



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

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍA VALUE STREAM MAPPING PARA IDENTIFICAR
CUELLOS DE BOTELLA POR ESCENARIOS EN MINERA LOS PELAMBRES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

FERNANDA BELÉN PARADA NÚÑEZ

**PROFESOR GUÍA:
OMAR CERDA INOSTROZA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SEBASTIÁN DEPOLO CABRERA
ENRIQUE JOFRÉ ROJAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2020**

APLICACIÓN DE METODOLOGÍA VALUE STREAM MAPPING PARA IDENTIFICAR CUELLOS DE BOTELLA POR ESCENARIOS EN MINERA LOS PELAMBRES

En Chile, la minería forma parte relevante en la economía nacional. Durante el año 2018 la participación de la minería en el PIB alcanzó el 9,8%, y en este porcentaje la participación de la minería del cobre fue de 8,9%. Chile, como mayor productor y exportador de cobre en el mundo, produjo 5.872 mil toneladas métricas el año 2018, lo que equivale al 28,3% de la producción mundial [1]. En este contexto, Minera Los Pelambres (MLP), perteneciente a Antofagasta Minerals, ocupa el quinto lugar a nivel nacional en producción de cobre, con ganancias cercanas a US\$ 790 millones y producciones de cobre fino aproximadas a 360.000 toneladas anuales.

Es preciso señalar que MLP está constantemente en búsqueda de mejorar sus procesos y operaciones, y con ello ser más eficientes y crecer como compañía. Es por esto que en el año 2014 se realizó un análisis para identificar desperdicios, específicamente cuellos de botella que limitaran la producción. En dicho estudio se encontraron procesos que contaban con cuellos de botella generando pérdidas de US\$ 12.620.000. Ante esta situación, el objetivo general de esta memoria es identificar los cuellos de botella bajo distintos escenarios en el proceso productivo minero de AMSA Los Pelambres que podrían afectar la producción futura. El propósito de dicho objetivo es anticiparse a los cambios de productividades que se podrían presentar y junto a ello que MLP pueda encontrar soluciones pertinentes y así no tener pérdidas.

La metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo es Value Stream Mapping. Esta es una técnica visual que plasma de forma gráfica un proceso en particular, donde se muestra cómo fluye el valor a lo largo de la cadena y se entrega información relativa a los tiempos asociados con los procesos involucrados. Además, tiene por objetivo principal resolver todos los problemas existentes en el proceso de producción para aumentar la productividad del mismo, reduciendo o eliminando desperdicios (cuellos de botella).

Tras dicho procedimiento, se encontraron 27 cuellos de botella para los diferentes escenarios propuestos y para la distintas áreas de estudio, ya sea Mina, Planta Concentradora, Pebbles y Gravilla, Sistema de transporte de concentrado y Puerto. Los principales cuellos de botella se encontraron en el STMG, Chancadores, Molinos SAG y Molinos Bolas. Por consiguiente, se presentan soluciones en base al concepto Mine to Mill, que consisten en reparos principalmente a procesos aguas arriba del cuello de botella identificado. Junto a ello, se realizó un análisis económico en el que se identifican las diferencias de producción y monetarias que se tienen al contar con dichos cuellos de botella. En dicho análisis se advierte que se podría ganar hasta un 20% extra de los ingresos reales de MLP.

Dedicatoria

*A todas aquellas personas que lucharon
y fueron víctimas del estallido social
de 18 de octubre del 2019*

Agradecimientos

Por mucho tiempo soñé con llegar a esta etapa de mi vida, donde finaliza un camino lleno de esfuerzo y sacrificio, pero también de muchas alegrías. Hoy que me encuentro aquí quiero agradecer a todas aquellas personas que estuvieron junto a mi en este tiempo.

En primer lugar quiero agradecer a mi familia. A mi mamá por guiarme desde pequeña, por enseñarme que para conseguir las cosas hay que esforzarse, por ser la mujer fuerte que en cada caída me ayudó a levantarme y a seguir adelante, por no rendirse y por luchar siempre por nuestra familia, por la unión y la paz entre nosotros. Gracias por ser como eres.

A mi papá por ser una contención por tantos años, por darme el abrazo que necesitaba cuando tenía miedo, por ser el responsable de mi gusto por las matemáticas y por la ingeniería, agradecerte por las infinitas conversaciones tomando helado, por ser el payaso que eres y por llevarme a la universidad y a Santiago una y otra vez. Gracias por estar siempre para mí.

A mis hermanos Joaquín y Maureen por enseñarme a ser mejor persona. A Joaquín por ser la luz de mis ojos, por ser un hermano ejemplar, por ser ese ángel caído del cielo que llena de luz cada espacio donde se encuentra. A Maureen por enseñarme de generosidad, de sabiduría y de lucha, porque a pesar de la distancia y lo distintas que somos, sé que eres y serás una gran persona. Gracias a ambos por darme la oportunidad de ser hermana menor y mayor al mismo tiempo.

A mi abuelo Fernando, que con mucha alegría hoy vive con nosotros, agradecerle porque con mucho esfuerzo siempre pensó en mis estudios y en mi futuro.

A mi perro Pascal Javier, que aunque no podrá leer, es el alma más pura e incondicional que ha permanecido a mi lado.

A mis amigos de la Universidad, que estuvieron junto a mi en las buenas y en las malas, en las alegres y en las tristes, en los triunfos y en las derrotas. Gracias Plaza, Fran, Nico por estos años de lucha juntos y por su gran amistad. Gracias Pablo, Sofi, Caro, Joaco, Nacho, Coke por todas las risas y buenos momentos dados. Gracias a todos los que estuvieron y espero siga el cariño por mucho tiempo más.

A la familia que se escoge, Romi y Pablo, Tía Ivonne y Tío Juan, Mariela y Sergio, Tía Jisella y Tío Marco. Gracias a todos porque en diferentes etapas de mi vida me han ayudado a crecer y han aportado su granito de arena en diferentes alegrías de mi vida.

A mis compañeros de Pelambritos, que me enseñaron de minería y me ayudaron con cada duda que tuve en mi memoria. Gracias por integrarme al equipo y hacerme parte como si fuera una más de ustedes. En especial quiero agradecer a Daniel, por ser mi salvavidas y guiarme tanto en lo profesional como en lo personal.

“Seamos agradecidos con las personas que nos hacen felices, ellos son los encantadores jardineros que hacen florecer nuestra alma” – Marcel Proust.

TABLA DE CONTENIDO

I.	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1	CARACTERÍSTICAS DE LA ORGANIZACIÓN MINERA LOS PELAMBRES	1
1.2	MERCADO MINERO Y DESEMPEÑO DE LA EMPRESA.	6
1.3	REGULACIONES.....	8
II.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	9
2.1	ÁREA DE LA ORGANIZACIÓN	9
2.2	ORGANIGRAMA	9
2.3	PROBLEMA	10
2.4	POSIBLES ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	13
2.5	IMPACTO.....	13
2.6	OBJETIVOS.....	14
2.6.1	<i>Objetivo General</i>	14
2.6.2	<i>Objetivos Específicos</i>	14
2.7	MARCO CONCEPTUAL.....	14
2.7.1	<i>Lean Manufacturing</i>	14
2.7.2	<i>Value Stream Mapping</i>	17
2.7.3	<i>Efectividad General del Equipo</i>	20
2.8	METODOLOGÍA	23
2.9	ALCANCES	27
2.10	RESULTADOS ESPERADOS	27
III.	DESARROLLO DEL PROYECTO	28
3.1	DEFINICIÓN DEL PROYECTO	28
3.1.1	<i>Cliente</i>	28
3.1.2	<i>Métricas</i>	29
3.1.3	<i>Escenarios</i>	29
3.2	ETAPAS PREVIAS AL VALUE STREAM MAPPING	30
3.2.1	<i>Identificación de procesos</i>	30
3.2.2	<i>Levantamiento de Información</i>	35
3.3	TRAZADO DE VALUE STREAM MAPPING Y ANÁLISIS BASE.....	37
3.3.1	<i>Trazado VSM actual</i>	37
3.3.2	<i>Análisis Caso Base</i>	39
3.4	ANÁLISIS ESCENARIOS FUTUROS.....	49
3.4.1	<i>20% Dureza de mineral</i>	50
3.4.2	<i>70% Dureza de mineral</i>	54
3.4.3	<i>Proyecto INCO con 20% dureza de mineral</i>	56
3.4.4	<i>Proyecto INCO con 70% dureza de mineral</i>	61
3.5	ANÁLISIS GENERAL.....	65
3.6	SÍNTESIS ANÁLISIS DE ESCENARIOS.....	68
IV.	POSIBLES SOLUCIONES	70
V.	ANÁLISIS ECONÓMICO	73
VI.	CONCLUSIONES	78
VII.	BIBLIOGRAFÍA	80
VIII.	ANEXOS	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: ESTRUCTURA ANTOFAGASTA MINERALS	3
ILUSTRACIÓN 2: ORGANIGRAMA MINERA LOS PELAMBRES	4
ILUSTRACIÓN 3: PROCESO PRODUCTIVO GENERAL MLP	5
ILUSTRACIÓN 4: DISTRIBUCIÓN DE PROCESOS Y SUB PROCESOS EN LAS DIFERENTES ÁREAS	5
ILUSTRACIÓN 5: PARTICIPACIÓN MUNDIAL EN EL MERCADO DEL COBRE	6
ILUSTRACIÓN 6: ORGANIGRAMA ÁREA OPERACIONAL	9
ILUSTRACIÓN 7: ÁRBOL DE PROBLEMAS: FUTUROS CUELLOS DE BOTELLA QUE LIMITARÁN LA PRODUCCIÓN	10
ILUSTRACIÓN 8: EJEMPLO MAPA CADENA DE VALOR	20
ILUSTRACIÓN 9: FACTORES INVOLUCRADOS EN EL CALCULO DE OEE	21
ILUSTRACIÓN 10: ILUSTRACIÓN GENERAL INSTALACIONES MLP	35
ILUSTRACIÓN 11: INTERFAZ GRÁFICA DE PROCESS BOOK	36
ILUSTRACIÓN 12: FLUJO DE INFORMACIÓN	37
ILUSTRACIÓN 13: FLUJO DE VALOR MINA	37
ILUSTRACIÓN 14: FLUJO DE VALOR MOLIENDA	38
ILUSTRACIÓN 15: FLUJO DE VALOR FLOTACIÓN	38
ILUSTRACIÓN 16: FLUJO DE VALOR STC Y PUERTO	39
ILUSTRACIÓN 17: POSIBLES SOLUCIONES A CUELLOS DE BOTELLA	71
ILUSTRACIÓN 18: PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DE CONCENTRADO DE COBRE	82
ILUSTRACIÓN 19: CUELLOS DE BOTELLA POR DUREZA DE MINERAL, AÑO 2014	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: PROYECCIÓN DUREZA DE MINERAL	12
GRÁFICO 2: PRODUCTIVIDADES ÁREA MINAS	41
GRÁFICO 3: EFICIENCIA GENERAL DE EQUIPOS MINA	42
GRÁFICO 4: PRODUCTIVIDADES PLANTA CONCENTRADORA	43
GRÁFICO 5: EFICIENCIA GENERAL DE EQUIPOS, PLANTA CONCENTRADORA	44
GRÁFICO 6: PRODUCTIVIDADES PEBBLES Y GRAVILLA	45
GRÁFICO 7: EFICIENCIA GENERAL DE EQUIPOS, PEBBLES Y GRAVILLA	46
GRÁFICO 8: PRODUCTIVIDADES STC	47
GRÁFICO 9: EFICIENCIA GENERAL DE EQUIPOS, STC	47
GRÁFICO 10: PRODUCTIVIDADES PUERTO	48
GRÁFICO 11: EFICIENCIA GENERAL DE EQUIPOS, PUERTO	49
GRÁFICO 12: PRODUCTIVIDADES CASO BASE Y 20% DURO, MINA	51
GRÁFICO 13: PRODUCTIVIDADES PARA CASO BASE Y 20% DURO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN	52
GRÁFICO 14: PRODUCTIVIDAD CASO BASE Y 20% DURO, STC	53
GRÁFICO 15: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, 20% Y 70% DURO, MINA	55
GRÁFICO 16: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, 20% Y 70% DURO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN	56
GRÁFICO 17: PRODUCTIVIDADES CASO BASE Y PROYECTO INCO CON 20% DURO, MINA	58
GRÁFICO 18: PRODUCTIVIDADES CASO BASE Y PROYECTO INCO CON 20% DURO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN	59
GRÁFICO 19: PRODUCTIVIDADES CASO BASE Y PROYECTO INCO CON 20% DURO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN 2032	60
GRÁFICO 20: PRODUCTIVIDADES CASO BASE Y PROYECTO INCO CON 20% DURO, PEBBLES Y GRAVILLA	61
GRÁFICO 21: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, PROYECTO INCO 20% Y 70% DURO, MINA	63
GRÁFICO 22: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, PROYECTO INCO 20% Y 70% DURO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN	64
GRÁFICO 23: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, PROYECTO INCO 20% Y 70% DURO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN 2032	65
GRÁFICO 24: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, 20% Y 70% DURO, GENERAL MLP	66
GRÁFICO 25: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, INCO 20% Y 70% DURO, GENERAL MLP	67
GRÁFICO 26: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, INCO 20% Y 70% DURO, GENERAL MLP 2032	67
GRÁFICO 27: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, 20% Y 70% DURO, PEBBLES Y GRAVILLA	83
GRÁFICO 28: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, 20% Y 70% DURO, STC	83
GRÁFICO 29: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, 20% Y 70% DURO, PUERTO	84
GRÁFICO 30: PRODUCTIVIDADES CASO BASE, PROYECTO INCO 20% Y 70% DURO, PEBBLES Y GRAVILLA	84

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: TONELADAS DE PRODUCCIÓN POR DIVISIÓN MINERA EN CHILE	7
TABLA 2: EJEMPLO PROCESS MAPPING ACTIVITY	25
TABLA 3: PARTES DEL PROCESO	28
TABLA 4: PRODUCTIVIDADES NOMINALES PARA DIFERENTES DUREZAS	49
TABLA 5: PROPORCIÓN DUREZA DE MINERAL BLANDO	50
TABLA 6: PROPORCIÓN DUREZA DE MINERAL DURO	54
TABLA 7: PROPORCIÓN MINERAL BLANDO	57
TABLA 8: PROPORCIÓN MINERAL DURO.....	62
TABLA 9: PRINCIPALES CUELLOS DE BOTELLA	68
TABLA 10: ESTIMACIONES PRECIO DEL COBRE POR JP MORGAN Y FITCH SOLUTION	73
TABLA 11: ESTIMACIONES PARA LEY DE COBRE Y RECUPERACIÓN, MINERA LOS PELAMBRES	74
TABLA 12: DIFERENCIA ENTRE GANANCIA REAL E IDEAL, CASO BASE (2018)	75
TABLA 13: PRODUCTIVIDADES PROMEDIO INTEGRANDO DUREZAS DE MINERAL, MOLINOS BOLAS	75
TABLA 14: PRODUCTIVIDADES PROMEDIO INTEGRANDO DUREZAS DE MINERAL, MOLINOS SAG.....	76
TABLA 15 : DIFERENCIA ENTRE GANANCIA REAL E IDEAL, 20% Y 70% DURO	76
TABLA 16: PRODUCTIVIDADES PROMEDIO INTEGRANDO DUREZAS DE MINERAL E INCO, MOLINOS BOLAS	77
TABLA 17: DIFERENCIA ENTRE GANANCIA REAL E IDEAL, PROYECTO INCO	77
TABLA 18: EJEMPLO DE PLANILLA UTILIZADA PARA LOS ANÁLISIS	85

I. ANTECEDENTES GENERALES

El trabajo de tesis presentado se sitúa en el área de Excelencia Operacional de Minera Los Pelambres. Esta empresa tiene por objetivo principal aumentar la capacidad de sus procesos e incrementar la producción y, en consecuencia, la exportación de mineral a sus principales clientes. Dado sus objetivos, el presente trabajo busca estudiar una problemática que dificulta alcanzarlos. Dicha problemática son los cuellos de botellas presentes en el proceso productivo de AMSA Los Pelambres, es decir, aquellas actividades que disminuyen el flujo del proceso, incrementando los tiempos de espera y reduciendo la productividad del sistema. Como consecuencia, esto genera un aumento en costos.

El solicitante que demanda el trabajo de título es un ingeniero industrial, responsable de la gestión estratégica y operativa de implementación de Excelencia Operacional en Los Pelambres y Gestión de Operaciones Mina a Puerto. Este profesional está a cargo de la coordinación/integración de gestión de líderes y línea ejecutiva en iniciativas claves de la compañía, tales como: “Recuperación Capacidad Productiva MLP” como primera prioridad de desarrollo compañía, “Mine to Mill” de Mina a Plantas y apoyo a “Equipos de Alto Desempeño” transversales a Los Pelambres. Además, es responsable del diseño e implementación de “Proyecto Integración Chacay” que innova en la forma de trabajar en Operaciones.

Los antecedentes generales que se presentan a continuación buscan proveer un contexto para entender el ambiente donde se desarrolla la problemática antes mencionada. Junto a ello, se abordan ciertas características propias de Minera Los Pelambres para indagar en aquellos aspectos propios, como la dureza de mineral y el proyecto de infraestructura complementaria (INCO), que explican el problema al cual se ven enfrentados actualmente y que el presente trabajo de memoria busca estudiar.

1.1 Características de la organización Minera Los Pelambres

a) Antecedentes

Minera Los Pelambres (MLP) es una empresa minera perteneciente a Antofagasta Minerals en un 60% y en un 40% a un consorcio de empresas japonesas compuesto por Nippon LP Investment (25%) y Marubeni & Mitsubishi LP Holding BV (15%). MLP opera desde finales de 1999. Esta se dedica a la explotación y producción de concentrado de cobre y molibdeno los que son comercializados en los principales mercados al rededor del mundo: Japón (35%); China (29%); resto de Asia (19%) y Europa (12%). Adicionalmente se incluyen como subproductos pagables los contenidos de oro y plata presentes en el concentrado de cobre [2].

Minera Los Pelambres ocupa el quinto lugar en producción a nivel nacional y es el séptimo productor de cobre a nivel mundial en 2018. Las instalaciones de la compañía recorren 120 kilómetros de cordillera a mar pasando por las comunas de Salamanca, Illapel y Los Vilos donde se encuentra su puerto de embarque en el sector de Punta Chungo, en un entorno donde coexisten más de 40 comunidades y 84 mil habitantes, quienes desarrollan tradicionales actividades económicas como: agricultura, ganadería de subsistencia, pesca y minería artesanal [3].

La estrategia laboral de la compañía se basa en la integridad, la confianza, la responsabilidad personal, el respeto y el cuidado mutuo entre todos quienes la componen. Uno de los principales compromisos es proteger y resguardar los derechos fundamentales de todos los trabajadores propios y colaboradores de empresas contratistas a través del cumplimiento de la legislación vigente y el compromiso con la Declaración Universal de los Derechos Humanos y los diez Principios del Pacto Global de las Naciones Unidas.

En las operaciones de Los Pelambres se desempeñan alrededor de seis mil personas de manera directa, entre trabajadores propios y colaboradores de empresas contratistas. En consecuencia, considerando el total de trabajo indirecto que crea la Región de Coquimbo, la compañía genera alrededor de 9 mil puestos de trabajo equivalentes al 2,8% del empleo y se destaca por la calidad de sus relaciones laborales.

Las ventas totales de Los Pelambres en 2012 alcanzaron un total de US\$ 3.553.733. En el periodo 2006 - 2012 la compañía tuvo una producción media anual de cobre fino de 354 mil toneladas métricas y, en el mismo periodo, incrementó sus ventas en un 24% gracias al precio internacional del cobre, pasando de US\$2.727.000 en 2006 a US\$ 3.553.733 en 2012. Sin embargo, en 2018 alcanzaron un total de US\$ 2.423.869 dada las variaciones en el precio, ya que en el mismo año la compañía tuvo una producción media anual de cobre fino de 370 mil toneladas métricas, similar a los años anteriores [4].

b) Misión, visión y valores

Minera Los Pelambres como misión y lineamiento estratégico busca:

- Asegurar que el crecimiento de la compañía se traduzca en un mayor beneficio para todos los grupos de interés.
- Fortalecer las relaciones con los grupos de interés para posibilitar el crecimiento.
- Asegurar la excelencia operacional y desarrollar relaciones de confianza y mutuo beneficio con los grupos de interés.

Por otro lado, en su visión mencionan que buscan ser una empresa productora de cobre y derivados de alta rentabilidad, con una reconocida reputación de excelencia operacional y confiabilidad, proactiva e innovadora en los ámbitos económico, social y ambiental, percibida como un socio estratégico en el desarrollo de la Región de Coquimbo.

Finalmente, como valores plantean:

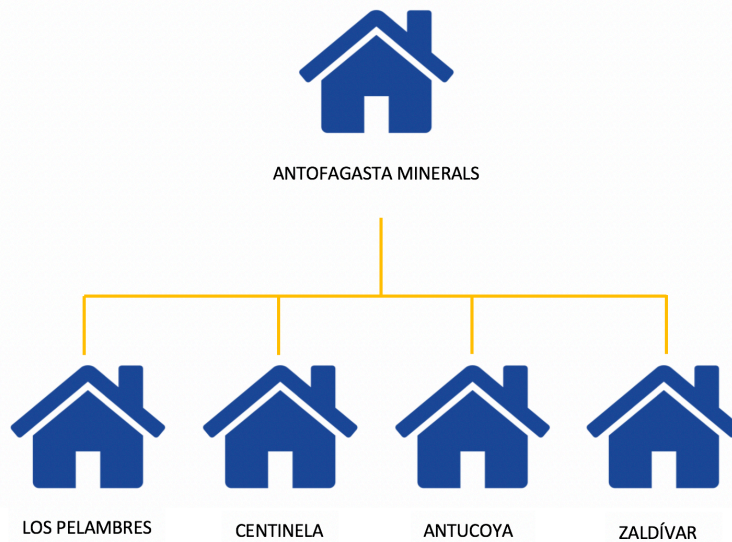
1. **Respeto a los demás:** Confiamos y respetamos a las personas y tenemos un genuino interés por su bienestar. Su opinión nos importa y nos relacionamos de forma abierta y colaborativa. Construimos confianza al cumplir con nuestros compromisos
2. **Responsabilidad por la seguridad y la salud:** Somos responsables de nuestra seguridad y salud, así como la de los demás, identificando y controlando nuestros riesgos y siendo conscientes de los impactos que generan nuestras acciones.

3. **Compromisos con la sustentabilidad:** Entendemos que el compromiso con la sustentabilidad pasa por crear valor en lo económico, en lo ambiental y en lo social. Respetamos a nuestros entornos y nos relacionamos con ellos de forma proactiva.
4. **Excelencia en nuestro desempeño diario:** Trabajamos para alcanzar siempre mejores resultados a través de la disciplina operacional, siendo austeros, eficientes y cuidando nuestros recursos.
5. **Innovación como práctica permanente:** Reconocemos y fomentamos las nuevas ideas que permiten mejorar nuestras prácticas de trabajo y las maneras de relacionarnos con otros, buscando crear valor para la organización, las personas y el entorno.
6. **Somos visionarios:** Somos visionarios al entender que la estrategia de nuestro negocio es de largo plazo, aprendiendo de nuestros errores y teniendo la flexibilidad y el coraje para enfrentar desafíos cambiantes.

c) Estructura organizacional.

Minera Los Pelambres pertenece a Antofagasta Minerals, junto a otras Mineras como Centinela, Antucoya y Zaldívar. [5]

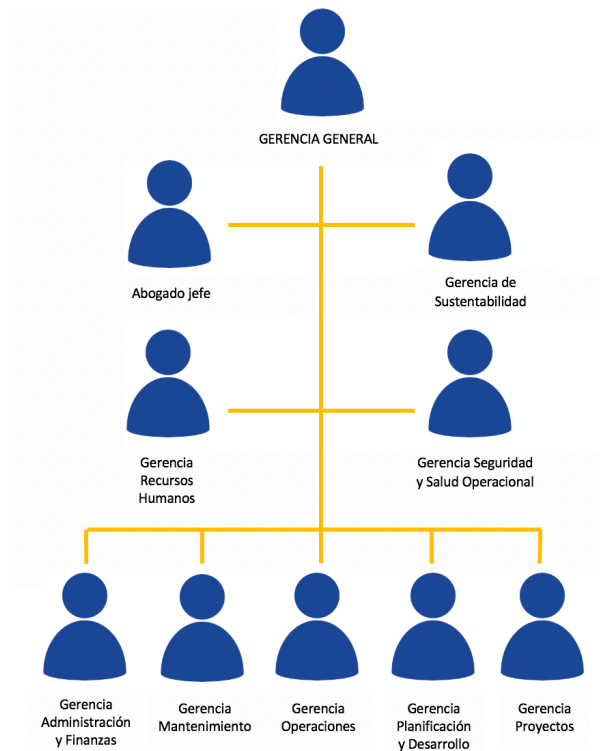
Ilustración 1: Estructura Antofagasta Minerals



Fuente: Elaboración propia

El Directorio de Minera Los Pelambres cuenta con diversos comités integrados por representantes de Antofagasta Minerals y sus socios japoneses: Comité de Marketing, Comité Técnico y Comité Ejecutivo. En conjunto, operan otros comités especializados y/o de carácter asesor en materias como: Operaciones, Proyectos, Estrategia, Finanzas, Tributarios y Riesgo, los que se presentan a continuación:

Ilustración 2: Organigrama Minera Los Pelambres



Fuente: Minera Los Pelambres

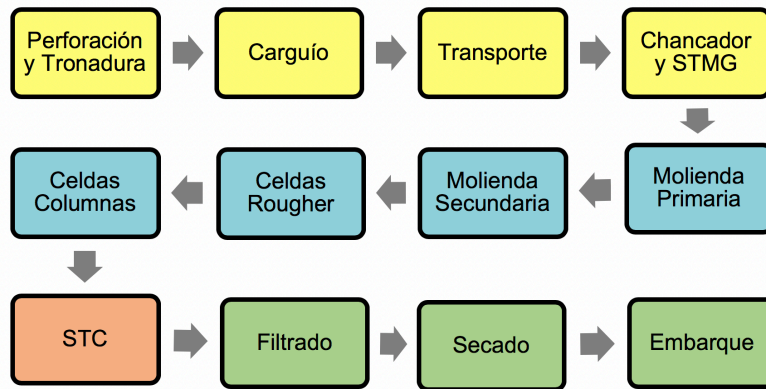
d) Proceso productivo

Para entregar su producto (concentrado de cobre) a sus clientes, Minera Los Pelambres pasa por un largo proceso que comienza con la extracción del mineral, la que se realiza a través de una mina a rajo abierto, luego del proceso de tronadura y carguío es trasladado a través de camiones de alto tonelaje (350 ton) hasta el sector de chancado primario. Ahí el mineral es reducido y luego enviado hacia el área de procesamiento a través de una correa transportadora que recorre 13 kilómetros, acumulándose en un stock pile. Desde ahí el mineral es enviado al sector de molienda, el que contempla 3 Molinos SAG y 4 Molinos Bolas, instalaciones que trituran el mineral hasta alcanzar el tamaño adecuado para la liberación de las partículas de cobre.

Una vez alcanzado el tamaño necesario, el mineral entra al proceso de flotación, donde al mineral de cobre sulfurado se le agrega agua, reactivos y aire, y es agitado para hacerlo burbujear, consiguiendo el arrastre a la superficie del mineral que luego pasa al proceso de espesamiento para aumentar la concentración de cobre, producto que se envía a través de un ducto al puerto Punta Chungo, en Los Vilos. En este lugar el concentrado pasa por un proceso de secado a través del cual se logra la humedad requerida para ser embarcado en los buques que lo conducirán a su destino final.

Se presenta la siguiente ilustración para representar de forma general el proceso productivo que sigue el concentrado de cobre:

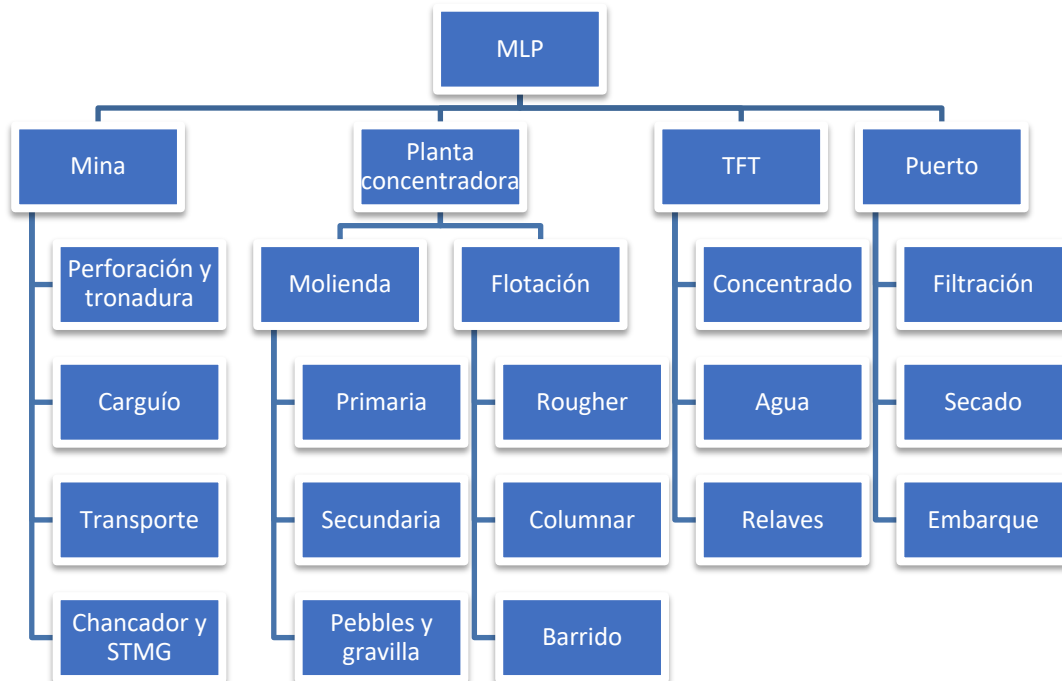
Ilustración 3: Proceso Productivo General MLP



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, cada parte del proceso productivo pertenece a una área específica en la que además se incluyen subprocesos secundarios como Pebbles y Gravilla, Flotación Barrido o procesos de agua y relaves, como se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración 4: Distribución de procesos y sub procesos en las diferentes áreas



Fuente: Elaboración propia

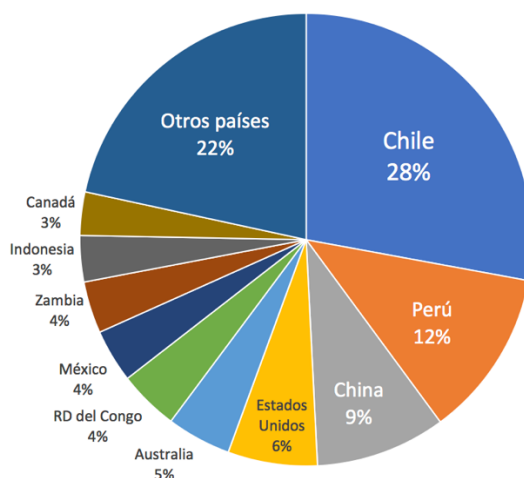
1.2 Mercado minero y desempeño de la empresa.

La minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel global, centrada esencialmente en la explotación, procesamiento y comercialización de minerales como, por ejemplo, metálicos, minerales no metálicos o rocas y minerales industriales (RMI).

A nivel mundial existen tres continentes, América, Asia y Oceanía, en los cuales la actividad minera se desarrolla en forma permanente, y en los que existen países que son líderes en la producción de minerales metálicos y/o de rocas y minerales industriales. En ellos, países como Estados Unidos, Canadá, México, Perú, Chile, China, India, Rusia y Australia, ocupan los primeros lugares en el mundo en la producción de uno o más minerales, como, por ejemplo, Canadá en potasa, México en plata, Chile en cobre y yodo, China en oro, molibdeno, nitrógeno, silicio y azufre, Turquía en boro, y Australia en litio. Específicamente para el mercado del cobre, los países competidores son principalmente Chile, Perú, China, EE. UU.

