



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL EN MINAS**

**“CUANTIFICACIÓN ECONOMICA DE DEMORAS OPERACIONALES EN EL  
PROYECTO MINERO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEO, MACRO  
BLOQUES N1- S1 CODELCO”**

**MATHIAS IGNACIO PALMA ESPINOZA**

**PROFESOR GUÍA: FREDDY ANTONIO ROJAS CORTÉS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL EN MINAS**

**SANTIAGO – CHILE  
DICIEMBRE, 2017**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA INGENIERIA CIVIL EN MINAS**  
**DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD**

Yo, **Mathias Ignacio Palma Espinoza**, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, 18 DICIEMBRE de 2017

---

Firma del alumno

*“Nuestros sentidos nos permiten percibir sólo  
una pequeña porción del mundo exterior”*

*Nikola Tesla.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quisiera agradecer principalmente a mis padres, por darme esta oportunidad de formación profesional, además a mi hermano y abuelos que también formaron parte de este proceso.*

*A mi tío David Contreras y tía Paola Espinoza por acogerme, ayudarme a surgir profesionalmente y a conseguir dicha oportunidad.*

*Agradecimientos especiales a Codelco División El Teniente, en particular a la Superintendencia mina sur, a Don. Mauricio Meléndez, y a la unidad productiva Pipa Norte, por el conocimiento adquirido y formación.*

*A Maptek Sudamerica por brindarme una formación temprana en el rubro minero.*

*A mi profesor guía Don. Freddy Rojas Cortés por darme la facilidad y herramientas para desarrollar esta tesis.*

*Finalmente dar agradecimientos a Elisa García por haberme apoyado a lo largo de esta formación, a Cristóbal Cortés y Felipe Zelada por su amistad incondicional.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>I.1. IMPORTANCIA DE CUANTIFICAR LAS INTERFERENCIAS OPERACIONALES.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2. BREVE DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>I.3. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>15</b>
I.4.1. Objetivos específicos.....	15
<b>I.5. ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DEL TRABAJO.....</b>	<b>16</b>
<b>II. METODOLOGIA Y DESARROLLO.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....</b>	<b>17</b>
<b>II.2. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD BAJO ESTUDIO.....</b>	<b>19</b>
II.2.1. Infraestructuras claves del nivel.....	22
II.2.1.1. Puntos de extracción.....	22
II.2.1.2. Calles de producción.....	23
II.2.2. Simulación.....	24
<b>II.3. DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4. LIMITACIONES Y ALCANCES DEL PROYECTO.....</b>	<b>31</b>
<b>II.5. NORMATIVA Y LEYES ASOCIADAS AL PROYECTO.....</b>	<b>32</b>
<b>III. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES DE MEJORA.....</b>	<b>34</b>
<b>III.1. IDENTIFICACIÓN CUANTITATIVA DE PROBLEMAS.....</b>	<b>34</b>
III.1.1. Distribución de tiempos ASARCO.....	34
III.1.2. Dimensionamiento de flota requerida.....	38
III.1.3. Flujograma para la utilización de equipos LHD.....	40
III.1.4. Arena® Simulation Software.....	41
III.1.5. Uso de combustible.....	42

<b>III.2. OPORTUNIDADES DE MEJORA.....</b>	<b>45</b>
<b>III.2.1. Caso 1 – Proto caso.....</b>	<b>45</b>
<b>III.2.2. Caso 2 – Caso base 1.....</b>	<b>45</b>
<b>III.2.3. Caso 3 – Caso base 1 + Colgaduras.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2.4. Caso 4 – Caso base 1 + Colgaduras + uso de combustible.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2.5. Caso 5 – Caso base 2.....</b>	<b>47</b>
<b>III.2.6. Caso 6 – Caso base 2 + Colgaduras + uso de combustible.....</b>	<b>47</b>
<b>IV. INGENIERIA DEL PROYECTO.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.1. PREPARACIÓN DEL MODELO MEDIANTE NETWORK.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.2. REGLAS DEL SISTEMA.....</b>	<b>52</b>
<b>IV.3. CASO 1 – PROTO CASO.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.3.1. Elaboración del modelo y validación de inputs.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.3.2. Resultados Proto caso.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.4. CASO 2 – CASO BASE 1.....</b>	<b>58</b>
<b>IV.4.1. Resultados Caso Base 1.....</b>	<b>59</b>
<b>IV.5. CASO 3 – CASO BASE 1 + COLGADURA.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.5.1 Validación de inputs.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.5.2 Resultados Caso 3.....</b>	<b>62</b>
<b>IV.6. CASO 4 – CASO BASE 1 + COLGADURA + USO DE COMBUSTIBLE...63</b>	
<b>IV.6.1 Validación de inputs.....</b>	<b>63</b>
<b>IV.6.2 Resultados Caso 4.....</b>	<b>63</b>
<b>IV.7. VALORACIÓN CASO 4.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.8. CASO BASE 2.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.8.1 Validación de inputs.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.8.2 Preparación Caso base 2 y resultados.....</b>	<b>67</b>
<b>V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>71</b>
<b>VI. GLOSARIO .....</b>	<b>76</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

<b>VIII.1. TEORÍA DE COLAS.....</b>	<b>80</b>
<b>VIII.2. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN MEDIANTE NETWORK.....</b>	<b>82</b>
<b>VIII.3. VALOR ACTUAL NETO (VAN).....</b>	<b>90</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Estado de puntos de extracción.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2. Distribución de tiempos PMCHS.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 3. Cálculo del factor operacional para LHD SA.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 4. Inputs de operación LH517.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 5. Valores de uso de combustible LH517.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 6. Cuadro resumen uso de combustible.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 7. Cuadro resumen de consumos por condición del LHD.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 8. Cuadro resumen “LHD Caso 1”.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 9. Cuadro resumen “Interferencias Caso 3”.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 10. Cuadro resumen condición de operación LHD Caso base 2.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 11. Cuadro resumen “Condiciones de operatividad LHD Caso 6”.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 12. Cuadro resumen elaboración Proto caso.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 13. Validación velocidades cargado y descargado.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 14. Cuadro resumen resultados simulación Proto caso.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 15. Cuadro resumen proyección Caso base 1.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 16. Cuadro resumen resultados simulación Caso base 1.....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 17. Resultados Caso 3.....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 18. Cuadro resumen de operación para Caso 4.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 19. Resultados Caso 4.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 20. Parámetros valorización Caso 4.....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 21. Variables de operación Caso base 2.....</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 22. Preparación Caso base 2.....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 23. Preparación Caso base 2, 17 kph cargado – descargado.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 24. Resultados simulación Caso base 2, 17 kph.....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 25. Cuadro resumen simulaciones realizadas.....</b>	<b>74</b>
<b>Tabla 26. NETWORK PMCHS.....</b>	<b>82</b>



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Diferencia entre producción planificada y medida para un cruzado en particular.....	12
Gráfico 2. Histograma para un punto de extracción en condiciones de colgadura y sobretamaño.....	13
Gráfico 3. Comparación de costos directos Codelco/Industria nacional.....	17
Gráfico 4. Caída de la ley de mineral.....	18
Gráfico 5. Producción por división y total de operaciones.....	19
Gráfico 6. Curva de producción para un equipo LH517.....	30
Gráfico 7. Sensibilidad por número de equipos 20 yd <sup>3</sup> .....	39
Gráfico 8. Correlación de consumo y KW LH517.....	43
Gráfico 9. Distribución de ciclos de repostaje en función del llenado del estanque....	44
Gráfico 10. Sensibilidad por número de equipos LHD, Caso 6.....	49
Gráfico 11. Porcentaje de cumplimiento Proto caso.....	57
Gráfico 12. Histograma baldadas simulación Proto caso.....	57
Gráfico 13. Aporte por equipo LHD a calle 4 Norte.....	59
Gráfico 14. Modelo predictivo de simulación.....	60
Gráfico 15. Resultados simulación contra CP.....	61
Gráfico 16. Simulación Caso 3 contra CP.....	62
Gráfico 17. Cuadro resumen de simulaciones velocidades 7 y 11,5 kph vs CP.....	64
Gráfico 18. Área comparativa solo simulaciones velocidad 7 y 11,5 kph.....	64
Gráfico 19. Valorización de CP vs simulación.....	66
Gráfico 20. Porcentaje de cumplimiento Caso base 2 inicial.....	67
Gráfico 21. Cumplimiento velocidades optimas 17 kph.....	69
Gráfico 22. Distribución de baldadas por equipo Caso base 2 final.....	70
Gráfico 23. Pareto demoras diseño actual.....	73
Gráfico 24. Comparación simulaciones vs Carta de producción.....	74

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1. LH517 en proceso de carguío.....</b>	<b>10</b>
<b>Ilustración 2. Perfil de la mina con sus respectivos niveles.....</b>	<b>20</b>
<b>Ilustración 3. Perfil de niveles por Macro Bloque.....</b>	<b>20</b>
<b>Ilustración 4. Vista en planta de los puntos de vaciado.....</b>	<b>21</b>
<b>Ilustración 5. Etapas de PMCHS.....</b>	<b>21</b>
<b>Ilustración 6. Calles de producción y zanjas.....</b>	<b>23</b>
<b>Ilustración 7. Disposición espacial del nivel de producción.....</b>	<b>26</b>
<b>Ilustración 8. Esquema de cierre de calle por acumulación de puntos colgados.....</b>	<b>29</b>
<b>Ilustración 9. Distribución de tiempo ASARCO PMCHS.....</b>	<b>34</b>
<b>Ilustración 10. Flujograma de procesos LHD.....</b>	<b>40</b>
<b>Ilustración 11. Petrolera PMCHS MB 1 SUR – NORTE.....</b>	<b>45</b>
<b>Ilustración 12. Nivel de producción MB 1 SUR – NORTE.....</b>	<b>46</b>
<b>Ilustración 13. Disposición espacial ejemplo network link.....</b>	<b>51</b>
<b>Ilustración 14. Resumen “Network link” Arena.....</b>	<b>51</b>
<b>Ilustración 15. Vista de planta MB 1 SUR – NORTE, Network link.....</b>	<b>52</b>
<b>Ilustración 16. Flujograma inicial LHD 1.....</b>	<b>53</b>
<b>Ilustración 17. Flujograma petrolera LHD 1.....</b>	<b>54</b>
<b>Ilustración 18. Flujograma carguío en zanja LHD 1.....</b>	<b>54</b>
<b>Ilustración 19. Flujograma sector botadero LHD 1.....</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1. Cálculo del factor operacional.....</b>	<b>37</b>
<b>Ecuación 2. Cálculo de disponibilidad física.....</b>	<b>37</b>
<b>Ecuación 3. Utilización de la disponibilidad.....</b>	<b>38</b>
<b>Ecuación 4. Distribución de baldadas Proto caso.....</b>	<b>58</b>
<b>Ecuación 5. VAN.....</b>	<b>90</b>

## **I. INTRODUCCIÓN**

La industria de la minería, es la encargada de la extracción de minerales tanto en la superficie como subterránea. Para lograr dicho objetivo es necesario el desarrollo de operaciones unitarias, siendo principalmente:

- Carguío
- Transporte
- Perforación
- Tronadura

En particular los procesos de carguío consisten en la utilización de equipos electro-mecánicos especializados que cumplen la función de vaciar y llenar de mineral a los equipos de transporte mediante un cucharón o balde, los cuales pueden observarse tanto hidráulicos como de cables, por otro lado, los equipos de transporte, están encargados del movimiento de material hacia un punto de interés, que puede ser un punto de acopio, un punto de vaciado, como un chancador.

En minería subterránea dichos procesos pueden llevarse a cabo de distinta manera según el método de extracción y automatización de sus procesos. Por ejemplo, para un layout de extracción básico de Block Caving, es común encontrar el uso de buitras para el paso de mineral hacia un nivel de reducción (Ahorrándose la operación de carguío), con un sistema de FFCC o camiones de bajo perfil para el transporte de mineral hacia el exterior.

Para una automatización más avanzada, se utilizan equipos que cumplen ambos roles para el nivel de producción, denominados Load-Haul-Dump (LHD), ya sea para Block Caving como para Panel Caving, desplazándose desde un punto de extracción hasta un punto de vaciado.

Los equipos LHD, están afectos a problemas operacionales, en estrecha relación al diseño del nivel de producción. Dichas incidencias se traducen en demoras del sector productivo, que merman en gran cantidad el target de producción, originando pérdidas para la minera.

Según sea el caso (Acorde al diseño del nivel), se pueden presentar demoras por congestión de sector. Determinar en que grado afectan estas demoras, en conjunto de otros factores como lo son las colgaduras, y uso de combustible, son claves para el estudio de proyectos.

Estos equipos, se caracterizan por su bajo perfil, siendo utilizado en secciones acotadas con dimensiones pequeñas, teniendo una capacidad nominal entre 7 y 20 yd<sup>3</sup>.

**Ilustración 1. LH517 en proceso de carguío.**



**Fuente: Sandvik Construction, web site.**

Según la orientación del punto de extracción, es que estos equipos pueden acomodar el sentido de dirección (Pudiendo ser: balde en punta, señalando que, al momento de desplazarse, el balde va en la dirección del movimiento, o bien motor en punta, denominando así que el motor va en el sentido del movimiento) para así tener un fácil ingreso del balde al momento de cargar y descargar.

Las rutas que siguen estos equipos hacia un punto de vaciado, está ajeno a diversos motivos que puedan prolongar el tiempo para llevar a cabo el propósito de descargar, siendo estos “motivos” denominados interferencias operacionales, que como se mencionó anteriormente, es ajeno al funcionamiento electro-mecánico del equipo, pudiendo producirse por: Presencia de cuadrillas de mantenimiento, colgaduras en los puntos de extracción, cuadrillas de PYT, alta sismicidad del sector, espera de botada de material, entre otros.

## **I.1. Importancia de cuantificar las interferencias operacionales**

Las interferencias operacionales representan gran parte del problema actual que sufren turno a turno los operadores de equipos por lograr así, un cumplimiento de extracción asignado mediante una carta de tiraje (CARTIR).

Así mismo, como afecta lo propuesto por la gerencia de planificación mina, también afecta a los indicadores conocidos como KPI de la unidad, siendo un ranking del comportamiento interno al momento de ejecutar la operación.

Estos problemas, se traducen en un tanto por ciento de mineral que, de no cumplir, no podrá ser capitalizable, por ende, un menor flujo de caja.

