecido en el estudio de Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014) se estima que las concentraciones de MP2,5 son equivalentes al 50% de las concentraciones del MP10, ya que estas están contenidas dentro de estas emisiones.

De esta forma se sustenta que las emisiones consideradas para valorizar los impactos en la población por estar expuesta a concentraciones de 33 mg/m³ de MP10 son correctas. La evolución de las concentraciones de MP2,5 en la Región Metropolitana de Santiago se muestran en la Ilustración 26.

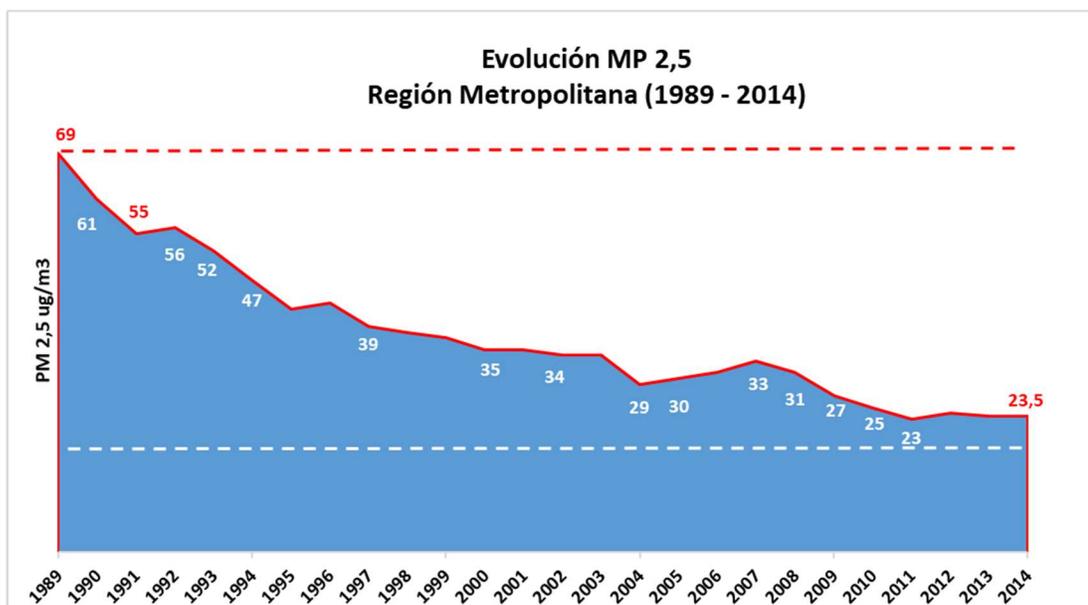


Ilustración 25. Evolución MP2.5 Región Metropolitana (1989 -2014)

Esto se considera significativo y por lo tanto permite pensar que es altamente posible que en un futuro próximo la autoridad, motivada por reducir los gastos médicos producto de la contaminación, implemente normativas que reduzcan las emisiones contaminantes provenientes de fuentes fijas y móviles para la industria minera.

El valor potencial de ahorro que es posible considerar para la Región Metropolitana es de MUS\$ 4491.6 con un costo de implementación de tan solo un 2.5% ó MUS\$ 112.3.

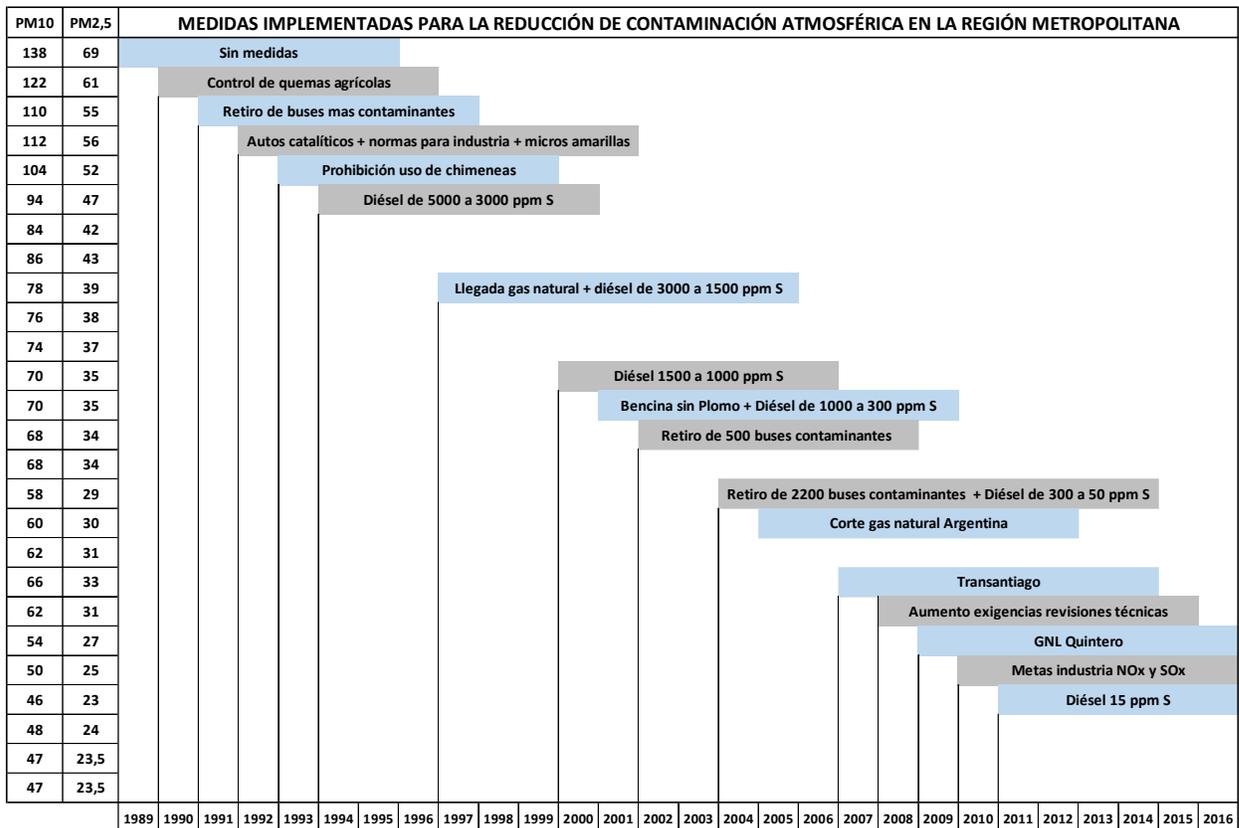


Ilustración 26. Evolución concentración de material particulado en la Región Metropolitana de Santiago para MP 2,5 con límite 20 mg/m3.

Se estima que los beneficios solo en la comuna del Gran Santiago alcanzan los MUS\$ 4491, equivalentes al 5% de los costos estimados por la EPA para EEUU en el año 2004.

Tabla 15. Costos estimados por exposición a contaminantes para la comuna del Gran Santiago, valores actualizados al 2018. Elaboración propia con fuente en estudio de Barzán, Vallejos y Valenzuela 2014.

Caso para el Gran Santiago	N° de Casos	Valor unitario utilizado	Costo Total
Mortalidad Prematura	3.020	\$ 963.892	\$ 2.910.574.079
Adm Hospitalaria Respiratorias	2.328	\$ 2.039	\$ 4.745.697
Adm Hospitalarias Cardiovasculares	1.597	\$ 41.312	\$ 65.993.707
Urgencia Respiratoria	19.322	\$ 89	\$ 1.720.634
Días de Actividad Restringida	1.548.719	\$ 18	\$ 28.631.461
Respiratorias Bajas en Niños	183	\$ 202	\$ 36.931
Bronquitis Crónica	7.325	\$ 162.700	\$ 1.191.786.426
Sintomas Respiratoris Agudos	19.606.721	\$ 11	\$ 211.721.907
Ataques de Asma	377.558	\$ 202	\$ 76.398.834
		\$ 1.170.465	\$ 4.491.609.675

Sin duda alguna los costos a que el Estado de Chile está sometido producto de las enfermedades respiratorias a causa de la contaminación son significativos

y motivarán cambios en la legislación para acelerar la reducción de emisiones contaminantes.

8.3. Estimación del costo social por emisiones contaminantes en la minería chilena

El Estado de Chile ha implementado la Ley N° 20.780¹⁸, que introduce una reforma al sistema de tributación, e incluye, entre otros aspectos, impuestos a las emisiones contaminantes.

Dentro de los artículos incluidos en la ley, se hace hincapié al artículo 8 que establece un impuesto anual que grava las emisiones al aire de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO2) y dióxido de carbono (CO2).

Este artículo se aplica a fuentes móviles y fijas. Donde se establece el impuesto en base a una combinación de la condición de la zona afectada (si es saturada o latente), un coeficiente de costo social de contaminación para los contaminantes antes mencionados y la población expuesta.

$$T_{ij} = CCA_j \times CSC_{pci} \times Pobj \quad (13)$$

Donde,

T_{ij} = la tasa impositiva producto de la contaminación expresada en USD/ton del contaminante i emitido en la zona j .

CCA_j = coeficiente de calidad del aire en la comuna j , donde para la zona saturada será de 1.2 y latente 1.1.

CSC_{pci} = costo social de contaminación per cápita para el contaminante i .

$Pobj$ = población de la comuna j de acuerdo a registro del INE.

Si consideramos que las flotas de transporte de mina están circunscritas a un radio fijo y no salen de él, entonces es válido considerarlas como una fuente de emisión fija. Esto a pesar que los camiones recorren distancias medias de 6 kilómetros en promedio para el caso de Los Bronces.

¹⁸ Ley N° 20.780. Reforma tributaria, Sistema de Tributación de la Renta; Ingresos No Constitutivos de Renta; Impuesto Emisiones al Aire de Material Particulado; Adulteración Maliciosa de Productos o Inventarios; D.L. no. 824

Otro aspecto relevante a considerar es que las emisiones a gravar solo corresponden a las que se generan entre el caso base y el caso con emisiones reducidas por las tecnologías de bajas emisiones. De esta forma se puede valorizar el costo privado que el no implementar la tecnología tendría para la compañía minera.

La ley también establece el costo social por contaminante específico para las fuentes fijas y que se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 16. Costo social de contaminación en Chile por tipo de contaminante atmosférico. Fuente: Ley N° 20.780

Contaminante emitido		usd/ton
Material Particulado	MP	0,9
Dióxido de Azufre	SO ₂	0,01
Óxidos de Nitrógeno	NO _x	0,025
Dióxido de Carbono	CO ₂	5

En el caso de las fuentes de emisiones fijas, los impactos se miden en base a la afectación poblacional, lo que trae el problema de determinar la cantidad de población que se estima será afectada por las emisiones contaminantes.