En Chile, la minería participa en forma relevante en la economía nacional. El año 2017 la participación de la minería en el PIB alcanzó al 10,1%, y en ella la participación del cobre fue de 9%. Chile, como mayor productor y exportador de cobre en el mundo, produjo 5.558 toneladas métricas el año 2017, lo que equivale al 27,9% de la producción mundial de cobre (ver ilustración 5), además de ocupar un segundo lugar en la producción mundial de molibdeno, con 62.454 toneladas métricas que corresponde al 21,1% de esa producción. Como productor de rocas y minerales industriales, ocupó el primer lugar en la producción de yodo con 17.976 ton con un 61,4% de participación en la producción mundial, y el segundo lugar en la producción de litio con 15.114 ton y un 34,4% de participación [6].

Ilustración 5: Participación mundial en el mercado del cobre



Fuente: Elaboración propia con datos COCHILCO 2018

Cabe señalar que el mercado del cobre ha ido en aumento desde sus inicios. Se espera que al año 2028 la producción de cobre en Chile llegue a valores superiores a 6 millones de toneladas (ver anexo A).

Finalmente, dentro de Chile el mercado de producción de cobre cuenta con 24 mineras, donde Minera Los Pelambres se posiciona en quinto lugar al 2018 (ver tabla 1), teniendo un crecimiento progresivo los últimos 3 años de producción, dada una baja constante desde el 2013 al 2016.

Tabla 1: Toneladas de producción por división minera en Chile

Prod. Chilena de Cobre	Unidad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Total Chile	Miles TM	5.776,0	5.761,1	5.772,1	5.552,6	5.503,5	5.831,6
Total Codelco	Miles TM	1.621,7	1.671,8	1.731,7	1.707,5	1.733,9	1.677,5
Escondida	Miles TM	1.193,7	1.165,4	1.152,5	1.002,0	925,4	1.242,7
Collahuasi	Miles TM	444,5	470,4	455,3	506,5	524,0	559,2
El Teniente	Miles TM	450,4	455,5	471,2	475,3	464,3	465,0
Anglo American Sur	Miles TM	467,3	436,9	437,8	354,2	348,7	422,2
Los Pelambres	Miles TM	419,2	404,6	375,8	367,8	356,3	370,5
Radomiro Tomic (2)	Miles TM	379,6	327,3	315,7	318,3	318,9	332,7
Chuquibambilla (1)	Miles TM	339,0	340,4	308,6	302,0	330,9	320,7
Andina	Miles TM	236,7	232,4	224,3	193,4	220,0	195,5
Ministro Hales	Miles TM	33,5	141,2	238,3	237	215,1	195,5
Spence	Miles TM	151,6	176,1	175,6	167,4	198,6	176,4
Centinela (Sulfuros)	Miles TM	177,1	180,7	145,2	180,4	163,8	155,4
Caserones	Miles TM	16,2	44,6	74,9	117,3	122,8	136,5
Gaby	Miles TM	128,2	121,0	125,0	121,7	122,7	107,3
Sierra Gorda	Miles TM	-	12,7	87,9	98,1	101,7	101,9
Candelaria	Miles TM	168,0	134,7	150,2	135,4	150,3	101,7
Zaldívar	Miles TM	126,5	100,6	103,4	103,4	103,3	94,5
Centinela (Oxidos)	Miles TM	102,6	93,8	75,9	55,8	64,5	92,6
El Abra	Miles TM	155,6	166,4	147,2	99,9	78,4	91,3
Anglo American N	Miles TM	111,3	104,2	106,3	99,1	87,8	83,5
Lomas Bayas	Miles TM	74,2	66,4	70,6	80,1	78,0	72,7
Antucoya	Miles TM	-	-	12,2	66,2	80,5	72,2
Cerro Colorado	Miles TM	73,6	79,6	74,4	74,0	66,2	66,2
Salvador	Miles TM	54,3	54,0	48,6	59,8	62,0	60,8
Quebrada Blanca	Miles TM	56,2	48,1	39,1	34,7	23,4	25,5

Fuente: COCHILCO 2018

1.3 Regulaciones

En cuanto a las regulaciones en el rubro de la minería, destacan dos áreas relevantes en las que hay agentes que controlan el comportamiento de la minera en cuestión. La primera de ellas relacionada al control del medio ambiente y contaminación, la segunda apunta a la seguridad de los trabajadores en sus labores de minería.

Con respecto al control del medio ambiente, la superintendencia del medioambiente tiene por objeto ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA); medidas de los planes de prevención y/o de descontaminación ambiental; contenido de las normas de calidad ambiental y normas de emisión; planes de manejo y todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la Ley N° 19.300 sobre bases generales del medio ambiente. Dicha ley es la regulación marco del medio ambiente y establece los instrumentos de gestión ambiental y los procedimientos para su dictación teniendo en consideración la protección de salud humana, como de otros componentes del medio ambiente, poniendo atención en la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo.

Por otro lado, según el código del trabajo, el empleador tiene la obligación de tomar todas las medidas necesarias para proteger eficazmente la vida y salud de los trabajadores, informando de los posibles riesgos y manteniendo las condiciones adecuadas de higiene y seguridad en las faenas, como también los implementos necesarios para prevenir accidentes y enfermedades profesionales. En los lugares de trabajo deberá suprimirse cualquier factor de peligro que pueda afectar la salud o integridad física de los trabajadores. Además de lo mencionado, las empresas mineras deberán elaborar, desarrollar y mantener reglamentos internos específicos de las operaciones críticas, que garanticen la integridad física de los trabajadores, el cuidado de las instalaciones, equipos, maquinarias y del medio ambiente. Lo anterior es fiscalizado por el servicio nacional de geología y minería (SERNAGEOMIN).

II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 Área de la organización

La tesis planteada se desarrolla en el área de Operaciones, específicamente en el área de Excelencia Operacional de Minera Los Pelambres. Esta última es parte de la Gerencia General y se encarga de la mejora de las operaciones bajo el nuevo Modelo Operacional de Antofagasta Minerals y Los Pelambres.

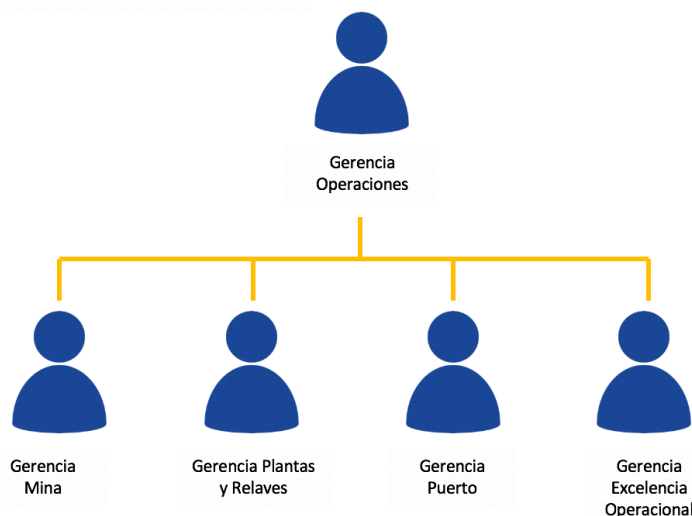
El área realiza un trabajo transversal con todas las áreas operacionales y de soporte a la producción por medio de: Identificación y diagnóstico de Oportunidades de Mejora, particularmente en los principales KPIs operacionales, diseño de soluciones y mejoras, PMO (Project Management Office) de ejecución de estos proyectos de mejora y seguimiento del resultado, para finalmente mantener el ciclo de mejora.

En específico, sus principales funciones son:

1. Apoyar y facilitar actividades para la identificación de variables claves involucradas en desempeños deficitarios (problemas contingentes).
2. Enseñar y apoyar en la aplicación de metodologías de análisis causal para la identificación de las causas básicas asociadas a los problemas contingentes.
3. Apoyar al área en la revisión de variables, revisión y/o establecimiento de indicadores y estándares requeridos para:
 - a. Orientar y motivar las conductas de los responsables en el proceso.
 - b. Monitorear la evolución de la efectividad de las mejoras a implementar.
 - c. Facilitar y apoyar actividades de identificación de oportunidades de mejoramiento y diseño de soluciones asociadas a eliminar, disminuir o controlar las causas básicas identificadas.
 - d. Apoyar a los líderes de las áreas en el Control y seguimiento del impacto de las iniciativas implementadas sobre el desempeño del proceso.

2.2 Organigrama

Ilustración 6: Organigrama área operacional



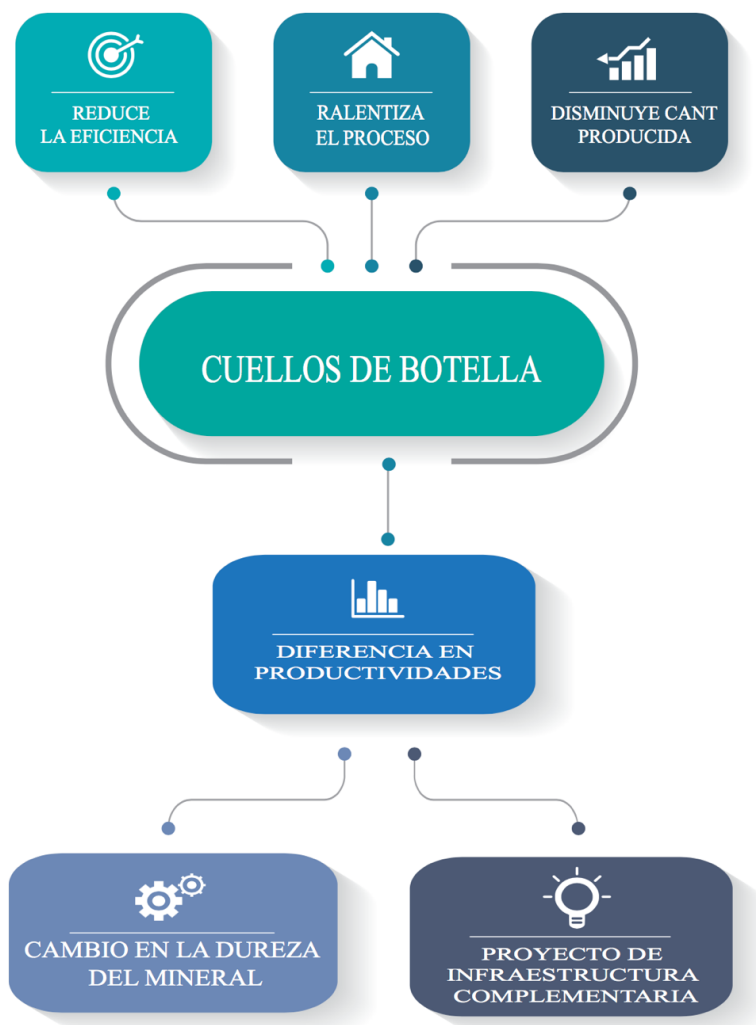
Fuente: Minera Los Pelambres

Cabe señalar que el trabajo de título desarrollado no implica un aporte solo al área de excelencia operacional, sino que también a toda la compañía, dado que es un trabajo que va desde mina hasta puerto, pasando por las diferentes áreas de la operación minera, tales como minas, concentrador, tranque y fluidos y finalmente puerto.

2.3 Problema

Esta investigación apunta a estudiar un problema específico de Minera Los Pelambres, enfocado en la generación de cuellos de botella en el proceso productivo de MLP. Estos se producen, principalmente, por dos escenarios: cambios en la dureza de mineral y el proyecto de infraestructura complementaria. El problema anteriormente mencionado es relevante, ya que tiene por consecuencia una reducción en la cantidad producida, una ralentización del proceso y una reducción de la eficiencia en MLP. En efecto bajan las ventas y, por tanto, los ingresos.

Ilustración 7: Árbol de problemas: Futuros cuellos de botella que limitarán la producción



Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que todo proceso productivo se puede representar y analizar como una cadena de valor que muestre las actividades realizadas para lograr la generación de productos o servicios ofrecidos a los clientes finales. Sin embargo, al hacer esto es muy común encontrarse con procesos que en realidad no le agregan valor a estos productos o servicios lo que implica un impacto negativo en la productividad del sistema. En el caso de la minería, por ejemplo, se pueden detectar actividades que no agregan valor como mantenciones y detenciones no planificadas que pueden estar dadas por problemas de la máquina misma, máquinas aguas arriba o aguas abajo o también por factores externos como restricciones ambientales o cortes de luz. Dichos desperdicios pueden finalmente generar desequilibrios en la producción y por tanto cuellos de botellas.

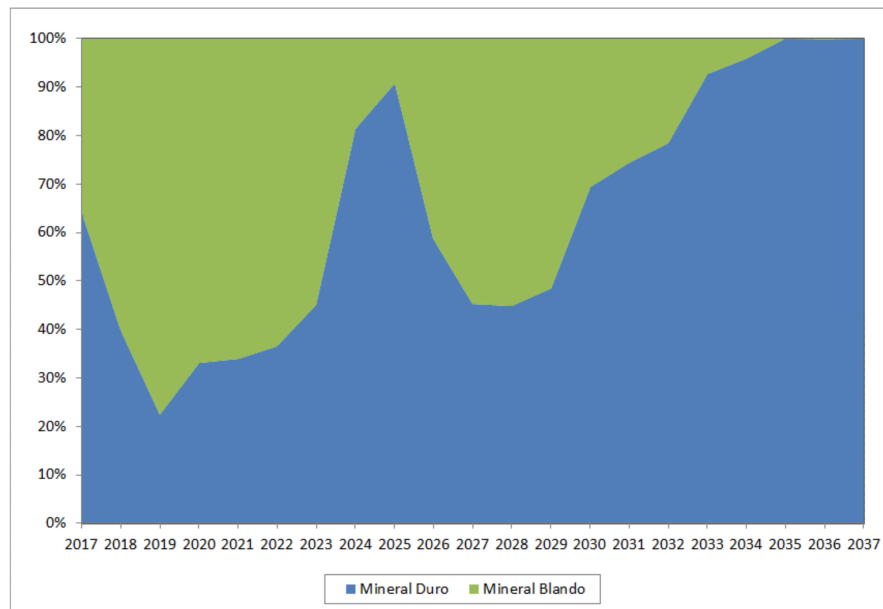
Estas actividades que no agregan valor pueden ser catalogadas como desperdicios que se clasifican en siete tipos: esperas, sobreproducción transporte, procesamiento excesivo, inventario, defectos y movimiento. Dichos desperdicios ocasionan un problema para la minera y la eficiencia de esta, dado que en ciertos casos limita la producción y posterior venta del concentrado de cobre. Existen diferentes causas que ocasionan los desperdicios anteriormente mencionados, entre ellas se encuentran: el desbalanceo, sobrecapacidad, métodos del proceso actual, sub optimización, realización de actividades en serie/paralelo inequívocas, interrupciones constantes en el proceso, entre otras.

Los cuellos de botella son causados principalmente por los desperdicios de espera. Estos corresponden al tiempo muerto que se produce cuando dos variables independientes del proceso no están completamente sincronizadas. Las causas principales de este tipo de desperdicios son: los tiempos de preparación, los tiempos en que una pieza debe esperar a otra para continuar su procesamiento de ensamble, tiempo por reparaciones o mantenimientos, tiempos de espera de instrucciones de los siguientes pasos en otros procesos, espera de materias primas que se les deben adicionar, retrasos por aspectos administrativos, falta de decisión, el tiempo de cola de espera para su procesamiento.

Hoy en día en MLP existen partes del proceso que cuentan con detenciones y mantenciones no planificadas de hasta 2.400 horas anuales, donde no se puede trabajar ni producir. Lo anterior significa perder hasta un 30% del tiempo de producción por diferentes tipos de causas de estas detenciones, ya sea por problemas aguas arriba o aguas abajo, restricciones ambientales, alarmas no identificadas, etc.

Por otro lado, otro factor que influye en la generación de cuellos de botella es la dureza del mineral tratado, ya que al aumentar la dureza de mineral aumenta el tiempo de procesamiento y con ello el tiempo de espera de otros procesos. La dureza es una propiedad de la roca que mide la capacidad de resistencia que ofrecen los materiales a procesos de abrasión, desgaste, penetración o de rallado. En las aleaciones, la dureza aumenta con los tratamientos térmicos o con el endurecimiento por deformación. Por lo tanto, dicha dureza ocasiona que exista mayor dificultad por parte de la maquinaria para lograr la granularidad requerida, tomando un mayor tiempo para llegar al estándar necesario para seguir el proceso. Minera Los Pelambres cuenta con una estimación futura para el cambio en la dureza del mineral de cobre, como se muestra en el gráfico 1 donde el mineral extraído pasará de un material blando a uno duro.

Gráfico 1: Proyección dureza de mineral



Fuente: Minera Los Pelambres

Cabe señalar que durante el año 2014, se realizó un análisis por Porsche Consulting que identificó cómo los cambios de dureza del material afectaban al proceso y a los cuellos de botella existentes. Se evidenció que para cuando se trabajaba con materiales blandos, los cuellos de botella estaban en el proceso de chancado y en el sistema de transporte de mineral grueso, en cambio, cuando el material trabajado era duro, el cuello de botella se encontraba en la perforación y tronadura, junto a ello la productividad disminuía considerablemente al cambiar el tipo de material (ver anexo B).

En este sentido, la planificación de la minera cuenta con un cambio en la dureza del mineral extraído; se estima que en aproximadamente 3 años se pasará de un material blando a un material duro, lo que afectará directamente al tiempo de procesamiento de algunas partes del proceso y por ende, en su productividad. Lo anterior podría generar cuellos de botella dependiendo de las instalaciones con las que se cuentan en ese momento (actuales y nuevas incorporaciones por el proyecto INCO), pues ciertas instalaciones podrían ocasionar desequilibrios en la producción y causar un desperdicio en el flujo. En relación con lo anterior, la hipótesis de este estudio es que dicho cambio en la dureza del mineral ocasionará desperdicios en partes del proceso que impliquen una granularidad del mineral, como lo es la tronadura, chancado y molienda.

Además de lo anterior en este estudio es relevante el análisis de proyecto de infraestructura complementaria, pues las nuevas maquinarias implementadas en este aumentarán las capacidades de solo algunos procesos, dejando a otros con un déficit de capacidad para poder lograr una mayor producción. Por lo tanto, la investigación tiene por objetivo identificar si los procesos no involucrados en INCO se vuelven cuellos de botella o tienen capacidades acordes a las nuevas instalaciones.

INCO comenzará sus operaciones durante el segundo semestre del año 2021. Este consiste en reforzar la capacidad de procesamiento de mineral mediante la instalación

de una nueva línea de molienda y una nueva línea de flotación en la Planta Piuquenes, ubicada dentro de las instalaciones productivas de Minera Los Pelambres, en la comuna de Salamanca, para alcanzar la tasa de procesamiento de mineral máxima ambientalmente aprobada.

Dicho proyecto es un claro ejemplo de una de las causas que contribuyen con la formación de desperdicios y específicamente con la creación de cuellos de botella. Este tipo de causas es denominado “suboptimización” y se refiere a descuidar el sistema global por optimizar una parte o área, es decir, se optimiza uno o más elementos de un proceso a expensas y en detrimento del todo como sistema afectando la ruta crítica y generando un marcapaso o un cuello de botella en otra parte del sistema.

En conclusión, tanto la dureza de mineral como el proyecto INCO generarán en un futuro cambios en el proceso actual. Cuando comiencen las operaciones de las nuevas líneas de molienda y flotación en el año 2021 o se comience con la tronadura de material de mayor dureza, se generarán variaciones en el proceso actual, generando posibles desequilibrios de producción en el proceso minero, ocasionando una disminución en la producción global.

Por consiguiente, es de vital importancia identificar con antelación los cuellos de botella que se podrían presentar en 2 escenarios principalmente: cambio en la dureza y proyecto INCO. De esta forma se pueden evaluar e implementar soluciones pertinentes con el propósito de no limitar la producción futura. Es de gran importancia mencionar que durante el año 2014 se dejaron de ganar aproximadamente US\$ 13.000.000, por no anticiparse al primer cuello de botella existente en esa época, el cual ocasionó un límite en la producción de ese año.

2.4 Posibles alternativas de solución

Existen diferentes formas de solución y acciones Lean para desperdicios de cuellos de botella (por ejemplo, nivelación de producción, nuevo layout, Jidoka, SMED). Sin embargo, aún no se tienen identificadas las distintas partes del proceso que cuentan con este tipo de desperdicios. Por lo tanto, como primera y única solución es identificar los diferentes cuellos de botellas para los casos actuales y futuros. De esta forma, MLP podrá anteponerse a ellos y buscar soluciones antes de que estos se presenten. La identificación correcta del cuello de botella del proceso es vital en el desarrollo de posibles mejoras, ya que si se centran esfuerzos y recursos en mejorar un centro de trabajo que no es el crítico, se pierde todo lo realizado pues no se mejora la producción.

2.5 Impacto

El segundo semestre del año 2021 empezará a funcionar el proyecto INCO y se espera que aumente la producción anual a 60.000 toneladas en promedio, sin embargo, dicho aumento no será posible si existe déficit de capacidad de otras partes del proceso, ocasionando cuellos de botella y disminución de la productividad. Por ello, es totalmente necesario anticiparse a los desperdicios que puedan ocasionar estos proyectos e identificarlos para, posteriormente, buscar soluciones y, finalmente, no afectar la producción por problemas de defectos del proceso.

2.6 Objetivos

2.6.1 Objetivo General

Identificar los desequilibrios (cuellos de botella) en el proceso productivo minero de minera AMSA Los Pelambres que afectarán la futura producción con el propósito de anticiparse a ellos.

2.6.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar los procesos de Mina a Puerto
2. Definir escenarios posibles de generación de cuellos de botella
3. Desarrollar metodología VSM bajo conceptos Lean Manufacturing
4. Identificar y especificar los flujos nominales y reales de equipos críticos MLP
5. Calcular productividad de capital (OEE) por procesos principales
6. Determinar cuellos de botella por cada escenarios propuestos
7. Definir posibles soluciones
8. Desarrollar análisis económico

2.7 Marco Conceptual

2.7.1 Lean Manufacturing

El modelo más adecuado para abordar la problemática de esta memoria es Lean Manufacturing aplicado a procesos. El término Lean fue acuñado por un grupo de estudio del Massachusetts Institute of Technology para analizar en el nivel mundial los métodos de manufactura de las empresas de la industria automotriz. El grupo destacó las ventajas de manufactura del mejor fabricante en su clase, la empresa automotriz japonesa Toyota, y denominó como Lean Manufacturing al grupo de métodos que había utilizado desde la década de los años sesenta y que, posteriormente, se afinó en la década de los setenta con la participación de Taiichi Onho y Shigeo Shingo.

Con la extensión del sistema a otros sectores y países se ha ido configurando un modelo que se ha convertido en el paradigma de los sistemas de mejora de la productividad asociada a la excelencia industrial. De forma resumida puede decirse que Lean consiste en la aplicación sistemática y habitual de un conjunto de técnicas de fabricación que buscan la mejora de los procesos productivos a través de la reducción de todo tipo de desperdicios.

En la última década, industrias de los sectores de la alimentación, farmacéutica o bienes de equipo han adoptado con éxito el modelo Lean. Actualmente, las experiencias señalan que el Lean es aplicable a cualquier tipo de industria, incluso a los servicios. Implementar Lean Manufacturing no consiste simplemente en poner en práctica unas cuantas técnicas para mejorar los procesos, sino que también comprende un cambio en el pensamiento de toda la empresa, desde la materia prima al producto terminado, de la orden a la entrega y desde la idea a la concepción.

Hay 5 principios que sirven de guía para cambiar de sistema de producción a Lean [7].

1. **Definir el valor del producto:** el valor lo define el cliente en términos de lo que él necesita o anda buscando.
2. **Identificar el flujo del valor:** tener claro cuál es el proceso que sigue el valor para ser entregado al cliente, detectando cuáles son los insumos a transformar para que sean entregados al cliente y eliminar sus desechos.
3. **Hacer que el valor fluya sin interrupciones:** luego de eliminar los posibles desechos, hacer que el valor fluya sin interrupciones.
4. **Dejar que sea el cliente quien hale el producto:** saber qué es lo que necesita el cliente y cuándo lo necesita, para tener una producción justo a tiempo.
5. **Perseguir la perfección:** estar en un continuo mejoramiento en busca de alcanzar o acercarse a la perfección.

Definir el valor

Se entiende por valor a un producto específico (bien o servicio) que satisface las necesidades del cliente, con un precio y tiempo determinado [7]. El concepto del valor lo define el cliente junto con el productor o proveedor; el primero presenta las exigencias y requisitos necesarios para que se cumplan sus necesidades, para que el segundo pueda entregar tal valor cumpliendo las expectativas del cliente. Por ello, el primer paso crítico del Pensamiento Ajustado es lograr expresar exactamente lo que se desea.

El punto anterior es muy importante en el flujo de abastecimiento de productos, ya que si no se tiene claro qué tipo de material se necesita y agregado a esto, la diversidad de materiales existentes, se generan confusiones que terminan entregando un producto que no era el deseado, generando re-trabajos y tiempos de espera de material, por lo tanto, pérdidas. Para evitar lo anterior, el proceso de definición del valor debe iniciarse precisando los productos específicos a utilizar, y si amerita mayor detalle, expresar en qué se utilizará el producto solicitado.

Identificar el flujo del valor

El flujo del valor está conformado por todos los subprocesos y etapas que debe pasar el valor, desde que nace la necesidad del cliente hasta que se le es satisfecha, identificando todas las etapas intermedias. El proceso se inicia con las materias primas (en este caso de estudio) o información inicial y termina con el cliente, que puede ser el cliente final o cliente interno. Lo que se mueve en el flujo del valor dependerá del tipo de empresa o proceso, es decir, si hablamos de manufactura lo que fluye son materiales, en diseño y servicios fluye la información, en servicios humanos fluyen las personas. En el presente caso de estudio se analiza el flujo de materias primas, en particular el cobre producido.

Tener claridad de los procesos intermedios permite ver los desperdicios que produce el proceso y a partir de esto plantear un rediseño del mismo. Esta etapa muestra que:

1. Algunas pocas acciones o actividades que se hayan identificado son las que verdaderamente sirven para crear valor en el producto y/o servicio, además de realizar el trabajo bien a la primera.
2. Otras actividades no añaden valor, pero es necesario realizarlas, debido a leyes, políticas internas, tecnología, etc.
3. El resto de las actividades son evitables, ya que no entregan valor ante los ojos del cliente.

Los dos últimos puntos presentan actividades que pueden ser consideradas mudas, que significa despilfarro, ineficiencia o desperdicios, o sea, toda actividad que consume recursos, pero no entrega valor. Los desperdicios en los que se puede incurrir en toda actividad productiva pueden ser siete [7]:

1. Sobreproducción
2. Transporte de bienes
3. Esperas varias
4. Movimiento de empleados
5. Productos o información defectuosos
6. Procesamiento excesivo
7. Inventario

La técnica del mapeado del flujo de valor o Value Stream Mapping, que será presentada más adelante, es un buen recurso para el análisis de esta etapa, pues permite la identificación del flujo del valor con las actividades que entregan valor y las que no.

Hacer que el valor fluya sin interrupciones

Una vez que se tiene claro el flujo es importante hacer que el valor fluya por este sin interrupciones. En general, las personas tienden a agrupar el trabajo en lotes grandes, sin embargo, hay que rediseñar esto o cambiar la actitud con la intención de generar un flujo continuo de lotes de producción más pequeños [8].

Permitir que el cliente defina el valor

Una de las claves para realizar un buen trabajo es satisfacer al cliente con el producto y/o servicio entregado, considerando el tiempo en que él lo solicitó. Para esto es imperante comprender lo que necesita. Lo que se propone es que el cliente sea quien realice las propuestas y entregue información de lo que busca por sobre la idea de que el productor realice el producto con sus propias características y se lo entregue al cliente, a saber, el cliente es el que decide cómo es el producto, no así el proveedor. Esto hace que el responsable de la correcta entrega del producto es el último participante del flujo, el cual va presionando al que está anterior en él, y así sucesivamente. Más aún, las demandas se vuelven más estables cuando el cliente sabe que tiene garantizado el servicio [8].

Perseguir la perfección

El espíritu de Lean es la continua búsqueda de la perfección, no basta con realizar algunas mejoras que entreguen buenos resultados, lo que persigue Lean es la constante mejora, un continuo perfeccionamiento. Es por esto que alcanzado los cuatro pasos anteriores, surge la idea de que no hay final en el proceso de reducir esfuerzos, tiempo, espacio, costos y desperfectos, ofreciendo un producto que cada vez se acerca más a lo que el cliente solicita, ya que siempre se puede empezar otra vez con un mejoramiento.

Las etapas anteriores hacen que la empresa entre en un círculo virtuoso y la búsqueda de la perfección tome sentido, donde el compromiso del equipo y la claridad y transparencia de la información son aspectos importantes.

2.7.2 Value Stream Mapping

Existen diferentes herramientas que permiten el análisis, evaluación y el rediseño de un proceso. Entre los mencionados y, además, más utilizados está el Value Stream Mapping (VSM) o Mapeo del flujo del valor. El VSM se muestra como una técnica relacionada con la producción sin pérdidas bajo un enfoque Lean. El objetivo principal del Value Stream Mapping es resolver todos los problemas existentes en el proceso de producción para aumentar la productividad del mismo, reduciendo o eliminando desperdicios. Lo que se desea es alcanzar el estado futuro que se plantea, ese estado ideal donde no hay ningún tipo de desperdicio en la producción. En concreto, el VSM es una técnica visual que plasma de forma gráfica un proceso en particular, donde se muestra cómo fluye el valor a lo largo de la cadena y se entrega información relativa a los tiempos asociados con los procesos involucrados, tiempos de espera, re trabajos, índices de productividad, etc. Esta técnica la comenzó a desarrollar Toyota bajo la idea de “mapeado del flujo y de información” y, finalmente, fue desarrollada por Rother y Shook en su libro “Learning to see” (1998), (ver ilustración 8, ejemplo de VSM) [8].

Para lo anterior hay que analizar proceso por proceso, evaluando cómo agrega valor al producto (o cómo no lo agrega). Este enfoque en el valor es lo que mantiene el análisis orientado a lo que realmente importa, permitiendo a la empresa ser más competitiva. El VSM se utiliza para producir el mayor valor para el cliente de la manera más eficiente posible. Además, se debe tener siempre presente para la mejora continua, ya que continuamente se pueden obtener oportunidades de mejora. El VSM permite ver no solo el desperdicio, sino también la fuente o causa de este.

El VSM tiene 5 fundamentos importantes, que son:

1. Especificar el valor
2. Identificar el flujo del valor
3. Hacer que el valor fluya
4. Comprender al cliente
5. Buscar la perfección

Como se observa, los cinco fundamentos son los mismos que persigue la filosofía Lean, es por esto que se puede decir que el VSM afecta a la base teórica del Lean.

Por otro lado, el VSM tiene una serie de etapas para poder llevar a cabo la investigación de un proyecto [8]:

1. Definir el valor que va a ser estudiado

Para este estudio es relevante tener claro el valor. Al definir esto se hace referencia desde dónde nace hasta dónde se deseará mapear, cuál es la información por considerar y qué áreas de la empresa se tienen que considerar. Además de focalizar el mapeado en un solo proceso que entregue el producto por determinar, se debe tener bien claro que esto es de suma importancia, ya que el incluir todos los posibles inputs de información o singularidades no conduce a desarrollar de manera adecuada las pautas de una Producción Ajustada [8].

2. Mapa del estado actual

Se hace una recopilación de toda la información necesaria para poder llevar a cabo el mapeo. Los autores aconsejan [8]:

1. Utilizando lápiz y papel, recopilar toda la información necesaria in situ
2. Dibujar aguas arriba, comenzando con los requerimientos del cliente
3. Cada actividad donde el material y la información fluyan, se considera un proceso y se dibuja mediante una caja. En dichas cajas se deben de registrar los datos necesarios para cada proceso, que podría ser:
 - a) Tiempo de ciclo
 - b) Tiempo de proceso
 - c) Demanda
 - d) Eficiencia
 - e) Número de operarios
 - f) Otros datos que sean importantes considerar

Contabilizar el tiempo de trabajo de una pieza o pedido, así como el periodo de maduración desde que se inicia el flujo hasta que termina. La idea de esta etapa es lograr representar en el mapa del estado actual, como realmente funciona el proceso en el presente, con la mayor cantidad de datos que sea posible, ya que a partir de lo indicado en esto se podrá realizar el posterior análisis.