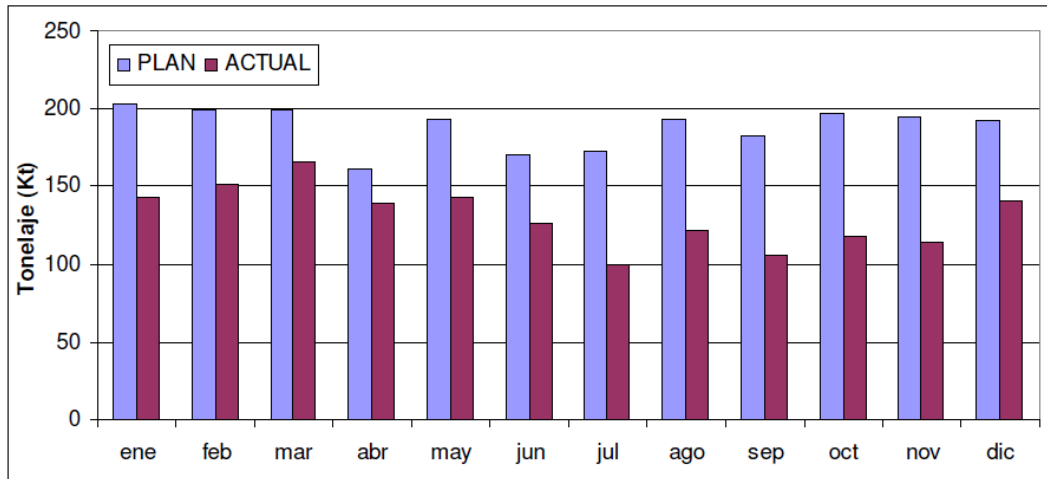
En particular el Proyecto Minero Chuquicamata Subterránea (PMCHS), está en sus labores de preparación, para poder ejecutar el método de extracción, no obstante, dispone un layout de transporte muy particular, poniendo a disposición 4 puntos de vaciado para un total de 8 calles en operación, en donde inicialmente se prevé, un déficit en el cumplimiento de la carta de producción, asociado a la presencia de interferencias operacionales.

Esta cuantificación, dará una aproximación de cómo operan los equipos LHD dada las interferencias, y así comparar en cuanto se asemeja a lo propuesto por la carta de producción y además aportar un símil a los macro bloques contiguos, para que de ser posible aportar mejoras al diseño para poder así, tener un cumplimiento admisible

## I.2. Breve discusión bibliográfica

Según lo descrito de manera preliminar en la memoria de título “Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción”, elaborada por Sebastián Horacio Bórquez de la Universidad de Chile, señala que por lo general la planificación se lleva a cabo sobre supuestos del comportamiento productivo, generando así resultados no reproducibles. Es así como se comentó anteriormente en relación a los puntos de vaciado y cantidad de calles. Además de señalar que la información recopilada de la operación, no es debidamente utilizada, logrando así planes mineros de difícil alcance dada su operación [1].

**Gráfico 1. Diferencia entre producción planificada y medida para un cruzado en particular.**



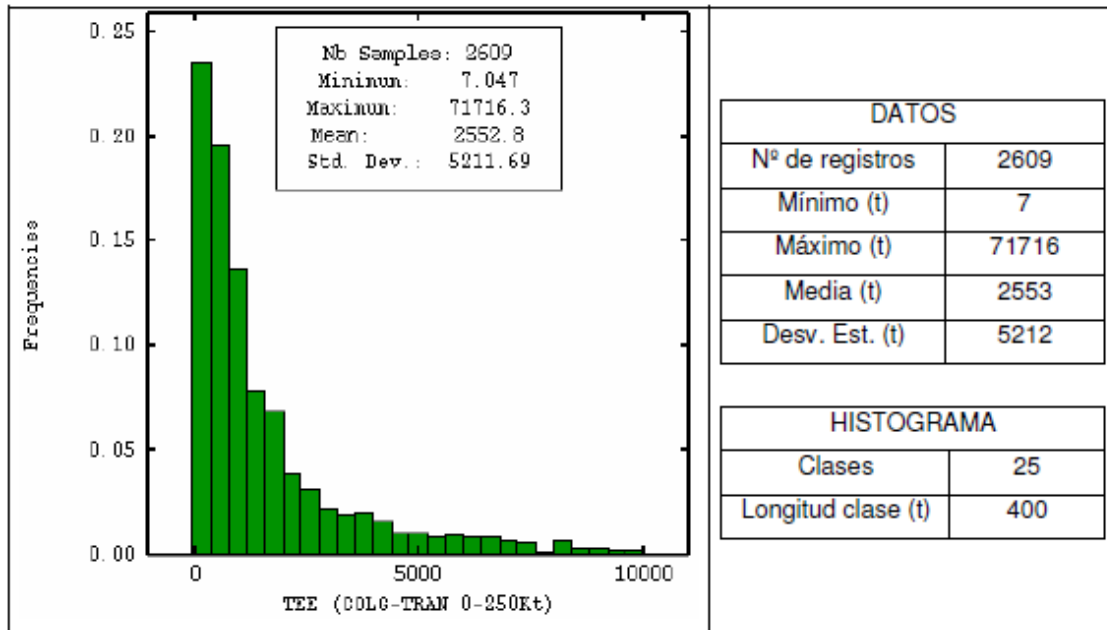
**Fuente: Memoria de título “Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción”, Santiago de Chile, Autor: Sebastián Horacio Bórquez.**

También señala que la productividad de un sistema minero depende de la frecuencia de ocurrencia de estos eventos, tales como: los componentes de infraestructura, número de cuadrillas de reducción secundaria y estrategia de cierre de cruzados para su reparación.

Es por ello que los operadores de los equipos de carguío adoptan malas prácticas que conllevan a tener un mineral más diluido, extracción no planificada haciendo abuso del tiraje de los puntos cercanos, mejorando así la productividad, pero produciendo un efecto contrapuesto, produciendo la pérdida parcial del valor que posee el recurso mineral.

En dicho estudio se caracterizó de manera cuantitativa la frecuencia de estos eventos mediante el análisis de datos, adoptando un tonelaje por cada dos eventos obteniendo lo siguiente:

**Gráfico 2. Histograma para un punto de extracción en condiciones de colgadura y sobretamaño.**



**Fuente: Memoria de título “Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción”, Santiago de Chile, Autor: Sebastián Horacio Bórquez.**

Esto demuestra que tanto los errores de los operadores como los fenómenos geomecánicos intrínsecos de la operación dan una media de 2.553 toneladas por cada 2 interferencias por colgadura y sobretamaño, dando en evidencia lo crítico que es el análisis para cuantificar dichas incidencias.

Este documento de memoria de título concuerda con una publicación realizada en la revista minería chilena el 3 de octubre del 2011, donde algunos consultores de la empresa consultora Aurys S.A., señalan que la manera para superar estas barreras es aplicar nuevas metodologías innovadoras para la gestión operacional de procesos productivos, como es la propuesta de un enfoque en la Gestión Integrada de Operaciones (GIO), en donde se describen inicialmente 3 pilares básicos:

- Sala de Control Integrada de Operaciones (SCIO)
- Programa Integrado de Operaciones (PIO)
- Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones (SATDD)

Ellos postulan que mediante la Sala de Control Integrada de Operaciones se puede tener un monitoreo operativo, realizando un seguimiento en tiempo real de todas las variables y condiciones operacionales relevantes para cumplir las promesas productivas, donde destacan: parámetros de procesos unitarios, el estado y condiciones de operación, y operación remota de equipo. Esto con el fin de tener una mejor coordinación entre procesos, mejorar la continuidad operacional para las distintas unidades productivas y por último destaca el minimizar las interferencias de los procesos unitarios, como lo es la coordinación de equipos mediante la utilización de una sala de comando (Contando con el cambio de calle y asignación de equipos), además de ante una eventual colgadura, coordinar las cuadrillas de manera más eficiente [2].

En resumen y conclusión, ambos autores proponen en común que no solo basta planificar, ni menos bajo datos supuestos de cómo debe ser la operación, sino más bien en base a un registro histórico de condiciones similares acorde al método de extracción. Es por ello que la incorporación de nuevas tecnologías y/o un buen manejo de información ayudarán a que el negocio minero sea sustentable y así no pierda la valorización, dada la incorporación de interferencias.



### **I.3. Contribución del trabajo**

Es interesante poder cuantificar en que medida estas desviaciones de la producción puedan afectar al negocio minero, en particular poder replicar las circunstancias en donde se desarrolla particularmente este trabajo. El Proyecto Minero Chuquicamata Subterránea aun no pone en marcha la operación, por lo tanto, es clave poder anticiparse a resultados de productividad de los macrobloques Norte 1 y Sur 1, para así tener un parámetro de comportamiento de los macrobloques contiguos y así proponer mejoras o cambios al diseño del nivel de producción, con el fin de extraer las reservas en su totalidad y no parcialmente en caso de que no se cumpla la carta de producción estipulada.

### **I.4. Objetivo general**

- Cuantificar el impacto que generan las interferencias operacionales a la planificación del PMCHS, y además valorizar dichas incidencias.

#### **I.4.1. Objetivos específicos**

- Identificar problemas operacionales puntuales que influyen en el cumplimiento del plan de producción.
- Validar el modelo de simulación con parámetros aportados.
- Estudiar la frecuencia de ocurrencia de las interferencias operacionales.
- Analizar el rol que juega el abastecimiento de combustible en el sector.
- Buscar el Hill Value de velocidad para cumplir la carta de producción.

## **I.5. Organización y presentación de este trabajo**

El documento está estructurado de la siguiente manera:

- **Capítulo 2.** Cuyo objetivo es presentar mediante gráficos e ilustraciones el contexto actual de Codelco, además de poder vislumbrar datos claves de PMCHS, definiendo esta última como unidad de estudio, incorporando conceptos claves sobre tipos de modelos de simulación. Por último, este acápite pretende orientar en materia normativa y legislativa el proyecto, considerando los dos grandes pilares en los cuales se enmarcan todos los proyectos mineros a nivel nacional.
- **Capítulo 3.** El propósito de este es poder comprender las incidencias que afectan al sector productivo, describiendo en sí las interferencias operacionales que se considerarán dentro de la simulación, a su vez de presentar los casos a simular, que incluyen dichas demoras.
- **Capítulo 4.** Siendo uno de los principales, en este acápite se podrá apreciar los resultados de la simulación para cada uno de los casos, además de la confección de elementos gráficos, para poder analizar el comportamiento del nivel de producción, tomando en consideración parámetros de operación.
- **Capítulo 5.** En este capítulo se darán a conocer las conclusiones del trabajo, teniendo en consideración que el proyecto minero Chuquicamata subterránea, ha sufrido modificaciones en su diseño del nivel de producción, haciendo énfasis a cómo el actual diseño afecta a la meta de producción.

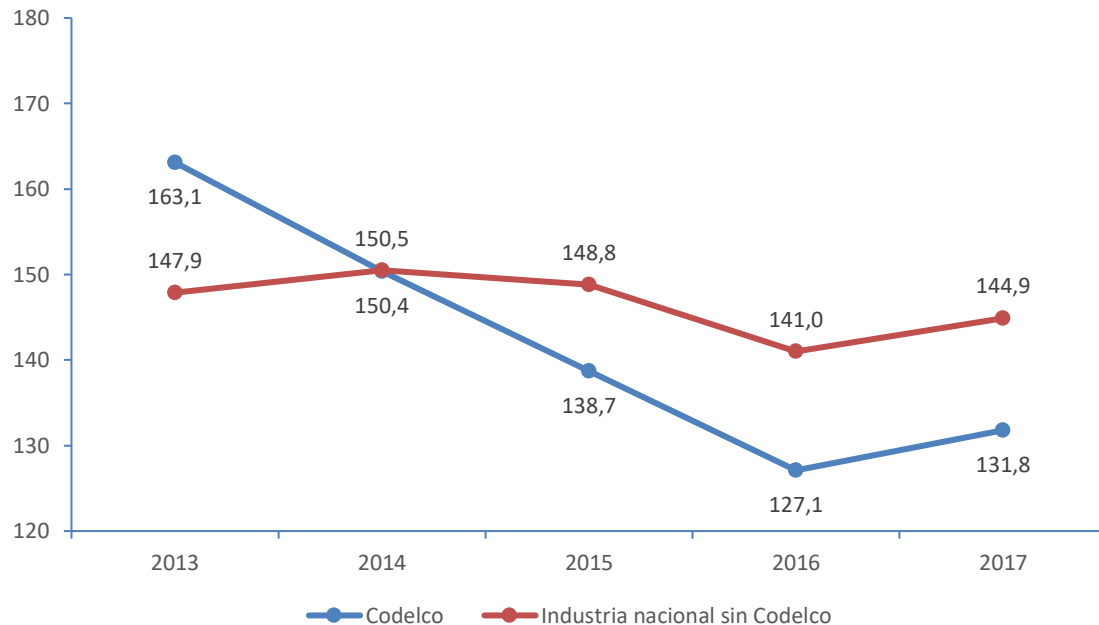
## II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

### II.1 Descripción de la empresa

Codelco es una empresa estatal productora de cobre de alto grado, siendo el sustento económico de la nación. Con un número aproximado de 42 mil empleados en total, dan vida a cada una de las divisiones a lo largo de Chile, con presencia en las regiones de Antofagasta, Atacama, Valparaíso, Región metropolitana y por último la región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Durante el tercer trimestre fiscal del 2017, Codelco presentó un excedente de 1.614 millones de dólares, traducándose en un esfuerzo constante de superar las cifras al mismo periodo del año pasado, en donde cuya cifra fue de una pérdida por 5 millones de dólares. Esta alza se percibe además por parte en la reducción de costos directos, llegando a los 131,8 c/lb, pudiendo ser más competitivo, dado que la industria nacional (Competidores), manejan un costo de 144,9 c/lb [3].