Si consideramos que la mayor parte de las minas en Chile se ubican en la pre cordillera o en la cordillera misma, es decir, en altura, donde los flujos de masas de aire no necesariamente bajan por los valles, podría ser cuestionable el real impacto en las comunidades cercanas a ellas. Esto se debe a que los comportamientos de las masas de aire deben estudiarse caso a caso y dependerán de las condiciones locales. Sin perjuicio de lo anterior, y solo para efectos de este estudio, se considerarán comunidades relevantes, usando el criterio de ciudades de más de 100.000 habitantes como el parámetro de afectación.

Se propone, para el caso de estudio, que la tasa de impuesto por no haber reducido las emisiones, en el caso que se imponga una legislación que grave las emisiones contaminantes en la minería, solo corresponderá a la brecha entre las emisiones actuales y las emisiones con tecnología de bajas emisiones. Así, si se consideran las emisiones de las zonas norte y centro del

país, en relación con las brechas en emisiones para material particulado y para óxidos de nitrógeno, se obtienen los resultados de la siguiente tabla:

Tabla 17. Costo social por emisiones contaminantes de material particulado y NOx en la minería chilena zona norte y zona centro

Costo Social por emisiones contaminantes Minería Zona Norte			Costo Social por emisiones contaminantes Minería Zona Centro		
Tasa de Impuesto PM	MUSD/año	537,5	Tasa de Impuesto PM	MUSD/año	62,1
Tasa de Impuesto NOx	MUSD/año	209,0	Tasa de Impuesto NOx	MUSD/año	38,7

Los impuestos verdes estimados alcanzan un total de MUSD 847,3 para la gran minería del cobre, considerando que las flotas mineras se homologan a fuentes fijas y los costos se proyectan basados en la ley de emisiones para esas fuentes.

En el caso de Los Bronces la estimación solo se hace considerando la flota de transporte, en particular la flota Komatsu K930E. Con esto se determina el costo social de la contaminación no reducida para la faena que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 18. Costo social estimado para Los Bronces por emisiones contaminantes por no contar con tecnología de bajas emisiones de motores diésel.

Costo Social por emisiones contaminantes Los Bronces		
Tasa de Impuesto PM	MUSD/año	12,7
Tasa de Impuesto NOx	MUSD/año	4,0

Finalmente, para determinar el costo privado que los potenciales impuestos verdes significarían para la faena, se calcula el flujo de gastos que el plan de implementación tendría versus el flujo de impuestos en el mismo periodo. En

la medida que se reducen las emisiones se reducen de forma proporcional los impuestos, como se puede observar en el siguiente gráfico:

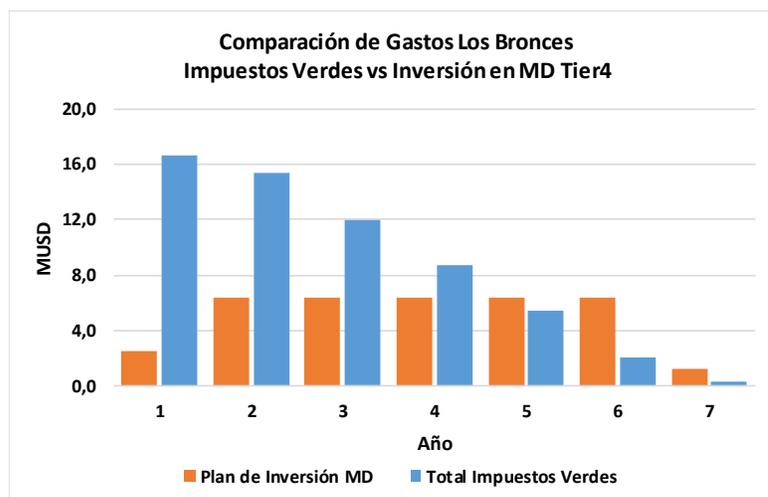


Ilustración 27. Comparación de gastos estimados en impuestos verdes por emisiones contaminantes versus el plan de inversiones de motores diésel Tier4.

El resultado muestra que, para un período de siete años, el gasto total en motores diésel T4 sería de MUSD 35,4. Para el mismo período, la no realización del cambio tecnológico implicará el pago de MUSD 60,6¹⁹ en impuestos verdes.

Se concluye, entonces, que el costo privado por no implementar el cambio tecnológico sería la diferencia entre los impuestos potenciales calculados y la inversión en motores de bajas emisiones, lo que resulta en MUSD 25,1 para un período de siete años.

De esta forma resulta en un gran incentivo para la mina realizar el cambio de tecnología pensando en que, frente a un impuesto por emisiones contaminantes y, considerado las variables establecidas en la ley para fuentes fijas, existiría un beneficio potencial de MUSD 25,1 de ahorro.

9. Mapa de Stakeholders del proyecto de cambio tecnológico

Un cambio tecnológico como el de este proyecto conlleva el problema de la resistencia al cambio. Es necesario poder identificar a los *stakeholders* clave para determinar cuáles son las necesidades, dudas y preguntas que tendrán que ser resueltas para poder lograr su apoyo. Por la naturaleza del proyecto,

¹⁹ El cálculo se realiza considerando el valor del dinero sin escalamientos ni correcciones por inflación o tasa de cambio peso dólar.

la forma en que se debería enfrentar la gestión de las partes interesadas, es haciendo que cada una de ellas comprenda lo que involucra, el impacto directo que tiene y el beneficio que trae consigo.

Se han identificado los actores clave para este proyecto, los que se describen a continuación:

- Presidencia Ejecutiva: Su compromiso con el proyecto está dado por la visión de la compañía de alcanzar una reducción en las emisiones de GEI de 30% al 2030. Sin embargo, esto tiene que estar alineado con el resultado del negocio y la forma de lograr apoyo y financiamiento es mostrando que existe un beneficio realizable para la organización y los accionistas.

- Finanzas: Esta es un área clave. Es aquí donde se realizará la validación económica y saldrán las cuentas de gastos para poder ir implementando los cambios en forma gradual. Esta unidad requerirá entender de forma global las implicancias del proyecto para dar su visto bueno para realizar la inversión.

- Operaciones: Su interés principal es que el desempeño de los camiones no se vea afectado por este cambio. Esto se traduce en que la flota esté disponible para lograr el objetivo de producción. Ellos tienen que estar informados, pero su involucramiento es solo parcial.

- Mantenimiento: Esta es un área crítica para el éxito del proyecto. Un cambio de tecnología como el que se plantea siempre trae desafíos de aprendizaje, lo que se traduce en problemas y efectos en el desempeño de los equipos. Su resultado de gestión es afectado en forma directa y esto es un freno para querer optar por el camino del cambio. Este grupo necesita comunicación y apoyo constante para reducir los tiempos de resolución de problemas. Habrá que colocar especial énfasis en la gestión con la primera línea, para capturar el sentir que ellos tienen de este proyecto. El éxito o fracaso va a pasar en gran medida por ellos.

- Permisos y Sustentabilidad: el área de permisos y sustentabilidad podrá obtener beneficios directos de este proyecto. En su interacción con las autoridades podrá –o no, dependiendo de las estrategias de la compañía– dar visibilidad a este proyecto que muestra el compromiso con el medio ambiente y las personas.

- Proveedores: Los proveedores de la tecnología estarán muy interesados en que sus soluciones sean aceptadas e implementadas en las faenas mineras. Al no ser una exigencia legal, un caso de éxito representa un buen medio para hacer *marketing* de ella y en la industria el *benchmarking* es una herramienta de uso común. Ante buenos resultados habrá otras compañías que querrán replicar el cambio. Bajo esta perspectiva los proveedores estarán muy

interesados en apoyar el cambio y evitar que la curva de aprendizaje sea demasiado larga y que tenga un impacto negativo en la faena.

- Cadena de Abastecimiento: Como una parte importante del proceso de manteamiento, al incorporar un cambio de tecnología ellos tendrán que viabilizar la operación del proceso logístico, donde se incluyan partes y piezas nuevas en los convenios de bodega, negociar sistemas de concesión y soporte a precios preferenciales para que el proyecto no tenga demoras asociadas a esto. Aquí se abre un frente de trabajo bien específico y que tiene relación con la gestión de las garantías. Es factible pensar que ante dificultades el proveedor no tendrá inconvenientes en responder a su costo con partes, piezas y mano de obra, sin embargo, esto tiene que tener un seguimiento estricto para poder medir el compromiso y los costos.

Los *stakeholders* identificados solo corresponden a la compañía, es decir, son del tipo interno. Esto se debe a que este proyecto, al no ser obligatorio, tendrá una gestión hacia afuera que dependerá del impacto que pueda tener para la compañía y que será evaluado en su mérito cuando corresponda.

Como conclusión de la revisión del mapa de partes interesadas (internas), al presentar un caso de cambio tecnológico con sustento económico y alineado con la visión de la compañía, no se anticipan mayores dificultades para su implementación.

10. Análisis de riesgo del cambio tecnológico

Como se ha mencionado con anterioridad, este proyecto tiene como objetivo primario el anticiparse a un cambio de legislación que obligue a la minería a implementar tecnologías de bajas emisiones y así evitar enfrentarse en un futuro a una restricción de la operación y/o al pago multas por no lograr las metas impuestas.

Por otra parte, se plantea el desafío de lograr que la brecha entre los costos de la nueva tecnología y el caso base sean los menores posibles para que la decisión de implementación sea estratégica.

Es posible que, si el VAN resultare negativo en un proyecto de este tipo, no se cuente con el apoyo de los niveles ejecutivos altos de la compañía para realizar la inversión. Sin embargo, en el caso en estudio, se ha podido observar que los valores del VAN resultan positivos, por lo que la implementación tecnológica únicamente se encuentra sujeta al interés que en ella tenga la alta gerencia.

10.1. Bajo desempeño de la tecnología

Del análisis PESTAL se determinó que entre los aspectos con mayor nivel de incertidumbre están los relacionados con la tecnología y su desempeño esperado. Es natural esperar problemas en un principio debido a que esta tecnología está en un nivel de madurez bajo y se proyectan problemas en la medida que estos motores comiencen a acumular horas de funcionamiento al ser esta tecnología nueva. La masa crítica de motores en operación a nivel mundial es baja, por lo que la historia de fallas se irá desarrollando en la medida que estos motores vayan acumulando horas de operación. Los fabricantes introducirán cambios en sus diseños y esto significará reemplazar partes y piezas que no se requieren reemplazar en motores maduros y que podrían tener un impacto negativo en el desempeño global de los camiones de transporte de mineral.

Una estrategia razonable que permitiría minimizar estos riesgos es la implementación de un programa de inspecciones preventivas más estricto que permita identificar en forma temprana señales de inicio de fallas mucho antes que estas se transformen en problemas. Esta información se debe entregar a los representantes locales y las fábricas para que, en base al análisis de los datos, puedan generar acciones para corregir estos problemas. Esto incluso podría significar el surgimiento de cambios en los diseños para eliminar las fallas y aumentar la confiabilidad del producto.