3. Análisis del estado actual

Se trata de revisar el funcionamiento actual del flujo completo, logrando identificar las actividades que agregan valor, las que no agregan valor, pero son necesarias y las que no agregan valor. Además de lo anterior, Rother sugiere responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el takt time o ritmo impuesto del trabajo realizado?
2. ¿Dónde se puede emplear flujo continuo?
3. ¿Es necesario emplear algún sistema pull para gestionar la producción?
4. ¿Qué unidad de trabajo será retirada constantemente del proceso?
5. ¿Qué mejoras de proceso serán necesarias en el flujo de valor para que fluya como en el diseño del estado futuro?

4. Mapa del estado futuro

A partir de los resultados que entregue el análisis del estado actual, se deben realizar los cambios pertinentes para poder lograr los objetivos planeados en el análisis. Luego de esto, se pueden obtener los nuevos tiempos totales estimados que demorará el proceso y si permite el flujo, obtener un nuevo takt time.

El Estado Futuro es el resultado del análisis realizado al estado actual, se espera hacer cambios del estado actual con la finalidad de eliminar las actividades que no agreguen valor al sistema, reducir los tiempos. Todo lo anterior apoyado en una implementación sostenible.

5. Crear un plan de trabajo e implementar

La creación del plan de trabajo corresponde a la última etapa del VSM. En esta se plasman en la práctica todos los cambios realizados presentados en el mapa del Estado Futuro ya aprobado. Un buen plan de implementación es clave para lograr los objetivos planteados.

Así como la Planificación e implementación son puntos relevantes, también hay que combinarlos en algunos casos con sistemas de prueba y error con los que hay que ir aprendiendo y sacando resultados y conclusiones. Además de ello, se necesita tener un control y una supervisión de cómo va la adaptación de los cambios propuestos.

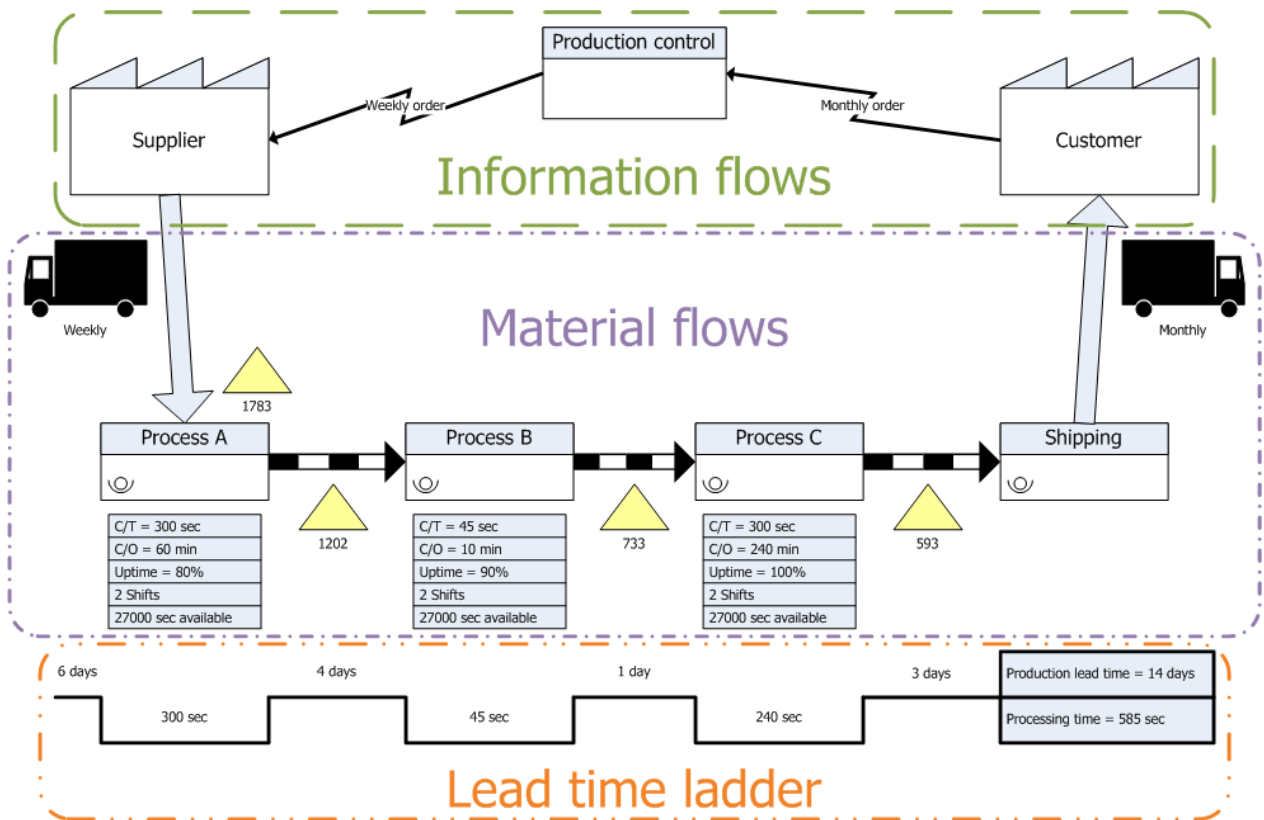
Aportes del Value Stream Mapping

Rother afirman que el VSM cumple demandas para una técnica de rediseño de sistema productivo. Por su parte, Pavnashkar (2003), en su categorización de técnicas Lean, subraya su gran potencial de cara a la mejora de sistemas productivos. Este último autor propone las siguientes justificaciones [8]:

1. El análisis de la situación inicial está basado en el tratamiento de datos numéricos (tiempo), junto con el empleo de un soporte gráfico facilitando la visión de los flujos de materiales e información.
2. La visión sistemática del flujo de un producto o servicio, que refleja sus ineficiencias.
3. El empleo de un lenguaje común para el entendimiento de todo el equipo, la unificación de conceptos y aplicación de técnicas Lean.
4. La posibilidad de que el VSM suponga un punto inicial en un plan estratégico de mejoras.
5. Permite debatir sobre el flujo a través de la visualización de este, tomando decisiones entre los diferentes actores involucrados en el proceso.
6. Permite la mayor facilidad de adaptación a personas que se estén recién integrando a la empresa, al poder visualizar el VSM con todos sus detalles e información.

Por tanto, el VSM se considera una herramienta válida para lo que se desea obtener.

Ilustración 8: Ejemplo mapa cadena de valor

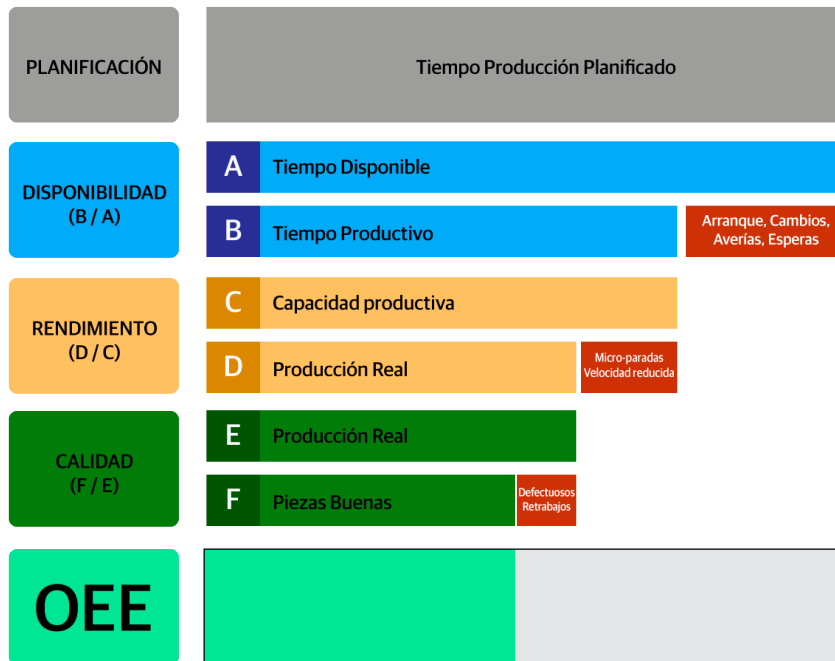


Fuente: Control Group

2.7.3 Efectividad General del Equipo

La Efectividad General del Equipo (OEE) es una herramienta Lean, que constituye una muy buena medida de la condición y rendimiento general del equipo. Esta refleja si el equipo se está utilizando en forma eficiente o no. También es un valor que se puede comparar (o aplicar benchmarking) con otras operaciones para saber lo que el equipo debería ser capaz de lograr. La medición de la OEE considera todos los factores principales asociados con la operación del equipo [9].

Ilustración 9: Factores involucrados en el calculo de OEE



Fuente: Sistemas OEE Technology to improve

De esta forma, el indicador puede ser calculado de la siguiente manera:

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad$$

Existen diferentes causas que repercuten en el OEE y que provocan la disminución del porcentaje de este indicador. Por lo tanto, al conocer dichas causas se está en condiciones de trabajar en ellas para reducirlas lo máximo posible, siendo este el objetivo principal de un indicador, ayudar a la mejora continua de la organización.

OEE considera 6 grandes pérdidas o desperdicios:

1. Averías
2. Cambios
3. Detenciones menores
4. Reducción de velocidad
5. Basura
6. Re-trabajo

Las dos primeras grandes pérdidas, averías y cambios, afectan a la Disponibilidad; las dos siguientes grandes pérdidas, detenciones y reducción de velocidad, afectan al Rendimiento; y las dos últimas grandes pérdidas afectan a la Calidad [10].

Como conclusión se debe destacar que con un solo indicador podemos estudiar tres conceptos relevantes para cualquier organización como son [11]:

1. **Disponibilidad:** Resulta de dividir el tiempo que la máquina ha estado produciendo (Tiempo de Operación: TO) por el tiempo que la máquina podría haber estado produciendo. El tiempo que la máquina podría haber estado produciendo (Tiempo Planificado de Producción: TPO) es el tiempo total menos los periodos en los que no estaba planificado producir por razones legales, festivos, almuerzos, mantenimientos programados, etc., estas se denominan paradas planificadas.

$$\text{Disponibilidad} : \frac{\text{Tiempo de Operación}}{\text{Tiempo planificado de producción}}$$

La disponibilidad es un valor entre 0 y 1, por lo que puede ser representado en porcentajes

2. **Rendimiento:** resulta de dividir la cantidad de piezas realmente producidas por la cantidad de piezas que se podrían haber producido. La cantidad de piezas que se podrían haber producido se obtiene multiplicando el tiempo en producción por la capacidad de producción nominal de la máquina.

$$\text{Rendimiento} : \frac{\text{cant. de piezas producidas}}{\text{cant. de piezas que se podrían haber producido}}$$

El rendimiento es un valor entre 0 y 1, por lo que puede ser representado en porcentajes.

3. **Calidad:** Las unidades producidas pueden ser conformes, buenas, o No Conformes, malas o rechazos. A veces, las unidades No Conformes pueden ser reprocesadas y pasar a ser unidades Conformes. La OEE solo considera Buenas las que se salen conformes la primera vez, no las reprocesadas. Por tanto, las unidades que posteriormente serán reprocesadas deben considerarse Rechazos, es decir, malas.

Por consiguiente, la Calidad resulta de dividir las piezas buenas producidas por el total de piezas producidas incluyendo piezas re trabajadas o desechadas.

$$\text{Calidad} : \frac{\text{Piezas buenas}}{\text{Total de piezas}}$$

La calidad es un valor entre 0 y 1, por lo que puede ser representado en porcentajes.

2.8 Metodología

Para términos de la presente memoria se trabaja sobre la base del segundo principio Lean “**identificación del flujo de valor**”, mediante el cual se busca conocer el estado actual del proceso de fabricación, identificando los cuellos de botella durante todo el flujo de valor, desde mina a puerto de Minera Los Pelambres. Junto a ello, este trabajo de tesis está focalizado en las etapas 2 y 3 de la metodología Value Stream Mapping. Por lo tanto, la primera fase se concentra en conocer el estado actual del sistema de fabricación, para luego poder realizar un análisis de éste y, posteriormente, incluir los diferentes escenarios que se presentarán a futuro.

Con esta metodología como base, se detallan las etapas fundamentales a desarrollar:

1. Etapa 1

1.1. Definición del proyecto

Esta fase tiene como propósito definir en detalle todos los factores de importancia que deben ser analizados para iniciar el tema de memoria. Para esto, se comienza con puntualizar la justificación del desarrollo del trabajo, detallando el problema y cómo este se ha originado. Se declara el objetivo general y los específicos del proyecto para tener un mayor entendimiento de lo que se quiere lograr, los resultados esperados y sus alcances.

Por otra parte, se detalla la metodología a emplear con la finalidad de tener claras las herramientas a utilizar para obtener la información y que los resultados tengan relación con lo que se pretende conseguir. Además, se analizan los riesgos asociados a la elaboración del proyecto, ya sea dificultades para conseguir datos de mayor confidencialidad, problemas con la implementación, restricciones de la organización, entre otras. De esta manera, es posible anticipar inconvenientes que pueden afectar el desarrollo apropiado de la memoria y contar con estrategias de solución en caso de ser requeridas.

2. Etapa 2

Esta etapa consiste en la fase previa a la diagramación de las actividades del proceso y la construcción de un Value Stream Mapping donde se recopila toda la información necesaria para la fase siguiente, se especifica los principales pasos llevados a cabo en el proceso de creación de concentrado de cobre, definiendo las métricas que serán necesarias, para así recopilar información en base a ellas.

En base a la bibliografía estudiada se presentan los siguientes pasos para su apropiada elaboración:

2.1. Identificar los principales procesos

En esta etapa se determina cada uno de los procesos que se deben seguir en el desarrollo de creación de concentrado de cobre, desde el momento en que se realiza la perforación del terreno hasta que el mineral es cargado en puerto para su

exportación. Lo anterior se realiza mediante el programa process book, además de reuniones con diferentes ingenieros químicos del área donde se efectúa la memoria.

2.2. Recogida de información

El éxito de la fase posterior, depende de gran medida de la fiabilidad de los datos de partida. Se precisa información de los productos (referencias, componentes, cantidades) y los procesos (operaciones, equipos, capacidades, tiempos).

Por tanto en esta fase se identifican las métricas a analizar y en base a ellas se busca información de los procesos y funcionamiento de las diferentes maquinas e instalaciones implicadas en el flujo de material, mediante entrevistas a ingenieros, operadores, mineros, quienes están a cargo de mina, planta y puerto, además de observaciones presenciales en las distintas partes del proceso minero, en sus distintas áreas como minas, planta concentradora, Pebbles y gravilla y puerto. Por otro lado, se recoge aquella información virtual entregada por la maquinaria, mediante tres sistemas (PI, SEP y SIP) donde se cuenta con información de capacidades, tiempos disponible, tiempos de uso, etc.

Por otro lado, se utiliza una de las 7 herramientas de VSM: Process Activity Mapping. Dicha herramienta tiene sus orígenes en la Ingeniería Industrial, dado que comprende un grupo de técnicas que se pueden utilizar para eliminar los residuos del lugar de trabajo, inconsistencias e irracionalidades, y proporcionar bienes y servicios de alta calidad fácil, rápida y económica.

Process Activity Mapping incluye los siguientes pasos. Primero, se emprende un análisis preliminar del proceso, seguido por el registro detallado de todos los elementos necesarios en cada proceso. El resultado de esto es un mapa del proceso bajo consideración (véase tabla 2). Como puede observarse, a partir de este ejemplo cada paso (1-23) ha sido clasificado en términos de una variedad de tipos de actividad (operación, de transporte, inspección y almacenamiento). Posteriormente se registran las máquinas o áreas utilizadas para cada una de estas actividades, junto con la distancia recorrida, tiempo empleado y el número de personas involucradas.

Tabla 2: Ejemplo Process Mapping Activity

#	STEP	FLOW	MACHINE	DIST (M)	TIME (MIN)	PEOPLE	O P E R A T I O N	T R A N S P O R T	I N S P E C T	S T O R E	D E L A Y	COMMENTS
1	RAW MATERIAL	S	RESERVOIR				O	T	I	S	D	RESERVOIR/ ADDITIVES
2	KITTING	O	WAREHOUSE	10	5	1	O	T	I	S	D	
3	DELIVERY TO LIFT	T		120		1	O	T	I	S	D	
4	OFFLOAD FROM LIFT	T			0,5	1/2	O	T	I	S	D	
5	WAIT FOR MIX	D	MIX AREA		20		O	T	I	S	D	
6	PUT IN GRADE	T		20		2	O	T	I	S	D	
7	PIERCE/POUR	O	MIX AREA 12		0,5	1	O	T	I	S	D	
8	MIX(BLOWERS)	O			20	1/2	O	T	I	S	D	BASE MATERIAL, BLOW & ADDITIVES
9	TEST #1	I			30	1+1	O	T	I	S	D	SAMPLE/TEST
10	PUMP TO STORAGE TANK	T	STORE TANK	100		1	O	T	I	S	D	DEDICATED RESERVOIR
11	MIX IN STORAGE TANK	O			10	1	O	T	I	S	D	
12	I.R.REST	I	STORE TANK		10	1+1	O	T	I	S	D	STAMP & APPROVE
13	AWAIT FILLING	D			15		O	T	I	S	D	LONGER IF SCREEN LATE
14	TO FILLER HEAD	T		20	0,1	1	O	T	I	S	D	
15	FILL/TOP/FIGHTEN	O	FILLER HEAD		1	1+1	O	T	I	S	D	1 UNIT
16	STACK	T	PALLET	3	0,1	1	O	T	I	S	D	1 UNIT
17	DELAY TO FILL I PALLET	D			30		O	T	I	S	D	
18	STRAP PALLET	O			2	1	O	T	I	S	D	
19	TO STORE	T		80	2	1	O	T	I	S	D	
20	AWAIT TRUCK	D	STORE		540		O	T	I	S	D	BATCH 360/ QUEUE 180
21	PICK/MOVE BY FORK LIFT	D		90	3	1	O	T	I	S	D	FORK LIFT
22	WAIT TO FILL FULL LOAD		LORRY		30	1+1	O	T	I	S	D	1 OPERATOR, 1 HAULIER
23	AWAIT SHIPMENT		LORRY		60	1	O	T	I	S	D	1 HAULIER
	TOTAL		23 STEPS	443	781,2	25	6	8	2	1	6	
	OPERATORS				38,5	8						
	% VALUE ADDING				4,93%	32%						

Fuente: The seven Value Stream Mapping tools - Peter Hines y Nick Rich

3. Etapa 3

En esta etapa se introduce toda la información recogida y analizada hasta el momento en un VSM denominado “actual”, que actúa como fuente de información global de la situación de partida, visualizada a través de los flujos materiales. Junto a ello, se evalúa cómo ocurre el traspaso de material de una etapa a otra y se completa los cuadros de datos respectivos a cada proceso.

3.1. Trazado de VSM actual

Para realizar el análisis de la situación actual de la cadena de valor y poder detectar desequilibrios en la producción, se utiliza Excel y se procede a dibujar el mapa en dicha herramienta. En los cuadros del mapa de información se agrega las productividades y eficiencia de equipos.

3.2. Identificación de cuellos de botella

En el desarrollo de esta fase se estudia en detalle cada uno de los pasos involucrados en el procedimiento diseñado anteriormente, tanto los procesos como los tiempos en que el material se encuentra en espera y la manera en que estos fluyen a través de las etapas. La idea es identificar si existen cuellos de botella. Para ello, se realizan

gráficos de productividad, para analizar e identificar las partes del proceso con menor productividad y que por tanto genere un límite en la producción total del proceso. Además, junto con el análisis de OEE se pueden identificar las causas de estos cuellos de botella, para el caso base 2018.

4. Etapa 4

4.1. Cambios de escenarios

A partir de la situación actual (caso base 2018) se realiza un análisis de los cambios en los diferentes cuellos de botella dados los diferentes escenarios que se presentarán en el futuro, específicamente cambio en la dureza de mineral y proyecto INCO, con las mismas herramientas anteriormente mencionadas.

5. Etapa 5

En esta etapa se realiza un análisis general de todos los escenarios anteriormente estudiados, con una mirada del proceso productivo en conjunto con el propósito de tener una idea global del problema y del cuello de botella principal que se encuentra en la cadena de valor de AMSA Los Pelambres

6. Etapa 6

Dados los cuellos de botella encontrados en las etapas anteriores, se buscan soluciones generales para ellos con el objetivo de presentar ideas para que en un futuro la minera pueda estudiarlas y analizar cual de ellas es la mejor para ser implementada en caso de querer solucionar los cuellos de botellas encontrados.

7. Etapa 7

Finalmente en esta última etapa se realiza un análisis económico para observar como los cuellos de botellas identificados afectan a la economía de Minera Los Pelambres, para tener una visión de cuánto dinero se está dejando de ganar por tener dichos cuellos de botella presentes o cuánto se podría estar ganando extra si ellos fueran eliminados.

Resulta relevante señalar que se contó con una planilla que fue realizada anteriormente para los análisis de cuello de botella durante el año 2014, bajo metodología Value Stream Mapping que sirvió de guía para el trabajo de título a realizar.

Finalmente, es importante destacar que la metodología VSM es ideal para este tipo de análisis en comparación a otras, dado que VSM se enfoca en toda la cadena de valor, identificando los desperdicios entre procesos a diferencia de otras más simples, que su enfoque está dentro de cada proceso. Por otro lado, es la base para la implantación de las técnicas Lean y sobre todo de la cultura Lean, las que permiten obtener unas mejoras claras en muchos aspectos esenciales, como la productividad, costos, flexibilidad y participación del personal en las empresas. Los resultados de estudios en este aspecto son relevantes, ya que más del 80% de las empresas que han adoptado el Lean manifiestan que los beneficios obtenidos han sido altos [10].

2.9 Alcances

El trabajo de título a desarrollar se enfoca en la identificación de los cuellos de botella del proceso completo de Minera Los Pelambres para 5 escenarios. Lo anterior depende de las variaciones producidas por los cambios en la dureza de mineral y la integración de las nuevas instalaciones del Proyecto de infraestructura complementaria:

1. Caso Base 2018
2. 70% dureza mineral
3. 20% dureza mineral
4. Proyecto INCO con 20% dureza de mineral
5. Proyecto INCO con 70% dureza de mineral.

Cabe señalar que se analizan cada uno de los procesos que forman parte de la creación de concentrado de cobre, excluyendo aquellos procesos de tratamiento de molibdeno (producto secundario de Minera Los Pelambres) y procesos hídricos o de relaves. Por otro lado, el análisis se focaliza en el flujo de material sin considerar flujos de información.

Sumado a lo anterior, se estudia como los cuellos de botella más significativos afectan a la economía de AMSA Los Pelambres. Finalmente, se realizan propuestas de mejoras generales para los cuellos de botellas más relevantes encontrados, con el objetivo de que MLP pueda realizar análisis en base a ellos y así anticiparse a los quiebres del futuro.

2.10 Resultados esperados

Como resultados esperados, se busca poder analizar toda la cadena de valor e identificar los principales cuellos de botella existentes, para la situación actual y los escenarios futuros. Además dar propuestas de soluciones generales a los cuellos de botellas principales encontrados y finalmente, encontrar efectos económicos para los cuellos de botella más relevantes.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Definición del proyecto

Este proyecto nace a partir de la necesidad de realizar un diagnóstico del proceso productivo de AMSA Los Pelambres, específicamente con la identificación de cuellos de botella en el área de excelencia operacional. Un diagnóstico previo muestra que existen desperdicios en el proceso y, con ello, cuellos de botella que limitan la producción. Debido a esta situación, se considera necesario realizar un estudio con data e investigación para identificarlos.

Una primera aproximación al problema es realizar un mapeo con todas las instalaciones que inciden en el proceso a estudiar. En la siguiente tabla se muestra un resumen por área de trabajo y procesos/equipos más relevantes.

Tabla 3: Partes del proceso

Área	Proceso
Mina	Perforación
Mina	Tronadura
Mina	Carguío
Mina	Sistemas de Transporte
Mina	Chancadores
Planta concentradora	Molinos SAG
Planta concentradora	Baterías Ciclone
Planta concentradora	Molinos Bolas
Planta concentradora	Celdas Rougher
Planta concentradora	Celdas Columnar
Planta concentradora	Celdas Scavenger
STC	Espesamiento
STC	Bombas
Puerto	Filtros de la pulpa
Puerto	Correas
Puerto	Carguío
Pebbles y gravilla	Correas
Pebbles y gravilla	Chutes Pantalón

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Cliente

Para continuar con el avance del tema de memoria es necesario conocer el cliente que se beneficia con los resultados que se encuentren. De esta manera se puede conocer cuales son sus inquietudes y que factores se debe tener en consideración para el análisis posterior.

En este trabajo el cliente es específicamente el área de excelencia operacional, puesto que el enfoque del análisis está ligado al hallazgo de las partes del proceso que tengan menor capacidad y sean una limitación en la producción, ante ello que es importante la

identificación de los principales cuellos de botella del proceso productivo. Esta área es la que sufre el dolor, ya que es la encargada de que las operaciones funcionen a su máxima capacidad y, por tanto, es su deber buscar la manera de optimizar los procesos y que de esta forma se pueda producir más y, por tanto, vender una mayor cantidad de producto.

3.1.2 Métricas

Previo al análisis correspondiente, es necesario el levantamiento de información acerca de como funciona el proceso productivo de MLP. En este sentido se requiere contar con métricas para estudiar la situación actual y luego realizar un análisis e identificar los principales cuellos de botella.

Para el diseño del flujo del proceso se utiliza el formato VSM, en que se evalúan los tiempos, productividades y eficiencias de cada etapa. Por lo tanto, es necesario contar con métricas como las siguientes para cada parte del flujo:

1. Tiempo total
2. Tiempo de disponibilidad
3. Tiempo de utilización
4. Número de equipos
5. Producción de tratamiento
6. Producción recirculada
7. Productividades nominales

Con ayuda de estas métricas se planea identificar las partes del proceso que son cuellos de botella y que, por ende, están limitando la producción total Minera Los Pelambres.

3.1.3 Escenarios

Para la identificación de cuellos de botella, se definen 5 escenarios relevantes con el objeto de ser analizados. Estos escenarios son determinados sobre la base del análisis de dureza de mineral y del proyecto de infraestructura complementaria. El primer escenario se define como “caso base” y se determina en torno a los datos del año 2018. Lo anterior para tener un punto de comparación para los escenarios futuros que se estimarán, además de identificar los cuellos de botella que se encuentran actualmente y así tener una imagen vigente de MLP.

Por otro lado, se presentan 2 escenarios relacionados con la dureza de mineral. El primer escenario busca analizar la productividad de la minera en casos de una dureza de mineral de 20%, mientras que el segundo escenario tiene por objetivo estudiar el funcionamiento de MLP para momentos con dureza de mineral de 70%. Se escogen estos dos casos extremos, ya que es trascendental conocer los límites de productividad. Cabe señalar que los escenarios mencionados se presentan desde el año 2019 hasta el 2021. Finalmente, los 2 escenarios restantes se presentan desde el año 2022 en adelante y son definidos en base al proyecto de infraestructura complementaria. Dichos escenarios buscan analizar los cuellos de botella para MLP con el proyecto INCO operando y con diferentes durezas de mineral, ya sea 20% o 70%.

En resumen, se analizan los siguientes escenarios:

1. Caso Base
2. 20% dureza de mineral
3. 70% dureza de mineral
4. Proyecto INCO y 20% dureza de mineral
5. Proyecto INCO y 70% dureza de mineral

3.2 Etapas previas al Value Stream Mapping

3.2.1 Identificación de procesos

Actualmente, Minera Los Pelambres cuenta con 4 grandes áreas en las cuales se pueden agrupar las actividades más importantes del proceso productivo. Estas últimas se mencionan a continuación (según documentación interna):

1. Mina

En esta área se realiza el procedimiento mediante el cual se extrae el cobre de la Tierra. El objetivo principal es, por tanto, sacar el mineral del macizo rocoso para llevarlo de forma segura a la planta donde será separado de otros minerales y se obtendrá el cobre más puro. Este último cobre se vende en el mercado internacional.

Los subprocesos de mina corresponden a:

a) Perforación y tronadura

En base a una planificación a corto plazo, se definen los bloques a perforar día a día, los cuales vienen con ciertas características, ya sea de mineral, composición, dureza, etc. Dadas estas propiedades se definen los patrones de perforación y tronadura.

La perforación consiste en utilizar una malla (patrón de perforación) con características definidas por las propiedades del bloque determinadas anteriormente. En esta etapa se definen las perforadoras y los explosivos a utilizar, además en la malla se definen los puntos donde se realizarán las perforaciones y también la profundidad de estas para hacer hendiduras/pozos en la tierra en las que más adelante se pondrán explosivos. Para ello se cuenta con 10 perforadoras.

Los explosivos puestos en las perforaciones realizadas anteriormente son detonados a control remoto, para fragmentar el macizo rocoso. Los explosivos remueven aproximadamente 150.000 toneladas de mineral diaria.

Existen ocasiones en que se realiza un análisis del material fragmentado, para posteriores planificaciones de perforación y tronadura.

b) Carguío

En esta etapa se selecciona el tipo de material tronado, identificando si es material con alto porcentaje de mineral a procesar, ripio o lastre (los cuales tienen poco porcentaje de mineral).

Mediante 6 palas principales y 3 cargadores frontales de gran tonelaje, se cargan los camiones que llevarán el material recolectado hasta el chancador primario, ripio o lastre.

Cabe señalar que los cargadores frontales funcionan como máquinas secundarias, es decir, en caso de que una de las palas necesite de ayuda, los cargadores frontales toman la labor de apoyo.

c) Chancador Primario

Esta etapa tiene por objetivo reducir por primera vez el mineral tronado, donde se encuentran dos chancadores giratorios que poseen engranajes con los que trituran el material. En ocasiones el material ingresado es de una magnitud en que los engranajes del chancador no son capaces de molerlos, por lo tanto, es necesario detener el proceso y la máquina, para hacer funcionar un martillo picarocas que permite triturar la roca y seguir con el proceso.

Esta detención puede durar entre 4 a 8 horas, por lo que es perjudicial para el proceso, por esta razón la fase anterior de tronadura debe realizarse con claras especificaciones y características, para que no suceda lo anteriormente mencionado.

La descarga de ambos chancadores es transportada vía correa hasta un acopio de 18.000 toneladas de capacidad viva ubicado en el sector mina, el cual sirve de cabeza para el sistema de transporte de mineral grueso a la planta concentradora.

d) Transporte de Mineral Grueso

El sistema de transporte de mineral grueso existente consiste en tres correas de 1.8 m de ancho y de aproximadamente 12.600 m de longitud total. Estas correas permiten alimentar el acopio de mineral grueso, de 105.000 ton de carga viva, ubicado en el área del concentrador. El sistema de transporte se inicia en la cota 3.000 m.s.n.m. y descarga a una elevación aproximada de 1.700 m.s.n.m., por tanto, cuentan con motores del tipo regenerativo.

2. Planta Concentradora

Dicha área está enfocada en el procesamiento del mineral para obtener finalmente concentrado de cobre. Este es tratado y clasificado en varias etapas mediante una serie de equipos que van reduciendo el tamaño de las rocas de mineral, mediante un proceso que se denomina Conminución, para luego someterlo a un proceso denominado Flotación.

Los subprocesos de mina corresponden a:

a) Molienda

El proceso de molienda está diseñado para reducir de tamaño el mineral proveniente de la etapa de chancado primario y dejarlo en proporciones aptas para el proceso de flotación

Se divide en 3 etapas principalmente:

i) Molienda Primaria

Se busca reducir el mineral a partículas muy pequeñas, por medio de caída del propio mineral, junto a bolas de acero. La planta de molienda existente en Piuquenes consiste en tres líneas de molienda SAG.