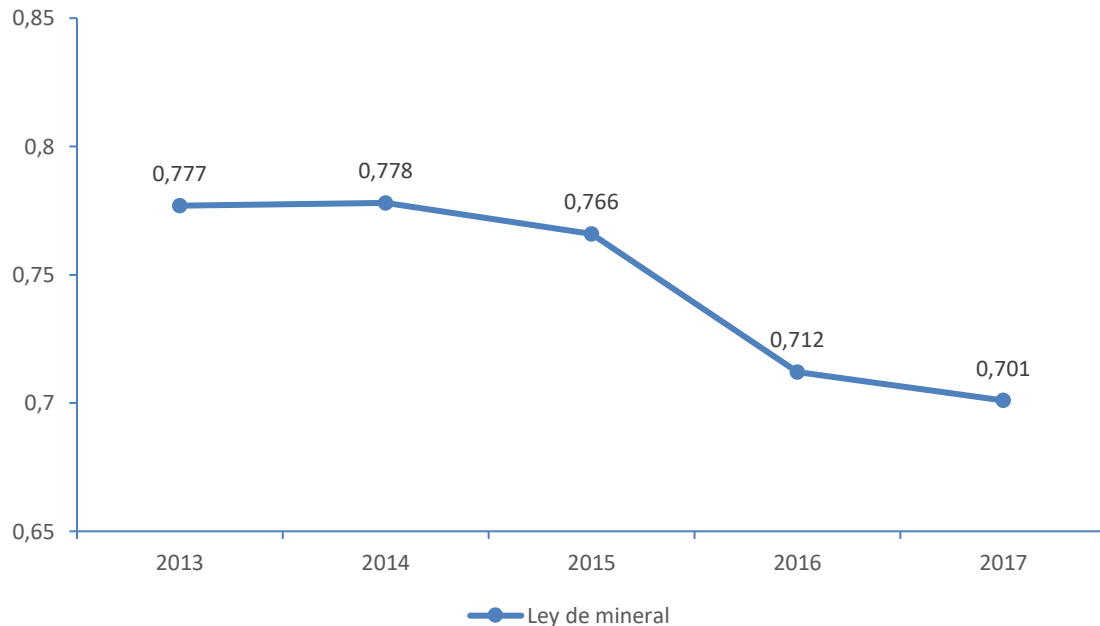
**Gráfico 3. Comparación de costos directos Codelco/Industria nacional (Sin Codelco)**



**Fuente: Wood Mackenzie y Codelco, Entrega de resultados Q3 2017 Codelco Chile.**

Esto en el contexto de la caída de ley de mineral promedio en todas sus divisiones, siendo de un 10%, llegando a tener una ley actual de 0,701. No obstante, se supo manejar dentro de la producción presupuestada para el Q3 2017 de aproximadamente 1.2 millones de toneladas métricas finas de cobre [3].

**Gráfico 4. Caída de la ley de mineral (Todas las divisiones)**

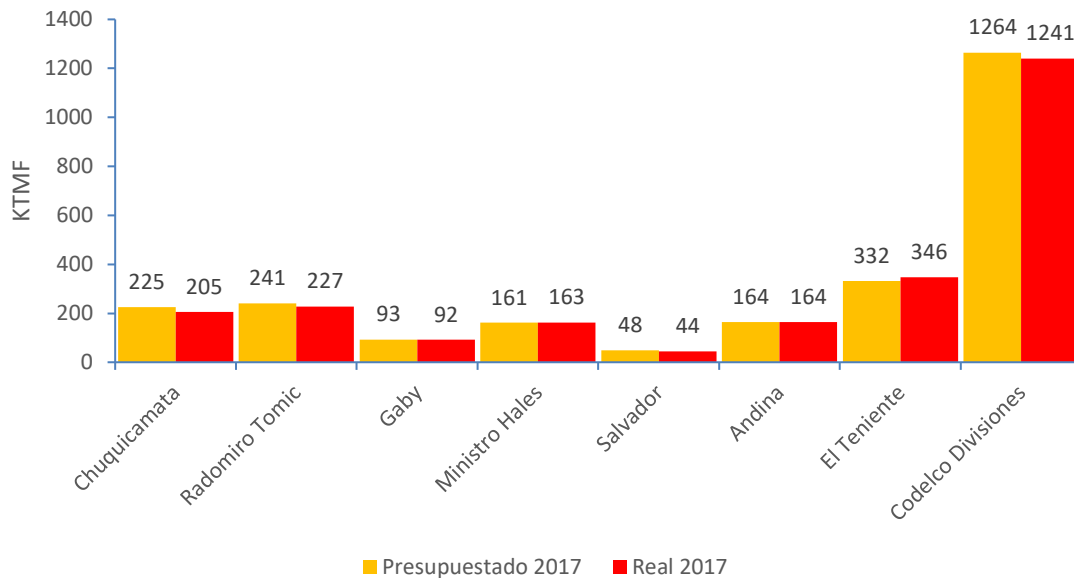


**Fuente: Entrega de resultados Q3 2017 Codelco Chile.**

Este arduo trabajo ha posicionado a Codelco en una alta valoración y reputación en el mercado, siendo reconocido entre las 10 mejores empresas en el ranking MERCOSUR Empresas, en reputación corporativa, además destaca en el segundo lugar en Índice de Sustentabilidad Corporativa (ISC), elaborado por ActionAbility Institute y Revista Capital. Además de tener reconocimiento por transparencia y rendición de cuentas, posicionándose en el primer lugar a nivel de empresas estatales según el Natural Resource Governance Institute, contando también con un 100% de cumplimiento de la Ley de Transparencia, respaldado por el Consejo para la Transparencia. En materia de innovación, es la única empresa estatal entre las 50 empresas más innovadoras, según el Ranking de Percepción de Innovación.

El gráfico 5, muestra la producción en KTMF por cada división, donde se observa que, en su mayoría, no se cumple la planificación (+2% dentro del rango comprometido), esto por razones operacionales, como interferencias anteriormente descritas. Chuquicamata para mantener su ritmo de producción, trabaja actualmente en el desarrollo de PMCHS.

**Gráfico 5. Producción por división y total de operaciones**



**Fuente: Entrega de resultados tercer trimestre 2017, Codelco Chile.**

## II.2 Descripción de la unidad bajo estudio

El Proyecto Minero Chuquicamata Subterránea (PMCHS), quien en adelante se referirá a él como PMCHS, está localizado en la región de Atacama en la localidad de Calama, cuyo fin es continuar las operaciones extractivas, pasando de ser un proyecto inicialmente de extracción en superficie, a una subterránea debido a que dejará de ser rentable en la próxima década, este nuevo proyecto busca extender en 40 años aproximadamente, la vida útil de la mina, mediante el método de hundimiento Block Caving.

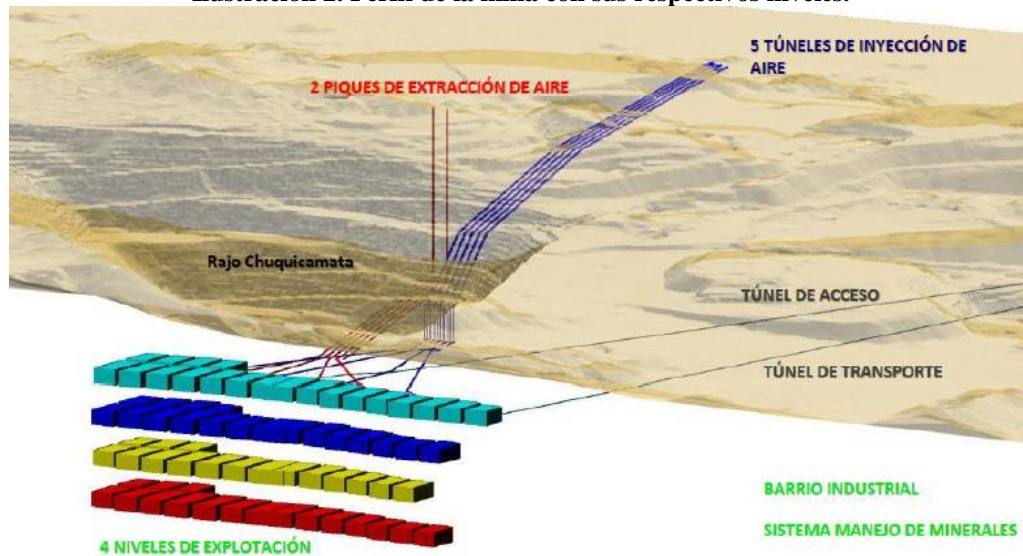
Dicho proyecto contó con una inversión al 2013 de USD\$ 4,2 millones, cuyo desarrollo según la memoria de título denominada “Formulación de un modelo de gestión operacional para la construcción de la futura mina Chuquicamata subterránea”, implica tasas de construcción del orden de 3.000 m/mes, con una alta exigencia en el cumplimiento de plazos, costos, calidad y sustentabilidad definidas [4].

Como se mencionó anteriormente, la explotación se realizará mediante el método de hundimiento Block Caving, cuya configuración de unidades básicas se denominan Macro Bloques (MB), con áreas basales que varían entre 24 mil y 39 mil m<sup>2</sup>[4]. Esta socavación basal de los MB, permite desarrollar un ritmo de extracción de entre 9.200 a 9.600 baldadas mensuales según la carta de producción para los MB SUR 1 y MB NORTE 1.

El proyecto cuenta con 4 niveles de hundimiento, situados a las cotas 1.841, 1.625, 1.409 y 1.193 m.s.n.m. respectivamente, los cuales se irán desarrollando y explotando en forma

secuencial y descendente durante la vida útil de la mina, en donde incluso, podrá verse coexistir la producción de dos niveles simultáneamente, debido al agotamiento de los niveles superiores. Además, los dos niveles superiores utilizarán el tipo de hundimiento convencional, mientras que los inferiores, se precisará de hundimiento avanzado [4].

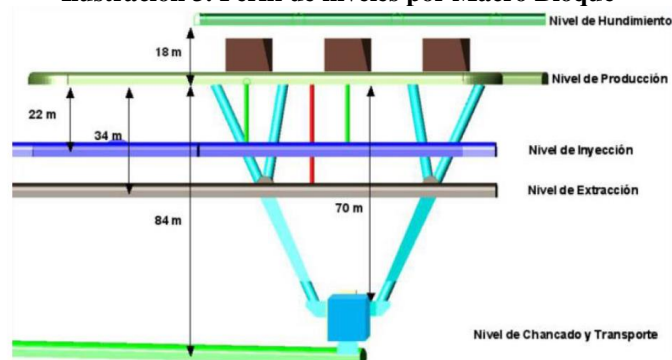
**Ilustración 2. Perfil de la mina con sus respectivos niveles.**



Fuente: Presentación PMCHS, Vicepresidencia de proyectos Codelco Chile.

Cada nivel está compuesto por diferentes subniveles, que cumplen con distintos propósitos, teniendo así un nivel de hundimiento, nivel de producción, subnivel de ventilación (SNV), y nivel de transporte.

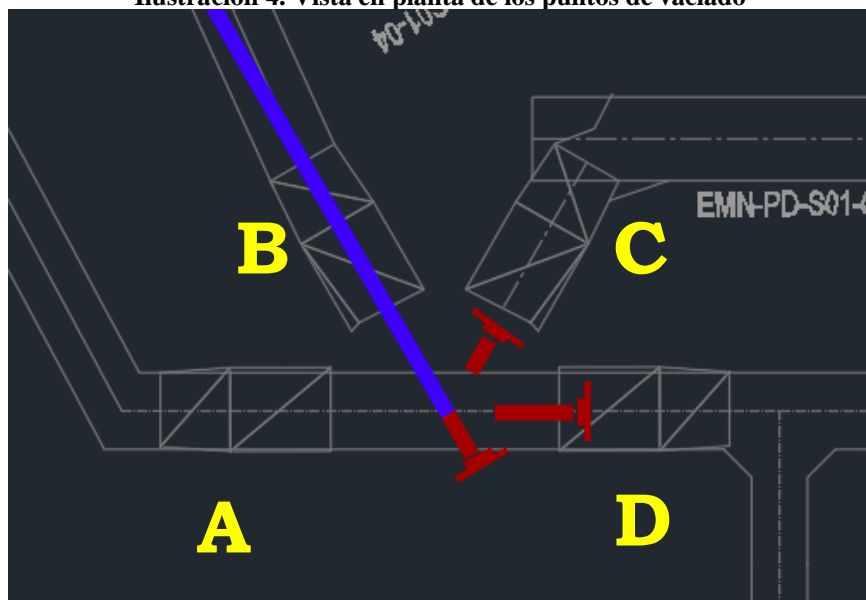
**Ilustración 3. Perfil de niveles por Macro Bloque**



Fuente: Estudio de prefactibilidad PMCHS, vicepresidencia de proyectos Codelco Chile.

Puntualmente, a lo largo de este trabajo se pondrá énfasis en el nivel de producción, donde a través de equipos LHD, se produce la captación del mineral procedente del nivel de hundimiento mediante gravedad. Este material es recepcionado por estructuras denominadas zanjas con una apertura de 5 metros (Distancia entre paredes), ubicadas en calles de producción, para que el equipo pueda hacer un ingreso parcial, dejando principalmente el balde lleno de mineral, para luego transportar y vaciar su contenido en un pique común. Este pique consta de 4 puntos de vaciado para el total de 8 calles de producción.

**Ilustración 4. Vista en planta de los puntos de vaciado**



Fuente: Plano de avances en el nivel de producción Julio 2017, Codelco Chile.

El ramp-up del MB SUR 1, se tiene presupuestado para el mes de Septiembre del 2019 mediante la incorporación de área (Socavación), de 1280 m<sup>2</sup> para la calle 1 SUR, 1024 m<sup>2</sup> para la calle 2 SUR y por último 512 m<sup>2</sup> para la calle 3 SUR. Para la calle 4 SUR el ramp-up da inicio al mes siguiente (Octubre del 2019), incluyendo también la incorporación de área para la calle 1 NORTE, estando ya tanto el MB SUR como el MB NORTE operando aproximadamente por el mes de Febrero del 2019.

**Ilustración 5. Etapas de PMCHS**

I ETAPA	II ETAPA	III ETAPA	IV ETAPA	VI ETAPA		RAMP-UP	
Ingeniería de Diagnóstico	Ingeniería de Perfil	Ingeniería Conceptual o Prefactibilidad	Ingeniería Básica o Factibilidad	Ingeniería de Detalle	Construcción y Montaje	Inicio Socavación	Se alcanza régimen productivo
2001	2003	2007	2009	2014	2015	2019	2025
							2028

Fuente: Presentación PMCHS Expomin, Abril 2010, Santiago de Chile.