Este proceso es conocido en la industria como eliminación de defectos, donde grupos de expertos multidisciplinarios combinan su experiencia y trabajo para dar una solución rápida y definitiva a cada uno de ellos.

Los sistemas que son distintos en los motores de bajas emisiones son los que se encargan de reducir las emisiones. Estos sistemas son los que gestionan la inyección de alta presión y la recirculación de gases de escape para la tecnología seleccionada. Aquí es razonable colocar los esfuerzos para ir entendiendo cómo se pueden ver afectados por las condiciones operacionales del sitio. Así se puede determinar el impacto que estas tendrán en su vida útil.

10.2. Falta de recursos para invertir

Uno de los riesgos más relevantes que enfrenta el proyecto es la falta de capital para realizar el cambio tecnológico. Ya que en la actualidad no existe una motivación forzada por una regulación, es posible que las compañías mineras mantengan el foco en la optimización del negocio, reduciendo los costos operacionales y bajando los gastos de capital.

En la medida que la diferencia de costos entre la nueva tecnología y la que se está reemplazando sean marginales, se facilitará la decisión de implementar el cambio, manteniendo la operación del negocio como en el caso base.

Los proveedores locales de motores pasan a tener un rol principal al poder apalancarse con las fábricas para lograr incentivos de precios que les permitan colocar sus productos en las operaciones mineras. Esto será una forma de lograr que los nuevos productos de tecnologías limpias puedan ganar participación de mercado y se logre reemplazar las tecnologías más antiguas.

Del caso de negocio se ha podido establecer que el cambio de tecnología no representa un mayor costo financiero ni operacional, si se considera que no habrá mayores problemas de confiabilidad. En la comparación del caso base a igualdad de desempeños de disponibilidad y costos de inversión, solo la resistencia al cambio es la barrera que se debe vencer, algo esperable en todo proyecto que se proponen un cambio significativo.

10.3. Falta de apoyo para implementar el cambio tecnológico

La tecnología en sí misma no es suficiente para lograr un impacto en el largo plazo. Proyectos de cambios importantes fracasan por falta de soporte de las organizaciones. Para el caso de los motores diésel, la organización de mantenimiento de la mina resulta clave para lograr un desempeño exitoso.

Si los supervisores de línea y los mecánicos de motores no conocen la tecnología y no apoyan el cambio, en el corto plazo, cuando los motores acumulen horas de operación, se presentarán fallas y problemas que, de no ser resueltos, podrían hacer fracasar la implementación.

Es por esto que la comunicación permanente y frecuente con estos niveles de la organización permitirán ir capturando las preocupaciones y necesidades que la tecnología les presenta. Así podrán ir corrigiendo las desviaciones antes que estas representen problemas mayores.

10.4. Falta de soporte al producto (fábrica y representante local)

Considerando lo señalado en el punto anterior, para enfrentar los problemas iniciales de la nueva tecnología, es necesario que la fábrica y sus ingenieros estén presentes para conseguir aprendizajes de fallas y problemas incipientes. En la medida que los problemas se vayan presentando, también surgirán soluciones y estos cambios serán integrados en los procesos de fabricación, mejorando el producto.

Un riesgo que se puede presentar es que la velocidad de reacción de la fábrica frente a las fallas sea muy baja, haciendo que el impacto en la disponibilidad de la flota de transporte afecte en forma negativa al negocio.

El representante local tiene que ser el puente entre la faena y la fábrica, logrando que la información fluya en forma ágil desde y hacia la fábrica. Esta agilidad hará que los impactos sean minimizados cuando las fallas se presenten.

Dentro de la estrategia de implementación, reuniones de seguimiento semanal serán necesarias para mantener un control del proyecto, de modo que sea posible capturar en forma temprana los problemas que la fábrica tendrá que ir resolviendo.

11. Medidas de mitigación

Como se ha discutido en los capítulos anteriores, los cambios tecnológicos conllevan posibles problemas iniciales y de puesta en marcha que desafiarán la continuidad del proyecto.

Estando en conocimiento de esto, medidas de mitigación para los diferentes potenciales problemas se tienen que implementar con el fin de reducir su impacto en el negocio.

De acuerdo con las normas ISO 55000 de gestión de activos, los problemas se pueden clasificar en distintos niveles de dificultad, de solución e impacto en disponibilidad de los equipos, como se puede ver a continuación:

a) Impacto menor: Aquellos que son de solución rápida y solo implican detenciones de algunas horas reduciendo los indicadores de confiabilidad, a saber, el tiempo medio entre fallas (MTBF por sus siglas en inglés). Para poder resolver estas fallas se requiere de repuestos suficientes y personal capacitado en faena.

b) Impacto medio: Considera aquellas fallas que requerirán de una evaluación y un diagnóstico más exhaustivo y cuya solución tomará más de un turno de 12 horas. Al igual que en el caso de las fallas de impacto menor, con los repuestos adecuados, técnicos competentes y herramientas de diagnóstico adecuadas (computadores y contacto con expertos) se deberían resolver sin mayores dificultades.

c) Impacto mayor: Son todas aquellas fallas que llevan a tener que retirar el motor diésel del equipo, generando una detención del equipo por 5 o más días. Dada la naturaleza del impacto, será necesario hacer análisis muy detallados de este tipo de fallas, contando en terreno con técnicos de la fábrica. Es posible

que las medidas de corrección también tengan que ser implementadas en el resto de las unidades que se encuentren operando.

Con el propósito de poder lograr una anticipación a las fallas, minimizando su impacto, es que serán necesarias otras medidas de mitigación, las que se describen a continuación.

11.1. Programa de inspecciones preventivas

Un programa de revisión de todos los elementos y sistemas críticos deberá ser implementado para capturar de forma preventiva y proactiva cualquier indicio de falla.

El desarrollo de un taller multidisciplinario con presencia de la fábrica y los representantes locales permitirá identificar qué sistemas y elementos son críticos y merecen ser inspeccionados en forma regular.

El proceso de inspecciones también permitirá que los técnicos del sitio puedan familiarizarse con la nueva tecnología como parte del proceso de aprendizaje.

11.2. Componentes de respaldo

Nunca se espera tener fallas mayores que impliquen tener que reemplazar de forma temprana un componente de alto valor como es un motor diésel. Sin embargo, es clave tener componentes de respaldo para minimizar el impacto en el negocio desde el punto de vista de la disponibilidad de los equipos.

En paralelo, al tomar el riesgo de implementar nuevas tecnologías, es razonable negociar con la fábrica y los representantes locales que a costo de ellos estén disponibles los componentes de respaldo. De no ser así, el costo de la falla y el riesgo del cambio tecnológico estará siempre en el lado de la compañía minera, siendo que lo razonable es que sea compartido.

11.3. Plan de mitigación

Debido a que las nuevas tecnologías de motores diésel de bajas emisiones traen sistemas de control de combustión y post tratamiento de gases de escapes, que difirieren de las tecnologías convencionales, es que se necesita un programa de capacitación para los mantenedores de faena.

Así mismo los repuestos y las necesidades que tendrán estos motores en el futuro durante su operación será algo que se podrá establecer solamente cuando se hayan implementado las primeras unidades y se acumulen horas de operación.

Es por estos motivos que la implementación sugerida de un plan piloto a escala reducida se presenta como una alternativa razonable para reducir los riesgos y minimizar el impacto en el negocio en caso de que surgieran problemas de confiabilidad y disponibilidad.

Las etapas que se proponen para esta etapa piloto son:

a) Determinar el número óptimo de unidades a ser reemplazadas, lo que ya se ha realizado, recomendado que sean 4 unidades en el primer año.

b) Acordar con la fábrica y los representantes del producto en Chile los requerimientos mínimos de componentes, repuestos y herramientas especiales necesarios para dar servicio de mantención y reparación a estos motores.

c) Realizar cursos de capacitación al 100% de los mantenedores de motor diésel para asegurar que tengan el conocimiento mínimo necesario y se involucren e interesen en el proyecto.

d) Establecer un periodo para evaluar el desempeño de los nuevos motores antes de realizar un reemplazo masivo. Se recomienda que esto no sea antes de un año o 5000 horas operacionales.

e) Contar con motores de respaldo en el sitio o en Santiago para poder responder si se presentan fallas prematuras catastróficas que demanden el reemplazo urgente del componente.

12. Condiciones de borde mínimo para ejecutar el cambio tecnológico

Las tecnologías de bajas emisiones requieren necesariamente de combustible con el grado de calidad máximo donde los menores niveles de azufre resultan un factor clave para reducir la generación de ácidos débiles que generan daños en la salud de las personas y deterioran los elementos mecánicos de los motores.

Hoy la disponibilidad de este tipo de combustible existe en Chile al igual que en los países desarrollados. Se cuenta ya con diésel con un muy bajo nivel de contenido de azufre, con una concentración máxima de 15 ppm.

La gestión del cambio tiene que considerar además dos líneas de trabajo: i) seguimiento de los indicadores de desempeño proactivos, es decir, aquellos que permiten alcanzar el desempeño futuro esperado; ii) reuniones de seguimiento de los indicadores de desempeño reactivos que son producto del

resultado de los otros indicadores (disponibilidad, confiabilidad-mantenibilidad y costos).

Estos requerirán de reuniones mensuales para monitorear el avance de cada uno de ellos y poder establecer medidas que permitan corregir cualquier desviación que pueda presentarse en el proyecto.

Un aspecto fundamental del proyecto es mantener a la fábrica involucrada. La masa crítica de motores de este tipo es baja a nivel mundial, por lo que es esperable que la fábrica introduzca modificaciones en la medida que se vayan acumulando horas de trabajo y aparezcan problemas. Esto es parte del desarrollo normal cuando se introducen nuevos productos al mercado que presentan una curva de estabilización y aprendizaje y que difieren de una mina a otra solo por las diferencias de la aplicación.

Una forma de poder ir retribuyendo a la fábrica con información clave respecto de la evolución y desempeño de los motores es mediante inspecciones y evaluaciones frecuentes. Aquí los sistemas de manejo de gases de escapes, válvulas, enfriadores y turbo cargadores será clave. Se les deben solicitar a los fabricantes los protocolos de inspección que permitan cubrir estos aspectos y sean una forma confiable para anticipar potenciales problemas.

Como se ha mostrado anteriormente, el plan de implementación propuesto considera instalar 4 unidades y luego 10 unidades por año hasta completar los 56 camiones Komatsu K930E con motores Tier4. De esta forma será posible usar los motores de tecnología antigua hasta el fin de su vida útil, sin elevar el costo de mina por dejar horas de motor sin utilizar.

Esta secuencia permitirá que en un plazo de siete años la flota de camiones Komatsu K930E de Los Bronces haya sido actualizada con motores de bajas emisiones en su totalidad, sin haber desperdiciado ninguna hora de motor de los modelos de tecnología antigua.