Para alimentar cada una de las líneas de molienda SAG, en la parte inferior del acopio de gruesos hay 4 alimentadores por cada línea, que descarga a su correa de alimentación. Los alimentadores son regulables, de manera que el sistema de control puede ajustar la carga al Molino SAG, según los objetivos de producción y las condiciones operacionales específicas de mineral y del molino. De los 4 alimentadores disponibles siempre se utilizan 2 y los dos restantes están stand-by. Los alimentadores son de velocidad variable y cada uno es capaz de suministrar el 50% del requerimiento del molino, o sea, se puede trabajar con un mínimo de 2 alimentadores operando a toda su capacidad o un máximo de 4 alimentadores trabajando al 50% de su capacidad.

Las tres líneas de molienda trabajan en paralelo y el producto de las tres alimenta la misma planta de flotación. La molienda se realiza en húmedo, es decir, se mezcla el mineral proveniente del stock de gruesos con agua. La razón entre mineral y agua la regula el sistema de control en rangos predefinidos para obtener los mejores resultados de molienda. El diseño estima trabajar con un porcentaje de sólidos al interior del molino de alrededor de 65% a 75%. En la alimentación también se adiciona lechada de cal para regular el pH de la pulpa que se envía hacia flotación.

En esta fase se obtienen dos salidas, una de ellas con material denominado Pebbles, el cual no alcanza un tamaño óptimo para seguir el proceso, por lo que es enviado a la planta de Pebbles. Por otro lado, se encuentra el material bajo tamaño el que es enviado a la etapa siguiente: Molienda secundaria.

ii) Molienda secundaria

La molienda secundaria corresponde a la reducción de tamaño de mineral que proviene de un circuito de trituración fina, es decir, molienda SAG y ocasionalmente (como complemento) por la gravilla obtenida del chancado de Pebbles. Dicha trituración fina tienen típicamente tamaños menores a 3/4" o menores que 1/2" y para seguir con el proceso de conminución se utilizan bolas de acero que ocupan aproximadamente el 34% del volumen del molino.

El circuito de molienda secundario está compuesto por 6 molinos, de los cuales el número 4 y 5 operan en paralelo y en serie al Molino SAG 1, definiendo la línea 1. Los Molinos de Bolas 6 y 7 operan en paralelo y en serie al Molino SAG 2, definiendo la línea 2. La línea 3 se define como el Molino SAG 3 más el Molino de Bolas 9 , operando en serie. El molino 8 opera independiente a los Molinos SAG.

La batería de ciclones clasifica el mineral. El material grueso (underflow) es retornado al molino para que vuelva a ser molido y los finos (Overflow) se envían a Flotación.

iii) Pebbles y Gravilla

Durante la operación, al interior del molino se genera un tamaño de partícula que es difícil de reducir de tamaño, denominado Pebbles, el cual es preferible eliminarlo del molino y procesarlo en otra etapa independiente, para así tener la posibilidad de procesar una mayor cantidad de mineral. La cantidad de Pebbles generado depende de las características propias del mineral (grado de dureza, granulometría), además del tonelaje fresco, de la moliendabilidad del SAG y apertura de las parrillas del trommel.

Las instalaciones existentes para el manejo de Pebbles y gravilla incluyen cuatro chancadores. Los Pebbles chancados pueden ser retornados tanto a los Molinos SAG como a los Molinos de bolas.

Existen 2 opciones de tratamiento de este mineral en esta planta:

1.- Enviar todo el flujo hacia “Planta de Gravilla”, en donde se procesa en 3 chancadores de cono para reducir su tamaño. La planta de gravilla tiene la opción de retornar todo el producto chancado hacia los Molinos SAG 1 y 2 (denominado circuito SABC-A) o redirigir el producto chancado hacia los Molinos de Bolas 4, 5, 6 o 7. (denominado circuito SABC-B)

2.-Enviar todo el flujo hacia la “Planta de Pebbles”, en donde se procesa en un chancador de cono, el cual retorna todo el producto de chancado a los Molinos SAG 1 o 2, operando en circuito SABC-A.

3.- Si el flujo de Pebbles generados es muy alto, se debe trabajar con las dos plantas en paralelo.

b) Flotación

La Flotación de minerales se define como un proceso de concentración donde desde el fondo de grandes piletas llamadas celdas de Flotación, se bombea aire para generar burbujas. Debido a la acción de los reactivos que fueron añadidos en la Molienda, el cobre se adhiere a estas burbujas y suben a la superficie de la solución. Una vez ahí, rebosan las celdas de Flotación (piscinas) por los costados y caen hacia canaletas que las conducen a estanques especiales, desde donde esta pulpa resultante será enviada a la siguiente etapa.

En el proceso se obtienen 2 productos, un concentrado rico en el metal de interés (cobre para MLP) y un relave que está compuesto principalmente por material estéril de poco o nada de valor comercial. La planta de flotación en MLP, se divide en Flotación Rougher, Flotación Columnar y Flotación Barrido, con una etapa de remolienda de concentrados. Cada una de estas etapas tiene una función en particular.

El circuito existente de flotación incluye: 3 filas de 9 celdas, 2 filas de 6 celdas y 2 filas de 5 celdas para la etapa primaria (rougher), 14 celdas para el circuito columnar y 3 filas de 9 celdas para la etapa de barrido (scavenger).

i) Flotación Rougher

Para el caso de Flotación Rougher su objetivo es recuperar la mayor cantidad de cobre contenido en la alimentación, todo el concentrado obtenido de flotación Rougher es remolido en molinos verticales para poder liberar al máximo la partícula de mineral con contenidos de metal. Luego de ser remolido el mineral pasa a la siguiente etapa que es la de flotación columnar.

ii) Flotación Columnar

La función de Flotación columnar es obtener un concentrado de mejor calidad, apto para ser comercializado. De la etapa de flotación columnar se obtienen 2 productos, un concentrado final y un relave con altos contenidos de metal que se dirige hacia la etapa de flotación de barrido.

iii) Flotación Barrido

En la etapa de Flotación barrido se tratan las colas de flotación columnar y su objetivo es recuperar el máximo de cobre remanente en la pulpa, de esta etapa se obtiene un concentrado de barrido que se mezcla con el concentrado Rougher para remolerlo e iniciar nuevamente el ciclo de limpieza.

3. Transporte, fluidos y tranque

En esta etapa del proceso se realizan diferentes actividades como transporte de concentrado, relaves y aguas. Para este análisis se considera únicamente el transporte de concentrado (STC), ya que, en él se involucra el producto principal de MLP, el concentrado de cobre.

a) STC

El concentrado proveniente de Flotación llega a estanques y/o espesadores donde se aumenta el porcentaje de sólidos de la pulpa de cobre. Luego con bombas de impulsión el concentrado de cobre es enviado por un ducto de 120 kilómetros hasta la ciudad de Los Vilos.

4. Puerto

Desde el sistema de transporte el concentrado llega a un estanque en el puerto Punta Chungo en forma de pulpa, donde es filtrado y secado alcanzando un contenido de humedad de 9% y en el que se obtiene polvo de concentrado de cobre. Este último es enviado a un Stock Pile para que finalmente con un sistema de correas encapsuladas el producto es cargado en barcos para su posterior exportación.

A continuación, en la ilustración 10 se presenta en un mapa real la distribución general de las instalaciones de Minera Los Pelambres, desde el área Minas hasta el Puerto en Punta Chungo.

Ilustración 10: Ilustración general instalaciones MLP



Fuente: Elaboración Minera Los Pelambres

3.2.2 Levantamiento de Información

Hoy en día Minera Los Pelambres no cuenta con una automatización completa de sus datos, es decir, existe información sobre el funcionamiento de diferentes procesos que se obtienen de planillas editadas por los mismos operadores o que solo es de conocimiento general por los trabajadores que se encuentran en terreno, a diferencia de ciertos datos que son capturados directamente desde el funcionamiento de la maquinaria por sistema PI. Dichos datos automatizados, son de aquellos equipos que tienen una mayor importancia dentro del flujo de la cadena, como son los Chancadores, Molinos, Celdas Rougher, Filtros de Pulpa, etc.

Cabe señalar que el análisis y recopilación de datos se realiza en base a aquellos que fueron compilados durante el año 2018, dado que dicho año es el más cercano a la realidad actual y se puede tomar como base completa para un análisis anual. De esta forma el análisis es significativo y representa de buena manera lo que sucede en un periodo de tiempo definido. Finalmente la data obtenida para el año 2018, sirve como

base para el análisis donde se integra tanto las modificaciones de dureza de mineral como los cambios efectuados por el proyecto INCO.

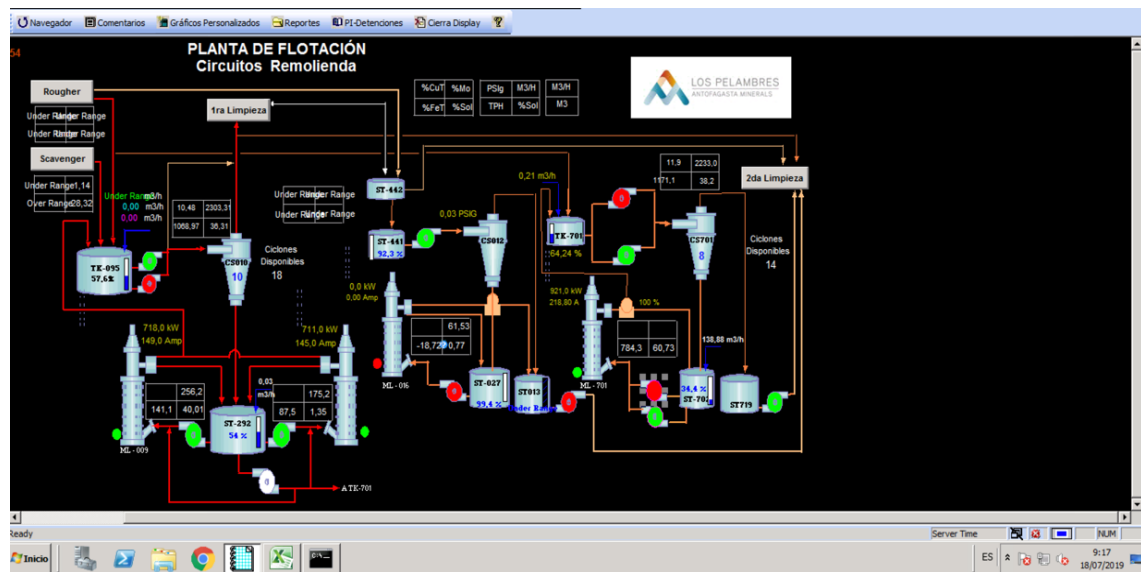
A continuación se detallan los sistemas de los cuales fue extraída la información y el flujo de esta.

1.- Sistema PI: Software gestor de datos, que contiene una interface conectada con más de 400 fuentes de datos o datasources, como PLCs, bases de datos, ficheros, SCADAs, HTML, XML, etc. Además, este provee un mecanismo estándar para la recopilación de datos, permitiendo el acceso en tiempo real a los datos actuales e históricos [12].

Adicionalmente a la generación de datos, se utiliza un complemento llamado Process Book, donde se puede observar detalladamente la conexión entre diferentes procesos y equipos, además de su distribución, para las diferentes plantas desde el proceso de Chancado hasta las correas transportadoras que trasladan el mineral a la embarcación en Puerto.

En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo de la interfaz de Process Book, en la que se puede observar parte de la planta de flotación, en el que se encuentran las distintas baterías ciclone, moledores, cajones, bombas, etc.

Ilustración 11: Interfaz Gráfica de Process Book



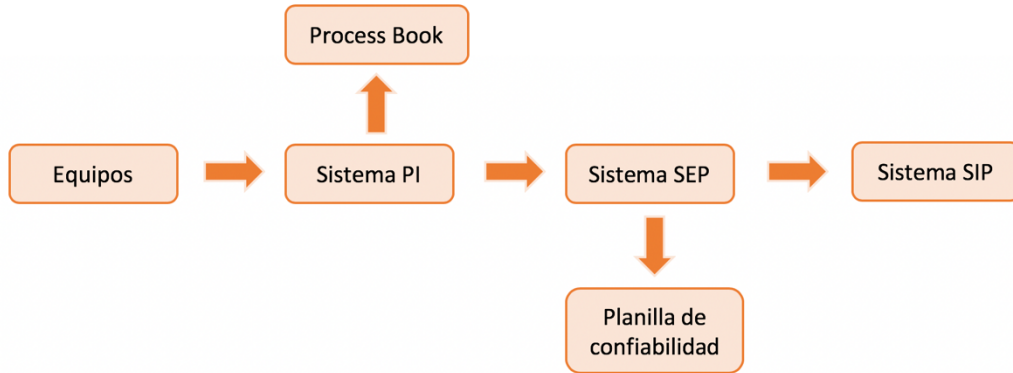
Fuente: Process Book

2.- Sistema SEP: Este sistema recolecta, calcula y almacena toda aquella información gestionada por Sistema PI, es decir, dadas ciertas reglas, características y configuraciones predefinidas por los operadores, el sistema realiza los cálculos necesarios basados en datos entregados por sistema PI para otorgar la información requerida para análisis posteriores. En particular, desde el sistema SEP se crean las llamadas planillas de confiabilidad, donde se pueden obtener datos de utilización,

disponibilidad, coeficientes de marcha, etc, para los equipos más relevantes del proceso productivo.

3.- Sistema SIP: En ciertas ocasiones, el sistema SEP debe sufrir algunas modificaciones dado que los datos no se relacionan 100% con la realidad. Estos arreglos son realizados por operadores o jefes de turno, quienes verifican la información y en caso de discordancia, es editada manualmente por ellos.

Ilustración 12: Flujo de información



Fuente: Elaboración propia

3.3 Trazado de Value Stream Mapping y Análisis Base

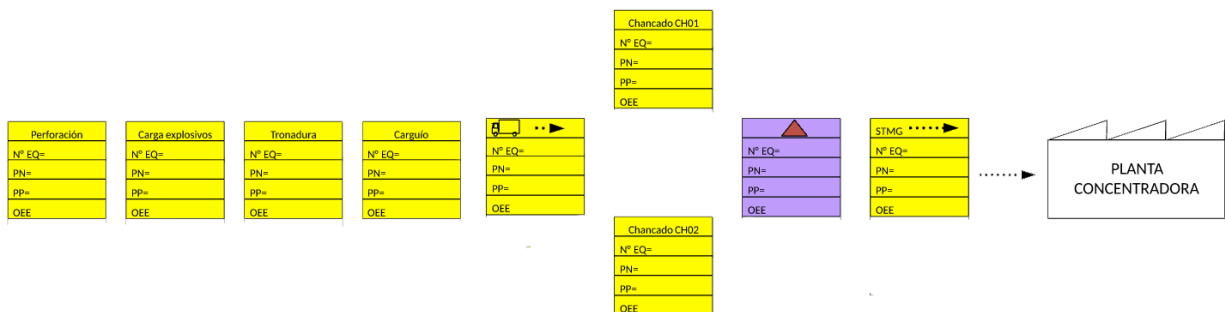
3.3.1 Trazado VSM actual

Para realizar un adecuado análisis, además de entender el funcionamiento del proceso productivo se debe tener especial cuidado y conocimiento de la disposición de las instalaciones y de como es el flujo del material por cada una de las máquinas. Por ello es que se realiza el mapa de flujo de valor para cada una de las áreas del proceso a estudiar.

El cual se presenta a continuación de forma simplificada.

a. Mina

Ilustración 13: flujo de valor Mina



Fuente: Minera Los Pelambres

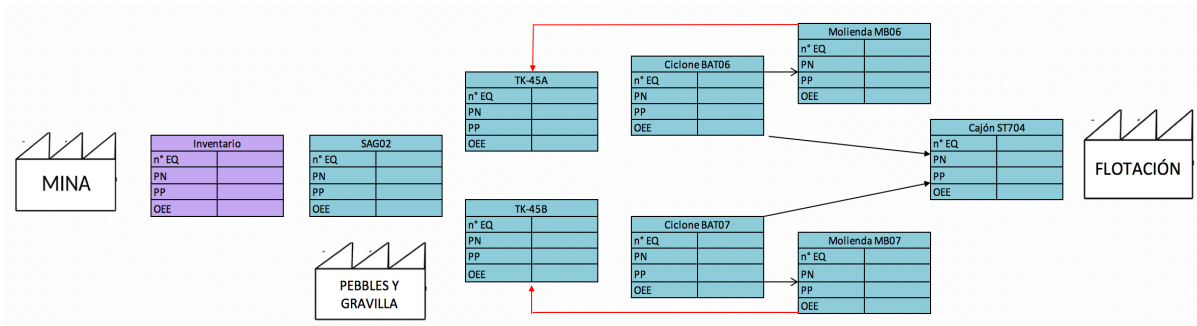
b. Planta Concentradora

En las siguientes ilustraciones se puede observar los procesos más relevantes de Planta, ya sea molienda y flotación de una forma simplificada.

i. Molienda

Para el caso de molienda, se presenta a continuación el flujo de material de la segunda línea de molienda, ya que las otras 2 líneas del proceso se comportan de igual manera.

Ilustración 14: Flujo de Valor Molienda

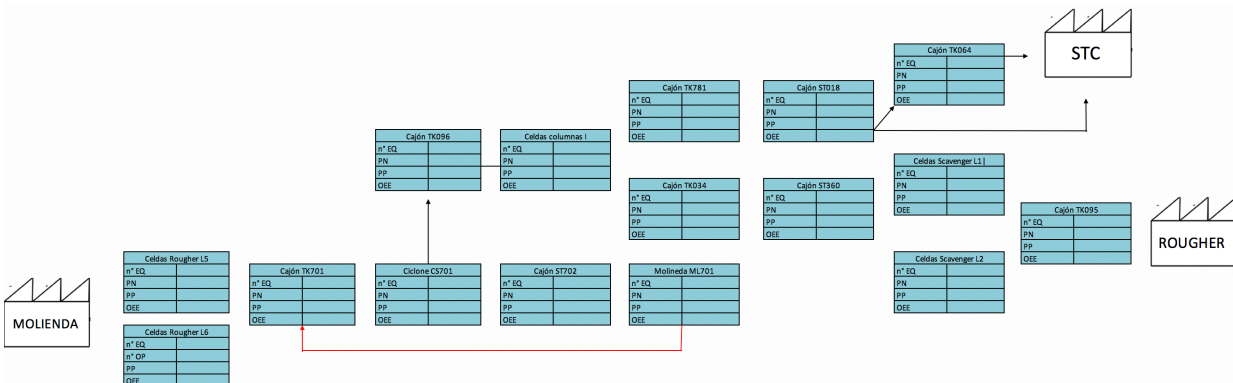


Fuente: Minera los pelambres

ii. Flotación

Al igual que en Molienda, a continuación se muestra el ejemplo para el flujo de material de una de las líneas de flotación, ya que las otras líneas pertenecientes al proceso se comportan de igual manera.

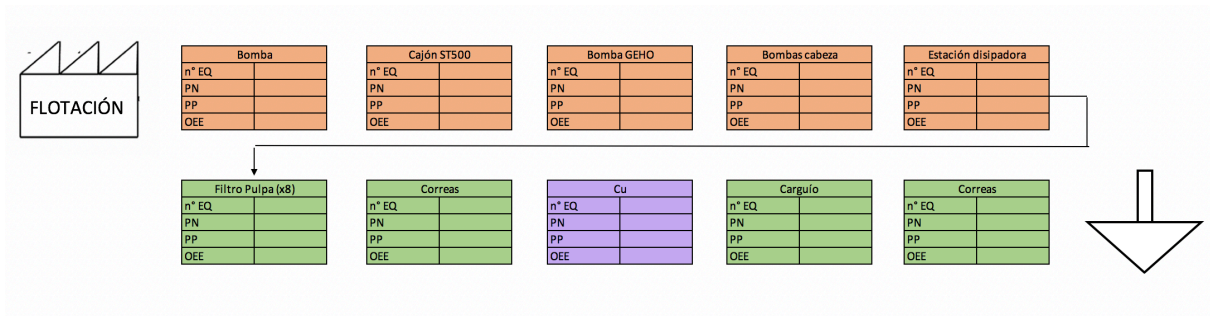
Ilustración 15: Flujo de valor Flotación



Fuente: Minera Los Pelambres

c. STC y Puerto

Ilustración 16: Flujo de valor STC y Puerto



Fuente: Minera Los Pelambres

3.3.2 Análisis Caso Base

Como primer análisis se considera el caso base para entender la situación actual del proceso productivo y con ello identificar los cuellos de botella vigentes. Dicho caso base cuenta con información del año 2018, ya que aquellos datos están completos y son cercanos al presente. Este análisis permite evaluar los escenarios futuros que se presentan en las siguientes secciones.

El análisis de cuellos de botella para el caso anteriormente mencionado (y para los escenarios futuros) se realiza en base a las productividades de cada máquina del proceso productivo, donde la fórmula general corresponde a:

$$Productividad = \frac{\text{Toneladas de mineral}}{\text{hora de utilización}}$$

Para llegar a los resultados de productividad para cada subproceso y equipos se realiza un levantamiento de información mediante sistema PI, SEP, SIP y planillas de confidencialidad, además de datos en planillas Excel para área minas, pues esta área está a cargo de una empresa externa y por lo tanto, no tiene información en los sistemas anteriormente mencionados. Desde los diferentes sistemas se extraen datos de productividad nominal, tratamiento de mineral y porcentajes de utilización de máquinas. En ocasiones cuando no se tiene información de utilización de máquinas, esta es calculada en base a datos de mantenencias y paradas planificadas y no planificadas extraídos desde los mismos sistemas. Posterior a la recolección de información, esta es ordenada mediante la herramienta de VSM (Process Mapping Activity), donde se separa la información por diferentes áreas y procesos. Luego se calcula las productividades de cada subproceso con la ecuación anteriormente mencionada.

Por otro lado, para el cálculo de OEE (Overall Equipment Effectiveness) también se levanta información de utilización, mantenencias, paradas recirculación de tratamiento, desde los diferentes sistemas de información. En base a esta información se calcula el rendimiento, la disponibilidad y la calidad de cada equipo y proceso, para luego evaluar su eficiencia general.

A continuación se presentan los resultados para las diferentes áreas y procesos productivos de Minera Los Pelambres para el caso base.

a. MINA

En los casos de perforación, carguío de explosivos y tronadura el cálculo de la productividad se calcula de manera distinta a la ecuación planteada anteriormente, dado que es necesario normalizar y modificar sus unidades para que sean comparables con el resto del proceso, por lo tanto, se definen en base a las siguientes fórmulas:

i. Perforación:

$$Productividad = ((PR/U) * TM * NE) * PM$$

Donde:

PR= Producción real [m]

U= Horas de utilización [h]

TM= Toneladas por metro perforado [ton/m]

NE= Número de equipos

PP= Porcentaje de mineral perforado

ii. Carguío Explosivos

$$Productividad = ((PR/U) * NE * TP) * PG$$

Donde:

PR= Producción real [pozos]

U=Horas de utilización [h]

NE= Número de equipos

TP= Toneladas por pozo [ton/pozos]

PG=Porcentaje de mineral cargado

iii. Tronadura

$$Productividad = (PR/U) * PT$$

Donde:

PR= Producción real [ton]

U= Horas de utilización [h]

PT=Porcentaje de mineral tronado

iv. Transporte de mineral

$$Productividad = (PR/U) * NE * PMT$$

Donde:

PR= Producción real [ton]

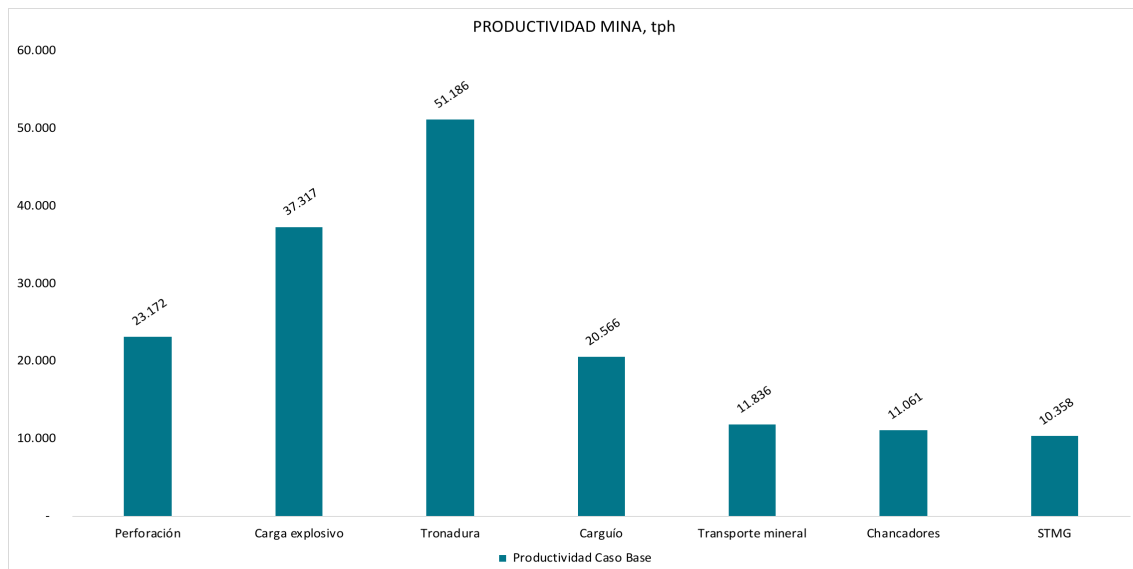
U= Horas de utilización [h]

PMT=Porcentaje de mineral transportado

Para el caso de chancadores y sistema de transporte de mineral grueso la ecuación general que representa a la productividad basta para su cálculo, dado que sus producciones iniciales son medidas en toneladas. Por otro lado, el material que llega a los chancadores ya no incluye el lastre incorporado en los procesos anteriormente mencionados.

A continuación se presenta el cálculo de productividades por subprocesos producido durante el año 2018 para el caso base del área minas.

Gráfico 2: Productividades área minas



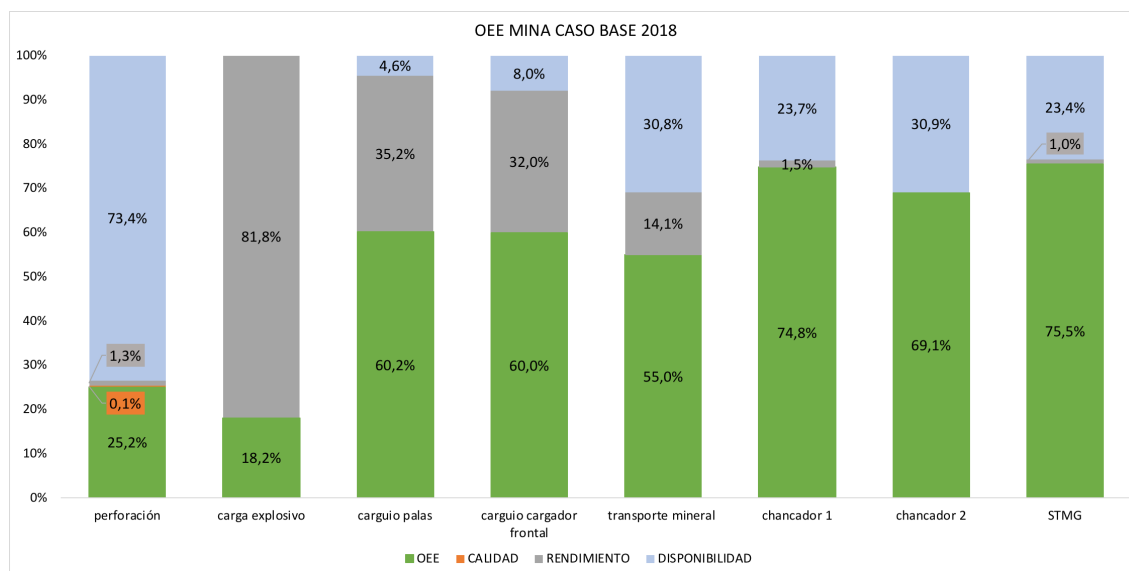
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el gráfico 2, durante el año 2018 el cuello de botella se encuentra en el sistema de transporte de mineral grueso. Esto coincide con la opinión de expertos, quienes creen que ese es el punto donde existe una limitación en la producción. Lo anterior se genera porque la productividad promedio anual del sistema de transporte de mineral grueso alcanza las 10.358 toneladas por hora, mientras que los procesos anteriores a éste alcanzan productividades mucho mayores en una hora. Por lo tanto, la cantidad producida por los chancadores (11.061 toneladas por hora) no alcanzan a ser cubiertas totalmente por el STMG. La diferencia de productividad entre chancadores y sistema de transporte de mineral grueso en promedio es de 703 toneladas cada hora de producción, siendo esto 16.872 toneladas diarias que se encuentran en espera de ser trasladadas y procesadas posteriormente. Este resultado puede variar dependiendo de

la hora y el día, según diferentes características externas al proceso, como mantenimientos, clima, detenciones no planificadas, problemas aguas arriba o aguas abajo, etc. Sin embargo, el resultado representa el comportamiento general del área minas.

Durante el año 2018 la eficiencia del sistema de transporte de mineral grueso se vio afectada principalmente por falta de disponibilidad, es decir, ocurrieron mantenimientos o detenciones no planificadas. Con lo anterior, se perdió un 23,4% de eficiencia obteniendo un OEE (siglas en inglés) de 75,5%, la que se encuentra por debajo del promedio (88,3%) de mineras chilenas del mismo rubro. Cabe señalar que STMG tiene una de las eficiencias más altas del área minas, como se puede observar en el gráfico 3.

Gráfico 3: Eficiencia General de Equipos Mina



Fuente: Elaboración propia

Pese a lo anterior, la productividad actual de sistema de transporte de mineral grueso supera la cantidad de producción máxima ambientalmente aprobada para la minera. Dicha cantidad es de 210 ktpd según RCA N°46. Esta situación se mantiene hasta el año actual. Sin embargo se cree que debiese cambiar dada las nuevas instalaciones del proyecto INCO, el cual se estudiará más adelante.

b. PLANTA CONCENTRADORA

En el proceso de Planta Concentradora se consideran 3 subprocesos, con los equipos más importantes para su funcionamiento. En el caso de Molienda y Flotación se estudian en conjunto, ya que son procesos continuos. No obstante, el proceso de Pebbles y Gravilla se estudian por separado, dado que es un proceso secundario que trabaja en paralelo a Molienda.

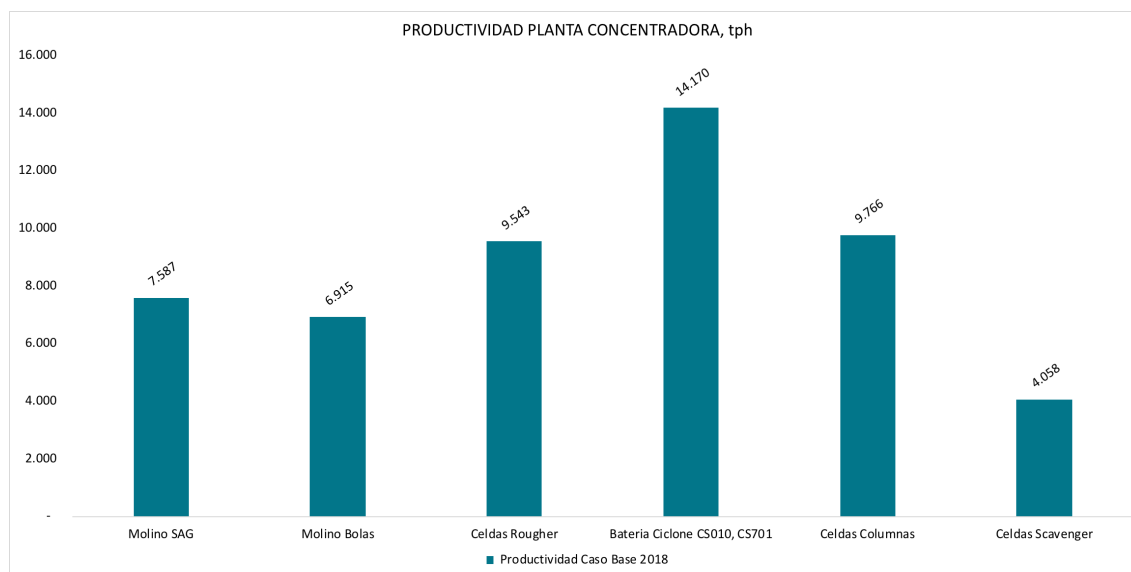
i. MOLIENDA Y FLOTACIÓN

Cabe señalar que los equipos relevantes para Molienda son los Molinos SAG y los Molinos Bolas, para el caso de Flotación estos equipos son: Celdas Rougher, Baterías Ciclone, Celdas Columnas.