## II.2.1 Infraestructuras claves del nivel

### II.2.1.1 Puntos de extracción

Los puntos de extracción son un área dentro del nivel de producción que tienen por finalidad la recepción del material descendiente por gravedad, teniendo diferentes maneras de construcción, siendo la “Zanja” la más utilizada. En estas estructuras se produce la extracción del mineral mediante equipos electro-mecánicos denominados LHD. En este contexto a medida que se realiza la extracción (Tiraje), pueden producirse diversos fenómenos geomecánicos, cambiando el estado productivo de la estructura, pudiéndolos categorizar de la siguiente manera:

**Tabla 1. Estados de puntos de extracción.**

Estado	Código	Definición
Hundido	H	Punto que ha sufrido quiebre de pilar y hundimiento de cerro.
Cortado Agotado	A	Punto en que se termina definitivamente la extracción por agotamiento de las reservas. La extracción del punto es igual o mayor que el 100% y presenta ley inferior a la ley de cierre.
Cortado Abandonado	I	Punto en que se termina definitivamente la extracción por razones de impurezas, condiciones de riesgo y otros, independientemente del porcentaje de extracción.
Agua Barro	B	Punto que, debido a la existencia de agua-barro, presenta riesgo de bombeo.
Futuro	F	Punto en que no se ha realizado la tronadura de la zanja.
Vacío	V	Puntos en los cuales sólo se ha efectuado la tronadura de la zanja y no el polvorazo correspondiente al área del punto.
Extracción Telecomandada	N	Punto que, debido a la penetración del agua, presenta riesgo a las personas, por lo cual se extracción debe ser realizada por un equipo telecomandado.
Operativo	O	Punto en condiciones aptas para producir.
Limitado	L	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un periodo determinado de tiempo.
Reabierto	S	Punto que pasa de un estado cortado a disponible para producir.
Cerrado	C	Punto en que se detiene temporalmente la extracción por baja ley de Cu e impurezas.
Reparación	R	Punto fuera de producción por arreglo de su estructura.
Colgado	T	Punto en que el flujo de mineral es interrumpido por un arco natural de soporte por más de 9 turnos,



		ya sea por planchones, colpas de gran tamaño o humedad.
Barrera	M	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral o barro de puntos adyacentes.
Razón Operacional	W	Punto fuera de producción por trabajos especiales y temporales, tales como: sondaje en cruzado de acceso o vías de tráfico, desarrollo de labores cercanas, tránsito temporal de suministros.

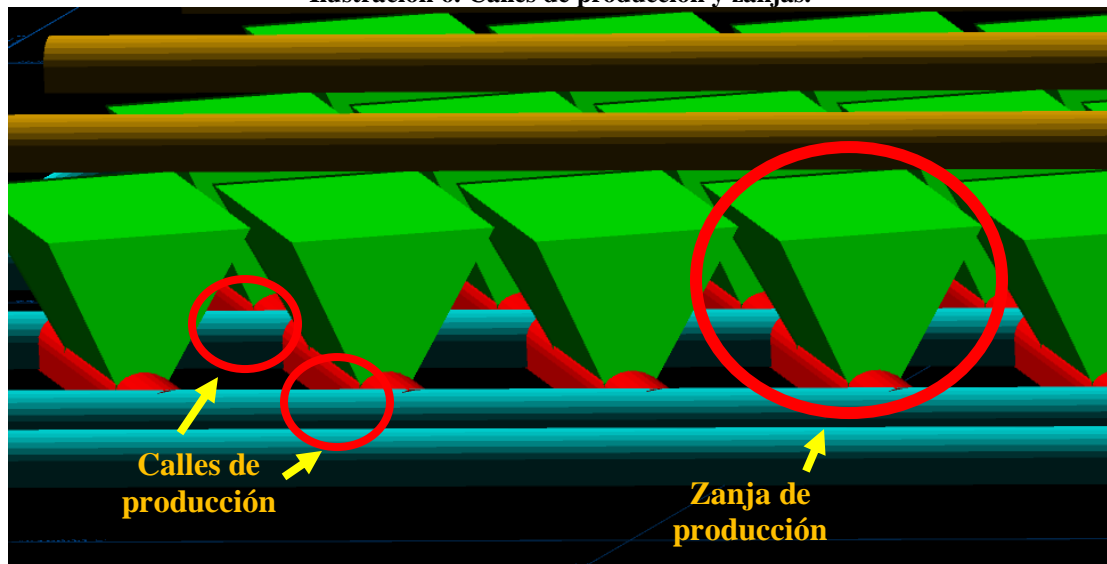
Fuente: Estados operacionales en puntos de extracción, Codelco División El Teniente, Chile.

El ancho de estos puntos de extracción para el proyecto es de 5,03 metros tomados de caja lateral derecha a izquierda, posibilitando el ingreso del balde de 20 yd<sup>3</sup>.

### II.2.1.2 Calles de producción

Las calles de producción, son parte de la infraestructura principal del nivel, y es por donde los equipos LHD realizan el ciclo de transporte. Es por ello que siempre deben mantenerse en buen estado, poniendo énfasis en la limpieza del sector, para así prolongar la vida útil de los neumáticos e integridad de los equipos LHD. En particular, entre los MB 1 SUR y NORTE, hace un total de 8 calles con un promedio de 34 puntos de extracción por calle, espaciados cada 16 metros uno del otro conformando una malla de 16x16. Esta infraestructura está diseñada para el correcto movimiento de equipos de 20 yd<sup>3</sup>, con un ancho de calle de 4,80 metros de longitud.

Ilustración 6. Calles de producción y zanjas.



Fuente: Elaboración propia.

## II.2.2 Simulación

La simulación es una herramienta de análisis que busca imitar un comportamiento, pudiendo ayudar a la disminución de los riesgos y optimizar la toma de decisiones empresariales, evaluación de inversiones en tecnología, personal e instalaciones, como así la planificación, análisis y mejorar procesos de la empresa a estudiar [5].

Como se describe en el documento “Guía de simulación de procesos industriales catem”, elaborado en colaboración con la Unión Europea, la simulación presenta importantes posibilidades en su aplicación a instalaciones y procesos industriales, logísticos, de transporte o de servicios.

Para el desarrollo de este proyecto será clave la utilización de un modelo de simulación, ya que dicha construcción representará el funcionamiento de los procesos existentes o propuestos en materia de extracción, transporte y vaciado mediante equipos LHD para PMCHS, concretamente para los MB SUR y MB NORTE. Los modelos de simulación tienen el beneficio de poder replicar un escenario, pudiendo realizarse pruebas y análisis de los resultados sin interferir en la actividad diaria del área de estudio.

Los modelos de simulación permiten profundizar en las variables que afectan más significativamente al funcionamiento de la empresa, analizar sus interferencias y evaluar su impacto global, constituyendo una ayuda inestimable para optimizar los procesos [5].

Por otra parte, la optimización es la búsqueda de la mejor forma de hacer las cosas considerando las restricciones funcionales, técnicas y económicas de los procesos a estudiar. La optimización de los procesos productivos permite a una empresa seguir siendo competitiva, entrando en un círculo en materia de mejora continua, pudiendo incorporar tecnología vanguardista, para así tener resultados óptimos.

Es importante tener en cuenta el comportamiento del sistema en el espacio temporal en el momento de la realización del estudio del sistema. Por lo tanto, podemos decir que el diseño de un modelo de simulación depende de clasificación del sistema en uno de estos dos tipos [5]:

- **Modelo discreto**
- **Modelo continuo**

Un modelo discreto es aquel en el cual las variables de estado, pueden cambiar de valor sólo un número finito de veces por unidad de tiempo, en otras palabras, solo cambiar en ciertos puntos del tiempo. Así mismo un sistema de eventos discretos se caracteriza porque las propiedades de interés del sistema, cambian únicamente en un cierto instante o

secuencia de interés y permanecen constantes el resto del tiempo, pudiéndose sub dividir en sistemas de terminación y no terminación [5].

Por otro lado, un modelo continuo es aquel cuyas variables de estado pueden cambiar continuamente con el tiempo. Es por ello que un sistema de eventos continuos es un sistema cuyo estado cambia continuamente y a cada instante en el transcurso del tiempo, por lo tanto, las variables de estado del sistema evolucionan en modo continuo a lo largo del tiempo [5].

Los beneficios para las empresas que utilizan modelos de simulación son:

- Optimización de colas en actividades.
- Corrección oportuna de procesos, pudiendo reducir los costes de desarrollo, ya que a medida que aumente la madurez del proyecto, se invierte mayor cantidad de capital en ingeniería, pudiéndose ahorrar gran parte de lo invertido.
- La calidad y fiabilidad de los modelos de simulación permiten desarrollar diversos escenarios, siendo fiel a las condiciones de operatividad del sector productivo.
- Evitar inversiones innecesarias.
- Evitar la reutilización de capital humano de manera innecesaria.
- Incremento en la productividad, pudiendo reducir los tiempos de operación.
- Información de calidad para la toma de decisiones.
- Beneficios intangibles, como la comprensión de procesos a nivel transversal, desde gerencia hasta los operadores.
- Permite definir incidencias de forma clara y concisa.
- Logra cuantificar variables de incertidumbre dentro de un sistema.

Los modelos de simulación deben crearse solamente con las variables que se quieran estudiar, ya que el exceso de detalles perjudicará al tiempo de ejecución computacional, pudiéndose estudiar más adelante el desarrollo de este trabajo.

Toda simulación posee un flowsheet de procesos, los cuales siguen ciertas reglas de prioridad, clasificaciones y lógicas, haciendo que el modelo sea fiel a las características operacionales a estudiar.



Para la calle 1 y 2 del MB SUR, se observa que ambas comparten un punto en común (Circunferencias de color rojo), el cual denominaremos “Intersección entre calles”, replicable a su vez para la calle 3 y 4 para el MB NORTE. el criterio a seguir para dar prioridad de acceso a los puntos de vaciados para el MB SUR 1, como el MB NORTE 1.

Es por ello que, a modo de ejemplo, si el LHD que trabaja la calle 1 SUR entra al punto de vaciado “A” (Ilustración 3), necesariamente el equipo que trabaja la calle 2 SUR debe detenerse si o si en la región circular anteriormente definida en la ilustración 5 mediante el color rojo, para así no colisionar con el LHD que está actualmente descargando mineral.

Una vez que el equipo que está vaciando su balde en el punto de vaciado “A”, haga retiro de la vía, volviendo a cumplir su función de carguío, el equipo que estaba previamente en espera en la calle 2 SUR, podrá hacer ingreso al sector a descargar, y así sucesivamente.

El resto de calles de producción, están sujetas al mismo fenómeno, ya que, para el punto de vaciado B, descargan las calles 3 y 4 del MB SUR, y para el punto de vaciado “C” descargan los equipos en producción de las calles 1 y 2 del MB NORTE.

Diferenciándose uno del otro entre los primeros antes mencionados, en la utilización de recursos, como lo pueden ser las cabeceras.

El nivel cuenta con un tramo denominado “Cabecera”, que es simplemente un tramo de uso peatonal y de equipos (Según corresponda), cuya función es conectar todas las calles del sector productivo transversalmente, pudiéndose apreciar en la ilustración 5 con orientación horizontal con una longitud entre calles de 32 metros. La anteriormente descrita, está denominada como “Cabecera Oeste”, existiendo además una “Cabecera Este”, que según el diseño del nivel de producción puede ser perpendicular a la primera, o bien tener una leve desviación, siendo la última la presente en el diseño del MB 1 SUR y MB 1 NORTE.

Es por ello que según sea el caso, los equipos deben enfrentar la utilización de tramos del layout en nivel de producción, pudiendo identificar los siguientes:

- Cabecera (Oeste).
- Intersección entre calles.

Por otro lado, las demoras por ingreso de cuadrillas por motivos de colgaduras y sobretamaño en las zanjas, es otro factor a estudiar. Ya que la propagación del fracturamiento en los métodos de hundimiento tradicionales tanto Block Caving como Panel Caving, produce un material que es capaz de obstruir la estructura que recepciona el mineral, denominada zanja, tanto en su “Corona” como en la base o piso de la misma.

Como se muestra en el gráfico 3, se toma una media de 2.553 toneladas por cada 2 eventos, dejando 1.277 toneladas por cada uno. Si bien estrictamente una colgadura y un sobretamaño se diferencian entre sí, para efectos del desarrollo del trabajo ambas se tomarán como si fuese una misma incidencia, ya que la colgadura puede producirse por material fino, como grueso (Sobretamaño).

Este fenómeno paraliza la producción en el punto de extracción afectado por este mismo, imposibilitando la extracción de este, hasta que acuda una cuadrilla de PYT para barrenar y tronar en caso de ser solo un sobretamaño, o bien solo tronar en caso de ser una colgadura, donde el material esté enyampado.

Esta labor además impide el acceso de los equipos de extracción LHD al sector productivo, por seguridad del trabajador que opera el equipo, como resguardar la integridad mecánica del mismo.

El buen funcionamiento y condición de “Operativo” para el equipo, es necesario para tener una producción continua y sólida. Es por ello que es común posicionar estos equipos a una distancia de más de 6 zanjas de distancia de la zona a tronar, y de ser posible resguardado en las cabeceras, pudiendo evitar daños por la onda expansiva de la explosión, pudiendo dañar la presurización de la cabina, ocasionando eventualmente un aumento en los riesgos asociados al operar el equipo en esas condiciones. Además, como política ante estos eventos en donde el equipo salga dañado, será necesario el traslado del equipo (Pudiendo ser hasta remolcado) hacia los talleres de mantenimiento, retirándolo de producción.

Una vez solucionada la incidencia, resuelta por una cuadrilla de PYT, se pueden reanudar las actividades de extracción en el sector.

**Ilustración 8. Esquema de cierre de calle por acumulación de puntos colgados.**



**Fuente: Elaboración propia mediante captura fotográfica en Codelco División El Teniente, Chile.**

El uso de combustible es otro factor a analizar, dada la autonomía de los equipos de producción, en donde a modo de referencia un equipo LHD LH514, cuyas características se asimilan a las demandadas por la carta de producción en cuanto a capacidad de balde, se observa mediante catalogo una estimación de fabricante de uso promedio de combustible de 35 litros/hora con el balde cargado a un 50%, con una capacidad de estanque de 485 litros.

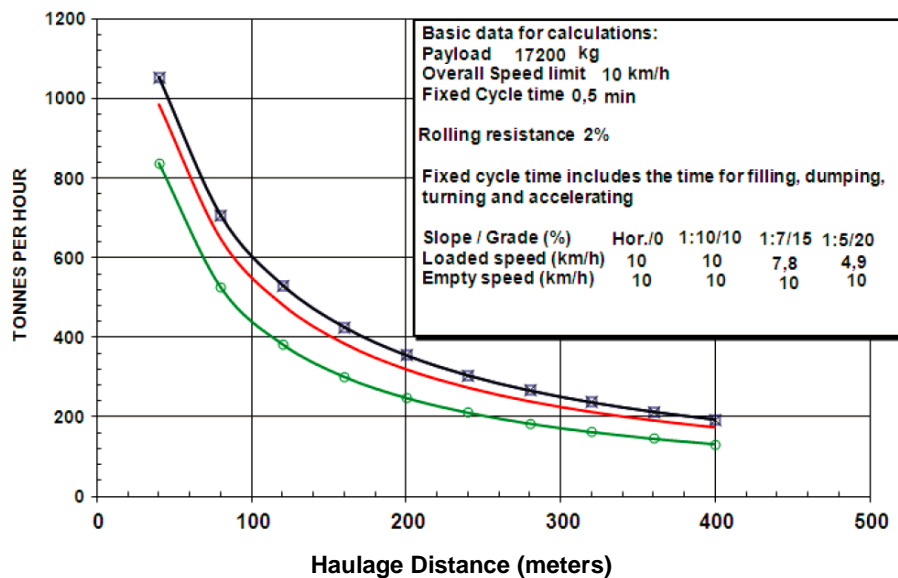
Realizando una regla de tres simple, podemos ver que bajo esas condiciones, el equipo está en condiciones de trabajar un aproximado de 13,85 horas, sin embargo dicho calculo no tiene en consideración las pérdidas de combustible producidas por las esperas de vaciado de material en los puntos A, B, C y D, en donde apagar y encender el equipo puede representar aún más pérdidas, dado que se debe esperar una cierta cantidad de tiempo para que el turbo del equipo esté totalmente apagado, dejando el equipo en un estado de energía cero. Además, bajo condiciones operativas, los equipos deben ir a cargar combustible a la petrolera, una vez su estanque se encuentre a no menos de un 50% de su capacidad, dejando una autonomía de aproximadamente 7 horas, tiempo que no alcanza a cubrir por completo el turno de 12 horas nominales<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> . Solo se menciona a modo de referencia, sin incluir indicadores que aporten las horas de operación.