Como se mencionó en capítulos previos, debido a que un cambio de tecnología de esta envergadura no puede ser implementado en un período de tiempo acotado, un cambio de legislación rígido tendría un impacto real en el negocio y es por esta razón que se recomienda iniciar el cambio en el más breve plazo posible.

Por otro lado, pensando en que, contrario a lo que podría esperarse, en un futuro no se produjera un cambio en la legislación, el proyecto resulta aconsejable de todas maneras, puesto que se ha visto que el cambio tecnológico tiene un impacto positivo al reducir las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Es menester recordar que la estrategia de Anglo American incluye, entre sus desafíos, al cambio climático y la reducción de las

emisiones de gases de efecto invernadero. Como este proyecto logra contribuir a este objetivo, solo por esta razón debería ser implementado.

La responsabilidad social, que es central para Anglo American, busca mejorar la vida de las comunidades cercanas a sus operaciones y sus trabajadores. Este proyecto es una muestra más de este compromiso.

Tomando ahora en consideración que el proyecto está alineado con el plan estratégico de la compañía, contar con un plan de comunicaciones interno será necesario para ir concientizando a los trabajadores de los cambios que se realizarán, para ir promoviendo y reforzando el compromiso de toda la empresa con el medio ambiente.

13. Conclusión

El problema del cambio climático y la contaminación atmosférica se ha transformado en un tema central a nivel mundial, por lo que el Estado de Chile, las empresas privadas y las comunidades se ven afectadas.

Esto está motivando un cambio en las regulaciones chilenas respecto de las emisiones contaminantes que afectan a las compañías mineras. Tanto es así que para la maquinaria diésel fuera de carretera ya han entrado en vigor regulaciones hasta potencias de 560kW o 420 HP.

Resulta, por lo tanto, lógico pensar que el Estado próximamente implementará restricciones de emisiones contaminantes para los motores diésel de los equipos mineros de alta potencia fuera de carretera.

Se ha visto en los estudios realizados con anterioridad a este trabajo, que los mayores contaminantes son el material particulado (MP10 y MP2,5) y los óxidos de nitrógeno (NOx), razón por la cual fueron elegidos para el caso de estudio.

Al comparar las emisiones contaminantes estimadas para la gran minería del cobre, para las flotas de camiones de más de 300 toneladas, de acuerdo con la metodología planteada, se obtiene que las emisiones de MP10 y MP2,5 son 23.244 ton/año; un 19% de las emisiones de la Región Metropolitana inventario 2014. En el caso de las emisiones de NOx, las estimaciones para los camiones son 43.346 (ton/año); un 7% más que las emisiones de la Región Metropolitana al año 2014. Esta comparación valida que las fuentes de emisiones móviles de la gran minería del cobre son relevantes.

Asimismo, el costo de reemplazo de los motores Tier1 por Tier4 para los camiones de extracción marca Komatsu 930E resulta positivo para el VAN y TIR, con MUSD 3,8 para el VAN y una TIR del 169% cuando se evalúa el caso completo. Bajo este escenario se recomienda la implementación del cambio tecnológico, debido a que no representa ningún costo adicional para la operación minera, sino un beneficio directo en costos de operación por menor consumo de combustible.

Al simular el cambio de tecnología, la proyección de reducción de la huella de carbono de la flota Komatsu K930E es de 4.6% anual, esto muestra que el cambio de tecnología de motor diésel de Tier1 a Tier4 reduce las emisiones de CO2 equivalentes.

La reducción en la huella de carbono del proyecto completo para la mina Los Bronces permitirá una reducción del 0,87% respecto del inventario total al 2018. A pesar que esto prueba que el cambio tecnológico sí representa un beneficio para Anglo American para reducir las emisiones de GEI, se requerirá

también de esfuerzos en otros sectores para alcanzar el objetivo de reducción de un 30% al 2030.

Debido a que para las compañías las relaciones con las comunidades son sumamente importantes, proyectos que tienen un impacto positivo en este sentido, como sería el del cambio tecnológico, deben considerarse bajo cualquier escenario económico. Son prueba del compromiso irrestricto de la compañía con el cambio climático y la reducción del impacto al medio ambiente.

La metodología propuesta para la estimación de los impuestos verdes por emisiones contaminantes usada en este estudio, para la gran minería, alcanzan un total de MUSD 847,3 lo que se considera relevante para la industria. Esto fue considerando que las emisiones de las flotas mineras se homologan a las emisiones de fuentes fijas y los costos por cada tonelada de contaminante emitido se proyectan basados en la ley de emisiones para esas fuentes.

Al comparar los impuestos verdes potenciales por emisiones que pagaría la gran minería contra el gasto que al Estado le significan (para el Gran Santiago) las emisiones contaminantes, se obtiene que estos representan un 19% del gasto total por enfermedades respiratorias.

Cuando se compara la inversión del caso de negocio estudiado para el caso de Los Bronces (MUSD 35,4) con los impuestos verdes estimados (si hubiese legislación aplicable) de MUSD 60,1 se obtiene una diferencia positiva para la implementación del proyecto de MUSD 25,1. Esto representa un ratio de 1.7 veces el costo de inversión versus el costo por impuestos verdes a favor del proyecto de cambio tecnológico de motores diésel de bajas emisiones.

Actualmente el congreso está estudiando un proyecto de ley que moderniza la legislación tributaria en lo relativo a los impuestos verdes, los aspectos que se están revisando podrían tener un impacto en el pago de estos impuestos para las compañías mineras. Los artículos en discusión se refieren al tipo de fuente, donde se elimina el concepto de fuente fija y la potencia de motores de combustión interna de hasta 500kW. Esto es indicativo que es posible que los pagos de impuestos por emisiones contaminantes para las compañías mineras estén más cerca de ser una realidad.

El real impacto de las emisiones contaminantes que la minería tiene en los centros urbanos no se ha estudiado aún. Las emisiones generadas por los procesos de transporte de mineral, en tanto, deben ser consideradas dentro de los planes de sustentabilidad de las compañías.

Es posible que un gran salto en la reducción de emisiones se genere, en el futuro, con la incorporación de vehículos de propulsión 100% eléctrica, ya sea

a baterías o con celdas de combustible a hidrógeno. Para que esta configuración sea 100% renovable, tendrá que estar abastecida por centrales de generación solar y eólica, además de sistemas de almacenamiento de energía que cubran los periodos sin generación, formando una red de generación sustentable.

Las tecnologías de bajas emisiones representan, en la actualidad, solo un paso para la reducción de emisiones contaminantes, resultando en una pequeña contribución para frenar el cambio climático, como se ha visto en el presente estudio. Se sugiere, por lo tanto, aplicar este cambio tecnológico, ya que es factible realizarlo a la brevedad, y continuar estudiando alternativas que permita conseguir una reducción de las emisiones contaminantes de los procesos productivos de una faena minera.

14. Bibliografía

1. Organización Mundial de la Salud, OMS, Calidad de aire y salud (2018). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
2. Anglo American-Chile, Estrategia de Sustentabilidad, Pilares Globales de Sustentabilidad. <https://www.angloamerican-chile.cl/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/document/estrategia-de-sustentabilidad.pdf>
3. Comisión Chilena del Cobre, COCHILCO, Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2016. Diciembre 2017.
4. Dirección General de Aguas Chile, DGA, Atlas del Agua 2016. <http://www.dga.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf>
5. Comisión Chilena del Cobre, COCHILCO, Proyección del consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Santiago 2017.
6. ENCARE, Estudio *Benchmarking* Gestión Minera. Primer Semestre 2017. Indicadores Mina Rajo.
7. Universidad de Chile. Facultad de Economía y Negocios. Estimando los Costos en la Salud de la contaminación por Material Particulado en Chile. Santiago, 2014.
8. United States, Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards, EPA-420-B-16-022, March 2016.
9. Cummins Power Generation. The Impact of Tier4 Emission Regulation on the Power Generation Industry. Aniruddahe Natekar and Matthew Menzel. Tier4 Regulations #9019, www.cumminspower.com.
10. Understanding Tier4 interim and Tier4 final EPA regulations for generator set applications. Christine Ueno, regulatory compliance manager. MTU Onsite Energy. Mankato, Minnesota 2010. www.mtu-online.com
11. DICTUC SA, Análisis y evaluación del impacto económico y social del plan de descontaminación de la Región Metropolitana (AGIES). División de Medio Ambiente. Diciembre de 2008.

12. Figueroa, Gomez-Lobo y Jorquera (2014), "Los Impactos del Transantiago en la contaminación atmosférica de Santiago: una estimación econométrica".
13. Ministerio del Medio Ambiente, Plan Nacional de Cambio Climático 2017-2022. División de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente.
14. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago Respira. Marcelo Mena, Propuesta de Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica, Región Metropolitana. www.santiagorespira.gob.cl.
15. Holz, J. (2000), "Estimación de Costos Unitarios en Morbilidad y Mortalidad y su aplicación para calcular los beneficios del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana", Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Chile, Santiago.
16. Ministerio de Salud, Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS), Reporte de egresos hospitalarios. <http://www.deis.cl/estadisticas-egresoshospitalarios/>
17. Ley N° 20.780. Reforma tributaria, Sistema de Tributación de la Renta; Ingresos No Constitutivos de Renta; Impuesto Emisiones al Aire de Material Particulado; Adulteración Maliciosa de Productos o Inventarios; D.L. no. 824

15. Anexos

15.1. Formación de los NOx

Con el nombre de óxidos de nitrógeno se designa a un grupo de compuestos químicos gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno. Los más importantes son el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nítrico (NO). Ambos están considerados como contaminantes del aire y se denominan habitualmente NOx.

Existen varias fuentes de generación de NOx, pero dentro de las que más impactan el medio ambiente se encuentran las provenientes del escape de vehículos motorizados, sobre todo de los que funcionan con diésel.

Los NOx se forman en los procesos de combustión a temperaturas por sobre los 2500° Fahrenheit y en presencia de mezclas pobres (con exceso de oxígeno). Los compuestos NO₂ y NO constituyen los dos óxidos de nitrógeno más importantes desde el punto de vista toxicológico, siendo el primero de ellos el más nocivo. El mecanismo de formación de NO a partir de nitrógeno atmosférico ha sido muy estudiado, y en general se acepta que las reacciones que gobiernan una combustión cercana a la mezcla estequiométrica son las que se presentan a continuación²⁰:



Así, el dióxido de nitrógeno se oxida fácilmente en el vapor de agua de las nubes para formar ácido nítrico (HNO₃), uno de los principales constituyentes de la lluvia ácida. Este ácido fuerte, de gran poder oxidante y altamente corrosivo, también puede formarse en fase gaseosa debido a la reacción del NO₂ con el radical hidroxilo (OH).



En cuanto al NO, una vez liberado a la atmósfera es oxidado rápidamente por el ozono para generar NO₂, que a su vez interviene en el ciclo de formación

²⁰ Nótese que las reacciones descritas en las ecuaciones 1, 2 y 3, corresponden tanto a formación como a destrucción de NO.

del ozono troposférico, constituyente esencial del smog fotoquímico. Este smog es típico de las grandes urbes que no tienen buena cantidad de vientos, como es el caso de Santiago.