Las Celdas Scavenger, si bien pertenecen al proceso de Flotación, son utilizadas como proceso secundario en circunstancias que las operaciones de los procesos anteriores no funcionen con normalidad o existan problemas.

En el siguiente gráfico se puede observar las productividades de equipos pertenecientes a Molienda y Flotación.

Gráfico 4: Productividades Planta Concentradora



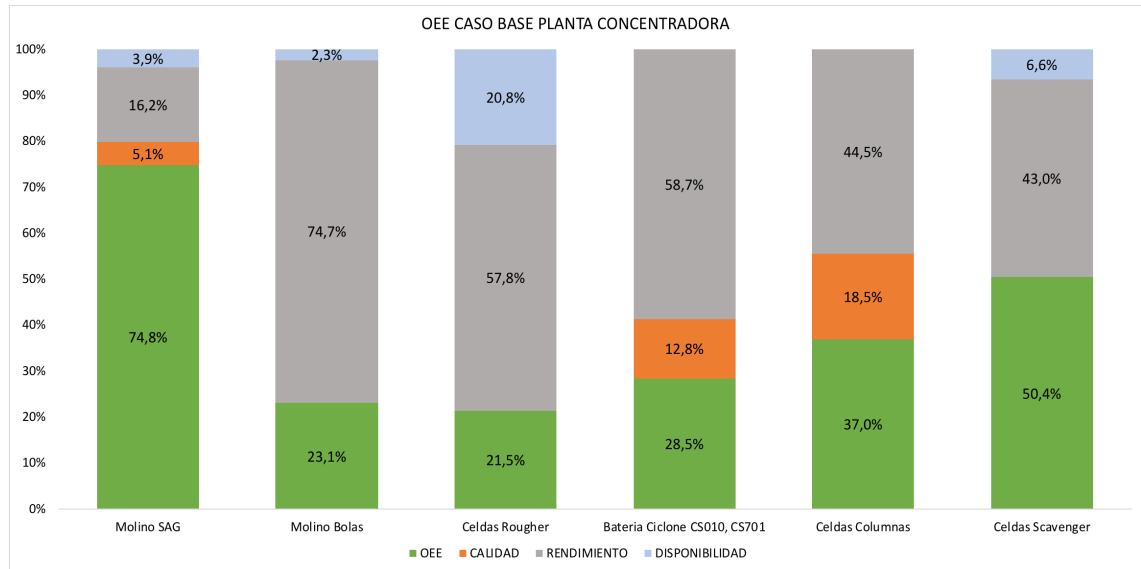
Fuente: Elaboración propia

Cada una de las productividades graficadas anteriormente corresponden a la suma de las productividades unitarias de cada equipo, es decir, aquellos equipos que funcionan en paralelo. Por ejemplo, Molinos SAG tienen su productividad por unidad, sin embargo, se busca entender el proceso como un todo completo, por lo tanto, se consideran los 3 Molinos SAG como un solo proceso. Lo anterior se realiza de esta manera, ya que si bien en cada proceso hay más de un equipo, estos funcionan en paralelo y en conjunto.

Actualmente, en el proceso de molienda, los Molinos Bolas son aquellos equipos con menor productividad y, por lo tanto, son un cuello de botella para el proceso de molienda durante el 2018. Además, los Molinos Bolas no alcanzan a producir la cantidad ambientalmente aprobada (8.750 tph), por lo que existe una diferencia de 1.835 toneladas por hora que se podrían estar produciendo y los Molinos Bolas están limitando.

Cabe destacar que los Molinos Bolas tienen un porcentaje de eficiencia de 23,1%. Su mayor pérdida está dada por el rendimiento de ellos, es decir, su productividad real se encuentra por debajo de su productividad nominal, perdiendo un 57,8% de eficiencia por este motivo. Junto a ello, se puede agregar que los Molinos Bolas tienen un OEE muy inferior en comparación a los Molinos SAG, como se puede observar en el gráfico 5 .

Gráfico 5: Eficiencia General de Equipos, Planta Concentradora



Fuente: Elaboración propia

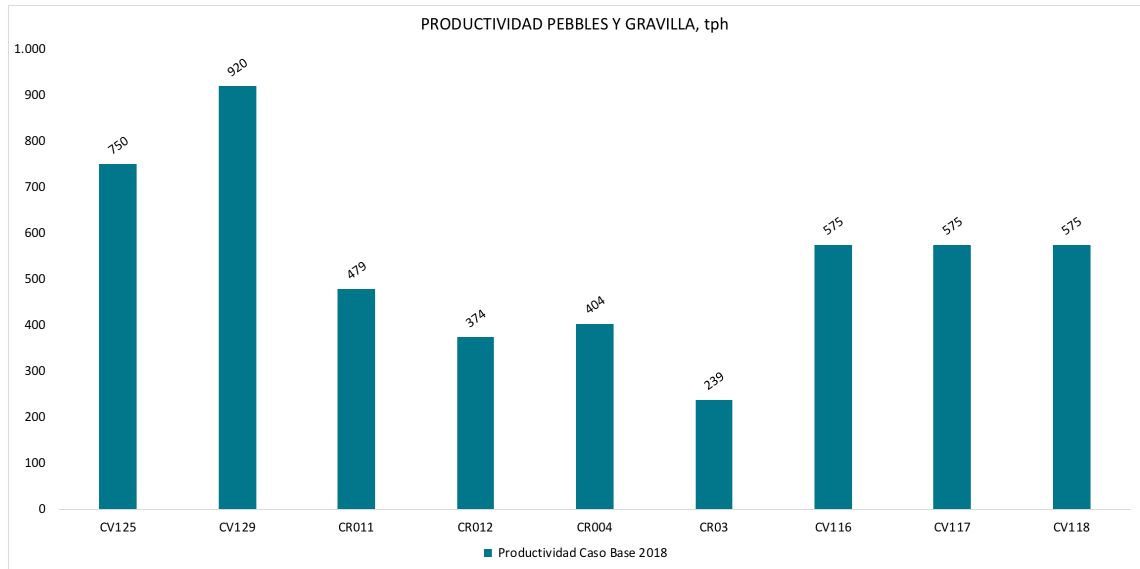
En cuanto al proceso de Flotación se consideran los siguientes equipos: Celdas Rougher, Batería Ciclone y Celdas columnas, ya que estos están en un flujo continuo como fue expuesto en la ilustración 15 y de esta forma se puede realizar un análisis adecuado de cuellos de botella. Debido a lo anterior, el proceso con menor productividad y que se transforma en cuello de botella son las Celdas Rougher. Sin embargo, a diferencia de los Molinos Bolas, este proceso productivo supera la capacidad máxima ambientalmente aprobada, entonces será un cuello de botella en el caso que MLP pueda aumentar la resolución de calificación ambiental que le impide producir más que una cierta cantidad establecida.

Cabe destacar que al igual que los Molinos Bolas, las Celdas Rougher también tiene un porcentaje de eficiencia bajo, cercano al 22%. Una de las mayores pérdidas en su eficiencia está relacionada con el rendimiento de estos equipos, teniendo una detrimento por esta razón de 58%.

ii. PEBBLES Y GRAVILLA

Como fue mencionado anteriormente, el proceso de Pebbles y Gravilla es un proceso secundario, ya que sirve de apoyo al proceso de Molienda cuando este no alcanza a llegar a la granularidad requerida y establecida por MLP. Por ello, este proceso cuenta con productividades menores en comparación al resto de los procesos. Sin embargo, de igual manera se pueden identificar desequilibrios en la producción, como se muestra en el siguiente gráfico:

Gráfico 6: Productividades Pebbles y Gravilla

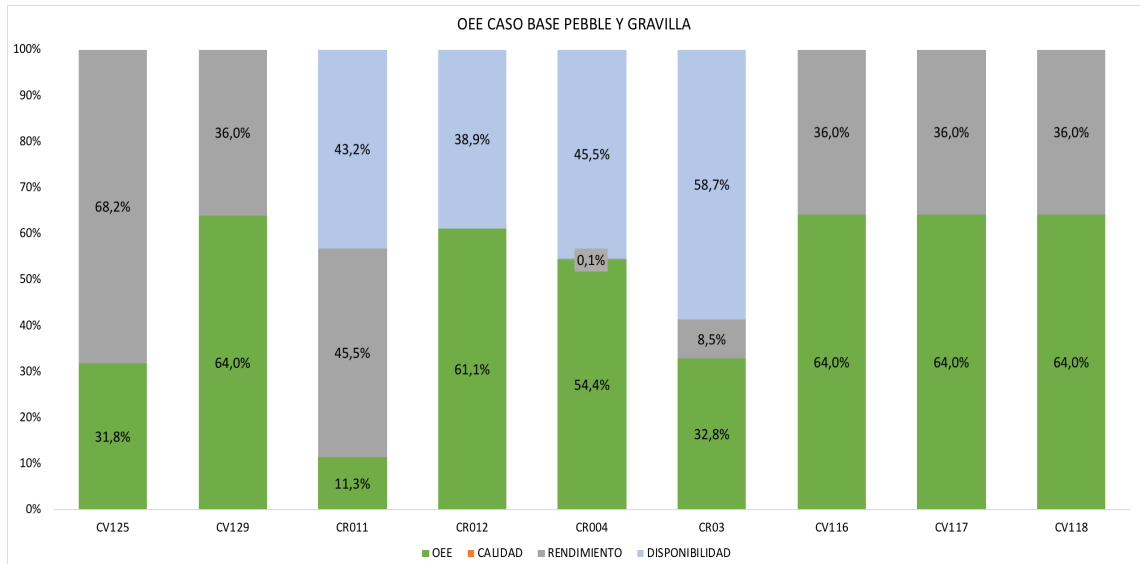


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los chancadores de esta planta (CR011, CR012, CR004, CR03) alcanzan una productividad de 1500 tph aproximadamente, sin embargo, la correa que alimenta estos chancadores (CV125) tiene una productividad de 750 tph, por lo que se transforma en cuello de botella, ya que limita la producción total de la planta.

Cabe señalar que para el caso base, la generación de Pebbles y gravilla bordea los 1000 tph en promedio, lo que implica que la correa CV125 está limitando la producción en 250 tph. Lo anterior está dado principalmente porque la eficiencia de la correa se ha visto reducida por una pérdida de velocidad de la misma, teniendo un detrimento de un 68,2% como lo muestra el gráfico 7 y alcanzando una eficiencia de 31,8%.

Gráfico 7: Eficiencia General de Equipos, Pebbles y Gravilla



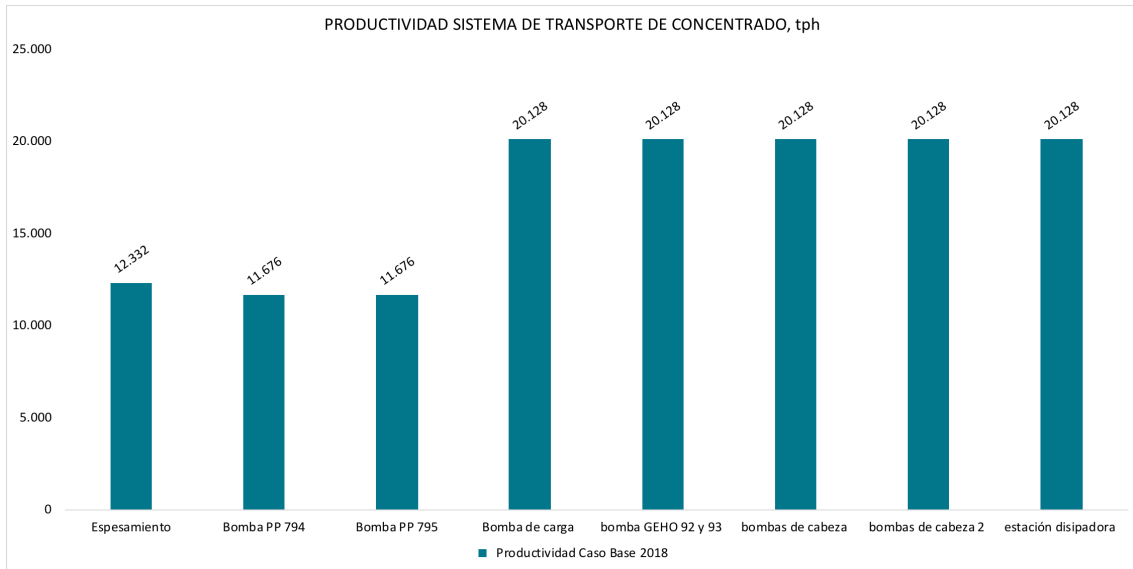
Fuente: Elaboración propia

c. STC

Para el caso de sistema de transporte de concentrado de cobre se analizan las productividades del espesamiento y las bombas que impulsan el concentrado hacia el puerto. Este proceso tiene una de las productividades más altas de todo el proceso productivo junto a Puerto. Por esta razón, este no es estudiado de forma profunda, no obstante, se identifican las partes con menor productividad y niveles de eficiencia, tanto para espesadores como las bombas que conforman parte del sistema de transporte.

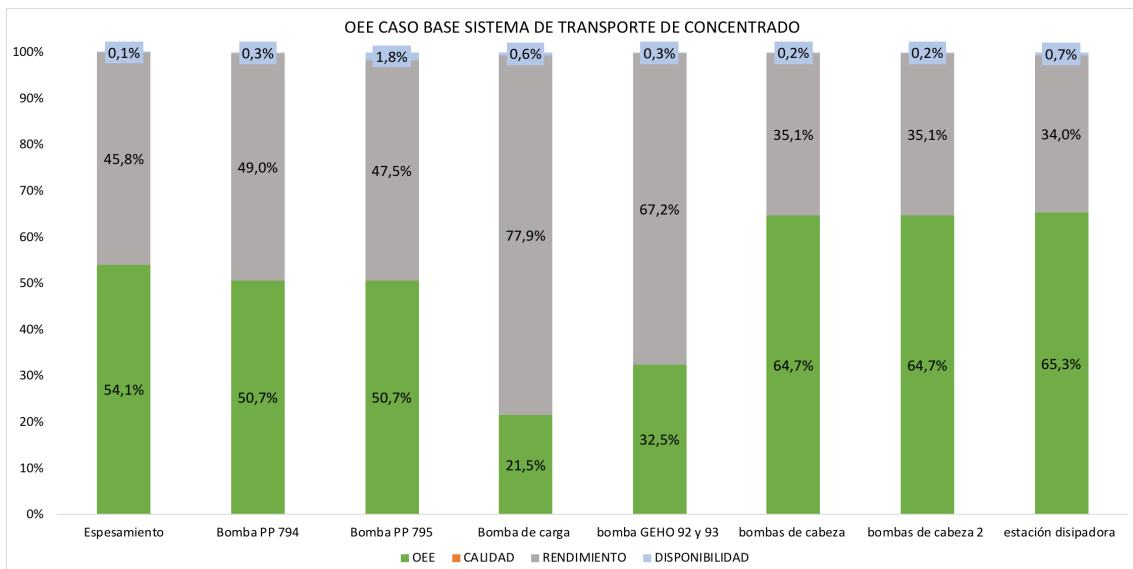
Se puede observar en el gráfico 8, que las productividades más baja se encuentran al comienzo del proceso, específicamente en el espesamiento y en las bombas PP794 y PP795. Tanto los espesadores como las bombas anteriormente mencionadas tienen eficiencias cercanas al 50%, similares al resto de las bombas pertenecientes al proceso de transporte de concentrado. Lo anterior puede estar dado, primero porque los espesadores tienen un rendimiento menor al nominal, es decir, el rendimiento actual se encuentra por debajo al rendimiento de diseño de estos equipos y segundo, porque las bombas provocan una pérdida de velocidad en el transporte del concentrado de cobre hasta el puerto. Esto puede ser observado en el gráfico 9.

Gráfico 8: Productividades STC



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 9: Eficiencia General de Equipos, STC



Fuente: Elaboración propia

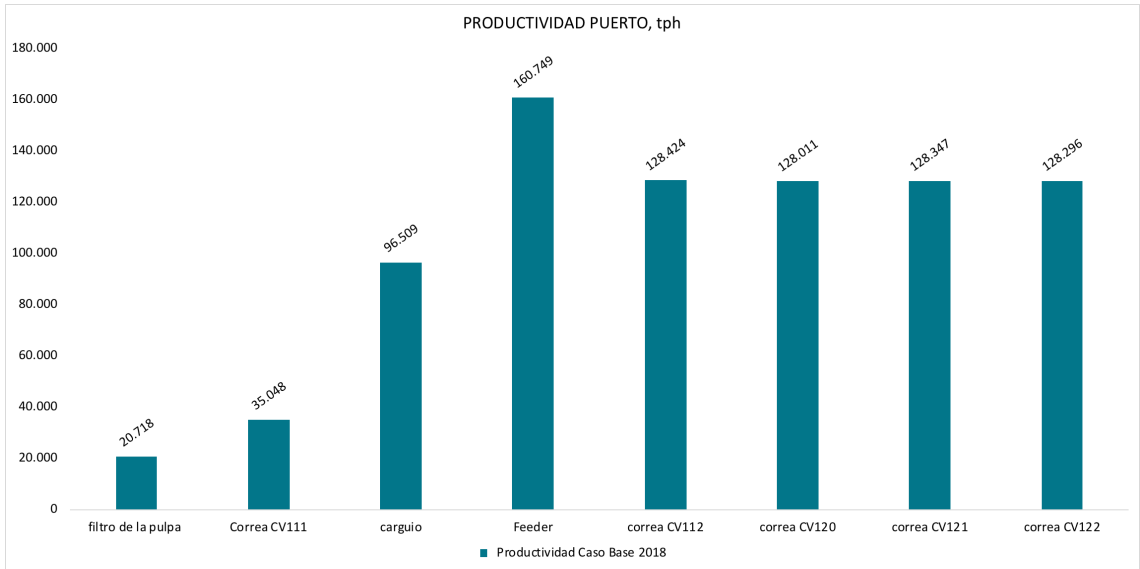
d. PUERTO

Como fue mencionado anteriormente, puerto es el proceso con productividades más altas de todo el proceso productivo de AMSA Los Pelambres. Por lo tanto, no se encuentran cuellos de botella relevantes para esta área. Pese a ello, al igual que el proceso de sistema de transporte de concentrado, también son estudiadas sus productividades y eficiencias generales de equipos.

De ello, se puede rescatar que los filtros de pulpa son la parte de proceso con menor productividad. Los filtros tienen una diferencia de hasta 140.000 tph con el feeder, parte del proceso en puerto que cuenta con mayor productividad. Por otro lado, a pesar de tener altas productividades en las diferentes partes del proceso, sus eficiencias son bastante bajas, cercanas al 6%. Esto ocurre, principalmente, por la pérdida de velocidad de las correas que componen el traslado del cobre hacia la embarcación.

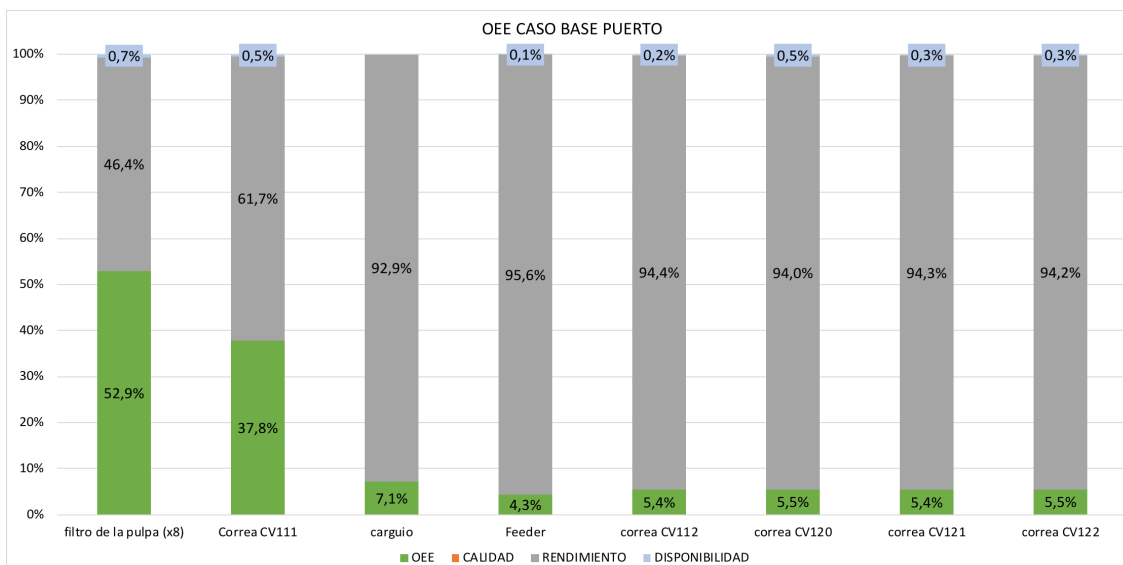
Las productividades y eficiencias generales de equipos para los subprocesos de puerto se puede observar en los siguientes gráficos:

Gráfico 10: Productividades Puerto



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11: Eficiencia General de Equipos, Puerto



Fuente: Elaboración propia

3.4 Análisis Escenarios Futuros

En esta etapa se estiman las productividades futuras de los diferentes escenarios que restan por estudiar. Para ello, se toma como base el escenario estudiado anteriormente, pues da una idea del funcionamiento real de MLP en la actualidad. Además, como los escenarios futuros tienen relación con la dureza de mineral y el proyecto INCO, se utilizan las productividades nominales de los equipos al trabajar con minerales blandos y duros. Por lo tanto, la productividad estimada para los escenarios futuros se calcula en base al aumento o disminución de productividad nominal con respecto a la productividad nominal del caso base.

A continuación se explica un ejemplo para clarificar el cálculo expuesto anteriormente:

Tabla 4: Productividades nominales para diferentes durezas

Área	Proceso	Productividad Nominal 20% duro tph	Productividad Nominal 55% duro tph	productividad nominal 70% duro tph	Pérdida por mineral duro	Ganancia por mineral blando
Mina	Chancador 1	6500	5506	5000	-9,2%	18,0%
Planta Concentradora	Molino SAG 01	3100	3042	2800	-7,9%	1,9%

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 4, se cuenta con información de las productividades para las diferentes durezas de mineral, 20% duro, 70% duro y 55% duro (caso base, 2018). Por consiguiente, con ellas se puede calcular la pérdida de productividad al trabajar con minerales duros en comparación al caso base y también la ganancia que se obtiene al trabajar con minerales blandos en comparación al caso base. Por ejemplo, el chancador 1 tiene una pérdida de 9,2% al trabajar con minerales duros y una ganancia de 18% al tratar con minerales blandos, ambos cálculos son con respecto al año 2018. Lo mismo sucede con el Molino SAG, el cual tiene una pérdida de 7,9% y una ganancia

de 1,9% al tratar con minerales duros o blandos respectivamente. El cálculo anterior se realiza para todos los equipos, procesos y subprocesos de la cadena de valor de Minera Los Pelambres. En la sección de anexos (Anexo G), se puede apreciar un ejemplo completo de la planilla utilizada.

Posterior al cálculo de pérdida y ganancia en la productividad por efectos de la dureza de mineral, se estiman las productividades futuras en base a las productividades reales del caso base con las siguientes fórmulas:

$$FB = \text{Productividad real caso base} * \% \text{ ganancia por mineral blando}$$

$$FD = \text{Productividad real caso base} * \% \text{ pérdida por mineral duro}$$

Donde:

FB = Productividad futura real escenario 20% duro

FD = Productividad futura real escenario 70% duro

A continuación se presentan los análisis y resultados para los escenarios futuros.

3.4.1 20% Dureza de mineral

La proyección realizada por Minera Los Pelambres indica que la dureza de mineral subirá gradualmente como se indicó anteriormente. Sin embargo, es necesario realizar un análisis para durezas de mineral bajas, ya que la proyección estimada es un promedio anual, pero existen algunas ocasiones en donde se extraerá mineral blando dada la planificación de extracción en el yacimiento y, por tanto, se procesará dicho material en todo el proceso aguas abajo.

La siguiente tabla indica la proporción del tiempo que se contará con minerales blandos para los años 2019, 2020 y 2021. Según la proyección realizada por Pelambres, desde el 2019 al 2021 habrá un promedio de 47,8% de escenarios con materiales blandos.

Tabla 5: Proporción dureza de mineral blando

AÑO	Proporción Mineral Blando
2019	22,5%
2020	64,1%
2021	56,8%
Promedio	47,8%

Fuente: Elaboración propia

a. MINA

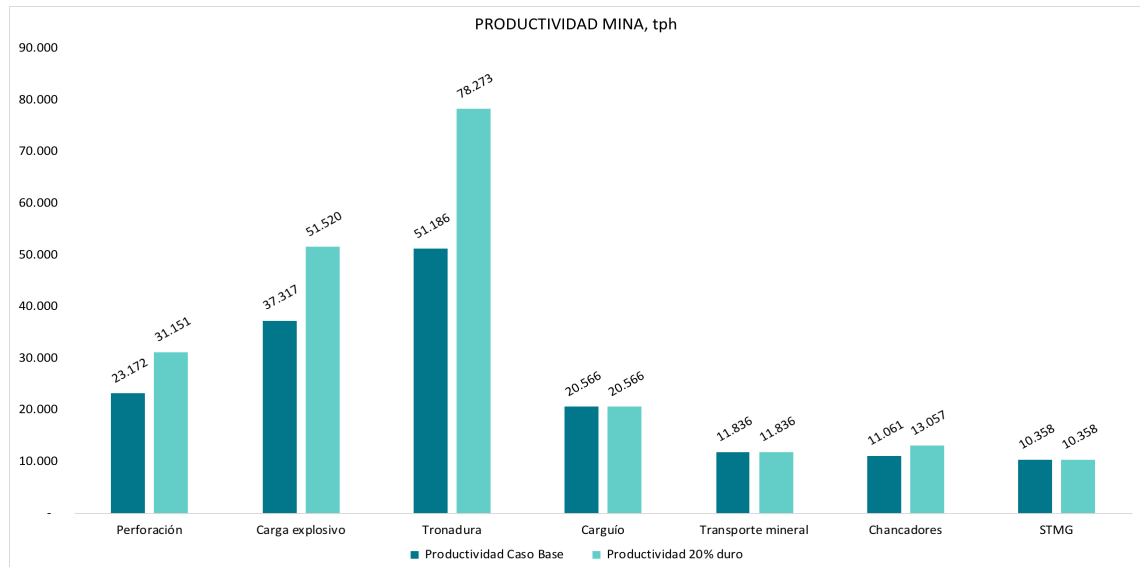
En el proceso productivo perteneciente a mina todos los subprocesos sufren un cambio en su productividad por efectos de la dureza de mineral, excepto carguío, transporte y sistema de transporte de mineral grueso (STMG). Al trabajar con minerales con durezas bajas los subprocesos aumentan su productividad, pero

algunos de ellos tienen un mayor impacto que otros, por ejemplo, el caso de tronadura aumenta su productividad en un 53%, mientras que los chancadores tan solo en un 18%.

Como fue mencionado anteriormente, en el caso base el cuello de botella en el área minas se encuentra en el sistema de transporte de mineral grueso, al no tener un cambio en su productividad por el trabajo con minerales blandos, este cuello de botella se mantiene en el STMG, ya que sigue siendo la parte del proceso con menor capacidad como lo muestra el gráfico 12

Cabe señalar que en este caso, en comparación al caso base, la diferencia entre chancadores y STMG aumenta, debido a que la productividad del primer proceso es mayor que en el caso base al trabajar con minerales con 20% de dureza. Lo anterior provoca que existan 2.700 tph sin poder ser trasladadas por la correa de transporte, es decir, 2.000 toneladas más que en el caso base.

Gráfico 12: Productividades Caso Base y 20% duro, Mina



Fuente: Elaboración propia

b. PLANTA CONCENTRADORA

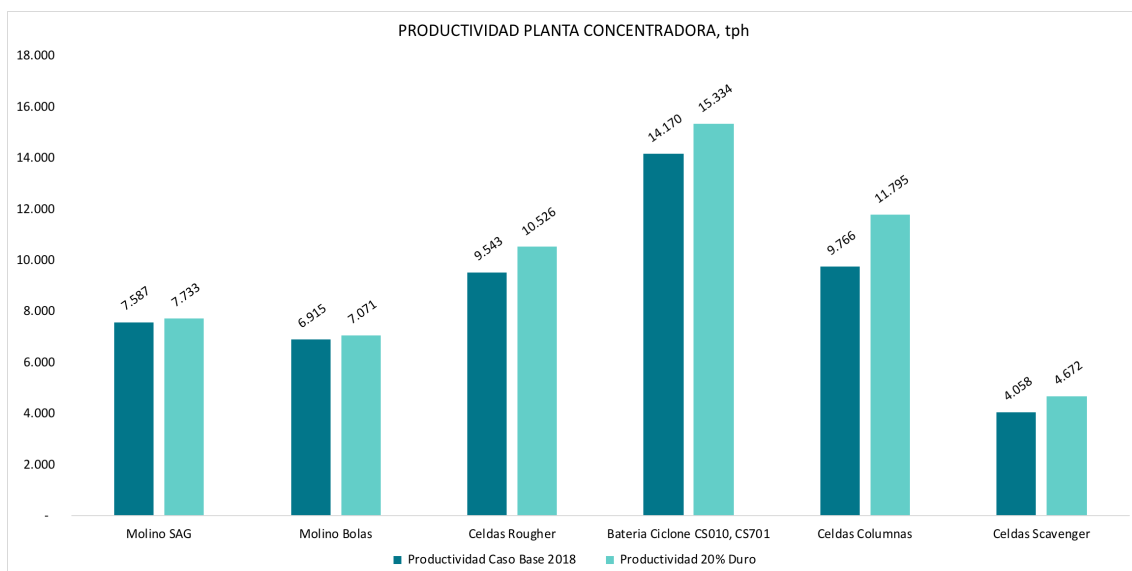
iii. MOLIENDA Y FLOTACIÓN

Al trabajar con minerales blandos la productividad de los subprocesos de molienda aumentan en un bajo porcentaje en comparación al caso base. Se puede observar que los Molinos SAG, al pasar de una dureza del 55% en el caso base a una dureza de 20% en el nuevo escenario, tienen un aumento de productividad cercano al 2%. Por otro lado, en el caso de los Molinos Bolas su productividad aumenta en un 2,2%. De esta información, se puede rescatar que como ambos procesos tienen un aumento de productividad en porcentajes cercanos, el cuello de botella en esta etapa se mantiene igual al caso base, es decir, en los Molinos Bolas como se puede observar en el gráfico 13.

Por otro lado, en el proceso de Flotación los subprocesos pertenecientes a este tienen un aumento en sus productividades mayor en comparación a los subprocesos de molienda, tal es el caso de las celdas columnas que tienen un aumento de 21% al pasar de una dureza del 55% (caso base) al 20%. No obstante, existen otros subprocesos en Flotación que tienen un aumento en menor proporción como por ejemplo Celdas Rougher, en este caso estos equipos tienen un aumento de 10,3%.

En relación con lo anterior, como Celdas Rougher son los equipos críticos en el caso base y en este escenario tienen un aumento en su productividad muy por debajo de los otros equipos pertenecientes a Flotación, el cuello de botella se mantiene en estos equipos para el escenario de 20% dureza de mineral.