Es por ello que, además surge la complejidad de ir a cargar combustible, produciendo una congestión extra en la cabecera del sector productivo, para que así uno de los siete equipos disponibles pueda tomar ruta hacia la petrolera. Cabe tener en consideración que en este sistema coexisten siete equipos que, en algún momento de su operación, cada uno deberá ir a repostar combustible. El criterio adoptado para realizar las maniobras para ir a cargar el estanque, es de espera hasta que el equipo que utiliza el recurso de petrolera, haga desuso del mismo, poniéndose así en marcha el equipo que espera utilizar el recurso.

Algunas consideraciones adicionales, son las distancias de acarreo, las cuales en algunos casos bordea la increíble longitud de aproximadamente 460 metros por ciclo, desde el punto más retirado hacia el punto de vaciado.

**Gráfico 6. Curva de producción para un equipo LH517**  
**PRODUCTIVITY CURVE**



**Fuente: Catálogo Sandvik LH517.**

En el gráfico 6, se puede apreciar el decaimiento de la producción en toneladas por hora, a medida que la distancia de acarreo aumenta, tomando en consideración el tiempo de ciclo del equipo, en otras palabras, llenado, vaciado y retorno.

Colocando en contexto el gráfico 6, el promedio en distancias de ambos MB, es de 279 metros, por lo tanto, el valor esperado de producción, según el ábaco aportado por el fabricante debería andar por aproximadamente las 180 toneladas por hora, siendo una de las cifras que se utilizará para validar la simulación a realizar.



## **II.4 Limitaciones y alcances del proyecto**

Este proyecto de título, se desarrolla en un contexto de validación por sobre la planificación que debe llevar PMCHS en función de parámetros de producción, en particular los MB SUR-NORTE, en el cual mediante el software Arena Simulation se podrá simular las interferencias relacionadas con el comportamiento de los equipos. Por lo tanto, algún proceso o recurso aguas abajo, ya sea procesos que involucra el uso del chancador híbrido, como a su vez la inclusión a la simulación de horas de mantenimiento programado, estudio del comportamiento geomecánico del sector, utilización de herramientas de planificación de corto plazo como lo es el CARTIR, quedan fuera del alcance del estudio, tomando como base una planificación mensual aportada por la carta de tiraje oficial de Codelco para PMCHS.

La elaboración minuciosa de procesos tales como el cambio de sentido no serán representados visualmente sobre el plano oficial del proyecto, sino más bien como la adición en tiempo de dicho movimiento como un proceso que retarda aún más los ciclos de carguío según corresponda el sentido de ingreso de los equipos LHD, también se adoptará una metodología similar para abordar los tiempos de cuadrilla, concretamente cuantificar el tiempo para la labor y descontarlo a las horas simuladas.

Para la simulación se tomará uno de los meses con mayor producción, en particular el mes de Febrero de 2023, ya que posee todos los puntos operando a su régimen de extracción, pudiendo establecer mediante la simulación, una cantidad de baldadas máximas de extracción para dicho mes, y así crear una curva que represente el tonelaje corregido para el peak de producción en función de la cantidad de equipos disponibles, para así determinar una brecha de pérdida entre lo planificado y lo simulado, pudiendo valorizar dicho delta.

## II.5 Normativa y leyes asociadas al proyecto

En materia de diseño de minas, todo proyecto minero nacional se apega a lo estipulado en el Decreto N°132 correspondiente a la seguridad minera, en conjunto del Código de Minería.

El Decreto N°132 establece el marco regulatorio general al que deben someterse todas las faenas de la industria extractiva minera nacional, para así proteger la vida e integridad física de las personas que desempeñan una función en dicha industria, además de proteger las instalaciones e infraestructura que hacen posible las operaciones mineras, con el fin de asegurar la continuidad de los procesos, regulando también los servicios de apoyo como es el transporte, destacándose los siguientes artículos para el desarrollo de PMCHS y además para definir de manera correcta las reglas del modelo en Arena:

- Artículo 5. Que designa a todas las actividades correspondientes a la industria extractiva minera:
  - A) Exploración y prospección de yacimientos y labores relacionadas con el desarrollo de proyectos mineros.
  - B) Construcción de proyectos mineros.
  - C) Explotación, extracción y transporte de minerales, estériles, productos y subproductos dentro del área industrial minera.
  - D) Procesos de transformación pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas y refinación de sustancias minerales y de sus productos.
  - E) Disposición de estériles, desechos y residuos. Construcción y operación de obras civiles destinadas a estos fines.
  - F) Actividades de embarque en tierra de sustancias minerales y/o sus productos.
  - G) Exploración, prospección y explotación de depósitos naturales de sustancias fósiles e hidrocarburos líquidos o gaseosos y fertilizantes.

Además, señala que la industria extractiva minera incluye, además, la apertura y desarrollo de túneles, excavaciones, construcciones, y obras civiles que se realizan por y para dicha industria y que tengan estrecha relación con las actividades indicadas en el inciso anterior.

- Artículo 22. Quien aclara que, al previo inicio de operaciones, la empresa minera presentará el método de explotación al Servicio, incluso cualquier modificación mayor, entendiéndose como modificación a los ritmos de explotación, de tecnología y diseño del método de explotación, ventilación, fortificación o tratamiento de minerales y así mismo como nuevos lugares de ubicación, ampliación o forma de depositación de residuos mineros, por alteraciones en el tipo de roca, leyes o calidad de los minerales. Además, debe presentarse un plan de cierre de faenas mineras, en donde solo se podrá operar después de la conformidad del Servicio, dentro de su pronunciación que tiene un plazo de 60 días a contar de la fecha de la presentación del documento.
- Artículo 30. Dice que todos los equipos, maquinarias, materiales, instalaciones e insumos, deberán tener sus especificaciones técnicas y de funcionamiento en español.
- Artículo 31. Conforme a lo descrito al inicio, especifica que la empresa minera debe adoptar medidas necesarias para asegurar la vida e integridad de los trabajadores, tanto propios como de terceros, a su vez en los equipos, maquinarias e instalaciones, siendo estas dadas a conocer al personal por medios de difusión que garanticen su comprensión.
- Artículo 357. Aborta en materia de conducción y tránsito, las normas a seguir, poniendo a disposición la Ley del Tránsito.

Por otro lado, el Código de Minería, contiene normas sobre el dominio del estado, a su vez de la capacidad de adquirir derechos mineros, objetos y forma de la concesión minera, procedimientos de constitución de las mismas, exploración y explotación minera, entre otros.

### III. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES DE MEJORA

#### III.1 Identificación cuantitativa de problemas

##### III.1.1 Distribución de tiempos ASARCO

En minería es habitual el control y evaluación de indicadores operacionales para equipos que sean relevantes para el desarrollo productivo. Es por eso que se realiza una distribución y desglose de tiempos para analizar estos indicadores KPI (Key Performance Indicator), para así poder registrar las operaciones y los sistemas de monitoreo tales como el sistema Dispatch®. Esta distribución de tiempo es personalizada para cada faena minera, pudiendo considerar variaciones en cada sub-ítem de sí misma dada las características propias en el manejo del tiempo.

Ilustración 9. Distribución de tiempo ASARCO PMCHS

Horas totales		
Horas disponibles		Mantenimiento
Horas operativas	Equipo en Standby (Reservas+Interferencias)	
Horas efectivas	Demoras (Factor Operacional)	

Fuente: Tesis “Asignación dinámica de operadores de LHD para operación a distancia en minería subterránea”; Vicepresidencia de proyectos, Codelco Chile, Autor: Francisco Carrasco Jerez.

- **Horas totales:**  
Consta de todas las horas de un periodo, pudiendo ser diario, mensual o anual, donde el equipo se encuentra físicamente en la faena.
- **Horas disponibles:**  
Periodo de tiempo en el cual, el equipo está en condiciones para cumplir con su funcionamiento electro-mecánico.

- **Horas mantención:**  
Lapso de tiempo en donde el equipo o instalación no puede ser operable, no cumpliendo su función de diseño dado un defecto o una falla electro-mecánica.
- **Horas operativas:**  
Es el tiempo en donde el equipo está siendo operado, cumpliendo su función de diseño a cargo de un operador.
- **Horas de reserva:**  
Tiempo donde el equipo no es utilizado para producir (Función de diseño), debido a la falta del operador, programa diario, charlas de seguridad. Para el caso de PMCHS, dentro de las horas de reserva se encuentran ítems como la colación, cambio de turno, interferencias producidas al inicio de turno, como lo pueden ser, el muestreo de puntos de extracción, inspección de puntos de extracción, tronaduras, mapeo geomecánico, además de contar con las mantenciones no programadas.
- **Horas efectivas:**  
Periodo de tiempo en donde el equipo está siendo utilizado de lleno, pudiendo cumplir su función de diseño sin colas que interfieran a su producción.
- **Horas de demora (Factor operacional; F.O):**  
Las demoras, canónicamente se operan de 3 maneras distintas, sin embargo, para PMCHS esta distribución va orientada netamente a procesos como traslados manuales del equipo a talleres, traslado del equipo a estaciones de diésel (Petrolera), cambio entre calles de producción (MB), tiempos de espera, actividades de limpieza de calle, inspección de pique, además de los imprevistos operacionales como lo pueden ser estado de puntos de extracción, colgado, sobretamaño, además estado de pique lleno. Estos procesos, se realizan con el motor encendido, incluso cuando recursos como tiempos de espera, estén siendo utilizados por equipos ajenos.

Para la asignación de los tiempos a trabajar se considerará el siguiente desglose de tiempos para un equipo LHD.

**Tabla 2. Distribución de tiempos PMCHS**

<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Días calendario	días	360
Detenciones programadas (1)	días	12
<b>Total</b>	<b>Días</b>	<b>348</b>
Turnos/día		2,00
Horas/turno	hr	12
Horas/semana	hr	168
Días/semana	días	7,00
Semanas/año	semanas	52
<b>Horas nominales/año</b>	<b>hr</b>	<b>8.352</b>
<b>Horas disponibles/año</b>	<b>hr</b>	<b>7.301</b>
<b>Horas mantenimiento/año</b>	<b>hr</b>	<b>1.052</b>
<b>Horas reserva/año</b>		
Colación	hr	1,00
Cambio de turno	hr	1,00
Varios (2)	hr	0,50
Misceláneos	hr	-
Mantenición no programada	hr	-
<b>Total/turno</b>	<b>hr</b>	<b>2,50</b>
<b>Total/día</b>	<b>hr</b>	<b>5</b>
<b>Total/año</b>	<b>hr</b>	<b>1.740</b>
<b>Horas operativas/año</b>	<b>hr</b>	<b>5.561</b>
<b>Horas operativas/mes</b>	<b>hr</b>	<b>463</b>
<b>Disponibilidad</b>	<b>%</b>	<b>87</b>
<b>Utilización de la disponibilidad</b>	<b>%</b>	<b>76</b>
<b>Factor operacional</b>	<b>%</b>	<b>80</b>
<b>Horas efectivas/año</b>	<b>hr</b>	<b>4.443</b>
<b>Horas demoras/año</b>	<b>hr</b>	<b>1.117</b>

Fuente: Tesis “Asignación dinámica de operadores de LHD para operación a distancia en minería subterránea”; Vicepresidencia de proyectos, Codelco Chile, Autor: Francisco Carrasco Jerez.

- (1) Se refiere a detenciones por mantenimiento al sistema de transporte principal, asociadas a la planta de chancado, correas, entre otros.
- (2) Contempla tiempos de interferencias propias de la operación, mencionadas en anterioridad como muestreo, inspección a puntos de extracción, mapeo geomecánico y geológico, como también tronaduras y charlas de seguridad.

**Tabla 3. Cálculo del factor operacional para LHD SA.**

<b>Factor operacional LHD</b>	<b>Tiempo pérdida operacional</b> min/día	<b>Tiempo pérdida operacional</b> % día
Traslados a taller	30	2,80
Traslados a estación diésel	6	0,80
Cambio de calle	12	1,10
Espera por reasignación	2,60	0,20
Cambio MB	36	3,30
Tiempos de espera	40	3,70
Otras actividades (1)	72	7
Imprevistos operacionales (2)	10	0,90
Varios	9	0,80
<b>Total</b>	<b>218</b>	<b>20</b>
	<b>Factor Operacional (F.O)</b>	<b>80</b>

**Fuente:** Tesis “Asignación dinámica de operadores de LHD para operación a distancia en minería subterránea”; Vicepresidencia de proyectos, Codelco Chile, Autor: Francisco Carrasco Jerez.

20,98

- (1) Limpieza de calle, inspección de pique, etc.
- (2) Punto colgado, pique lleno, etc.

Para el cálculo de indicadores (KPI) se consideraron las siguientes formulas:

$$F.O = 100 - \sum \%tpo$$

**Ecuación 1. Cálculo del factor operacional.**

Dónde: -F.O es el factor operacional.

-Tpo (%) son los tiempos de pérdida operacional.

$$DF = \frac{HD}{HN} * 100$$

**Ecuación 2. Cálculo de disponibilidad física.**

Dónde: -DF es la disponibilidad física.

-HD son las horas disponibles

-HN son las horas nominales.

$$UOD = \frac{HO}{HD} * 100$$

**Ecuación 3. Utilización de la disponibilidad.**

Dónde: -UOD es la Utilización de la disponibilidad  
 -HO son las horas operacionales  
 -HD son las horas disponibles

### III.1.2 Dimensionamiento de flota requerida

Otro input a corroborar es la cantidad de equipos LHD que deben operar en el circuito, con el fin de cumplir la carta de producción para el mes de febrero del 2023, teniendo así la cantidad máxima de equipos dado que en dicho mes se alcanzan las tasas de régimen para todos los puntos de extracción.

Teóricamente ambos macro bloques se encuentran operativos con un total de 7 equipos LHD SA, cifra que se corroborará mediante un análisis por dimensionamiento de flota.