El óxido nitroso es un gas con un potente efecto invernadero, siendo considerado, a pesar de su baja concentración en la atmósfera, el tercer gas que más contribuye al calentamiento global (por detrás del dióxido de carbono y el metano). Ello se debe a su largo tiempo de residencia en la atmósfera y a su gran capacidad para absorber energía (unas 300 veces superior a la del CO₂).

Tabla 19. Factores de conversión para distintos tipos de combustible a emisiones de CO₂. Fuente: Informe huella de carbono institucional. Universidad de Antofagasta y CREA.

Combustible		Factor de Conversión				
		kg CO ₂ /TJ	kg CO ₂ /m ³	kg CO ₂ /ton	PCI kcal/kg	Densidad kg/m ³
Gasolina para vehículos		69300	2241	3070	10583	730
Kerosene de aviación		71500	2554	3153	10536	810
Diésel		74100	2676	3186	10273	840
Petróleo combustible	Petróleo combustible n° 5	77400	2899	3127	9652	927
	Petróleo combustible n° 6	77400	2955	3127	9652	945
	Petróleo combustible IFO 180	77400	2927	3127	9652	936
Gas licuados de petróleo		63100	1642	2985	11300	550
Gas natural		56100	1.97	-	8407	-
Carbón bituminoso		94600	-	2441	6164	-
Carbón sub-bituminoso		96100	-	1816	4515	-

Tabla 20. Población chilena en ciudades con más de 100.000 habitantes.
Fuente: INE 2016.

Ciudad	N° Habitantes 2014	N° Habitantes 2016
Iquique	183.997	199.629
Antofagasta	346.126	384.065
Calama	138.109	179.200
Copiapo	158.438	175.524
La Serena	210.299	221.021
Coquimbo	202.287	236.799
Ovalle	104.855	121.868
Valparaíso	292.510	295.731
Viña de Mar	330.110	325.195
Quilpue	150.723	170.853
Villa Alemana	118.886	141.729
Rancagua	232.538	234.048
Talca	200.461	234.760
Curicó	140.353	145.344
Concepción	214.234	229.118
Coronel	108.855	116.256
San Pedro de la Paz	121.655	135.093
Talcahuano	150.881	178.500
Los Angeles	187.017	196.454
Chillán	175.505	180.348
Temuco	268.720	290.234
Puerto Montt	228.118	248.230
Osorno	153.797	157.855
Punta Arenas	131.067	130.738
Gran Santiago	6.683.852	7.399.042
Valdivia	154.097	169.735
Arica	210.920	239.710
	11.598.410	12.737.079

Tabla 21. Cálculo de población afectada por exposición a contaminación atmosférica MP10 por sobre 33 $\mu\text{m}/\text{m}^3$. Metodología desarrollada por Holz (2000) y actualizada por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014).

Ciudades de Chile con población mayor a 100.000 hab.	Parámetro Beta utilizado por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014)			Población Afectada	Mayor exposición	Población Expuesta
	Beta	Nivel Bajo	Nivel Medio			
Adm Hospitalaria Respiratorias	0,000788	0,000673	0,000588	4.007	33	12.737.079
Adm Hospitalarias Cardiovasculares	0,00048	0,00064	0,00079	2.750	33	12.737.079
Días de Actividad Restringida	0,0097	0,0168	0,0238	3.751.628	33	11.720.175
Respiratorias Bajas en Niños	0,0007	0,0011	0,0016	3.008	33	3.581.910
Bronquitis Crónica	0,00003	0,000061	0,000093	12.610	33	12.737.079
Síntomas Respiratorias Agudos	0,0803	0,1679		33.751.986	33	12.737.079
Ataques de Asma	0,0329	0,0584	0,1971	649.946	33	12.737.079

Tabla 22. Cálculo de población afectada por exposición a contaminación atmosférica MP10 por sobre 33 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ en el Gran Santiago. Metodología

desarrollada por Holz (2000) y actualizada por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014).

Gran Santiago	Parámetro Beta utilizado por Barzán, Valenzuela y Vallejos (2014)			Población Afectada	Mayor exposición	Población Expuesta
	Beta	Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto	N	dPM10
Adm Hospitalarias Respiratorias	0,000788	0,000673	0,000588	2.328	33	7.399.042
Adm Hospitalarias Cardiovasculares	0,00048	0,00064	0,00079	1.597	33	7.399.042
Urgencia Respiratoria	0,0073284	0,0062589	0,0054684	19.322	33	7.399.042
Días de Actividad Restringida	0,0097	0,0168	0,0238	1.548.719	33	4.838.234
Respiratorias Bajas en Niños	0,0007	0,0011	0,0016	183	33	1.478.329
Bronquitis Crónica	0,00003	0,000061	0,000093	7.325	33	7.399.042
Síntomas Respiratorias Agudos	0,0803	0,1679		19.606.721	33	7.399.042
Ataques de Asma	0,0329	0,0584	0,1971	377.557,6	33	7.399.042
Mortalidad Prematura	0,001963			3019,61	33	7.399.042

Tabla 23. Evaluación económica caso unitario sobre las diferencias MD T4 vs MD T1.

Evaluación Económica: Reemplazo vs Caso Base (Do Nothing)

Año	0	1	2	3	4
Ingresos		41	59	41	41
Egresos		0	0	0	0
escalador		1,0000	1,0195	1,0391	1,0391
(I+E)*Es	-	41	60	43	43
margen	-	41	60	43	43
depreciación	-	(5)	(5)	(5)	(5)
UAI	-	36	55	38	38
Impuesto (35%)	-	(13)	(19)	(13)	(13)
UDI	-	23	35	25	25
depreciación	-	5	5	5	5
inversiones	(21)	0	0	0	0
FCN (nominal)	(21)	29	41	30	30
FCN (real)	(21)	29	40	29	29
Delta FCN (real)	(20,51)	29	40	29	29
		8	68	68	57

	(+10% inversión)	(-10% ingresos)	(+10% Egresos)
NPV (8,00%)	88	87,9	79,0
IRR	149%	149%	148%
PAYBACK	0,7	0,7	0,7

Tabla 24. Evaluación económica casi unitario MD T4 vs MD T1 consumo de combustible idéntico.

Evaluación Económica: Reemplazo vs Caso Base (Consumo de combustible idéntico)

Año	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
Ingresos		3	21	3	3
Egresos		0	0	0	0
escalador		1,0000	1,0195	1,0391	1,0391
(I+E)*Es	-	3	21	3	3
margen	-	3	21	3	3
depreciación	-	(5)	(5)	(5)	(5)
UAI	-	(1)	16	(1)	(1)
Impuesto (35%)	-	0	(6)	0	0
UDI	-	(1)	11	(1)	(1)
depreciación	-	5	5	5	5
inversiones	(19)	0	0	0	0
FCN (nominal)	(19)	3	15	3	3
FCN (real)	(19)	3	15	3	3
Delta FCN (real)	(18,65)	3	15	3	3
		(15)	18	18	7

NPV (8,00%)	3,2
IRR	14%
PAYBACK	2,7

(+10% inversión-10% ingresos+10% egresos)

1,3	1,1	0
9%	9%	0
3,2	3,2	0

Inversión:	(18,65)
Sens. Inversión:	1,00
Sens. Ingresos:	1,00
Sens. Egresos:	1,00

Cálculo Payback	
	7,0
	2,7
	2,7

Vida útil Técnica	4
--------------------------	----------

Tabla 25. Evaluación económica para el caso de implementación completo de motores Tier4 en Los Bronces.

Evaluación Económica: Reemplazo vs Caso Base (Flota completa 56 unidades)											
Caso completo											
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ahorro de costos		171	653	1.169	1.582	1.824	1.824	1.493	943	495	83
Gastos											
escalador	1,0000	1,0390	1,0795	1,0585	1,0780	1,0975	1,1170	1,1365	1,1560	1,1755	
(I+E)YEs	171	665	1.215	1.674	1.966	2.002	1.668	1.071	573	97	
margin	171	665	1.215	1.674	1.966	2.002	1.668	1.071	573	97	
depreciación	(19)	(19)	(19)	(19)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	0
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
depreciación	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(47)	(9)
UAI	152	600	1.103	1.516	1.780	1.815	1.519	1.071	573	97	
Impuesto (35%)	(53)	(210)	(386)	(531)	(623)	(635)	(532)	(375)	(200)	(34)	
UDI	99	390	717	985	1.157	1.180	987	686	372	63	
depreciación	19	65	112	158	186	186	149	103	56	9	
inversiones	(75)	(186)	(186)	(186)	(186)	(37)					
FCN (nominal)	(75)	269	642	957	1.157	1.329	1.137	799	428	72	
FCN (real)	(69)	264	618	904	1.073	1.211	1.017	703	370	62	
Delta FCN (real)	(75)	264	618	904	1.073	1.211	1.017	703	370	62	
Delta FCN acumulado (real)	(143)	195	882	1.522	1.977	2.284	2.228	1.720	1.073	432	
NPV (8,00%)	3.924										
IRR	166,5%										
PAYBACK	0,12										
Inversión:	(75)										
Sens. Inversión:	1,00										
Sens. Ingresos:	1,00										
Sens. Egresos:	1,00										
Vida útil Técnica	4 Años										

	(+10% Inversión)	(-10% Ingresos)	(+10% Egresos)
NPV (8,00%)	3.556	3.467	
IRR	149,6%	148,5%	
PAYBACK	0,13	0,14	

Cálculo Payback	
	615,34
	0,12
	0,12

Tabla 26. IPC de Salud histórico, Chile. Fuente: INE.