Gráfico 13: Productividades para Caso Base y 20% duro, Molienda y Flotación



Fuente: Elaboración propia

iv. PEBBLES Y GRAVILLA

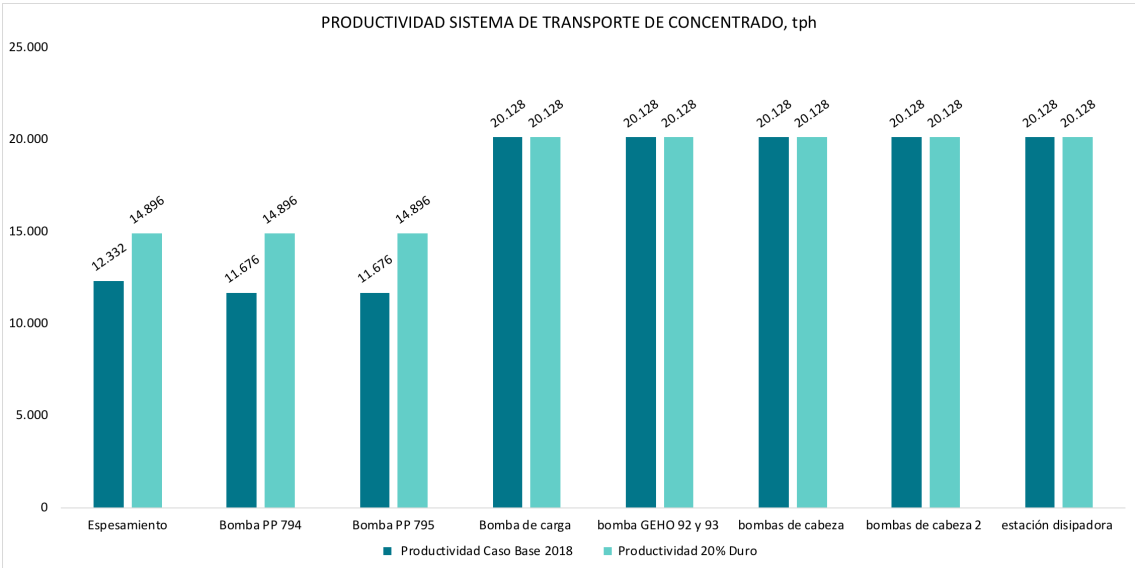
La planta de Pebbles y Gravilla no se ve afectada por la dureza de mineral, ya que todo mineral que es enviado a esta planta tiene una granularidad establecida. Por lo tanto, el análisis para este escenario se mantiene igual al caso base planteado anteriormente.

c. STC

STC es uno de los procesos con productividades más altas de AMSA Los Pelambres. En el caso de trabajo con materiales blandos, los equipos como espesamiento y bombas iniciales tienen un aumento en su productividad de hasta 28%, por lo tanto, en ningún caso el sistema de transporte de concentrado puede causar un problema para el resto del proceso productivo.

Cabe señalar que el aumento de productividad de los equipos pertenecientes al sistema de transporte de concentrado es consecuencia del aumento de productividades aguas arriba y no así del equipo en sí mismo. Estas nuevas productividades para el escenario de mineral blando se pueden observar en el siguiente gráfico:

Gráfico 14: Productividad Caso Base y 20% duro, STC



Fuente: Elaboración propia

d. PUERTO

En la etapa de puerto la mayoría de los subprocesos productivos no varían sus productividades por efectos de la dureza de mineral. Los filtros de pulpa son la única parte del proceso productivo en puerto que tiene una variación de productividad por la dureza de mineral, no obstante, es una variación de proporciones bajas en comparación a los cambios que sufren otras partes del proceso de AMSA Los Pelambres. Estas variaciones se producen principalmente por un efecto colateral por el cambio de productividad de los procesos aguas arriba (véase en anexo E).

Por otro lado, como fue mencionado anteriormente, los equipos de puerto tienen las productividades mas altas de todo el proceso productivo de Pelambres, por lo tanto, no se analizan en profundidad.

3.4.2 70% Dureza de mineral

Este escenario se presenta durante los años 2019 al 2021, ya que en estos años aún no entra en operación en proyecto INCO, por lo tanto, se puede realizar un análisis por separado para tener claridad de lo que sucede con el proceso productivo en estos dos años próximos y estar preparados para ello.

Como lo indica la tabla 6 desde la actualidad hasta el año 2021 hay un 52,2% de escenarios con dureza de mineral alta. Por consiguiente, es de utilidad estudiar y tener en consideración este escenario.

Tabla 6: Proporción dureza de mineral duro

AÑO	Proporción Mineral Duro
2019	77,5%
2020	35,9%
2021	43,2%
Promedio	52,2%

Fuente: Elaboración propia

Como fue mencionado anteriormente, los procesos de Planta y Gravilla, sistema de transporte de concentrado y puerto no tienen cambios sustanciales en sus productividades por efectos de la dureza de mineral. Por esa razón, en este escenario se analizan los subprocesos de Mina y Planta Concentradora. No obstante, las productividades de los procesos que no se muestran a continuación se pueden ver en Anexo C, D y E.

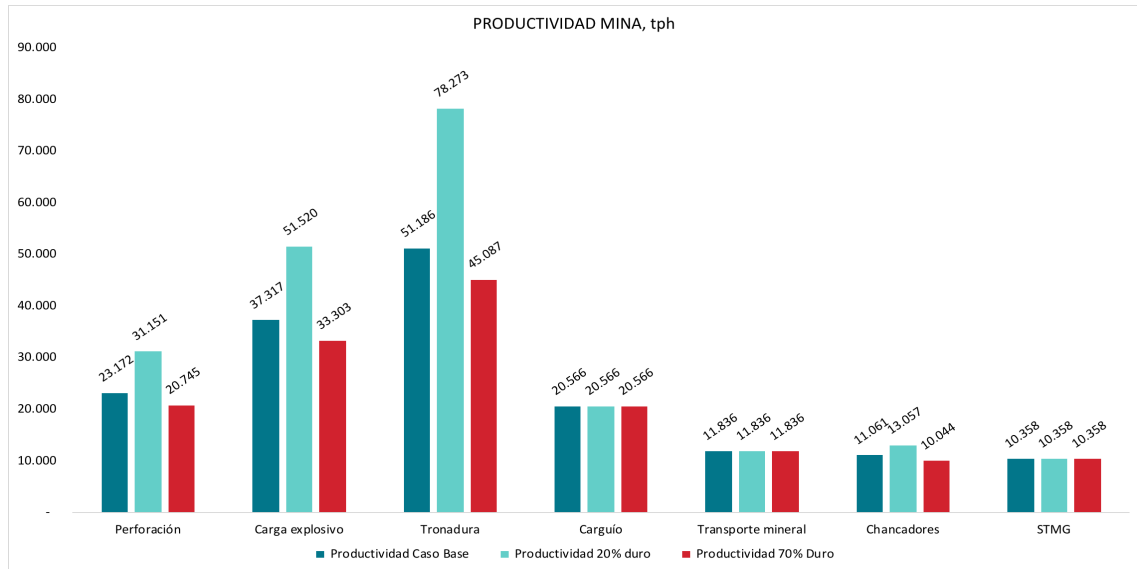
a. MINA

Al igual que en el escenario con 20% de dureza de mineral, existen subprocesos que se ven más afectados por el cambio de material y, por tanto, sus productividades disminuyen en una mayor o menor medida.

En el caso de tronadura al pasar de un material blando a uno duro tiene una reducción de su productividad de 42,4%. Por otra parte, existen subprocesos que no tienen cambios de productividad como es carguío, transporte de mineral y sistema de transporte de mineral grueso. Finalmente, hay otros subprocesos que tienen un impacto menor al trabajar con un mineral duro como son los chancadores. En el caso de los chancadores al pasar de un mineral blando a uno duro tienen una disminución de su productividad de 23%

En el siguiente gráfico se puede observar como van variando las productividades de cada subprocesos con minerales blandos o duros.

Gráfico 15: Productividades Caso base, 20% y 70% duro, Mina



Fuente: Elaboración propia

En este caso el cuello de botella cambia, ya no es el sistema de transporte de mineral grueso como en los escenarios anteriores, sino que los chancadores son el subproceso con menor productividad del área mina. Lo anterior sucede porque, a pesar de que el sistema de transporte de mineral grueso no se ve afectado por el cambio de dureza, los chancadores sí y pasan a estar en un nivel inferior.

Se puede observar que en el escenario de mineral duro el transporte de mineral tiene una productividad de 11.836 tph y los chancadores de 10.044 tph. Esto significa que hay una diferencia de 1.792 toneladas por hora que los chancadores no pueden procesar y por lo tanto están limitando la producción. Sin embargo, el STMG no tiene una productividad mucho más alta que los chancadores, de este modo en caso de aumentar la productividad de estos chancadores, el sistema de transporte de mineral grueso sería el cuello de botella nuevamente.

b. PLANTA CONCENTRADORA

i. MOLIENDA Y FLOTACIÓN

En el escenario de 70% de dureza los subprocesos productivos de molienda y flotación tienen un mayor impacto que en el caso de 20% de dureza, es decir, se ven más afectados al tratar un mineral duro.

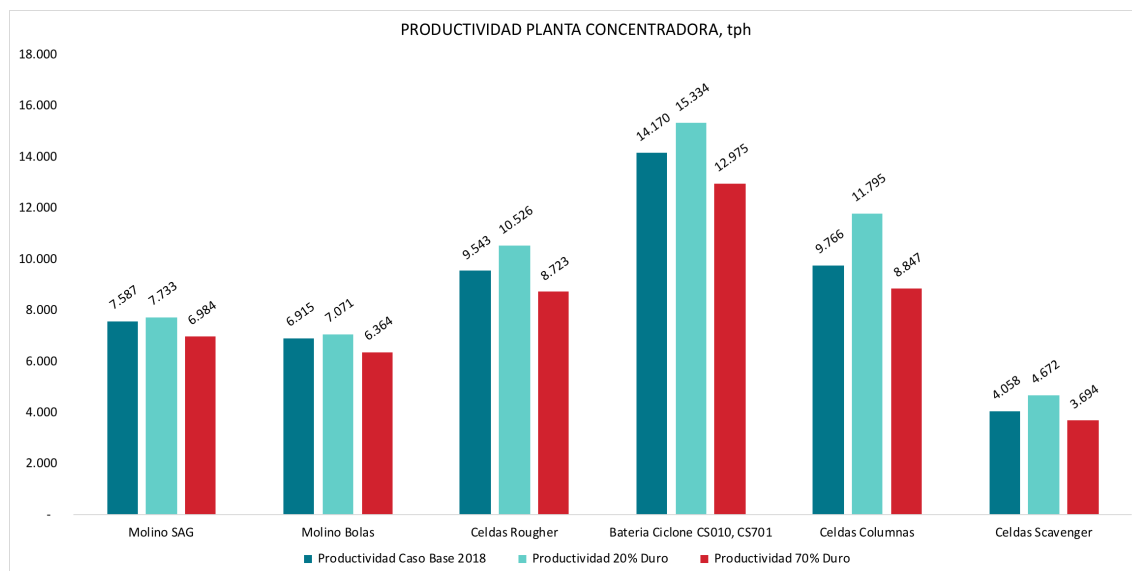
En el caso de molienda los Molinos SAG tienen un detrimento de un 7,94% en comparación al caso base, en cuanto a los Molinos Bolas se puede observar en el gráfico 16 que este subproceso tiene una pérdida de productividad de 7,96% en comparación al 2018. Es por esto que al tener una disminución en sus productividades de similares proporciones, el cuello de botella se mantiene en los Molinos Bolas. Es relevante mencionar que en este escenario los Molinos Bolas no superan la resolución de calificación ambiental, la que indica que Los

Pelambres puede producir 8.750 tph, por lo que se considera como un cuello de botella importante a estudiar.

Para el proceso de flotación ocurre una situación similar, ya que las celdas rougher tienen una disminución en su productividad de 8,59%, Baterías Ciclone de 8,43% y Celdas Columnas de 9,41% en comparación al caso base (véase en el gráfico 16). De esta manera, al tener todos los equipos una baja en sus productividades de las mismas proporciones, el cuello de botella se mantiene igual que los casos anteriores, es decir, Celdas Rougher.

Cabe señalar que en el escenario con minerales blandos la productividad de las Celdas Rougher y Celdas Columnas tienen una diferencia de 1.269 tph. En este caso las productividades tienen una variación de 124 tph, por lo que al aumentar la productividad de Celdas Rougher, las Celdas Columnas serían una limitante en el caso de trabajar con materiales duros.

Gráfico 16: Productividades Caso base, 20% y 70% duro, Molienda y Flotación



Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Proyecto INCO con 20% dureza de mineral

El proyecto de infraestructura complementaria realiza cambios en los procesos de mina y planta concentradora (Molienda, Flotación y Pebbles y Gravilla). Debido a ello es que se estudian únicamente los subprocesos pertenecientes a estas áreas. Además, el proyecto empieza a funcionar durante el segundo semestre del año 2021. Sin embargo, este escenario se estudia desde el año 2022 para así considerar un año completo del proyecto INCO en operación.

Según la planificación del Minera Los Pelambres (tabla 7) desde el año 2022 hasta el 2035 existe un 24,7% en promedio de escenarios que se trabaja con mineral blando. Pese a ser un porcentaje bajo en comparación a los escenarios con dureza de mineral

alta, es un escenario que acaece (en 2027 alcanza un 50,9%), por ello, es importante su análisis.

Tabla 7: Proporción mineral blando

AÑO	Proporción Mineral Blando
2022	59,4%
2023	54,5%
2024	25,4%
2025	27,6%
2026	45,6%
2027	50,9%
2028	28,9%
2029	36,4%
2030	35,5%
2031	12,9%
2032	5,9%
2033	0,4%
2034	0,0%
2035	0,0%
Promedio	27,4%

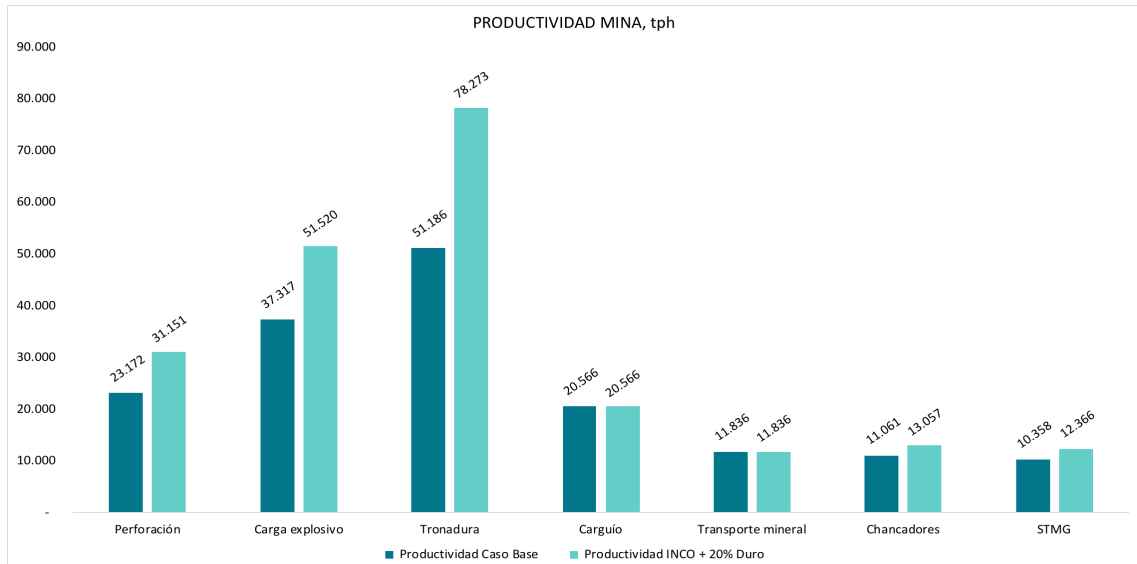
Fuente: Elaboración propia

b. MINA

En el proyecto INCO se extiende la correa del sistema de transporte de mineral grueso en 14 metros con el propósito de alimentar el acopio de mineral grueso, además aumenta la velocidad de ésta, provocando un incremento en su productividad en 2.008 toneladas por hora. Con este aumento en su productividad el cuello de botella cambia al transporte de mineral (camiones que trasladan el mineral desde la tronadura hasta los chancadores) como se puede observar en el gráfico 17.

Independiente de que el transporte de mineral sea el cuello de botella y los procesos siguientes tengan productividades similares, todos los subprocesos superan la restricción ambientalmente aprobada que limita a la Minera a una producción de 8.750 toneladas por hora. Por consiguiente, en este escenario no se presentan problemas para el proceso productivo en el área minas.

Gráfico 17: Productividades Caso base y proyecto INCO con 20% duro, Mina



Fuente: Elaboración propia

c. PLANTA CONCENTRADORA

i. MOLIENDA Y FLOTACIÓN

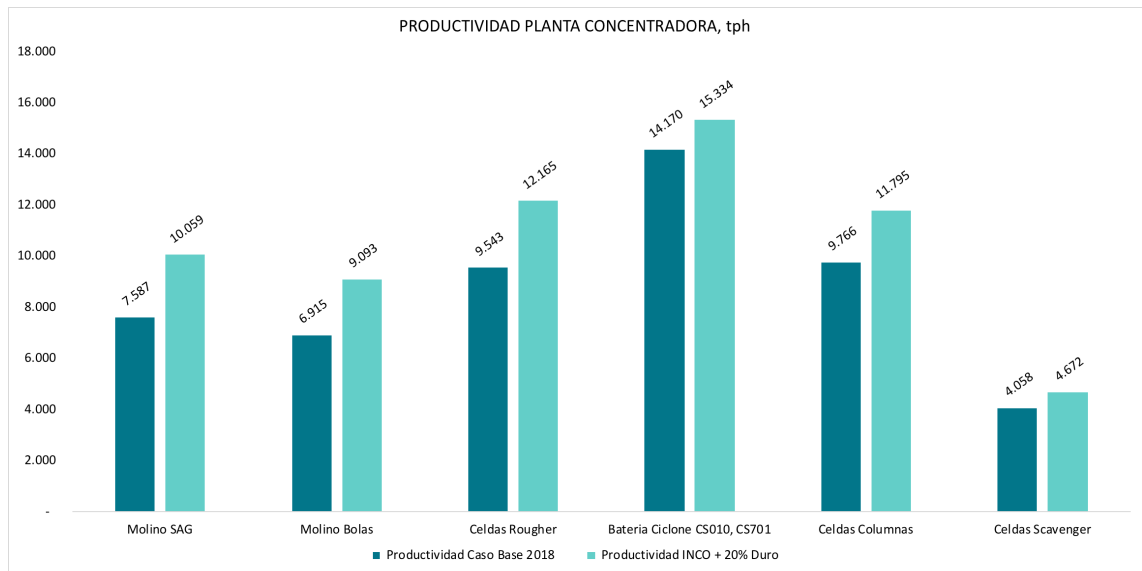
El proyecto INCO contempla la instalación de una cuarta línea de molienda formada por un Molino SAG con una productividad de 2.326 (al trabajar con minerales blandos) y un Molino Bolas. Dicho Molino Bolas tiene una productividad de 2.022 tph con minerales 20% duros, en consecuencia, la productividad de todo el subproceso de bolas aumenta a 9.093 toneladas por hora en este escenario.

Para estimar la productividad de los nuevos molinos, ya sea SAG o Bolas, se realiza en base a una proporción entre la potencia del nuevo molino y los molinos en operación. Sin embargo, esta cifra puede variar, ya que los molinos existentes son antiguos y están repotenciados, o sea, han sido modificados para su mejoramiento. Por esta razón es que la estimación es cercana mas no precisa, a causa de no contar con la información pertinente pues el proyecto INCO es de carácter confidencial.

En cuanto al proceso de Flotación, el proyecto INCO instalará una fila de 6 celdas como circuito de Flotación primaria (Celdas Rougher) con una productividad de 1.639 toneladas por hora. Por consiguiente, este subproceso alcanza una productividad de 12.125 toneladas por hora en este escenario.

En base a las nuevas productividades de cada proceso, se grafican nuevamente los subprocesos pertenecientes a Molienda y Flotación (gráfico 18). En él se puede ver que los Molinos Bolas continúan siendo el cuello de botella para la parte de Molienda, en cambio para el área de Flotación el cuello de botella se traslada a las Celdas Columnas, pues estas alcanzan una productividad promedio de 11.795 toneladas por hora, 370 tph por debajo de las Celdas Rougher.

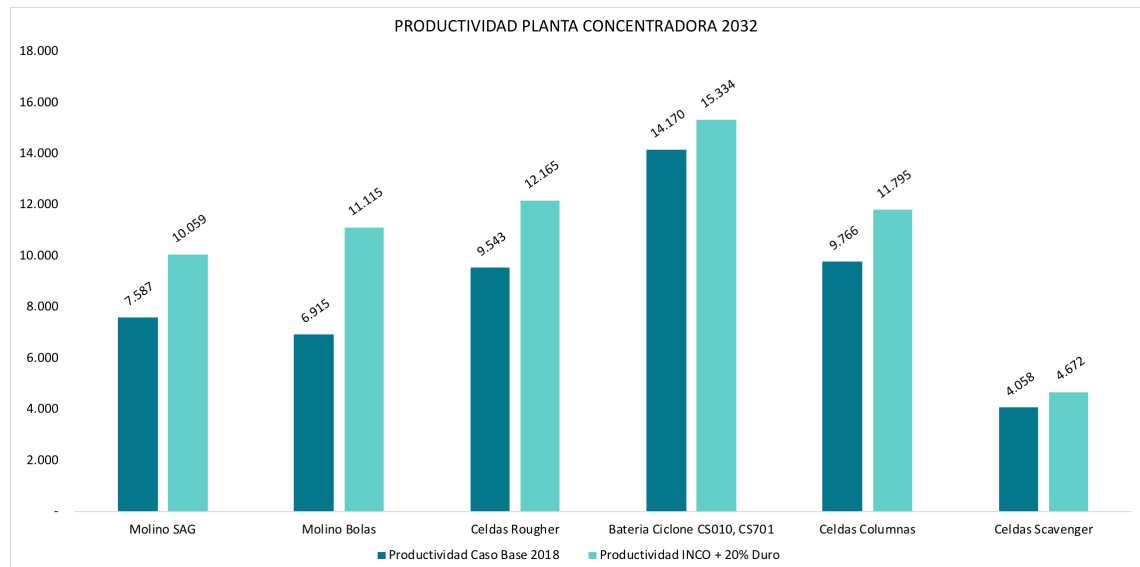
Gráfico 18: Productividades Caso base y Proyecto INCO con 20% duro, Molienda y Flotación



Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que el año 2032 se integra un nuevo Molino Bolas por el proyecto INCO. El nuevo molino tiene una productividad de 4.044 toneladas por hora al trabajar con minerales blandos. Luego de esta instalación, la productividad total del subproceso de bolas aumenta a 11.115 tph, superando las 10.059 tph de los Molinos SAG. La productividad de este nuevo Molino Bolas es estimada al igual que los anteriores en base a la potencia de los Molinos Bolas existentes. Es por esto que a partir del año 2032 el cuello de botella ya no corresponde a los Molinos Bolas como en los escenarios anteriores sino que corresponde a los subprocesos Molinos SAG, como se observa en el gráfico 19.

Gráfico 19: Productividades Caso base y Proyecto INCO con 20% duro, Molienda y Flotación 2032



Fuente: Elaboración propia

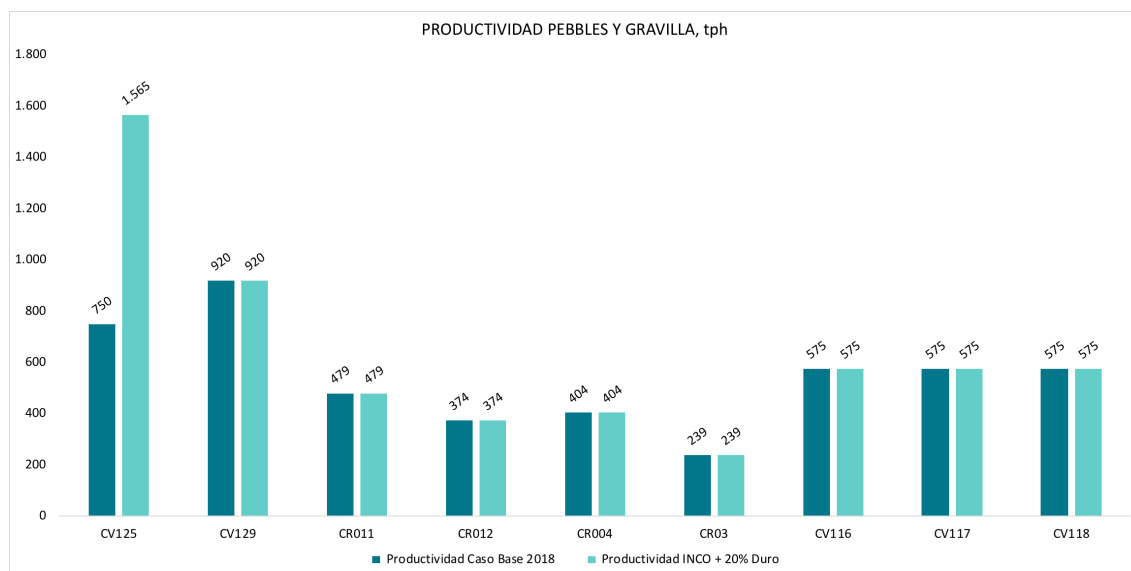
ii. PEBBLES Y GRAVILLA

Para la planta de Pebbles y Gravilla el proyecto INCO considera la instalación de un nuevo sistema de correas transportadoras para la recirculación de los Pebbles generados por la cuarta línea de molienda, vale decir, mejoramiento para la correa CV125 principalmente. De esta manera, las nuevas correas aumentan en 815 toneladas por hora la productividad inicial de la correa CV125, así pues esta última alcanza una productividad de 1.565 tph cuando está en operación el proyecto de infraestructura complementaria y se trabaja con mineral blando.

En relación a lo anterior, en este escenario los chancadores alcanzan en total una productividad de 1.500 toneladas por hora, similar a la productividad de la correa transportadora. Sin embargo, se considera ésta como cuello de botella para el proceso productivo de planta Pebbles y Gravilla en el escenario presente.

Cabe señalar que la generación de Pebbles producida por la nueva línea de molienda es de 400 toneladas por hora, por ello es que el total aumenta de 1.000 a 1.400 tph. Se puede destacar que las capacidades en este escenario alcanzan a procesar dicha demanda de Pebbles.

Gráfico 20: Productividades Caso base y Proyecto INCO con 20% duro, Pebbles y Gravilla



Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Proyecto INCO con 70% dureza de mineral

Como fue mencionado anteriormente, el proyecto de infraestructura complementaria contempla nuevas instalaciones para los procesos de mina y planta concentradora. Por lo tanto, para este escenario al igual que para el escenario pasado, se estudian estas dos partes del proceso productivo de AMSA Los Pelambres.

La planificación de dureza de mineral de Los Pelambres indica que la proporción y el porcentaje de dureza de mineral irá aumentando gradualmente hacia el futuro como se puede apreciar en la tabla 8. El año con menor proporción de minerales duros es el 2022 con 40,6%, luego irá aumentando gradualmente con excepciones de algunos años como 2026, 2027. Estas excepciones suceden porque la planificación de tronadura en el yacimiento va variando y en ocasiones se trabaja en partes del terreno donde hay más proporción de mineral blando, por lo tanto, esta es una causa geográfica principalmente.

Tabla 8: Proporción mineral duro

AÑO	Proporción Mineral Duro
2022	40,6%
2023	45,5%
2024	74,6%
2025	72,4%
2026	54,4%
2027	49,1%
2028	71,1%
2029	63,6%
2030	64,5%
2031	87,1%
2032	94,1%
2033	99,6%
2034	100,0%
2035	100,0%
Promedio	72,6%

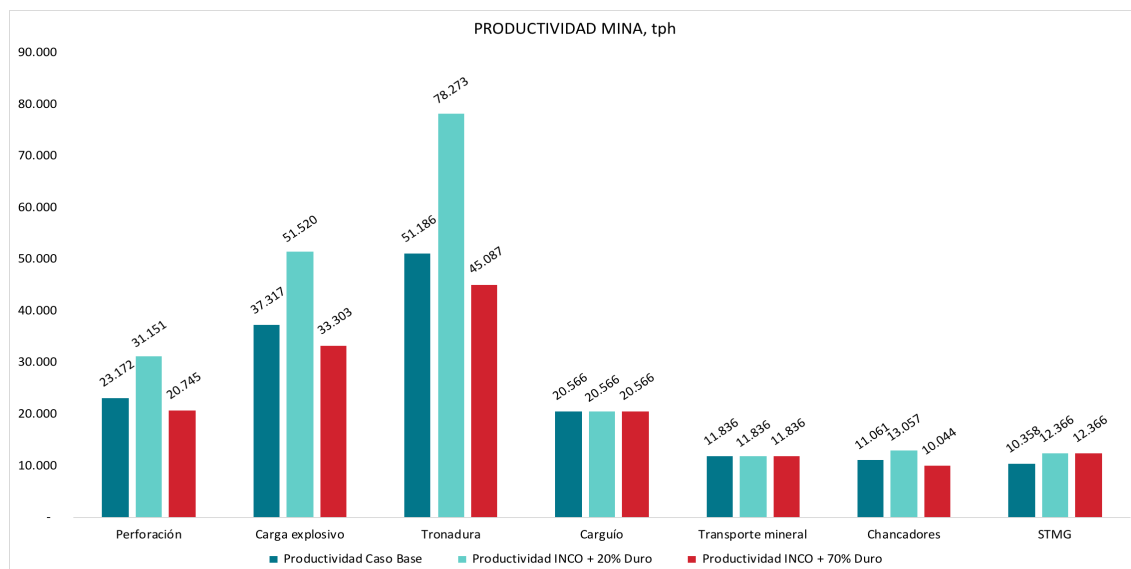
Fuente: Elaboración propia

a. MINA

El crecimiento en la productividad del sistema de transporte de mineral grueso generado por el aumento de velocidad en la correa, se mantiene en 2.008 tph como en el escenario anterior, pues la dureza de mineral no afecta al STMG. En esta línea, por efectos de la dureza del mineral, los chancadores tienen un impacto y una disminución de su productividad. Por esta razón, pasan de producir 13.057 toneladas por hora (escenario INCO más 20% duro) a tener un tratamiento de 10.044 tph en el escenario con INCO operando y 70% dureza de mineral. De lo anterior se puede destacar que el nuevo cuello de botella son los chancadores, puesto que son los equipos con menor productividad en el proceso productivo de mina.

A continuación se puede observar las productividades para este escenario en el área mina.

Gráfico 21: Productividades Caso base, Proyecto INCO 20% y 70% duro, Mina



Fuente: Elaboración propia

b. PLANTA CONCENTRADORA

i. MOLIENDA Y FLOTACIÓN

Para el caso de Molienda y Flotación, en el escenario donde el proyecto de infraestructura complementaria está operando con mineral duro, cambian las productividades de los equipos que tienen un mejoramiento gracias a las nuevas instalaciones del proyecto INCO, pues la dureza de mineral impacta en los equipos como Molinos SAG, Bolas y Celdas Rougher.

En este escenario la productividad para el nuevo Molino SAG cambia de 2.326 tph a 2.101 toneladas por hora por efectos de la dureza de mineral, por consiguiente, la productividad total del proceso de Molinos SAG disminuye de 10.059 tph (caso anterior) a 9.085 tph, a saber, 9,68% menos.

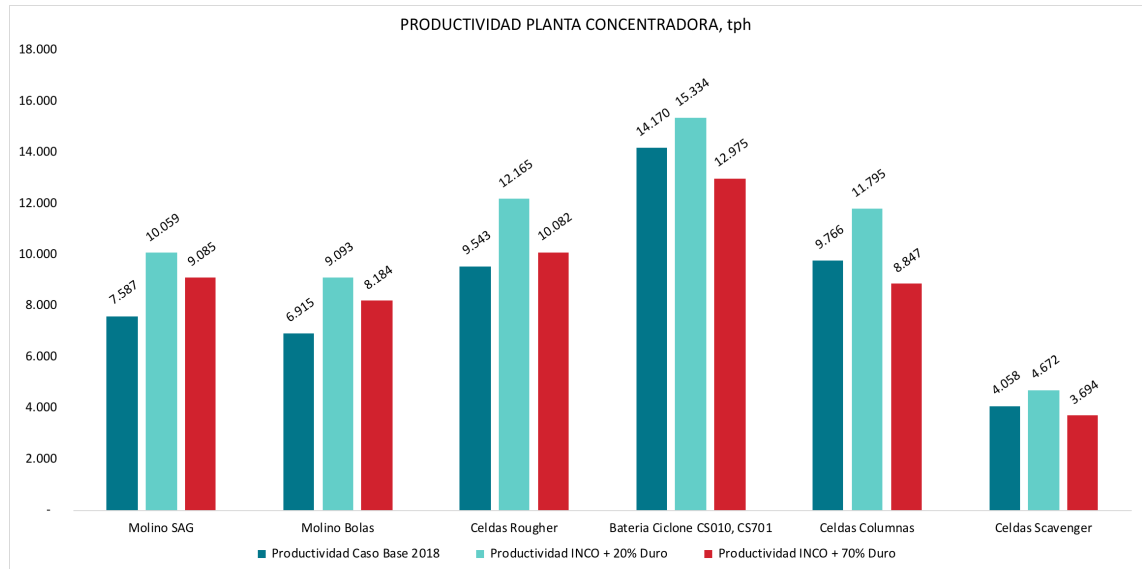
Por otro lado, el nuevo Molino Bolas al trabajar con minerales duros llega a una productividad promedio de 1.820 toneladas por hora. En total el tratamiento del proceso de bolas cambia de 9.093 tph a 8.184 tph, es decir, disminuye un 10% aproximadamente en relación con el escenario anteriormente estudiado.