Para ello se tienen los siguientes datos:

**Tabla 4. Inputs de operación LH517.**

Ítem	Unidad	Valor
Equipos	#	7
Velocidad equipo cargado (1)	km/hr	11
Velocidad equipo descargado (1)	km/hr	11
Capacidad de balde (2)	Ton	15
Rendimiento operativo	ton/hr op	255
Producción mensual	Baldadas	75.911

**Fuente: Elaboración propia.**

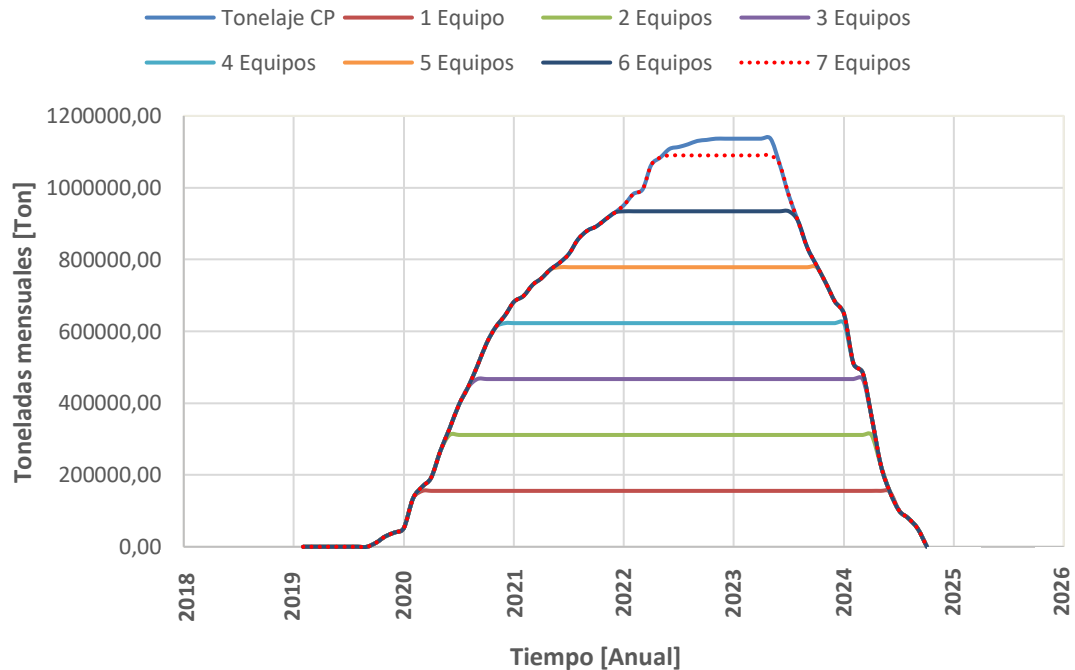
(1) Velocidades de catálogo de equipo.

(2) Capacidad de balde ajustada por factor de corrección para un equipo LHD de 20 yd<sup>3</sup>.

Bajo los datos de operación se realizó una sensibilidad en función al número de equipos en donde de manera preliminar a la simulación aportó el siguiente gráfico:



**Gráfico 7. Sensibilidad por número de equipos 20 yd<sup>3</sup> (15 ton)**



**Fuente: Elaboración propia, con parámetros de tabla 4.**

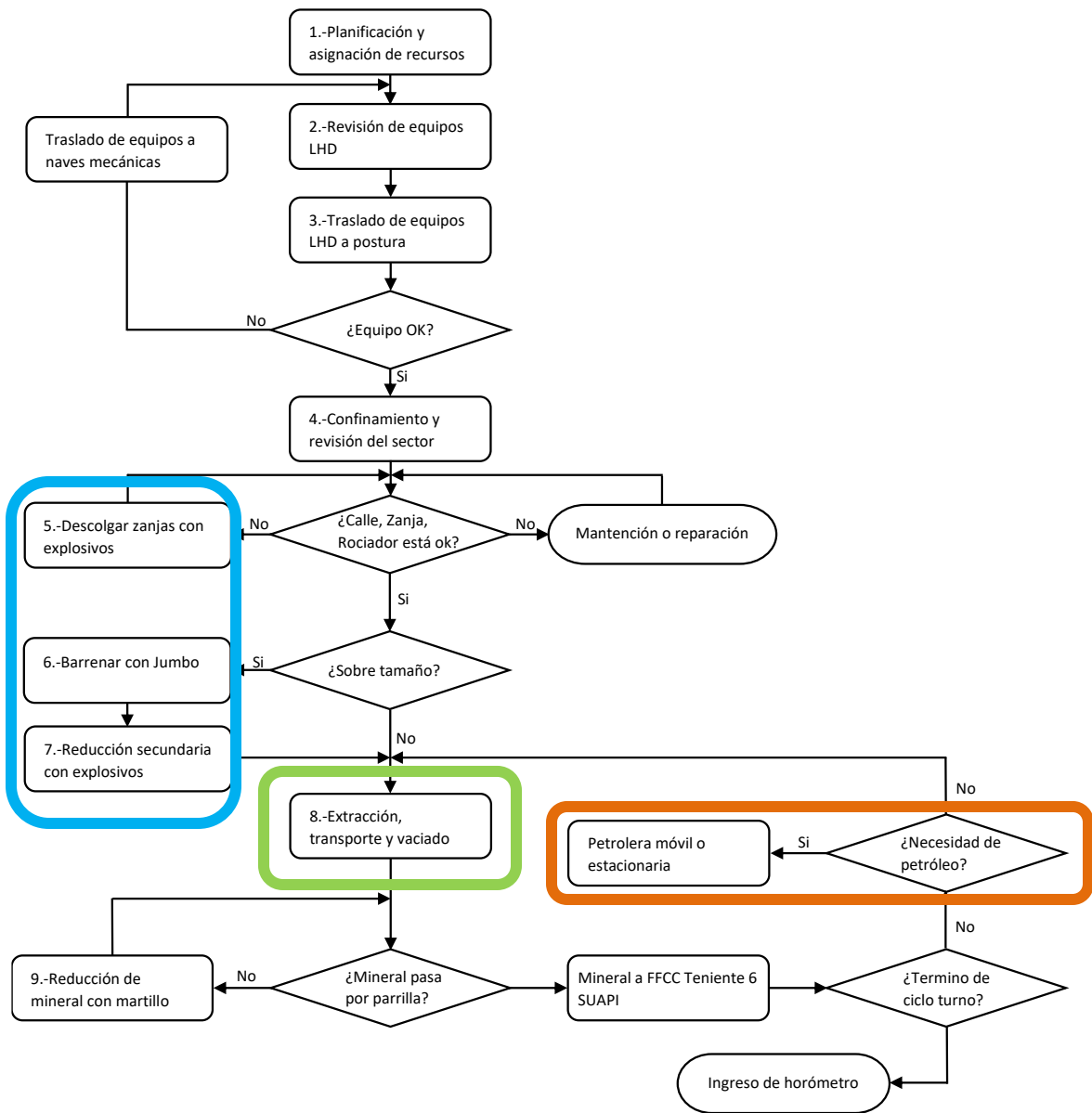
De manera preliminar, previa a la simulación, podemos ver que la cantidad necesaria requerida de 7 equipos, no es capaz de atender la demanda de producción dada, aproximadamente desde mediados del 2022 hasta mediados del 2023, periodo donde todos los puntos se encuentran en el régimen PRC de un 70% - 100% según la carta de producción.

No obstante, pese a que el dimensionamiento sugiera una cantidad de 8 equipos, se operará con una cantidad de 7 equipos ya que se dejará una calle para solucionar interferencias operacionales, es por ello que los equipos a simular tendrán diversas variables para los MB 1 SUR y MB 1 NORTE, atendiendo un total de 8 calles, mediante la asignación dinámica de equipos para cubrir la producción de la calle 4 Norte.

### III.1.3 Flujograma para la utilización de equipos LHD

Para poder conocer el área de simulación, necesario además poder visualizar de manera didáctica a modo de ejemplo, los procesos claves a simular, además de aquellos de los cuales se presume que puedan existir incidencias al momento de realizarla en Arena Simulation.

**Ilustración 10. Flujograma de procesos LHD Codelco División El Teniente.**



**Fuente: Codelco División El Teniente, TTE 6.**

A simples rasgos, las áreas remarcadas en la ilustración 8, son extrapolables a cualquier faena que utilice extracción, transporte y vaciado mediante sistemas LHD, en donde el color azul corresponde a interferencias operacionales relacionadas al comportamiento geomecánico del sector, el color verde representa la base de la simulación, asignando las rutas dinámicas previamente señaladas y por último el color naranja, representa la necesidad del equipo por repostar combustible.

### **III.1.4 Arena® Simulation Software**

Arena es un producto de simulación desarrollado por Rockwell Automation, que tiene por finalidad realizar simulaciones con el fin de:

- Encontrar la mejor aproximación a problemas operacionales.
- Reducir el riesgo de inversión de capital.
- Comprender características del sistema, como costos, tiempos de ciclo, utilización y disponibilidad de recursos.
- Mostrar resultados.

Lo anteriormente descrito concuerda con lo anteriormente visto en acápite anteriores.

Este es un software de simulación discreta, avalando el hecho que, en la mayoría de los procesos, se produce un cambio continuo en sus parámetros dada ciertas circunstancias. Es por ello que, el modelamiento de eventos discretos, describe el comportamiento de un sistema complejo como una serie de eventos bien definidos y ordenados, funcionando perfectamente ante cualquier proceso donde haya alguna variación, tanto en recursos o interacciones complejas dentro del sistema.

Algunas industrias en donde se ha probado el funcionamiento de esta herramienta son:

- Manufacturera
- Salud
- Supply Chain
- Terminales y puertos
- Logística
- Militar

### III.1.5 Uso de combustible

El uso de combustible de equipos LHD, está parametrizado de tal forma que se lleve a cabo una vez al final de cada turno.

Para este trabajo en particular, se usarán datos de un equipo LHD LH517 de la empresa Sandvik para un modelo de motor Volvo TAD1341 cuyos datos son los siguientes:

**Tabla 5. Valores de uso de combustible LH517**

Ítem	Unidad	Valor
Consumo promedio de combustible (1)	litros/hr	35,00
Capacidad de estanque	litros	385,00

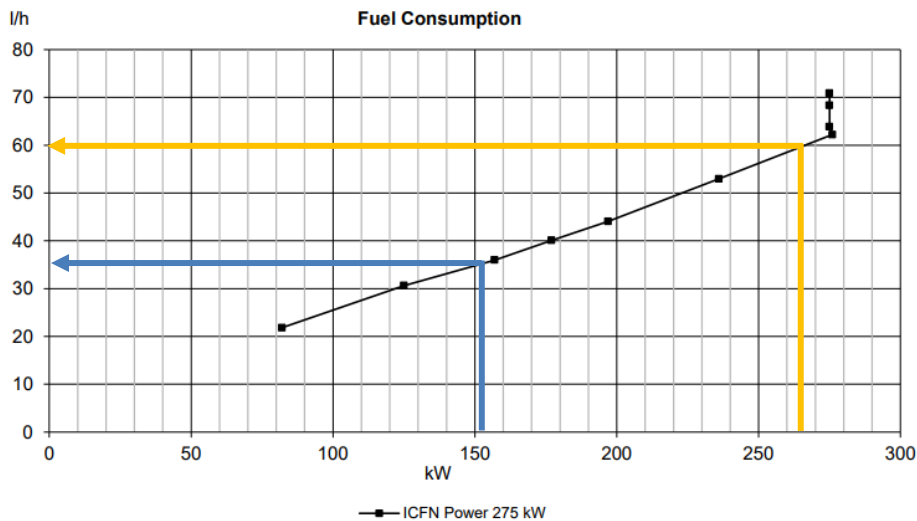
Fuente: Catalogo del equipo.

(1) Consumo considerando solamente el 50% de carga.

No obstante, Sandvik, indica que la carga de un equipo LHD ronda dentro del 50% anteriormente señalado y esa es su justificación para utilizar dicho valor, sin embargo, la empresa señala que dicha cifra es ajustable dependiendo de las condiciones de operación de la mina. Es por ello que para precisar el criterio a utilizar será el factor de balde para el equipo con un cucharón de 20 yd<sup>3</sup>, siendo un 75%.

Para ello utilizaremos la siguiente distribución de uso de combustible en función de los KW producidos por el motor.

**Gráfico 8. Correlación de consumo y KW LH517.**



Fuente: Catalogo Volvo TAD1341.

Donde el color azul representa el 50% y el color naranja representa un 100% de llenado, es por ello que un factor de corrección de 75% da un valor aproximado a 47,5 litros por hora.

**Tabla 6. Cuadro resumen uso de combustible.**

Ítem	Unidad	Valor
50% Loaded	litros/hr	35,00
75% Loaded	litros/hr	47,50
100% Loaded	litros/hr	60,00

**Fuente: Elaboración propia.**

Para las esperas donde el equipo esté detenido se asumirá un uso de combustible de 15 litros/hora dada la linealidad del grafico para un 0% de cargado de balde.

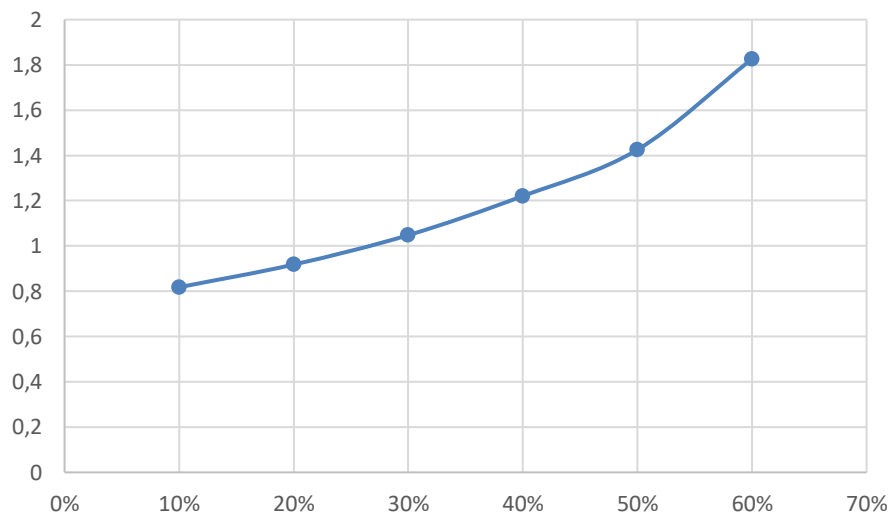
**Tabla 7. Cuadro resumen de consumos por condición del LHD.**

Ítem	Unidad	Valor
Consumo cargado	litros/hr	47,00
Consumo descargado	litros/hr	15,00
Consumo descargado en espera	litros/hr	10,00

**Fuente: Elaboración propia.**

Además, se tiene la siguiente distribución de ciclos de repostaje de combustible en función del estado del estanque, en otras palabras, que porcentaje resta para que se vacíe.