**ÍNDICE DE PRECIOS AL CONSUMIDOR (IPC)
COBERTURA NACIONAL
BASE AÑO 2013**

HOJA DE CIFRAS POR DIVISIÓN

		6._ SALUD						
Año	Mes	Índice	Variación Mensual	Variación Acumulada	Variación a 12 Meses	Incidencia Mensual	Incidencia Acumulada	Incidencia a 12 Meses
2014	Enero	101,71	0,9	0,9	-	0,060	0,060	-
	Febrero	101,64	-0,1	0,9	-	-0,004	0,056	-
	Marzo	101,63	0,0	0,9	-	-0,001	0,055	-
	Abril	103,41	1,8	2,6	-	0,111	0,168	-
	Mayo	103,95	0,5	3,2	-	0,034	0,203	-
	Junio	103,94	0,0	3,2	-	-0,001	0,202	-
	Julio	103,71	-0,2	2,9	-	-0,015	0,187	-
	Agosto	104,16	0,4	3,4	-	0,028	0,216	-
	Septiembre	104,46	0,3	3,7	-	0,018	0,235	-
	Octubre	105,08	0,6	4,3	-	0,038	0,274	-
	Noviembre	105,39	0,3	4,6	-	0,019	0,294	-
	Diciembre	105,31	-0,1	4,5	-	-0,005	0,289	-
2015	Enero	106,83	1,4	1,4	5,0	0,092	0,092	0,325
	Febrero	107,16	0,3	1,8	5,4	0,020	0,112	0,348
	Marzo	107,74	0,5	2,3	6,0	0,035	0,147	0,382
	Abril	109,44	1,6	3,9	5,8	0,102	0,251	0,375
	Mayo	110,15	0,6	4,6	6,0	0,042	0,293	0,384
	Junio	110,31	0,1	4,8	6,1	0,010	0,303	0,394
	Julio	110,64	0,3	5,1	6,7	0,019	0,323	0,428
	Agosto	110,87	0,2	5,3	6,4	0,014	0,337	0,413
	Septiembre	111,33	0,4	5,7	6,6	0,027	0,365	0,420
	Octubre	111,66	0,3	6,0	6,3	0,019	0,385	0,397
	Noviembre	111,67	0,0	6,0	6,0	0,001	0,386	0,380
	Diciembre	111,68	0,0	6,1	6,1	0,001	0,387	0,387
2016	Enero	113,07	1,2	1,2	5,8	0,080	0,080	0,378
	Febrero	113,25	0,2	1,4	5,7	0,010	0,091	0,368
	Marzo	113,29	0,0	1,4	5,2	0,002	0,093	0,333
	Abril	115,05	1,6	3,0	5,1	0,101	0,195	0,334
	Mayo	114,76	-0,2	2,8	4,2	-0,016	0,179	0,275
	Junio	115,70	0,8	3,6	4,9	0,054	0,233	0,319
	Julio	116,10	0,3	4,0	4,9	0,023	0,256	0,322
	Agosto	116,81	0,6	4,6	5,4	0,040	0,298	0,348
	Septiembre	117,16	0,3	4,9	5,2	0,020	0,318	0,340
	Octubre	117,47	0,3	5,2	5,2	0,018	0,336	0,338
	Noviembre	117,29	-0,2	5,0	5,0	-0,010	0,326	0,326
	Diciembre	117,28	0,0	5,0	5,0	-0,001	0,325	0,325
2017	Enero	118,38	0,9	0,9	4,7	0,062	0,062	0,307
	Febrero	118,75	0,3	1,3	4,9	0,021	0,083	0,317
	Marzo	118,88	0,1	1,4	4,9	0,008	0,091	0,322
	Abril	120,34	1,2	2,6	4,6	0,081	0,173	0,303
	Mayo	120,27	-0,1	2,6	4,8	-0,004	0,169	0,315
	Junio	120,35	0,1	2,6	4,0	0,004	0,174	0,265
	Julio	120,76	0,3	3,0	4,0	0,023	0,197	0,265
	Agosto	121,46	0,6	3,6	4,0	0,039	0,236	0,264
	Septiembre	121,16	-0,2	3,3	3,4	-0,017	0,219	0,226
	Octubre	121,68	0,4	3,8	3,6	0,029	0,249	0,238
	Noviembre	121,55	-0,1	3,6	3,6	-0,007	0,242	0,240
	Diciembre	121,51	0,0	3,6	3,6	-0,002	0,239	0,239
2018	Enero	122,61	0,9	0,9	3,6	0,061	0,061	0,238
	Febrero	123,02	0,3	1,2	3,6	0,023	0,084	0,240
	Marzo	123,15	0,1	1,4	3,6	0,007	0,091	0,239
	Abril	124,38	1,0	2,4	3,4	0,067	0,159	0,225
	Mayo	124,75	0,3	2,7	3,7	0,020	0,179	0,250
	Junio	124,87	0,1	2,8	3,8	0,007	0,186	0,253
	Julio	124,92	0,0	2,8	3,4	0,002	0,189	0,232
	Agosto	124,86	0,0	2,8	2,8	-0,003	0,186	0,190
	Septiembre	125,02	0,1	2,9	3,2	0,009	0,194	0,215
	Octubre	125,27	0,2	3,1	3,0	0,014	0,208	0,199
	Noviembre							
	Diciembre							

16. Especificaciones técnicas

16.1. Especificaciones técnicas motores Cummins QSK60 Tier4 final

Performance That Pays.

In demanding mining applications such as excavators, haul trucks and wheel loaders, dependability is everything. That's where the superior uptime and productivity of the Tier 4 Final QSK60 make a difference. Its V16 configuration offers up to 2850 hp (2125 kW) in mining applications, with simplified air handling, reduced complexity and improved serviceability. The proven QSK60 platform delivers high reliability and outstanding durability, with no loss of power or torque. Host rejection is similar to the Tier 2 engine, so there is no need to re-engineer the cooling package. The fully integrated aftertreatment unit replaces the muffler in your equipment, minimizing design modifications. The combination of higher productivity and lower operating costs is performance that pays.

■ **Base engine** – A redesigned power cylinder, optimized wastegate turbocharger and improved crankcase breather system work to keep particulate matter (PM) levels low while maintaining durability and reliability. The QSK60 achieves nearly 1.1 million gallons-to-overhaul.

■ **Fuel system** – The Cummins Modular Common Rail Fuel System (MCRS) uses increased injection pressures and larger injector accumulator volume, for reduced PM and improved fuel economy. The leakless injector has increased fueling precision and timing control, for reduced parasitic losses, reduced fuel heating and improved fuel economy. An improved pilot valve resists wear, for enhanced reliability and durability. The fuel pump has an improved tappet design and fuel cooling of pumping elements, which contributes to longer component life.

■ **Air handling** – The simplified configuration of the wastegate turbochargers and intercoolers allows access to the top end of the QSK60 without removal of the air-handling system, even on our two-stage engines. Its altitude capacity exceeds the 10,500-ft requirement for Tier 4 Final engines in North America.

■ **Lubrication and filtration** – NanoNet® filtration captures and retains more harmful particles than traditional media, for longer fuel pump and injector life with better reliability. Oil and fuel filter change intervals have been increased to 500 hours.

■ **Selective Catalytic Reduction (SCR)** – Cummins modular SCR system features an integrated decomposition chamber and a Cummins Airless Diesel Exhaust Fluid (DEF) dosing system designed to last the life of the engine. The use of SCR minimizes engine backpressure, for increased fuel economy. Optimized temperature management minimizes DEF consumption.

Every Customer. Supported.

Cummins high-horsepower engines are supported through our network of more than 600 global authorized distributor locations. Cummins-certified technicians are fully trained and equipped with the latest diagnostic tools, for fast, accurate service to support customers around the globe.

Every Question. Answered.

For additional details about the Cummins Tier 4 Final QSK60 for use in mining applications, contact your local Cummins distributor or visit cumminsengines.com.

QSK60 Specifications

Engine type	60° vee, 16-cylinder	
Displacement	3,061 cu in	60.0 liters
Bore and stroke	6.26 in x 7.48 in	159 mm x 190 mm
Oil system capacity	275 U.S. qt	261 liters
Coolant capacity	180 U.S. qt	170 liters
Aspiration	Single-stage Turbocharged Aftercooled	Two-stage Turbocharged Aftercooled and Intercooled
Length	114.7 in (2,914 mm)	114.3 in (2,903 mm)
Width	68.5 in (1,740 mm)	68.6 in (1,742 mm)
Height	83.6 in (2,123 mm)	82.9 in (2,106 mm)
Dry weight	17,867 lb (8,100 kg)	19,423 lb (8,810 kg)
Wet weight	18,858 lb (8,554 kg)	20,424 lb (9,264 kg)

QSK60 Ratings

Model	Advertised power bhp (kW)	Peak torque lb-ft (N•m)	Turbo Arrangement
QSK60-1875	1875 (1368) @ 1800	6169 (8364) @ 1500	Single stage
QSK60-1944	1944 (1423) @ 1800	6169 (8364) @ 1500	Single stage
QSK60-2000	2000 (1491) @ 1800	6670 (8907) @ 1500	Single stage
QSK60-2300	2300 (1715) @ 1800	6677 (9063) @ 1500	Single stage
QSK60-2500	2500 (1864) @ 1800	7357 (9858) @ 1500	Single stage
QSK60-2700	2700 (2013) @ 1800	8267 (11208) @ 1500	Two-stage
QSK60-2850	2850 (2125) @ 1800	8274 (11218) @ 1500	Two-stage

 Cummins Inc.
Box 3006
Columbus, IN 47302-3006
U.S.A.
Phone: 1 800 251/3171 (1 800 343 7367)
Internet: cumminsengines.com
Marketing@cumminsengines.com
Website.com/cumminsengines
Epub#: 4287592 Printed in U.S.A. 4/15
©2015 Cummins Inc.

16.2. Especificaciones técnicas camión Caterpillar Cat797F



Specifications

Engine

Engine Model	Cat C175-20	
Gross Power – SAE J1995	2983 kW	4,000 hp
Net Power – SAE J1349	2828 kW	3,793 hp
Bore	175 mm	6.9 in
Stroke	220 mm	8.7 in
Displacement	106 L	6,469 in ³

- Power ratings apply at 1,750 rpm when tested under the specific conditions for the specified standard.
- Ratings based on SAE J1995 standard air conditions of 25° C (77° F) and 99 kPa (29.32 Hg) barometer. Power based on fuel having API gravity of 35 at 16° C (69° F) and an LHV of 42 780 kJ/kg (18,390 Btu/lb) when engine is used at 30° C (38° F).
- No low altitude arrangement (LAA) engine derating required up to 2134 m (7,000 ft) altitude.
- No high altitude arrangement (HAA) engine derating required up to 4877 m (16,000 ft) altitude.
- Emission Standards. Where applicable, the Cat C175-20 engine is compliant with current U.S. EPA emission standards.

Weights – Approximate

Target Gross Machine Operating Weight (GMW)	623 690 kg	1,375,000 lb
Body Weight Range	41 368-61 235 kg	91,200-135,000 lb
Chassis Weight Range	210 630-219 146 kg	464,359-483,134 lb

- Refer to the Cat Mining Truck 10/10/20 Payload Policy for maximum gross machine weight limitations.
- Body weight varies depending on body and liner configuration. Weight range for known applications.
- Chassis weight with 100 percent fuel, hoist, body mounting group, rims and tires.

Operating Specifications

Nominal Payload Capacity	363 tonnes	400 tons
Heaped SAE (2:1) Capacity	240-267 m ³	314-350 yd ³
Top Speed – Loaded	67.6 km/h	42 mph
Steer Angle	40 Degrees	
Machine Clearance Turning Diameter	42 m	138 ft

Final Drives

Differential Ratio	1.278:1
Planetary Ratio	16.67:1
Total Reduction Ratio	21.26:1

- Double reduction, planetary with full floating axles.