Dado que las nuevas productividades de los Molinos SAG y Molinos Bolas tienen una disminución de proporciones similares en este escenario, entonces el cuello de botella se mantiene en los Molinos Bolas como se observa en el gráfico 22. Cabe señalar que en este escenario los Molinos Bolas tampoco superan la restricción de calificación ambiental.

En cuanto al proceso de Flotación, la productividad de las nuevas Celdas Rougher disminuyen en un 17%, esto es, una reducción de 1.639 tph a 1.359 toneladas por hora. En consecuencia de este detrimento, la productividad del proceso

completo de Celdas Rougher tiene un promedio de 10.082 toneladas por hora. Por otra parte, los otros procesos de Flotación mantienen sus productividades iguales a los escenarios que contemplan solo dureza de mineral (20% y 70%). En consecuencia del aumento de productividad en las Celdas Rougher por efecto de las nuevas instalaciones del proyecto de infraestructura complementaria, el cuello de botella para este escenario son las Celdas Columnas con una productividad promedio de 8.847 tph.

Gráfico 22: Productividades Caso base, Proyecto INCO 20% y 70% duro, Molienda y Flotación

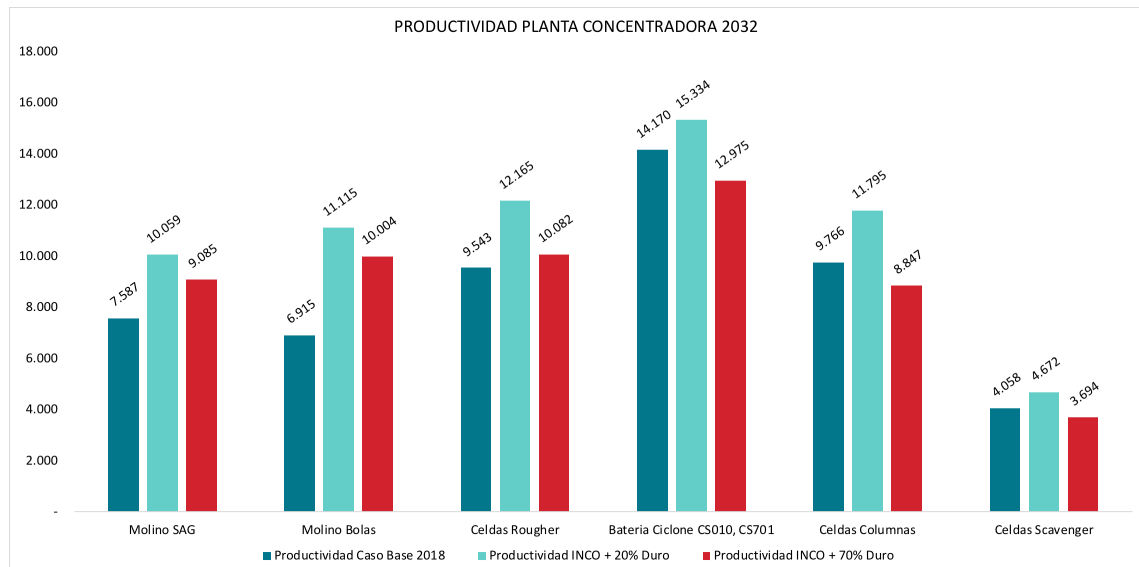


Fuente: Elaboración propia

Desde el año 2032 hacia adelante, con la integración del nuevo Molino Bolas, el cuello de botella cambia para el proceso productivo de molienda. La productividad del Molino Bolas instalado en el año 2032, al trabajar con mineral duro, es de 3.640 toneladas por hora, 404 tph menos que al trabajar con mineral blando. En consecuencia de este nuevo molino, la productividad total de los Molinos Bolas alcanza las 10.004 toneladas por hora, superior a los Molinos SAG. Por esta razón, el subproceso de Molinos SAG se convierte en cuello de botella, pues tiene una productividad de 9.085 tph, es decir, 919 toneladas por hora menos que los Molinos Bolas.

A continuación se grafica las productividades para los procesos de Molienda y Flotación en este escenario

Gráfico 23: Productividades Caso base, Proyecto INCO 20% y 70% duro, Molienda y Flotación 2032



Fuente: Elaboración propia

ii. PEBBLES Y GRAVILLA

La planta de Pebbles y Gravilla en este escenario no tiene cambios con respecto al escenario donde el proyecto INCO está operando con minerales blandos. Por lo tanto, el análisis y las conclusiones son equivalentes al escenario anteriormente mencionado. Se puede observar el gráfico de productividades en anexo F.

3.5 Análisis General

En esta etapa se realiza un análisis de las partes más relevantes del proceso productivo de AMSA Los Pelambres en conjunto. Para ello se consideran los subprocesos que son cuellos de botella en los diferentes escenarios estudiados anteriormente. De esta forma, se puede ver gráficamente cuáles son los cuellos de botella más relevantes de toda la cadena de valor de la Minera.

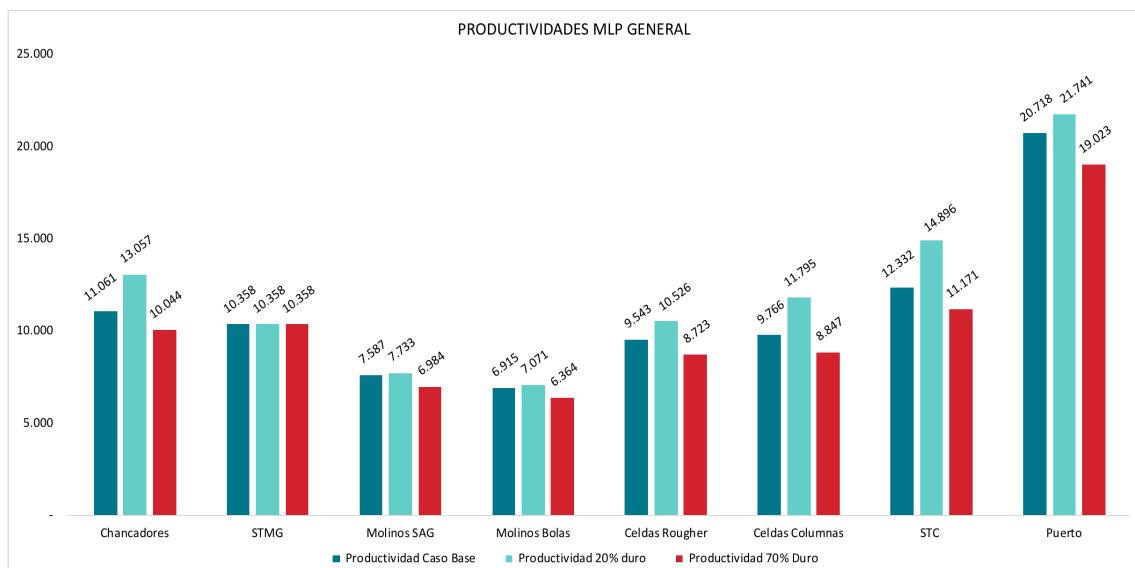
Se presentan 3 análisis, el primero de ellos estudia el comportamiento general de la minera para los escenarios con dureza de mineral, tanto 20% y 70%, a saber, durante los años 2019 y 2021. El segundo análisis plantea el conjunto de cuellos de botella para escenarios con el proyecto de infraestructura complementaria, operando con 20% y 70% de dureza durante el año 2022 hasta el 2031. Finalmente, el último escenario muestra el funcionamiento de MLP para los años desde el 2032 cuando se instala el nuevo Molino Bolas por el proyecto INCO.

Con respecto al primer análisis, se puede observar en el gráfico 24 que los Molinos Bolas son el cuello de botella para todos los escenarios, es decir, caso base, 20% y 70% dureza de mineral. En estos escenarios los Molinos Bolas no alcanzan a superar la restricción de calificación ambiental, por lo que son una limitante para producir el máximo que se

puede producir en Minera Los Pelambres. El hecho de trabajar con minerales blandos limita la producción en 1.679 tph y al trabajar con minerales duros la diferencia de producción limitada aumenta a 2.386 toneladas por hora, o sea, 57.264 tph diarias. Por otro lado, el cuello de botella siguiente (en caso de aumentar la productividad de Molino Bolas) son los Molinos SAG que tampoco superan la restricción de calificación ambiental en los escenarios planteados en el primer análisis. Sin embargo, con una diferencia menor que el cuello de botella anterior, es decir, 1.017 tph y 1.766 tph al trabajar con mineral blando y duro, respectivamente.

Estos cuellos de botella (Molinos Bolas y Molinos SAG) tienen una explicación lógica porque son aquellos subprocesos que más impacto tienen al tratar con una mala granularidad, además su productividad se ve aún más afectada por el efecto látigo que se produce por los subprocesos aguas arriba, ya que Perforación, Tronadura y Chancadores no trabajan la dureza de mineral como corresponde.

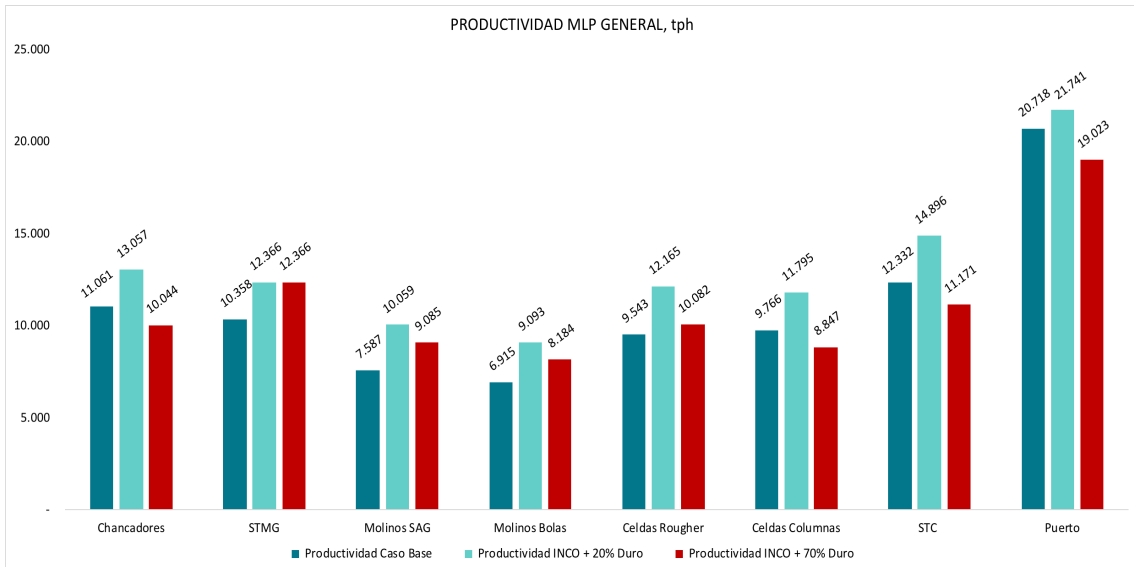
Gráfico 24: Productividades Caso base, 20% y 70% duro, General MLP



Fuente: Elaboración propia

En el segundo análisis se gráfica las productividades para el conjunto de subprocesos que son cuellos de botella de la cadena de valor de Minera Los Pelambres en diferentes escenarios con el proyecto INCO operando. En el gráfico 25 se puede apreciar que los Molinos Bolas siguen siendo el subproceso con menor productividad en los escenarios con proyecto INCO en operación y al trabajar con distintas durezas de mineral. A diferencia del análisis anterior, en este caso, con las nuevas instalaciones del proyecto INCO los Molinos Bolas al tratar con minerales blandos superan la restricción ambientalmente aprobada al trabajar. En otras palabras, tienen una productividad que permite producir una cantidad de cobre superior a la indicada por RCA, sin embargo, al trabajar con minerales duros los Molinos Bolas no logran superar la restricción y limitan la producción en 566 toneladas por hora, lo que equivale a una pérdida de 13.584 tph diarias. Por otro lado, en caso de que la restricción instaurada por la resolución de calificación ambiental aumente para MLP, el segundo cuello de botella en presentarse son las Celdas Columnas y Molino SAG al trabajar con minerales duros y blandos respectivamente.

Gráfico 25: Productividades Caso base, INCO 20% y 70% duro, General MLP

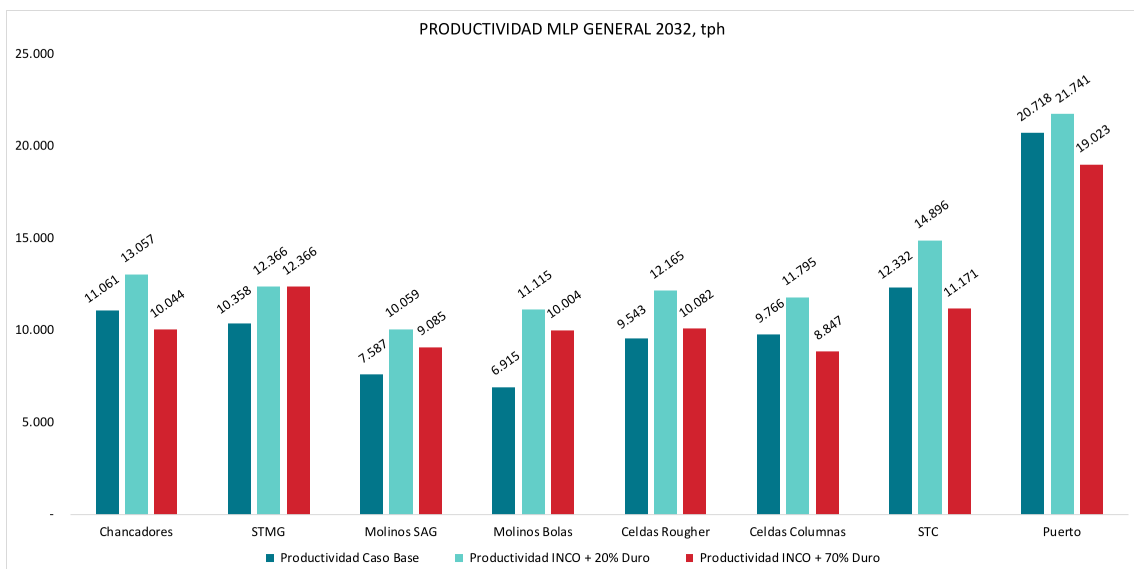


Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el último análisis incorpora el nuevo Molino Bolas que se instalará el año 2032, por lo tanto, el último análisis a presentar se enfoca en los años posteriores a éste. Cabe señalar que con la instalación del nuevo molino la productividad de este subproceso aumenta para diferentes durezas de mineral.

En este escenario el subproceso con menor productividad corresponde a los Molinos SAG al tratar con minerales blandos, con 10.059 tph, sin embargo, al trabajar con minerales duros el subproceso con menor productividad son las Celdas Columnas con 8.847 tph como se aprecia en el gráfico 26.

Gráfico 26: Productividades Caso base, INCO 20% y 70% duro, General MLP 2032



Fuente: Elaboración propia

3.6 Síntesis Análisis de Escenarios

En los subcapítulos anteriores (3.3 y 3.4 principalmente) se encontraron los cuellos de botella más relevantes para los 5 escenarios planteados en un comienzo, o sea, caso base, dureza de mineral (20% y 70%) y nuevas instalaciones del proyecto INCO que entrarán en operación durante el segundo semestre del 2021. Se hallaron 27 cuellos de botella, los que fueron validados oportunamente con expertos de las diferentes áreas estudiadas. Dichos cuellos de botellas se detallan a continuación:

Tabla 9: Principales cuellos de botella

ÁREA	ESCENARIO	CUELLO DE BOTELLA
MINA	CASO BASE	STMG
	20% DURO	STMG
	70% DURO	CHANCADORES
	INCO 20% DURO	TRANSPORTE DE MINERAL
	INCO 70% DURO	CHANCADORES
MOLIENDA	CASO BASE	MOLINO BOLAS
	20% DURO	MOLINO BOLAS
	70% DURO	MOLINO BOLAS
	INCO 20% DURO	MOLINO BOLAS
	INCO 70% DURO	MOLINO BOLAS
	INCO 2032	MOLINO SAG
FLOTACIÓN	CASO BASE	CELDAS ROUGHER
	20% DURO	CELDAS ROUGHER
	70% DURO	CELDAS ROUGHER
	INCO 20% DURO	CELDAS COLUMNAS
	INCO 70% DURO	CELDAS COLUMNAS
PEBBLES Y GRAVILLA	CASO BASE	CORREA CV125
	20% DURO	CORREA CV125
	70% DURO	CORREA CV125
	INCO 20% DURO	CHANCADORES
	INCO 70% DURO	CHANCADORES
STC	CASO BASE	ESPEMAMIENTO Y BOMBAS
	20% DURO	ESPEMAMIENTO Y BOMBAS
	70% DURO	ESPEMAMIENTO Y BOMBAS
PUERTO	CASO BASE	FILTRO DE PULPA
	20% DURO	FILTRO DE PULPA
	70% DURO	FILTRO DE PULPA

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 9, en el área Mina el sistema de transporte de mineral grueso es el cuello de botella en 2 de 5 escenarios y los chancadores se transforman en cuello de botella en escenarios con 70% de dureza.

En cuanto al proceso de planta concentradora, el subproceso de molienda cuenta con que los Molinos Bolas son los que tienen menor productividad en todos los escenarios, sin embargo, al solucionar lo anterior con un nuevo Molino Bolas en el año 2032, el cuello de botella se traslada a los Molinos SAG. Por otro lado, en Flotación las Celdas Rougher son el cuello de botella hasta que entre en operación el proyecto INCO, luego Celdas Columnas son la parte del proceso con menor productividad.

En el caso de Pebbles y Gravilla, la correa CV125 (alimentación de chancadores) es el equipo que tiene menor productividad para los escenarios: caso base, 20% y 70% dureza de mineral. Al entrar en operación el proyecto INCO los chancadores de la planta se transformarán en cuello de botella.

Finalmente, STC y Puerto mantienen sus cuellos de botella, es decir, espesamiento y filtro de pulpa respectivamente para todos los escenarios estudiados en estos procesos. Sin embargo, al tener alta productividad en la actualidad y en el futuro, no son ni serán un problema para AMSA Los Pelambres.

IV. POSIBLES SOLUCIONES

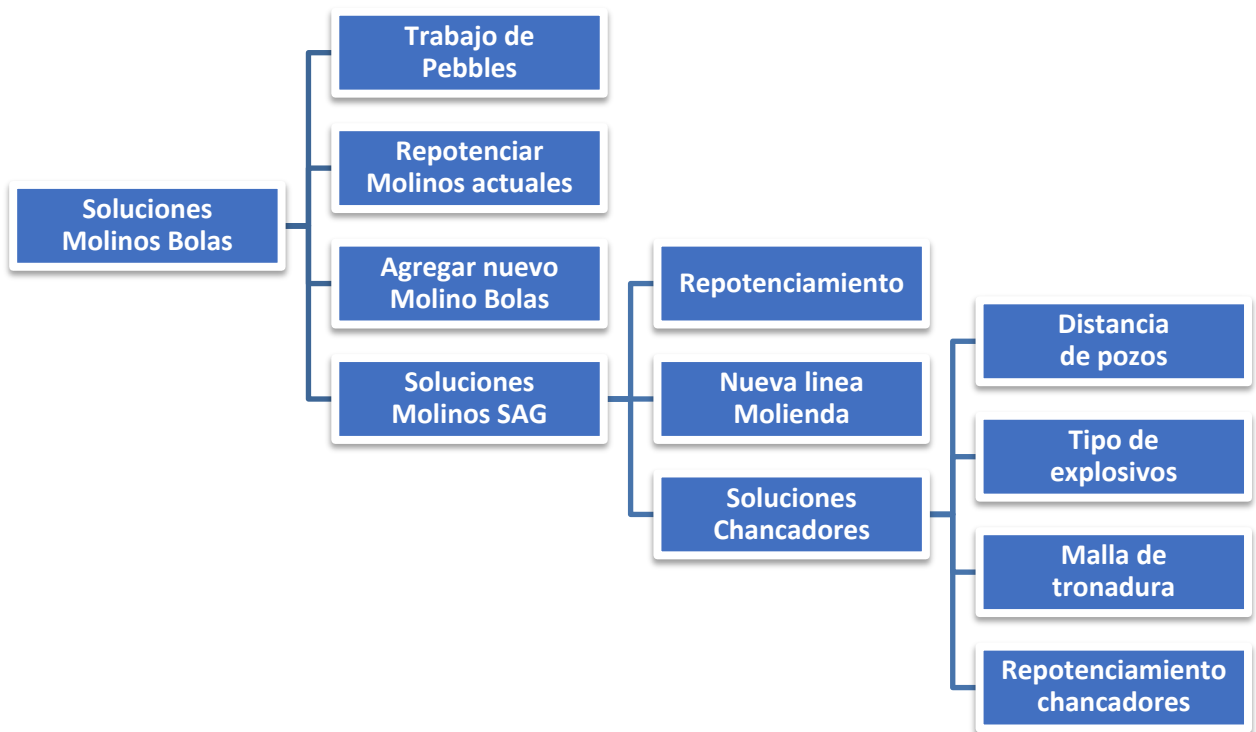
En este capítulo se plantean posibles soluciones a los principales cuellos de botella encontrados, a saber, Molinos Bolas, Molinos SAG, STMG y Chancadores. El resto de cuellos de botellas hallados se dejan fuera del análisis, porque algunos de ellos no tienen un impacto relevante como lo son aquellos pertenecientes a STC y Puerto, otros requieren de un análisis mayor, el cual involucra otras variables además de tratamiento, por ejemplo, para entregar soluciones pertinentes para Celdas Rougher se precisa analizar el uso de reactivos, ley de cobre, recuperación, etc. Finalmente existen otros cuellos de botella pertenecientes a procesos secundarios que tampoco son importantes para el proceso general, como aquellos generados en la planta de Pebbles y Gravilla.

Tradicionalmente el proceso minero es clasificado dentro de dos grupos distintos: Mina y Planta Concentradora, los cuales están gestionados con centros de costos separados dada una “supuesta” independencia, por lo que cada proceso tiene un presupuesto y una producción asignada; y su gestión se enfatiza en maximizar su propia producción a un mínimo costo; siendo la eficiencia satisfactoria, al estar dentro de sus presupuestos y de sus objetivos de producción. Sin embargo, a fines de la década de 1990, investigadores de la Universidad de Queensland propusieron un concepto comúnmente conocido como "Optimización Mine to Mill" y demostraron la gran influencia que posee la tronadura en los subprocesos “aguas abajo” (Planta Concentradora) del proceso global minero, ya que las variaciones en la dureza y distribución granulométrica del mineral de alimentación, esta íntimamente ligado a la eficiencia global del proceso, ya sea con el rendimiento de los circuitos de chancado y molienda; el grado de recuperación de los metales o generación de productos fuera de especificación o con menor valor agregado [13].

Es por eso que el concepto Mine to Mill (de mina a planta) integra la operación en Mina con la operación en Planta Concentradora, controlando ambos procesos como un todo único, para maximizar el rendimiento del proceso de tratamiento y por ende obtener una optimización global total, debido al menor consumo de energía en los procesos mecánicos (chancado y molienda), frente a un mejor aprovechamiento en la energía química de los explosivos, el cual resulta en la obtención de un mineral de más fácil tratamiento. La optimización en conjunto, desde un nuevo diseño de tronadura y un mejor aprovechamiento de la etapa de chancado, brindará un mineral de alimentación más adecuado para la molienda, el cual permitirá maximizar la producción del circuito, y obtener un costo global por tonelada mucho más bajo.

En relación a lo anterior, en base al concepto Mine to Mill, se presentan dos tipos de soluciones para reparar un cuello de botella: arreglar el equipo que causa la limitación en la producción o bien mejorar equipos de procesos aguas arriba que causen un impacto en el cuello de botella a corregir. En la siguiente ilustración se detallan las posibles soluciones a los cuellos de botella.

Ilustración 17: Posibles soluciones a cuellos de botella



Fuente: Elaboración propia

Para solucionar el cuello de botella generado por Molinos Bolas se puede agregar otro Molino Bolas, repotenciar el existente, mejorar el trabajo de Pebbles, vale decir, perfeccionar los chancadores pertenecientes a la planta de Pebbles y Gravilla para que el mineral que vuelve a los molinos tenga un tamaño amigable al proceso. También es adecuado según los investigadores de la Universidad de Queensland repotenciar los Molinos SAG (proceso aguas arriba a Molino Bolas) para que el mineral que fluye desde los Molinos SAG a los Molinos Bolas tengan una mejor granularidad y así este último no se vea afectado por el tamaño de mineral ingresado.

Siguiendo en esa línea, para solucionar el cuello de botella en los Molinos SAG se puede repotenciar el molino, agregar una nueva línea de molienda, lo que implica agregar un nuevo Molino SAG, Molinos Bolas y Celdas Rougher (al igual que el proyecto INCO) o mejorar el proceso de chancado aguas arriba, con el propósito de tener una mejor granularidad en el paso desde el chancador al Molino SAG.

Con respecto al cuello de botella en los chancadores pertenecientes al área mina, algunas soluciones posibles son las siguientes: repotenciar el chancador o generar reparos aguas arriba, como en el tipo de explosivos, la malla a utilizar en tronadura o la separación de los pozos en la perforación. Estos arreglos aguas arriba tienen por objetivo mejorar la granularidad del mineral al igual que en los casos anteriores.

Por último, el cuello de botella en sistema de transporte de mineral grueso no tiene relación con los procesos aguas abajo o aguas arriba en cuanto al impacto que pueda generar en ellos por la granularidad del mineral, entonces tiene soluciones

independientes a los otros procesos. Las principales soluciones para este cuello de botella es el aumento de velocidad de la correa o mantener la continuidad de envío, es decir, que las paradas tanto planificadas como no planificadas se reduzcan, con el propósito de que la correa esté en constante funcionamiento y pueda trasladar el mineral grueso necesario.

Finalmente, es de gran importancia tener un mejor conocimiento de los procesos anteriores a Mina, es decir geología y planificación geo minero metalúrgica, pues el cerro está en constante movimiento y cambio, por lo que tener mayor información y habituales actualizaciones del yacimiento mejora las planificaciones de perforación y con ellas la tronadura es más eficiente, ya que se puede estimar de mejor manera la distancia de los pozos y los explosivos necesarios a utilizar. Mejorar la tronadura ayuda a mejorar la fragmentación de la roca y la granulometría. Lo anterior se traduce en reducir el tiempo en el chancador y una mejora continua para los procesos de Planta Concentradora.

V. ANÁLISIS ECONÓMICO

En el presente capítulo se realiza un análisis económico con el propósito de plasmar el efecto que producen los cuellos de botella en la economía de Minera Los Pelambres. Para ello, se estudian los escenarios donde el cuello de botella no supera la restricción impuesta por la resolución de calificación ambiental, pues este límite indica cuál podría ser la producción máxima que podría llegar a tener MLP durante los años de estudio. Por lo tanto, los escenarios a estudiar son: Caso base (2018), años con diferentes durezas de mineral (2019 - 2021) y finalmente, años donde se opera con el proyecto INCO y diferentes durezas de mineral (2022 – 2031) .

El análisis se enfoca en los ingresos que se obtienen dada una cierta cantidad de cobre fino producido. Por lo tanto, para calcular el ingreso se utilizan las estimaciones del precio del cobre realizadas por JP Morgan y Fitch Solution para los años 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022. La siguiente tabla muestra las estimaciones para los años mencionados. Además para los años posteriores al 2022 se utiliza un promedio de los datos entregados por JP Morgan y Fitch Solution.

Tabla 10: Estimaciones precio del cobre por JP Morgan y Fitch Solution

AÑO	Precio Cobre (dolares/libra)
2018	2,96
2019	2,72
2020	2,62
2021	2,61
2022	2,60
futuro	2,70

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para obtener el cobre fino generado luego de una cierta productividad es necesario contar con la ley de cobre y el porcentaje de recuperación para los años de estudio. El cobre fino es calculado con la siguiente formula:

$$\text{Cant Cobre Fino} = \text{Productividad} * \% \text{ ley de cobre} * \% \text{ Recuperación}$$

En la tabla 11 se detallan las estimaciones realizadas por Minera Los Pelambres para la ley de cobre y la recuperación para los diferentes años de estudio y con las cuales se estima el cobre fino generado en los distintos escenarios.

Tabla 11: Estimaciones para ley de cobre y recuperación, Minera Los Pelambres

AÑO	LEY DE COBRE	RECUPERACIÓN
2018	0,668%	89,8%
2019	0,679%	88,9%
2020	0,662%	90,3%
2021	0,619%	92,0%
2022	0,600%	91,4%
2023	0,582%	91,7%
2024	0,484%	93,1%
2025	0,571%	93,3%
2026	0,637%	93,4%
2027	0,637%	92,1%
2028	0,614%	91,7%
2029	0,611%	91,8%
2030	0,550%	90,1%
2031	0,523%	90,5%

Fuente: Elaboración propia

ESCENARIO 1: CASO BASE (2018)

En primer lugar, se analiza el caso base. En este escenario el primer cuello de botella es el subproceso correspondiente a los Molinos Bolas, el cual cuenta con una productividad de 6.915 toneladas por hora. Esta productividad se traduce en una producción de 363.370 toneladas por año de cobre fino (considerando un porcentaje de ley de cobre igual a 0,668% y una recuperación de 89,8%), lo que implica ingresos de MUS\$ 2.371.235.

Por otro lado, la siguiente productividad que se puede alcanzar al solucionar el primer cuello de botella es de 7.587 tph (segundo cuello de botella). De la información anterior se puede rescatar que existe una diferencia de 35.312 toneladas de cobre fino anuales que son limitadas por los Molinos Bolas durante el 2018. Esta diferencia de producción se traduce en que Minera Los Pelambres deja de ganar MUS\$ 230.437, a saber, 9,72% de los ingresos por venta de cobre fino que se podrían tener al solucionar el cuello de botella (produciendo con la limitante del segundo cuello de botella).

Cabe señalar que al eliminar el primer cuello de botella (solucionando las limitaciones en los Molinos Bolas) aparece un segundo cuello de botella para el caso base. El subproceso correspondiente a los Molinos SAG forma parte de la segunda limitante del proceso productivo de AMSA Los Pelambres, el cual en el caso base tiene una productividad de 7.587 toneladas por hora, lo que se traduce en ingresos monetarios de MUS\$ 2.601.671. Además, la productividad máxima es de 8.750 tph por RCA, dados los porcentajes de ley de cobre y recuperación del año 2018. En consecuencia, el cobre fino máximo producido es de 459.796 toneladas por año, lo que implica ingresos de MUS\$ 3.000.478.

Dada la productividad alcanzada por los Molinos SAG y la máxima posible, se produce una diferencia de producción de cobre fino entre el cuello de botella y el caso ideal de 61.113 toneladas por año, lo que significa que MLP deja de ganar MUS\$ 398.806 (16,82% de los ingresos reales por venta de cobre fino) por no solucionar el cuello de botella.