**Gráfico 9. Distribución de ciclos de repostaje en función del llenado del estanque.**

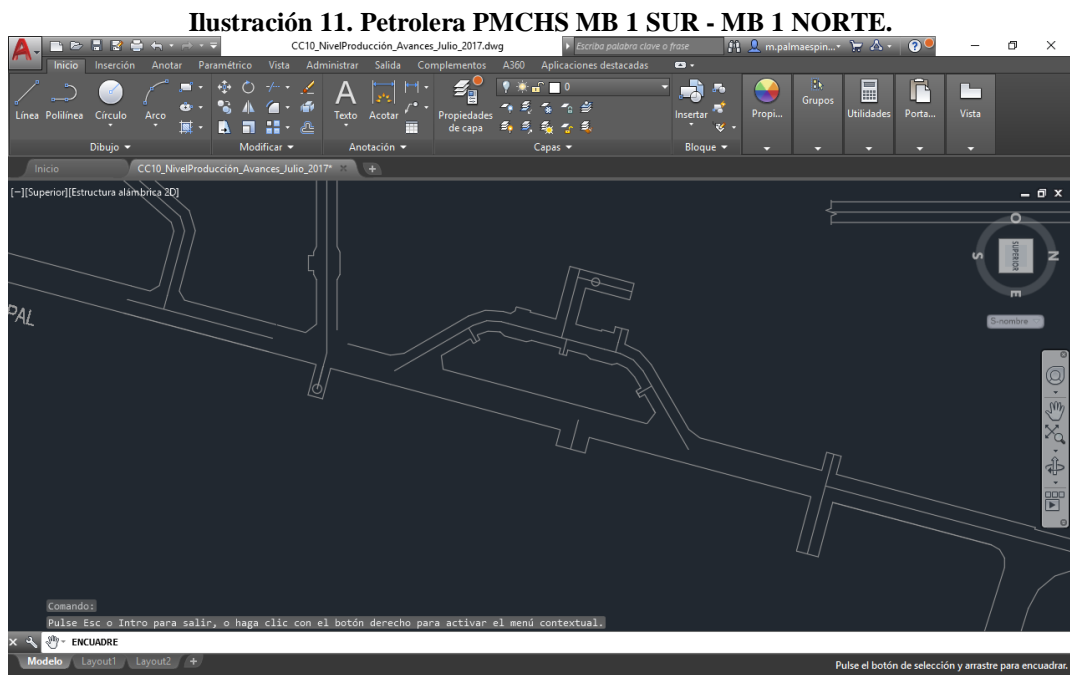


**Fuente: Elaboración propia, velocidades de 7 y 11 km/hr cargado-descargado respectivamente.**

Es habitual que, según fuentes en minería los equipos inicien el ciclo de repostaje de combustible cuando su capacidad de estanque no disminuya más del 50%, es por ello que en la simulación se adoptará este criterio, siendo adoptado el valor de 242,5 litros.

De forma preliminar ya podemos ver que según los datos de PMCHS, se tiene que por turno el equipo debe petrolearse exactamente 2 veces, pudiéndose ver una diferencia ya que, al momento de simular puntualmente el fenómeno de repostaje, la simulación otorga un valor aproximado de 2,4 veces por día, siendo superior a las 2 estipuladas para el proyecto.

Cabe recalcar que esta simulación se realizó de manera previa solo para contrastar dicho valor a uno simulado bajo condiciones de operación, además aclarar que esta simulación es una derivada de la simulación principal bajo una restricción en tiempo de simulación.



**Fuente: DWG PMCHS.**

## III.2 Oportunidades de mejora

### III.2.1 Caso 1 – Proto caso

Para dar origen a los casos de simulación, se procederá a crear un proto caso, que utilizará los parámetros operacionales para los LHD, serán según la tabla 8. Este caso en particular contempla solamente la utilización de un equipo por calle, dejando sin utilizar

la calle 4 norte. Esto para poder asignar una cantidad de baldadas para que los equipos se vayan movilizandohacia la calle 4 norte.

Este caso además podrá orientar la secuencia de despacho hacia la calle 4 norte y corroborar la validez del modelo para recrear el Caso base 1.

### III.2.2 Caso 2 – Caso base 1

El primer caso a analizar consta de un parque de 7 equipos, los cuales operarán a conforme a la siguiente tabla de resumen.

**Tabla 8. Cuadro resumen “LHD Caso 1”.**

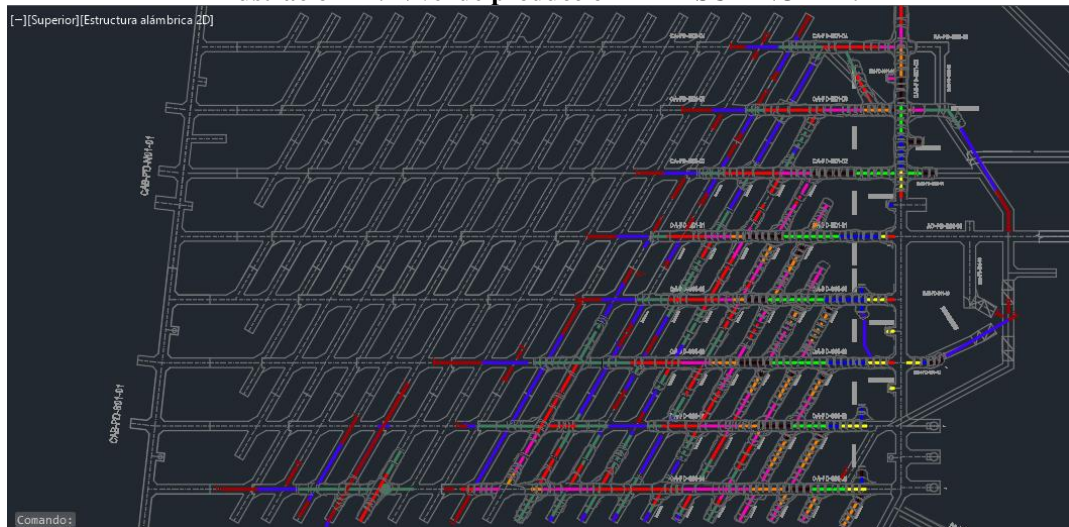
<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Número de equipos	#	7,00
Velocidad equipo cargado	km/hr	7,00
Velocidad equipo descargado	km/hr	11,50
Horas de simulación	horas/mes	463,42

**Fuente: Elaboración propia.**

La motivación de desarrollar este caso, es probar que bajo las variables de operación descritas en la tabla 7, se logra cumplir el plan de producción para el periodo de febrero 2023. Para ello será necesario que los equipos cambien de calle para prestar servicio de carguío y transporte a la calle 4 Norte del MB 1 NORTE.

Esta simulación tendrá por objetivo, observar como es el comportamiento de la producción con solo la interferencia operacional de congestión en las cabeceras por espera de las vías para realizar la descarga.

**Ilustración 12. Nivel de producción MB 1 SUR-NORTE.**



Fuente: DWG PMCHS.

Este diseño en particular, presenta congestiones el sector de descarga ya que las rutas son compartidas para 2 equipos LHD como se mencionó con anterioridad.

### III.2.3 Caso 3 – Caso base 1 + frecuencia de colgadura

Para este caso, se incorporará el fenómeno de colgadura, el cual está parametrizado según la tabla 2. Por lo tanto, las horas de simulación variarán según la siguiente tabla.

**Tabla 9. Cuadro resumen “Interferencias caso 3”.**

Ítem	Unidad	Valor
Punto colgado, pique lleno (1)	min/día	10,00
Total interferencias operacionales	horas/mes	4,83
Horas de simulación mensual	horas/mes	458,59

Fuente: Elaboración propia.

- (1) Cuantificación realizada bajo la tesis “Asignación dinámica de operadores de LHD para operación a distancia en minería subterránea”.

### III.2.4 Caso 4 – Caso base 1 + frecuencia de colgadura + uso de combustible

Para este caso se verá el comportamiento del sistema de movimiento de material en el nivel productivo incluyendo el uso de combustible, con el fin de ver como varía la producción incluyendo todas las interferencias del equipo, siendo la congestión del nivel, uso de cuadrillas y uso de combustible.



Recordemos que se cuantificó la frecuencia de reposteo de combustible en el acápite de uso de combustible, para velocidades de 7,00 y 11,50 km/hr para cargado y descargado respectivamente. Dicha cuantificación sugiere que existe un excedente de frecuencia diaria de aproximadamente 0,5 veces, no obstante, es lógico esperarse una mayor frecuencia al operar con velocidades menores como las descritas en la tabla 7. Esta simulación al no contener horas de reserva, simulará un trabajo continuo a lo largo del mes.

Esta simulación contempla los inputs de operación del caso 3.

### III.2.5 Caso 5 – Caso base 2 LHD S.A.

El caso base 2 toma diferentes valores de operación de los equipos LHD, siendo estos aportados mediante la tesis “Asignación dinámica de operadores de LHD para operación a distancia en minería subterránea”, elaborado por Francisco Carrasco Jerez, en donde se especifica el siguiente recuadro:

**Tabla 10. Cuadro resumen condición de operación LHD Caso base 2.**

Ítem	Unidad	Valor
Número de equipos (1)	#	7,00
Velocidad equipo cargado	km/hr	12,00
Velocidad equipo descargado	km/hr	12,70
Horas de simulación mensual (1)	horas/mes	463,42

**Fuente: Elaboración propia con apoyo en tesis “Asignación dinámica de operadores LHD para operación a distancia en minería subterránea”, Autor: Francisco Carrasco Jerez.**

- (1) Valores provenientes del caso base 1, ya que son valores constantes en la simulación.

### III.2.6 Caso 6 – Caso base 2 + frecuencia de colgaduras + uso de combustible

Este caso en particular, representa las condiciones de operación descritas en la tesis “Asignación dinámica de operadores de LHD para operación a distancia en minería subterránea”, en donde además se incorpora el uso de combustible aportado por el fabricante de equipos para validar y cuantificar los parámetros aportados. Los valores de operación se resumen en la siguiente tabla de resumen:

**Tabla 11. Cuadro resumen "Condiciones de operatividad LHD caso 6".**

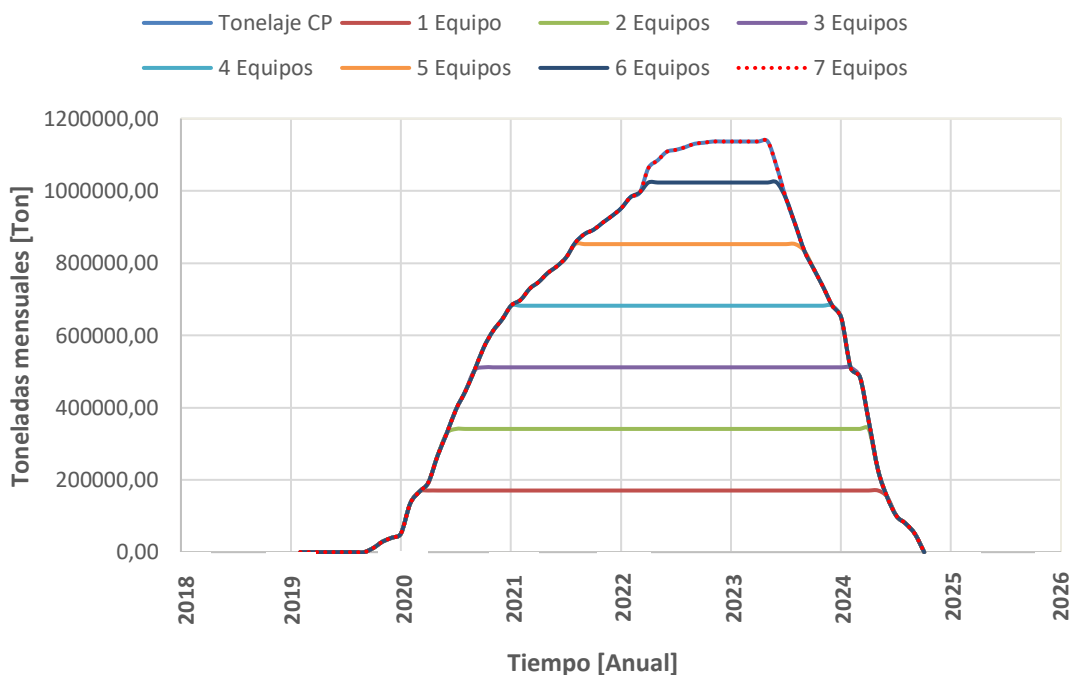
Ítem	Unidad	Valor
Número de equipos (1)	#	7,00
Velocidad equipo cargado	km/hr	12,00
Velocidad equipo descargado	km/hr	12,00
Horas de simulación mensual	horas/mes	458,59
Consumo cargado (1)	litros/hr	47,00
Consumo descargado (1)	litros/hr	15,00
Consumo descargado en espera (1)	litros/hr	10,00

Fuente: Elaboración propia.

(1) Valores procedentes de casos anteriores, en materia de combustible son referidos a la simulación 4.

Esta simulación tiene como objetivo corroborar lo propuesto por la vicepresidencia de proyectos de Codelco Chile.

**Gráfico 10. Sensibilidad 2 por número de equipos LHD, Caso 6.**



Fuente: Elaboración propia.

Esta tesis, emplea el uso de equipos LHD SA (Semi-autónomo), donde establece que la velocidad cruce de estos equipos es de 12 kph. La ventaja de utilizar estos equipos es que solamente debe ser asistido al momento de carga, pudiendo ser configurables, ya sea

su velocidad como la ruta que deben seguir. El operador mediante radio control es capaz de dirigir el proceso de carguío, siendo su implementación emergente dentro de las tecnologías actualmente empleadas en el rubro. Un ejemplo similar son los martillos automatizados desde una sala de control, cuya filosofía es semejante a los LHD SA.

Estos equipos para poder movilizarse emplean el uso de combustible, es por ello que también será considerado en la simulación.

Cabe destacar que estas velocidades regían bajo un diseño del nivel de producción, donde producían 2 equipos por calle, es por ello que además se probará simular un caso extra, cuyas velocidades serán los promedios de las marchas 2 y 3 de un equipo LH517.

Si bien la sensibilidad con velocidades propuestas en la tesis, si avala la producción CP, esta sensibilidad no considera demoras operacionales, es por ello que establecer un punto de quiebre es clave.