Transmission

Forward 1	11.3 km/h	7 mph
Forward 2	15.2 km/h	9.5 mph
Forward 3	20.5 km/h	12.7 mph
Forward 4	27.7 km/h	17.2 mph
Forward 5	37.2 km/h	23.1 mph
Forward 6	50.3 km/h	31.2 mph
Forward 7	67.6 km/h	42 mph
Reverse	11.9 km/h	7.4 mph

Suspension

Effective Cylinder Stroke – Front	313.6 mm	12.3 in
Effective Cylinder Stroke – Rear	165.1 mm	6.5 in
Rear Axle Oscillation	±4.0 degrees	

Body Hoists

Pump Flow – High Idle	1200 L/min	317 gal/min
Relief Valve Setting – Raise	24 200 kPa	3,510 psi
Body Raise Time – High Idle	25 Seconds	
High Idle Body Lower Time – Float	19 Seconds	

Brakes

Number of Discs per Side – Front	10	
Number of Discs per Side – Rear	15	
Outside Diameter	1067 mm	42 in
Brake Surface	330 517 cm ²	51,243 in ²
Standards	ISO 3450:2011	

Approximate Weights – MSD II

Front Axle – Empty	47.2%
Front Axle – Loaded	33.3%
Rear Axle – Empty	52.8%
Rear Axle – Loaded	66.7%

Weight Distributions – Approximate

Front Axle – Empty	47.2%
Rear Axle – Empty	52.8%
Front Axle – Loaded	33.3%
Rear Axle – Loaded	66.7%



16.3. Especificaciones técnicas camión Caterpillar Cat795FAC

795F AC Mining Truck Specifications

Engine

Engine Model	Cat C175-16	
Gross Power – SAE J1995	2536 kW	3,400 hp
Bore	175 mm	6.9 in
Stroke	220 mm	8.7 in
Displacement	85 L	5,187 in ³

- Power ratings apply at 1,800 rpm when tested under the specified condition for the specified standard.
- Ratings based on SAE J1995 standard air conditions of 25° C (77° F) and 99 kPa (29.61 Hg) dry barometer. Power based on fuel having API gravity of 35 at 16° C (60° F) and an LHV of 42 780 kJ/kg (18,390 Btu/lb) when engine used at 30° C (86° F).
- No engine derating required up to 3203 m (10,500 ft) altitude.
- Compliant with U.S. Environmental Protection Agency Tier 2 emission standards.

Weights – Approximate

Gross Machine Operating Weight (GMW)	570 678 kg	1,257,000 lb
Chassis Weight	202 270 kg	445,524 lb
Body Weight Range	38 500- 54 500 kg	84,900- 120,000 lb

- GMW depends on tire selection. Consult your tire manufacturer for maximum loaded top speed.
- Chassis weight with 100% fuel, hoist, body mounting group, rims and tires.
- Body weight varies depending on how body is equipped.

Operating Specifications

Nominal Payload Capacity	313 tonnes	345 tons
Top Speed – Loaded	64 km/h	40 mph
Steer Angle	34 degrees	
Turning Diameter – Front	34 m	112 ft
Turning Circle Clearance Diameter	38.7 m	127 ft

- Refer to the Cat® Mining Truck 10/10/20 Overload Policy (AEXQ0250) for maximum gross machine weight limitations.

Final Drives

Total Reduction Ratio	35:1
-----------------------	------

AC Drive System

Generator/Alternator	Brushless, remote mounted, dual bearing
Controls	IGBT Inverter Technology, air cooled, pressurized cabinet with filtration
Wheel Motor	Rear axle mounted Cat AC induction
Cooling System	Variable speed, hydraulic cooling system

Suspension

Effective Cylinder Stroke – Front	293 mm	11.5 in
Effective Cylinder Stroke – Rear	141 mm	5.6 in
Rear Axle Oscillation	±4.8°	

Body Hoists

Pump Flow – High Idle	935 L/min	247 gal/min
Relief Valve Setting – Raise	24 500 kPa	3,553 psi
Body Raise Time – High Idle	19 Seconds	
Body Lower Time – Float	20 Seconds	
Body Power Down – High Idle	17.5 Seconds	

- Twin, two-stage hydraulic cylinders mounted inside main frame; double-acting cylinders in second stage.
- Power raise in both stages; power down in second stage.
- Automatic body-lower modulation reduces impact on frame.

Braking System

Oil Cooled Brakes – Retarding Capable at All Speeds		
Outside Diameter	1067 mm	42 in
Brake Surface – Front	132 258.4 cm ²	20,500.09 in ²
Brake Surface – Rear	198 388 cm ²	30,750.2 in ²
Standards	J-ISO 3450 JAN88, ISO 3450:1996	

Electric Retarding

Radial Grid Design with Brushless AC Fan Motor	4750 kW (6,370 hp)	rated power
Dynamic Retarding Power	4750 kW	6,370 hp
Blended Four Corner Retarding	Standard	

16.4. Especificaciones técnicas camión Caterpillar Cat794AC

794 AC Mining Truck Specifications

Engine	
Engine Model	Cat C175-16
Standard Gross Power – SAE J1995*	2610 kW 3,500 hp
Bore	175 mm 6.9 in
Stroke	220 mm 8.7 in
Displacement	85 L 5,187 in ³
<ul style="list-style-type: none"> * Contact factory for low HP, lower emissions tier configurations and high altitude configurations. • Power Ratings apply at 1,800 rpm when tested under the specified conditions for the specified standard. • Ratings based on SAE J1995 standard air conditions of 25° C (77° F) and 99 kPa (29.61 Hg) dry barometer. Power based on fuel having API gravity of 35 at 16° C (60° F) and an LHV of 42 780 kJ/kg (18,390 BTU/lb) when engine used at 30° C (86° F). • No engine derating required up to 1829 m (6,000 ft) altitude. • Equivalent to U.S. EPA Tier 2 emission standards. 	
Weights – approximate	
Gross Machine Operating Weight	521 631 kg 1,150,000 lb
Chassis Weight	189 233 kg 417,187 lb
Body Weight	28 186 kg 62,140 lb
<ul style="list-style-type: none"> • Consult your tire manufacturer for maximum tire load. • Chassis weight with 100% fuel, hoist, body mounting group, rims, and tires. • Body weight varies depending on how body is equipped. 	
Operating Specifications	
Nominal Payload Capacity	291 tonnes 320 tons
Top Speed – Loaded	60 km/h 37 mph
Steer Angle	39 degrees
Minimum Turning Radius	16.2 m 53 ft
<ul style="list-style-type: none"> • Payload assumes no debris, no extra options or attachments. • Refer to the Cat Mining Truck 10/10/20 Overload Policy (AEXQ0250) for maximum gross machine weight limitations. 	
Final Drives	
Total Reduction Ratio	35:1
AC Drive System	
Generator/Alternator	Brushless, engine mounted, dual bearing
Controls	IGBT Inverter Technology, air cooled, pressurized cabinet with filtration
Wheel Motor	Cat AC induction, rear axle mounted
Cooling System	Variable speed, hydraulically driven cooling system
Tires	
<ul style="list-style-type: none"> • 53/80 R63. • Production capabilities of the 794 AC truck are such that, under certain job conditions, TKPH (TMPH) capabilities could be exceeded and, therefore, limit production. • Caterpillar recommends the customer evaluate all job conditions and consult tire manufacturer for proper tire selection. 	
Braking System	
Front Wet Disc Brake Surface Area	131 473 cm ² 20,378 in ²
Rear Wet Disc Brake Surface Area	198 388 cm ² 30,750 in ²
Standards	ISO 3450:2011
Electric Retarding – Radial Grid Design	
Dynamic Retarding Power	
Continuous	4086 kW 5,480 hp
Weight Distributions – approximate	
Front Axle – Empty	49%
Rear Axle – Empty	51%
Front Axle – Loaded	33%
Rear Axle – Loaded	67%

16.5. Especificaciones técnicas camión Liebherr T282C

Technical Data



Engine

Model	MTU 20V4000 C23 Tier II
Gross horsepower @ 1,800 rpm	2,600 kW / 3,750 hp
No. of cylinders	20
Displacement	95.4 l / 5822 in ³
Wet weight	12,020 kg / 26,5000 lbs
Crankcase	335 l / 88 gal
Cooling system	1,080 l / 280 gal
Model	MTU 20V4000 C22 Tier I
Gross horsepower @ 1,800 rpm	2,722 kW / 3,650 hp
No. of cylinders	20
Displacement	90 l / 5,490 in ³
Wet weight	10,480 kg / 23,100 lbs
Crankcase	390 l / 103 gal
Cooling system	870 l / 230 gal
Model	Cummins QSK 78
Gross horsepower @ 1,900 rpm	2,610 kW / 3,500 hp
No. of cylinders	18
Displacement	78 l / 4,735 in ³
Wet weight	11,300 kg / 24,912 lbs
Crankcase	295 l / 78 gal
Cooling system	721 l / 191 gal
Fan clutch	Variable speed, temperature controlled
Air cleaners	Two units with 2 elements per unit with electronic restriction monitoring in the cab
Radiator	Mesabi flexible core
Starter	Electric
Roll out power module	Radiator, engine and main alternator, mounted on roll out sub frame
Batteries	6 x 12 Volt, (3 series of 2), 1,200 CCA each at -18° C (0° F), 1,475 CGA at 0° C (32° F)
Consult factory for other engine options	



Braking Systems

Electric dynamic braking , forced air over quiet stainless steel resistor grids with dry disc service and secondary braking system.	
Electric dynamic braking	Max. 4,500 kW / 6,035 hp
Extended speed range	Full dynamic braking down to Zero. Automatic brake blending with service brakes from 0.8 km/h / 0.5 mph to zero
Dynamic braking speed control	Operator adjustable, automatically limits truck speed on downhill grade when set
Adjustable speed limits	Automatic speed limits for empty and loaded truck adjustable for site requirements
Traction control	Computer controlled in propel and dynamic braking, forward and reverse, all wheel speed sensing
Service brakes front	Single disc, wheel speed, five calipers per wheel
Service brakes rear	Dual discs per side, one caliper per disc, armature speed
Hydraulic accumulators	2 x 7.6 l / 2 gal, separate accumulator for front and rear axle (Piston type)
Park brakes	Spring applied, pressure released, one caliper per each rear disc
Filtration	Cleanliness level ISO 15/13/11



Steering

Ackermann center point lever system, full hydraulic power steering with accumulator safety backup. Isolated from dump hydraulic system. Two double acting hydraulic cylinders.	
Hydraulic accumulator	170 l / 45 gal (Piston type)
Filtration	Cleanliness level ISO 15/13/11
Turning radius (ISO 7457) -	
Tire centerline	15.81 m / 51' 10"
Vehicle clearance radius (ISO 5010) -	19.95 m / 65' 5"



Electric Drive System

Manufacturer	Liebherr - Litronic Plus AC drive system (IGBT)
Main alternator	AC brushless, direct drive
Wheel motors	Litronic Plus AC induction motors
Gear ratio	Standard 43.7 to 1 - haul profile dependant Optional 37.33 to 1 - haul profile dependant Optional 53.33 to 1 - haul profile dependant
Max Speed	Standard 54 km/h / 34 mph
Cooling fan	Optional 64 km/h / 40 mph Optional 45 km/h / 28 mph Variable speed AC motor with twin impeller radial cooling fans



Dump System

Two double stage, double acting hoist cylinders with inter stage and end cushioning in both directions. Electronic joystick with full modulating control in both extend and retract.	
Dump angle	49° (45° with optional kick-out switch)
Cycle times	56 seconds
Remote dump	Quick disconnects for external power dumping (buddy dump) accessible from ground level
Filtration	High pressure filtration and return line filtration. Cleanliness level ISO 18/16/13



Tires

Rims	41" x 63" bolt on rims
Tires	Michelin 58/80 R63 or Bridgestone 59/80 R63



Body

Body Sizes are custom designed to fit customer requirements and specific application. Please contact factory for options.