En la siguiente tabla se observa las diferencias en producción e ingresos para Minera Los Pelambres en el caso base, año 2018:

Tabla 12: Diferencia entre ganancia real e ideal, Caso Base (2018)

Caso Base 2018	Primer CB	Segundo CB	Ideal	Ganancia eliminar 1er CB	Ganancia eliminar 2do CB
Productividad [tph]	6.915	7.587	8.750	672	1.163
Cobre fino total [ton/y]	363.370	398.682	459.796	35.312	61.113
Cobre fino total [libras/y]	801.092.808	878.943.042	1.013.674.920	77.850.234	134.731.878
Ingresos [MUS\$]	2.371.235	2.601.671	3.000.478	230.437	398.806

Fuente: Elaboración propia

ESCENARIO 2: DISTINTAS DUREZAS (2019- 2021)

En los escenarios donde se trabaja con diferentes durezas de mineral durante los años 2019, 2020 y 2021 sucede un efecto similar al estudiado anteriormente. Para este análisis se considera una productividad promedio para los 3 años, pues en un año se presentan ambos escenarios. La proporción utilizada y el promedio se muestran en la tabla 13 y es calculada de la siguiente manera:

$$Prod\ Total = Prod\ Blanda * \% prop\ Blanda + Prod\ dura * \% Prop\ Dura$$

Tabla 13: Productividades Promedio integrando durezas de mineral, Molinos Bolas

Año	Prod blanda tph	Prod dura tph	Prop blanda	Prop dura	Prod Total
2019	7.071	6.364	22,5%	77,5%	6.523
2020	7.071	6.364	64,1%	35,9%	6.817
2021	7.071	6.364	56,8%	43,2%	6.766
				Promedio	6.702

Fuente: Elaboración propia

Las productividades en casos de tratamiento con minerales duros y blandos mostradas en la tabla 13 corresponden a los Molinos Bolas, ya que es el subproceso con menor productividad para escenarios con 20% y 70% de dureza de mineral y, por consiguiente, es el primer cuello de botella presente, el que cuenta con una productividad promedio para los 3 años de 6.702 toneladas por hora. Para estudiar la productividad promedio para el segundo cuello de botella (Molinos SAG) para el periodo de estudio 2019-2021 se realiza el mismo procedimiento realizado para los Molinos Bolas y se detalla en la tabla 14, donde se observa una estimación de su productividad promedio de 7.342 toneladas por hora para cada año de análisis.

Tabla 14: Productividades Promedio integrando durezas de mineral, Molinos SAG

Año	Prod blanda tph	Prod dura tph	Prop blanda	Prop dura	Prod Total
2019	7.733	6.984	22,5%	77,5%	7.153
2020	7.733	6.984	64,1%	35,9%	7.464
2021	7.733	6.984	56,8%	43,2%	7.409
				Promedio	7.342

Fuente: Elaboración propia

Luego, para realizar el análisis económico se utilizan las productividades promedio obtenidas anteriormente, a saber, 6.702 tph y 7.342 tph para el primer y segundo cuello de botella respectivamente.

En el primer caso, al contar con los Molinos Bolas como cuello de botella se logra una producción de cobre fino de 346.746 toneladas anuales y en consecuencia, ingresos de MUS\$ 2.025.776 anualmente. Sin embargo, en caso de reparar este cuello de botella y poder alcanzar productividades más altas, aparece una segunda limitante en la producción, los Molinos SAG. De manera que, al eliminar la limitante por los Molinos Bolas, se puede alcanzar una producción de 379.858 toneladas anuales de cobre fino, lo que se traduce en ingresos anuales de MUS\$ 2.219.225 (MUS\$ 193.449 más que en el primer caso).

Por otro lado, queda la posibilidad de eliminar el cuello de botella provocado por los Molinos SAG y así alcanzar el escenario ideal y producir la máxima cantidad de cobre fino aprobado. En este caso, considerando la ley de cobre y porcentaje de recuperación para estos años, el escenario ideal busca producir como máximo 452.705 toneladas de cobre fino (con la misma productividad de 8.750 tph) y de esta forma alcanzar ingresos de MUS\$ 2.644.813. Finalmente, en caso de mantener los dos cuellos de botella estudiados (Molinos Bolas y SAG) Minera Los Pelambres deja de ganar MUS\$ 425.588, equivalentes a 21% de sus ingresos reales en este escenario.

En la siguiente tabla se observa las diferencias en producción e ingresos al tener los cuellos de botella en un año de Minera Los Pelambres en el escenario con distintas durezas.

Tabla 15 : Diferencia entre ganancia real e ideal, 20% y 70% duro

Dureza de mineral. 20% y 70%	Primer CB	Segundo CB	Ideal	Ganancia por eliminar 1er CB	Ganancia por eliminar 2do CB
Productividad [tph]	6.702	7.342	8.750	640	1.408
Cobre fino total [ton/y]	346.746	379.858	452.705	33.112	72.847
Cobre fino total [libras/y]	764.443.724	837.443.424	998.042.762	72.999.699	160.599.338
Ingresos [MUS\$]	2.025.776	2.219.225	2.644.813	193.449	425.588

Fuente: Elaboración propia

ESCENARIO 3: INCO OPERANDO CON DISTINTAS DUREZAS (2022- 2031)

Finalmente, para este escenario se calcula una productividad promedio para realizar un análisis de un año de producción de MLP con el proyecto de infraestructura complementaria operando con diferentes durezas de mineral. Por lo tanto, en la tabla 16 se puede observar las productividades de los Molinos Bolas (principal cuello de botella para este escenario) al trabajar con diferentes durezas y la productividad promedio para los diferentes años dada la proporción de minerales duros y blandos para dicho año. Finalmente, la productividad a utilizar para el análisis económico es el promedio de todos los años de estudio, o sea, 8.527 toneladas por hora.

Tabla 16: Productividades Promedio integrando durezas de mineral e INCO, Molinos Bolas

Año	Prod blanda tph	Prod dura tph	Prop blanda	Prop dura	Total
2022	9093	8184	59,4%	40,6%	8.724
2023	9093	8184	54,5%	45,5%	8.679
2024	9093	8184	25,4%	74,6%	8.415
2025	9093	8184	27,6%	72,4%	8.435
2026	9093	8184	45,6%	54,4%	8.599
2027	9093	8184	50,9%	49,1%	8.647
2028	9093	8184	28,9%	71,1%	8.447
2029	9093	8184	36,4%	63,6%	8.515
2030	9093	8184	35,5%	64,5%	8.507
2031	9093	8184	12,9%	87,1%	8.301
				Promedio	8.527

Fuente: Elaboración propia

Para los años desde el 2022 hasta el 2031, el primer cuello de botella (Molinos Bolas) tiene una productividad promedio de 8.527 toneladas por hora, lo que significa que con una ley de cobre promedio de 0,518% y un porcentaje de recuperación promedio de 91,9% alcanza una producción de 398.798 toneladas anuales de cobre fino, lo que implica ingresos de MUS\$ 2.375.596. Por otro lado, al eliminar dicho cuello de botella se logra alcanzar el escenario ideal y tener una productividad de 8.750 tph, por consiguiente, se logra una producción de 409.238 toneladas anuales de cobre fino e ingresos de MUS\$ 2.437.784. Por lo tanto, hay una diferencia de 10.440 toneladas de cobre fino anuales e ingresos de MUS\$ 62.189 al tener presente el cuello de botella.

En la siguiente tabla se observa las diferencias en producción e ingresos al tener los cuellos de botella en un año de Minera Los Pelambres en el escenario donde el proyecto INCO opera con distintas durezas.

Tabla 17: Diferencia entre ganancia real e ideal, Proyecto INCO

Proyecto INCO	primer CB	Ideal	Ganancia eliminar CB
Productividad [tph]	8.527	8.750	223
Cobre fino total [ton/y]	398.798	409.238	10.440
Cobre fino total [libras/y]	879.199.127	902.215.003	23.015.876
Ingresos MUS\$	2.375.596,04	2.437.784,94	62.189

Fuente: Elaboración propia

VI. CONCLUSIONES

Existe un consenso en la literatura, e incluso dentro de los mismos ingenieros de la minería, sobre la importancia de la mejora continua dentro de los procesos productivos. Dentro de esta son relevantes: la identificación de actividades que no agregan valor a la compañía, el conocimiento de los desperdicios y el uso eficiente de los recursos mineros. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es identificar los desequilibrios (cuellos de botella) en el proceso productivo minero de AMSA Los Pelambres que afectarán la futura producción con el propósito de tener información real para que MLP pueda anticiparse a ellos.

Como causas principales de los cuellos de botella según la literatura se encuentran los desperdicios de sobreproducción transporte, procesamiento excesivo, inventario, defectos, movimiento y esperas. En particular para este análisis, los desperdicios de espera son la principal causa en la generación de cuellos de botella presentes en el proceso productivo de AMSA Los Pelambres. Además, como causas de estos desperdicios de espera se encuentran los efectos producidos por el cambio en la dureza de mineral y el nuevo proyecto de infraestructura complementaria que comienza a operar a fines del 2021.

De acuerdo con los resultados de esta investigación, en términos generales se hallaron 27 cuellos de botella para los 5 escenarios expuestos al inicio de la memoria: caso base, 20% dureza de mineral, 70% dureza de mineral, Proyecto INCO operando con 20% y 70% dureza de mineral. A nivel específico, el cuello de botella más relevante para todo el proceso productivo se encuentra en los Molinos Bolas. En cuanto a los cuellos de botella dentro de Mina y Planta Concentradora, los más importantes son STMG, Chancadores, Molinos SAG y Molinos Bolas. En otro orden de ideas, se entregaron posibles soluciones en base al concepto mine to mill, dentro de las cuales se propone mejorar el sistema de tronadura para tener un impacto positivo aguas abajo. Finalmente, se realizó un análisis económico para detectar como afectan los cuellos de botella en la economía de MLP, donde se encontró que al solucionar los cuellos de botella presentes se puede llegar a tener ganancias del 20% en comparación a la situación con cuellos de botella. Por consiguiente, dado los resultados mostrados en los análisis, se puede concluir que la metodología aplicada ayuda a identificar los cuellos de botella y proponer soluciones de alto nivel.

Sobre la base de los datos anteriores, la hipótesis principal del trabajo queda validada teórica y metodológicamente. Teóricamente pues se cuenta con la validación entregada por los ingenieros expertos en procesos. Se enfatiza el término teóricamente, porque para hacer una validación robusta es necesaria una observación exhaustiva en terreno. Si bien, se realizaron observaciones en terreno, estas fueron de forma general y para obtener una idea de los aspectos relevantes de cada proceso y no en detalle pues se escapa del alcance del trabajo. Y metodológicamente ya que se cumplieron todos los pasos metodológicos para una correcta identificación de cuellos de botella.

Se espera que tanto la información emanada de esta memoria, así como las soluciones propuestas, sean de utilidad para la compañía con el propósito de complementar posteriores estudios en el área o análisis de optimización de la cadena de valor del

proceso productivo. Asimismo, se espera generar una ayuda para la toma de decisiones por parte de el grupo de excelencia operacional de MLP.

Respecto de las fortalezas de esta memoria, se destaca que es un trabajo validado con ingenieros expertos en los diferentes procesos estudiados. Estos participantes sirvieron de apoyo y guía constante para la realización y cumplimiento de los objetivos planteados. Otra fortaleza que se puede mencionar es la calidad de los datos utilizados, pues es información real obtenida de sistemas que capturan datos automáticamente desde las máquinas. Por otra parte, la principal debilidad del trabajo es la cantidad de visitas a terreno realizadas, debido a problemáticas con los sectores aledaños a la minera y la situación país ocurrida durante la segunda parte de la realización de la minera. Por ello, es que el análisis realizado se sustenta principalmente en sistemas de información y entrevistas por video llamadas.

En cuanto a las limitaciones del trabajo, se debe considerar que al evaluar la situación actual se llega a la conclusión de incorporar en el análisis solo el flujo de material de cobre, dejando fuera los procesos relacionados a la producción de molibdeno, aguas y relaves. Ante dichas limitaciones se propone agregar estos procesos en una futura investigación para realizar un análisis del 100% de la minera. Además, se sugiere incorporar las variaciones en la ley de cobre y el porcentaje de recuperación para los estudios en el proceso de Flotación, pues estos se consideraron Ceteris Paribus. Por otro lado, se recomienda analizar las posibles soluciones entregadas para encontrar aquellas más óptimas y eficientes para su implementación. También se sugiere automatizar el análisis, creando un modelo que identifique los cuellos de botella en tiempo real con la información proporcionada por los diferentes sistemas. Por otro lado, es de utilidad considerar las restricciones de producción impuestas por la resolución de calificación ambiental, pues el objetivo de dichas restricciones es acotar las emisiones y mejorar la calidad de los medios, donde esas emisiones impactan. Es por ello, que si estos medios son monitoreados podría existir holgura para que Minera Los Pelambres pueda ampliar las capacidades permitidas de producción.

Finalmente, del trabajo realizado surgen aprendizajes relevantes con respecto al funcionamiento de una minera y la importancia de la mejora continua para todo proceso productivo. Cabe señalar que el proceso industrial analizado es de una alta variabilidad, puesto que un cambio menor aguas arriba genera un impacto relevante en los subprocesos posteriores. Por lo tanto, es de vital importancia tener una constante optimización de los procesos, recursos y sistemas, pues esto ayuda a disminuir costos, aumentar beneficios y por consecuencia, al crecimiento de la compañía.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SERNAGEOMIN, «Anuario de la minería en Chile,» Santiago, 2019.
- [2] M. L. Pelambres, «Memoria Anual,» Santiago, 2019.
- [3] M. L. Pelambres, «Minera Los Pelambres,» [En línea]. Available: <http://web.pelambres.cl>. [Último acceso: 6 Diciembre 2019].
- [4] C. C. d. Cobre, «Producción de cobre de mina por empresa anual,» Santiago, 2019.
- [5] M. L. Pelambres, «Memoria Anual 2015,» Santiago, 2015.
- [6] SERNAGEOMIN, «Anuario de la minería en Chile,» Santiago, 2017.
- [7] C. Sandoval, «REDISEÑO DEL PROCESO DE INGRESO Y PREPARACIÓN DEL PACIENTE QUIRÚRGICO ELECTIVO EN EL HOSPITAL CLÍNICO DE LA RED DE SALUD UC CHRISTUS,» Santiago, 2018.
- [8] V. Ode, «MEJORAMIENTO EN LA PRODUCTIVIDAD EN PROCESOS ADMINISTRATIVOS EN GESTIÓN DE PROYECTOS DE EDIFICACIÓN A TRAVÉS DE MAPAS DE CADENA DE VALOR,» Santiago, 2015.
- [9] V. Cisternas, «IMPLEMENTACIÓN DE LEAN AL PROCESO DE PERFORACIÓN & TRONADURA DEL RAJO SUR - DIVISIÓN EL TENIENTE-CODELCO CHILE,» Santiago, 2016.
- [10] E. d. o. industrial, «Lean manufacturing Conceptos, técnicas e implantación,» España, 2018.
- [11] L. Caceres, «APLICACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD A LA FLOTA DE CAMIONES DE ACARREO CATERPILLAR 793F DE UNA COMPAÑÍA MINERA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL,» Perú, 2017.
- [12] D. Cortés, «Evaluación del efecto de mejoras en tronadura y pre-chancado sobre el rendimiento del molino SAG,» Santiago, 2018.
- [13] F. Pacheco, «VOLADURAS DE ALTA INTENSIDAD Y SU INFLUENCIA EN EL CHANCADO Y MOLIENDA DEL PÓRFIDO CUPRÍFEROS DE CERRO VERDE,» Perú, 2013.
- [14] C. Cifuentes, «Mercado de concentrados: Situación mundial y mirada nacional,» Santiago, 2018.
- [15] A. Roman, «ANÁLISIS DE CUELLOS DE BOTELLA PARA INCREMENTAR LA TASA DE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE UNA MINERA,» Perú, 2017.
- [16] K. Gamarra, «ANÁLISIS DE DOS METODOLOGÍAS PARA IDENTIFICAR EL CUELLO DE BOTELLA EN PROCESOS PRODUCTIVOS,» Bucaramanga, 2012.
- [17] C. Cabrera, «VALUE STREAM MAPPING, análisis de cadena de valor».
- [18] M. J. C. J. C. L. J. y. G. R. Wilches, «APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE MANUFACTURA ESBELTA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CADENA DE VALOR DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE SILLAS PARA OFICINA,» 2013.
- [19] C. O. Santos, «metodología de implantación de la gestión lean en plantas industriales,» 2008.
- [20] Cardozo, «IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS LEAN PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFECTIVIDAD GLOBAL DEL EQUIPO DE

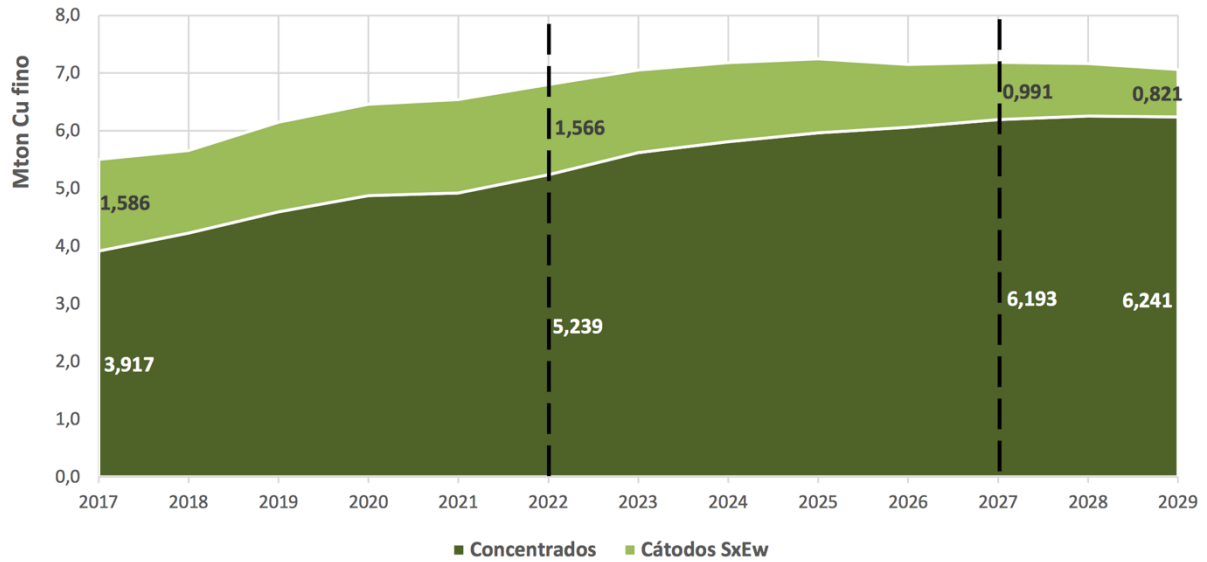
PERFORACION SKS12 REEDRILL DE LA MINA LAGUNAS NORTE, DE LA MINERA MINERA BARICK MISQUICHILCA S.A.» Perú, 2013.

- [21] S. Tejada, «MEJORAS DE LEAN MANUFACTURING EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS,» 2011.
- [22] L. F. A. Javier Freire, «MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE DISEÑO EN PROYECTOS ACHIEVING A LEAN DESIGN PROCESS,» 2001.
- [23] Olivella, «METODOLOGÍA PARA LA IMPLANTACIÓN DEL LEAN MANAGEMENT EN UNA EMPRESA INDUSTRIAL INDEPENDIENTE Y DE TAMAÑO MEDIO».
- [24] M. Consulting, «Estudio de productividad en la gran minería del cobre,» Santiago, 2017.
- [25] G. C. Consulting, «Overall Equipment Effectiveness».
- [26] I. Serrano, «ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE LA TÉCNICA VALUE STREAM MAPPING EN EL REDISEÑO DE SISTEMAS PRODUCTIVOS,» Girona, 2007.
- [27] E. M. V. A. & A. F. R. Thomas McDonald, «Utilising Simulation to Enhance Value Stream Mapping: A Manufacturing Case Application,» 2010.
- [28] N. S. D. G. Dinesh Seth, «Application of value stream mapping (VSM) for minimization of wastes in the processing side of supply chain of cottonseed oil industry in Indian context,» 2007.
- [29] M. Rosienkiewicz, «IDEA OF ADAPTATION VALUE STREAM MAPPING METHOD TO THE CONDITIONS OF THE MINING INDUSTRY,» 2012.
- [30] N. R. Peter Hines, «The seven value stream mapping tools,» 1997.

VIII. ANEXOS

Anexo A:

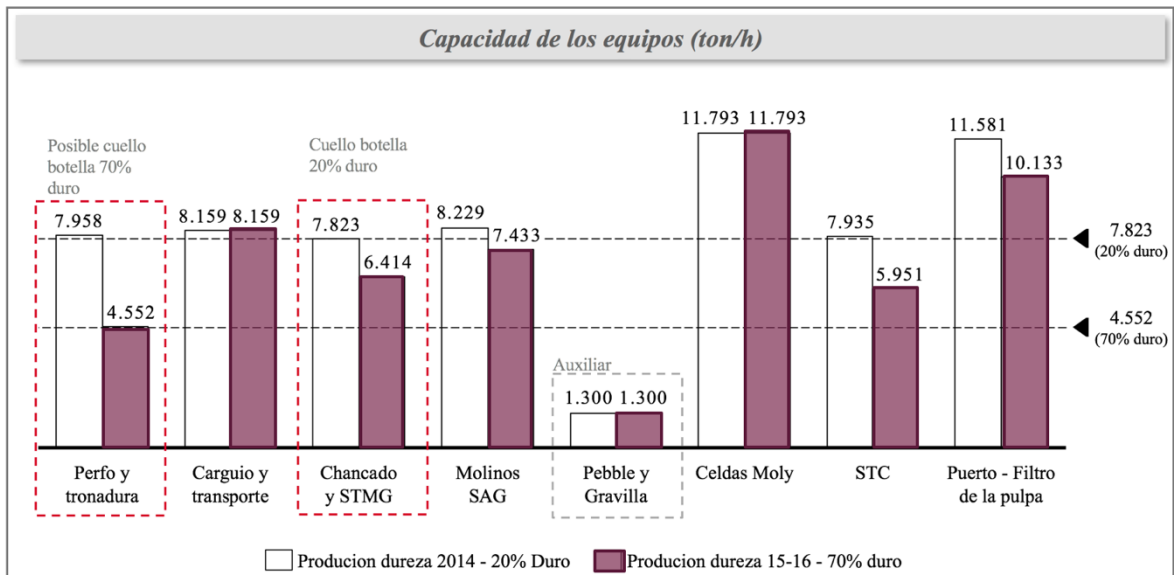
Ilustración 18: Proyección de crecimiento de concentrado de cobre



Fuente: COCHILCO 2018

Anexo B:

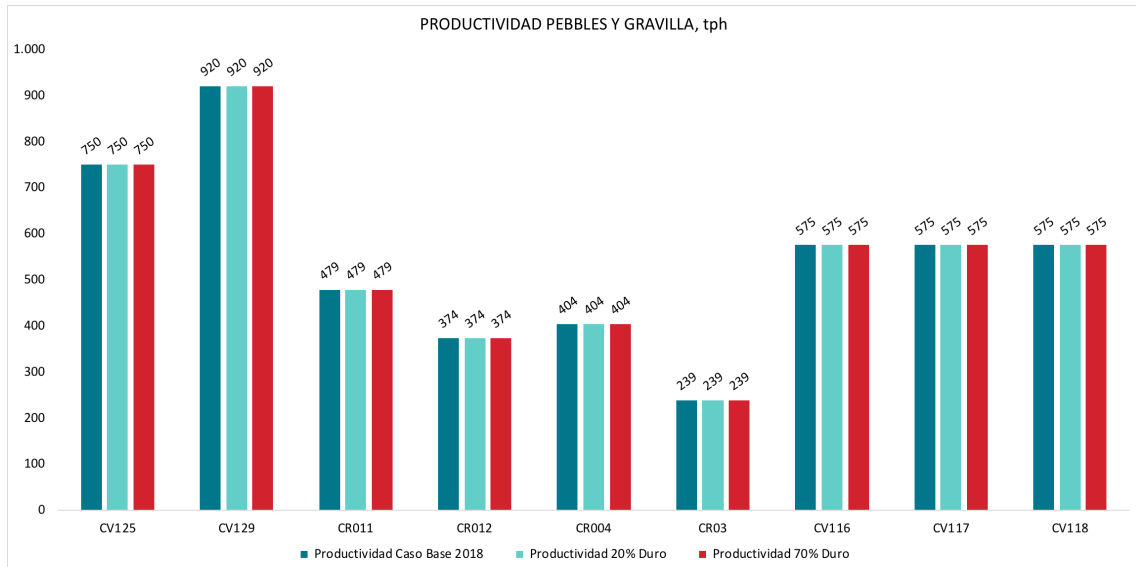
Ilustración 19: Cuellos de botella por dureza de mineral, año 2014



Fuente: Elaboración Minera Los Pelambres

Anexo C:

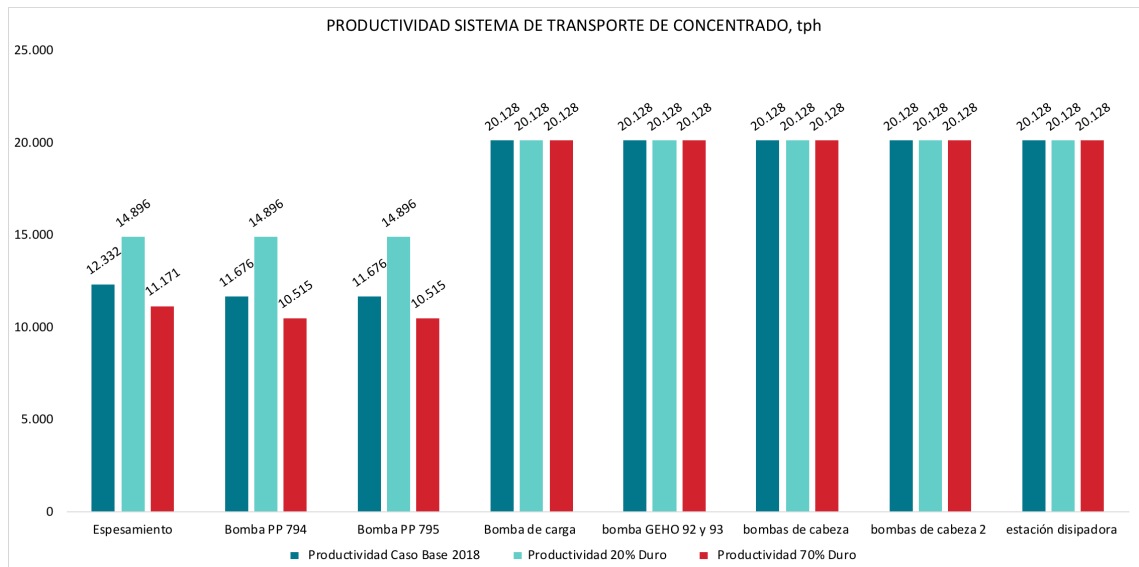
Gráfico 27: Productividades Caso base, 20% y 70% duro, Pebbles y Gravilla



Fuente: Elaboración propia

Anexo D:

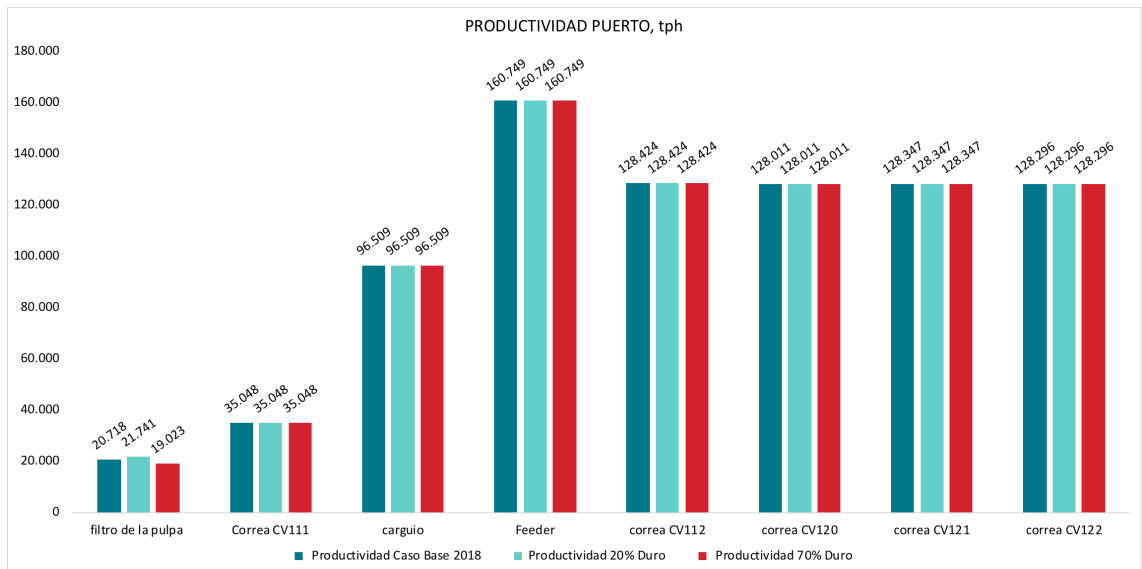
Gráfico 28: Productividades Caso base, 20% y 70% duro, STC



Fuente: Elaboración propia

Anexo E:

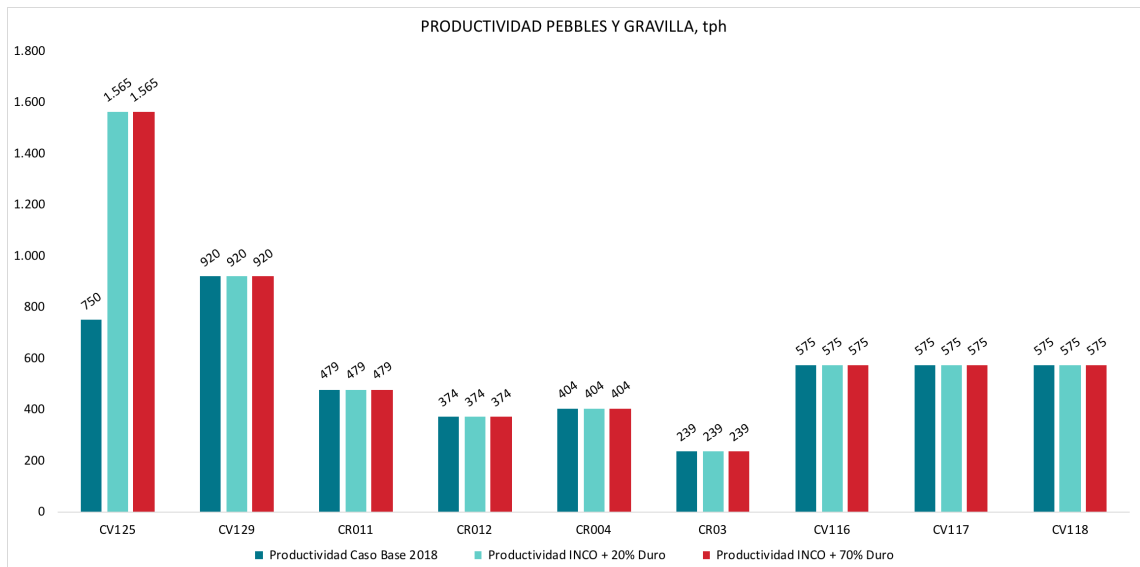
Gráfico 29: Productividades Caso base, 20% y 70% duro, Puerto



Fuente: Elaboración propia

Anexo F:

Gráfico 30 : Productividades Caso base, Proyecto INCO 20% y 70% duro, Pebbles y Gravilla



Fuente: Elaboración propia

Anexo G:

Tabla 18: Ejemplo de Planilla utilizada para los análisis

Área	N° de proceso	Productividad nom. 20% duro	Productividad nom. 55% duro	Productividad nom 70% duro	Pérdida por dureza	Ganancia por blando	Productividad Real 55% duro (Caso Base)	Producción Total	horas reales de producción
Mina	proceso 1	6.500	5.500	5.000	91%	118%	5.661	30.400.000	5.370
Mina	proceso 2	10.500	10.500	10.500	100%	100%	10.357	63.048.907	6.087
Planta	proceso 3	3.100	3.042	2.800	92%	102%	2.324	18.507.163	7.961
Planta	proceso 4	5000	4.890	4500	92%	102%	817	6.416.802	7.856

Fuente: Elaboración propia