Suspensions

Front	Double A-Arm with inclined king pin pivot, spindle, and nitrogen over oil suspension struts with integral damping
Rear	Three bar linkage comprised of triangular upper link plus two bottom drag links and nitrogen over oil suspension struts with integral damping

16.6. Especificaciones técnicas camión Liebherr T284

Technical Data

Engine

Model	MTU 20V4000 C23 Tier 2 ¹⁾
Gross horsepower @ 1,800 rpm²⁾	3,000 kW / 4,023 HP ³⁾
No. of cylinders	20
Displacement	95.4 l / 5,822 in ³
Wet weight	11,769 kg / 25,946 lb
Crankcase	335 l / 88 gal
Cooling system	1,060 l / 280 gal

¹⁾ Standard engine setting is USA/EPA Tier 2 compliant in emission-optimized (EO) mode. Fuel-optimized (FO) mode is optional for non-emission regulated countries.

²⁾ Gross power definition according to ISO 3046 (ratings also correspond to SAE J 1995 standard conditions).

³⁾ Optional 2,800 kW / 3,750 HP engine power setting. Consult factory for additional reduced engine power settings.

Model	MTU 20V4000 C22 Tier 1 ¹⁾
Gross horsepower @ 1,800 rpm²⁾	2,720 kW / 3,648 HP
No. of cylinders	20
Displacement	90 l / 5,490 in ³
Wet weight	10,480 kg / 23,100 lb
Crankcase	390 l / 103 gal
Cooling system	870 l / 230 gal

¹⁾ Standard engine setting is USA/EPA Tier 1 compliant.

²⁾ Gross power definition according to ISO 3046 (ratings also correspond to SAE J 1995 standard conditions).

Model	Cummins QSK 78
Gross horsepower @ 1,900 rpm¹⁾	2,610 kW / 3,500 HP
No. of cylinders	18
Displacement	78 l / 4,735 in ³
Wet weight	11,300 kg / 24,912 lb
Crankcase	295 l / 78 gal
Cooling system	721 l / 191 gal

¹⁾ Gross power definition according to SAE J 1995 standard conditions.

Electric Drive System

Control system	Liebherr Litronic Plus AC drive system with IGBT technology
Control box	Liquid cooled power components, pressurized cabinet
Main alternator	AC brushless, direct drive, forced air cooling
Wheel motors	Litronic Plus AC induction motors, forced air cooling
Maximum speed¹⁾	54 km/h / 34 mph (with 43.7:1 gear ratio) 64 km/h / 40 mph (with 37.33:1 gear ratio) 45 km/h / 28 mph (with 53.33:1 gear ratio)
Cooling system	variable speed AC motor with twin impeller radial cooling fans

¹⁾ Consult factory for proper selection of gear ratio based on site requirements.

Braking Systems

Electric dynamic braking, forced air over quiet stainless steel grid resistors with dry disc service and secondary braking system.

Electric dynamic braking	max. 4,500 kW / 6,035 HP full dynamic braking down to zero. Single pedal automatic brake blending with service brakes below 1 km/h
Dynamic braking speed control	operator adjustable, automatically limits truck speed on downhill grade when set
Adjustable speed limits	Automatic speed limits for empty and loaded truck adjustable for site requirements
Traction control	Litronic Plus traction control system. Computer controlled in propel and dynamic braking, forward and reverse, all-wheel speed sensing
Service brakes front	single disc, wheel speed, five calipers per wheel
Service brakes rear	dual discs per side, one caliper per disc, armature speed
Hydraulic accumulators	1 x 7.6 l (2 gal), 2 x 3.8 l (1 gal), 1 x 26.5 l (7 gal) accumulators (4 in total), separate isolated accumulator for front and rear axle (piston type)
Park brakes	spring applied, pressure released, one caliper per each rear disc
Filtration	cleanliness level ISO 15/13/11

Steering

Ackerhmann center point lever system, full hydraulic power steering with accumulator safety backup, isolated from dump hydraulic system. Two double-acting hydraulic cylinders.

Hydraulic accumulator	170 l / 46 gal (piston type)
Filtration	cleanliness level ISO 15/13/11
Turning radius – tire centerline	17.2 m / 56'5" (ISO 7457)
Vehicle clearance radius	19.95 m / 65'5" (ISO 5010)

Dump System

Two double-stage, double-acting hoist cylinders with inter-stage and end cushioning in both directions. Electronic joystick with integrated engine high-idle switch and full modulating control in both extend and retract.

Dump angle	49° (45° with optional kick-out switch)
Cycle times	50 sacs
Remote dump	quick disconnects for external power dumping (buddy dump) accessible from ground level
Filtration	high pressure and return line filtration. Cleanliness level ISO 18/16/13

16.7. Especificaciones técnicas camión Komatsu 930E-4

930E-4 ELECTRIC DRIVE TRUCK

SPECIFICATIONS



ENGINE

Make and model	Komatsu SSDA16V160*
Fuel	Diesel
Number of cylinders	16
Operating cycle	4 cycle
Rated brake power**	2014 kW 2,700 HP @ 1900 rpm
Flywheel power***	1902 kW 2,550 HP @ 1900 rpm
Weight (wet)	9608 kg 21,182 lb

* Tier 2 emissions compliant. Tier 1 emissions engine is optional outside of North America.
 ** Rated brake power is the output of the engine as installed in this machine, at governed rpm and with engine manufacturer's approved fuel setting. Accessory losses included are water pump, fuel pump and oil pump.
 *** Flywheel power is the rated power at the engine flywheel minus the average accessory losses. Accessories include fan and charging alternator. Rating(s) represent net engine performance in accordance with SAE J1349 conditions.



ELECTRIC DRIVE

AC/DC CURRENT

Alternator	GTA-41
Dual impeller in-line blower	340 m ³ /min 12,000 cfm
Control	AC Torque Control System
Motorized wheels*	GDY106 Induction Traction Motors
Ratio**	32.62:1
Speed (maximum)	64.5 km/h 40 mph

* Wheel motor application depends upon gross vehicle weight, haul road grade, haul road length, rolling resistance and other parameters. Komatsu and G.E. must analyze each job condition to assure proper application.
 ** Optional ratios available.



TIRES AND RIMS

Rock service, tubeless, radial tires	
Standard tire*	53/80 R63
Taper lock, five (5) piece rim	
914 mm x 1600 mm x 127 mm 36" x 63" x 5.0" rim assembly.	
Films rated at 758 kPa 110 psi cold inflation pressure.	
Typical tire weight	26127 kg 57,600 lb

* Tires should meet application requirements for load/tyre, tread, compound, inflation pressure, ply rating or equivalent, etc.



BODY

All-welded steel flat floor body with horizontal bolsters and full canopy. Eyebrow, rear wheel rock ejectors, body up sling and rubber mounts on frame are standard. Pivot exhaust heating optional.	
Floor sheet	16 mm 0.63" 1379 mPa 200,000 psi tensile strength steel (two-piece)
Front sheet	9 mm 0.35" 1379 mPa 200,000 psi tensile strength steel
Side sheet	8 mm 0.31" 1379 mPa 200,000 psi tensile strength steel
Canopy sheet	5 mm 0.19" 690 mPa 100,000 psi
Struck	171 m ³ 224 yd³
Standard SAE heaped 2:1	211 m ³ 276 yd³
Standard Komatsu body weight	30362 kg 66,936 lb

* Komatsu must approve all bodies through a Body Application Worksheet



CAB

Advanced Operator Environment with integral 4-post ROPS/FOPS structure Level 2, adjustable air suspension seat w/lumbar support and arm rests, full-size passenger seat, maximum R-value insulation, tilt and telescoping steering wheel, electric windshield wipers w/washer, tinted safety glass, power windows, Komatsu Payload Weighing System, 55,000 Btu/hr heater and defroster, 21,600 BTU/hr air conditioning (HFC - 134A refrigerant).



FRAME

Advanced technology, full butt-welded box sectional ladder-type frame with integral ROPS supports, integral front bumper, rear tubular cross members, steel castings at all critical stress transition zones, rugged continuous horsecollar.	
Plate material	482.6 mPa 70,000 psi tensile strength steel
Casting material	620.5 mPa 90,000 psi tensile strength steel
Rail width	305 mm 12"
Rail depth (minimum)	864 mm 34"
Top and bottom plate thickness	45 mm 1.77"
Side plate thickness	25 mm 0.98"
Drive axle mounting	Pin and spherical bushing
Drive axle alignment	Swing link between frame and axle



BRAKING SYSTEM

Service brakes: oil-cooled, hydraulic-actuated, multiple disc brakes at each wheel. Traction system wheel slip/slide control.	
Max. service apply pressure	17237 kPa 2500 psi
Total friction area per brake	97025 cm ² 15,038 in²
Emergency brakes	Automatically applied prior to hydraulic system pressure dropping below level required to meet secondary stopping requirements.
Wheel brake locks	Switch activated
Parking brakes	Multiple disc, spring-applied, hydraulically-released, dry brakes on inboard end of each wheel motor rotor shaft. Rated to hold on $\pm 15\%$ grade at maximum gross vehicle weight.
Electric dynamic retarder	Max 4026 kW 5400 hp Continuous 2460 kW 3300 hp
Continuously rated high-density blown grids w/retard capacity at low speeds and retard in reverse propulsion.	



SUSPENSION

Variable rate hydro-pneumatic with integral rebound control	
Max. front stroke	328 mm 12.92"
Max. rear stroke	239 mm 9.40"
Max. rear axle oscillation	$\pm 6.5^\circ$



COOLING SYSTEM

L&M radiator assembly, split-flow, with deaerator-type top tank.	
Radiator frontal area	7.02 m ² 75.5 ft²



SERVICE CAPACITIES

Cooling system	594 L	157 U.S. gal
Crankcase*	280 L	74 U.S. gal
Hydraulic system	1325 L	350 U.S. gal
Motor gear box (each)	95 L	25 U.S. gal
Fuel	4542 L	1200 U.S. gal

* Includes lube oil filters