## **IV. INGENIERÍA DEL PROYECTO**

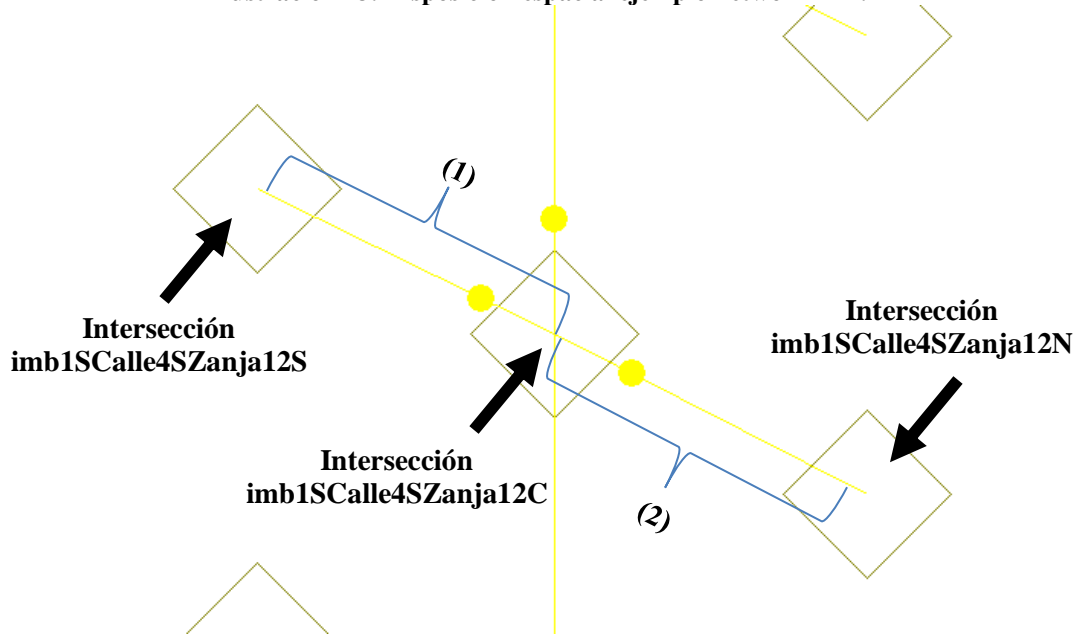
### **IV.1 Preparación del modelo mediante NETWORK**

Dada las características del proyecto, es posible modelarlo en Arena mediante una red de intersecciones denominada “Network”, que describe un segmento donde cada extremo es una intersección. Cada una de estas intersecciones posee un código en particular para así poder distinguirse una de otra, además de poder seguir un protocolo de buena praxis al momento en que varios usuarios manipulen dicha red de información, saber el contenido y especificaciones de la intersección.

En la elaboración de la simulación se utilizan nomenclaturas para la construcción de la network siguiendo la siguiente arquitectura:

1. Toda network link comenzará con “nl” (Network Link) haciendo referencia a si misma.
2. Una vez tipeado el paso 1, se colocará una “i” de identificador, ya que todo lo que venga a continuación se tendrá en consideración como un identificador propio de la intersección.
3. Seguido el paso 2, se deberá mencionar el macro bloque con “mb”, seguido por 1S o 1N según sea el caso, por ejemplo, mb1S es el macro bloque 1 sur.
4. Luego se deberá citar a la calle en la cual irá la intersección, como puede ser el caso de la calle 2 sur. En dicho caso, seguido el tipeo del paso 3, deberá colocarse “Calle2S”
5. Una vez referida la calle se deberá citar la zanja. Esta estructura posee 3 intersecciones, la primera es la S (Sur), que hace mención al punto sur de la zanja, la segunda estructura es la C (Centro), haciendo referencia al punto centro, que es el punto equidistante entre extremos (Norte), y por último la N (Norte) que es el punto norte de la zanja. La unión entre puntos C (Centro), va creando espacialmente la calle en cuestión. Se puede observar a modo de ejemplo la ilustración 12.
6. Al ser un segmento deberá tipearse la letra “a” señalando la dirección en donde se quiere proyectar la recta, en otras palabras, otra intersección, repitiendo el paso 2 hasta el 5.

**Ilustración 13. Disposición espacial ejemplo network link.**



**Fuente: Elaboración propia.**

- (1) Network Link: nlimb1SCalle4SZanja12Saimb1SCalle4SZanja12C
- (2) Network Link: nlimb1SCalle4SZanja12Caimb1SCalle4SZanja12N

Cada network link representa una unión entre intersecciones, en caso del ejemplo se crean 2 de estas para conformar 2 tramos de igual longitud. Para conectar la zanja 12 con la zanja 13, se debe crear una tercera network link conectando los puntos de centro de ambas zanjas.

El modelo consta con la elaboración de 517 network links, contemplando nivel de producción, acceso de producción, cruzado de producción principal y parque de LHD.

**Ilustración 14. Resumen "Network link" Arena.**

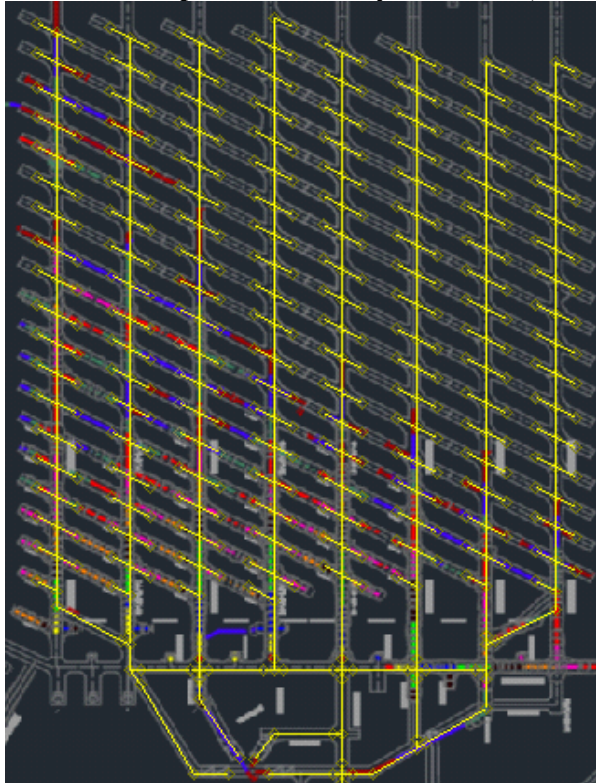
	Name	Network Links
1 ▶	MB	517 rows

Double-click here to add a new row.

**Fuente: Elaboración propia.**

La construcción de esta red se realizó encima de un screenshot del dwg del MB 1 SUR y MB 1 NORTE de PMCHS.

**Ilustración 15. Vista de planta MB 1 Sur y MB 1 Norte, Network link.**



**Fuente: Elaboración propia.**

## **IV.2 Reglas del sistema**

El sistema para operar, necesita una serie de reglas para así evitar la colisión entre equipos LHD, entre otras para dar un orden lógico al modelo. Esto procurará la correcta ejecución de la simulación siguiendo los siguientes criterios:

- Asignación de recursos mediante estructura FIFO (First in – First out), para las colas producidas por la misma asignación.
- Equipos en espera tendrán el uso mínimo de combustible según sea el caso.
- Solo podrá haber un equipo operando por calle.
- Los equipos podrán ir alternando de calle según sea el caso.
- Equipos en labores de producción tienen preferencia ante equipos que vayan en curso a repostar combustible.
- La salida de equipos del parque (Estacionamiento) será en orden de calles de izquierda a derecha como lo muestra la ilustración 14 (1S,2S,3S,4S,1N,2N y 3N).
- La salida de equipos del parque (Estacionamiento) será guiada inicialmente a la petrolera.

## IV.3 Proto caso

### IV.3.1 Elaboración del modelo y validación de inputs

Para la construcción del primer modelo, se validará ante la siguiente tabla de resumen:

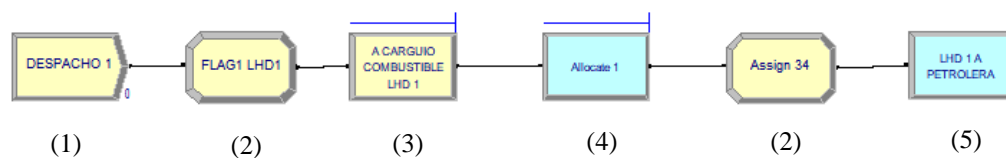
**Tabla 12. Cuadro resumen elaboración Proto caso.**

Ítem	Unidad	Valor
Número de equipos	#	7,00
Velocidad equipo cargado	km/hr	7,00
Velocidad equipo descargado	km/hr	11,50
Horas por cambio de calle mensual	horas/mes	-
Horas de simulación mensual	horas/mes	463,42
Consumo cargado	litros/hr	-
Consumo descargado	litros/hr	-
Consumo descargado en espera	litros/hr	-

Fuente: Elaboración propia.

Cada equipo LHD tendrá una entidad en común denominada “equipo” que será creada por una unidad de despacho.

**Ilustración 16. Flujograma inicial LHD 1.**

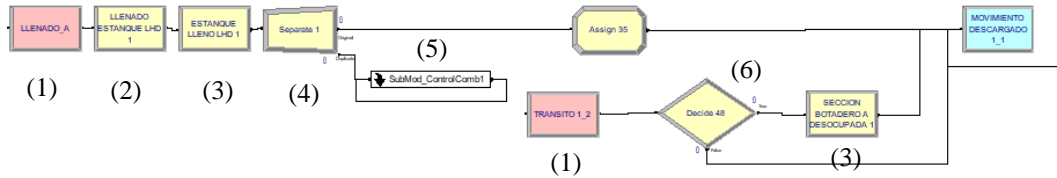


Fuente: Elaboración Propia

- (1) Módulo que crea la entidad.
- (2) Módulo que asigna atributos, variables y expresiones a la entidad.
- (3) Módulo Seize, que asigna un recurso a la entidad
- (4) Módulo Allocate, que asigna un transportador a la entidad.
- (5) Módulo Transport, que transporta la entidad a una estación.

La ilustración 15 representa el viaje inicial que realiza el LHD hacia la estación petrolera al iniciar la simulación, como se describió en las reglas del sistema.

**Ilustración 17. Flujograma petrolera LHD 1.**

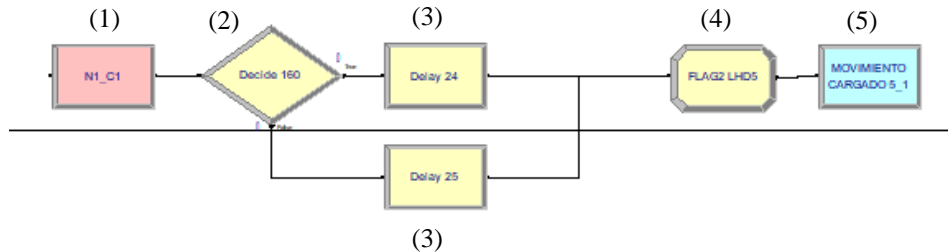


**Fuente: Elaboración propia.**

- (1) Módulo de estación que tiene referencias de la network, con su respectiva intersección.
- (2) Módulo Delay, que tiene como objetivo, producir una demora a la entidad.
- (3) Módulo Release, libera un recurso anteriormente ocupado por la entidad.
- (4) Módulo Sepárate, encargado de duplicar la entidad en dos iguales.
- (5) Submodelo, cuyo propósito es resumir varios módulos en uno solo, conteniendo procesos complejos dentro de él.
- (6) Módulo Decide, cuya finalidad es tener el criterio de decidir y discriminar puntos de salida a la entidad, según algún criterio estipulado o probabilidad.

La ilustración 16, muestra el flujo de la entidad al momento de realizar el proceso de carguío de combustible en la petrolera, con un Submodelo que cumple el rol de controlador al uso de combustible según sea el caso.

**Ilustración 18. Flujograma carguío en zanja LHD 1.**



**Fuente: Elaboración propia.**



- (1) Módulo de estación, puntualmente contiene todas las intersecciones de la calle 1 del macrobloque norte.
- (2) Módulo Decide, que cumple el rol de asignar retrasos para la labor de carga, en donde para las zanjas norte es mayor debido a la necesidad de realizar un loop.
- (3) Módulo Delay, que contiene información de retrasos por carguío del balde del equipo, con un valor de 11 seg para las zanjas norte y 17 seg para zanjas sur.
- (4) Módulo Assign, cuyo fin fue explicado en la ilustración 15, no obstante, en este flujograma cumple el rol indicar que el equipo está cargado, además de contabilizar las baldadas extraídas por el equipo y finalmente asignar un nuevo punto de extracción para el inicio del nuevo ciclo de carguío.
- (5) Módulo Transport, cuya finalidad dentro del flujograma es transportar el equipo al botadero.

**Ilustración 19. Flujograma sector botadero LHD 1.**



**Fuente: Elaboración propia.**

- (1) Módulo de estación, correspondiente al punto de vaciado.
- (2) Módulo Delay, que contiene información del tiempo de descarga.
- (3) Módulo Assign, con información del equipo, como el estado de descargado y una variable que cuenta la cantidad de baldadas aportadas por el equipo al sistema de chancado.
- (4) Módulo Decide, con el propósito de ordenar según una cantidad de baldadas en particular el ingreso al Submodelo.
- (5) Submodelo que controla el movimiento del equipo para prestar servicio a la calle 4 norte.
- (6) Submodelo, con el propósito de guiar al equipo LHD hacia la petrolera para repostar combustible.
- (7) Módulo Transport, cuyo fin es movilizar la entidad a un punto de extracción, cerrando así el ciclo de carguío y transporte.

Cabe destacar que, para el Proto caso, los procesos 4, 5 y 6 están deshabilitados.

**Tabla 13. Validación velocidades cargado y descargado.**

	Name	Transporter Name	Unit Number	Entity Destination Type	Station Name	Expression	Velocity	Units	Guided Tran Destination Type
1	MOVIMIENTO CARGADO 1_2	tlHD1		Station	eBOTADERO1		7000	Per Hour	Entity Destination
2	MOVIMIENTO CARGADO 2_2	tlHD2		Station	eBOTADERO2		7000	Per Hour	Entity Destination
3	MOVIMIENTO CARGADO 3_2	tlHD3		Station	eBOTADERO3		7000	Per Hour	Entity Destination
4	MOVIMIENTO CARGADO 4_2	tlHD4		Station	eBOTADERO4		7000	Per Hour	Entity Destination

Fuente: Elaboración propia.

Para la tabla 14 se muestra un set de 4 datos de transportadores con una velocidad de 7000,00 metros por hora (7,00 kph), de un total de 39 datos entre velocidades de cargado y descargado.

#### IV.3.2 Resultados Proto caso

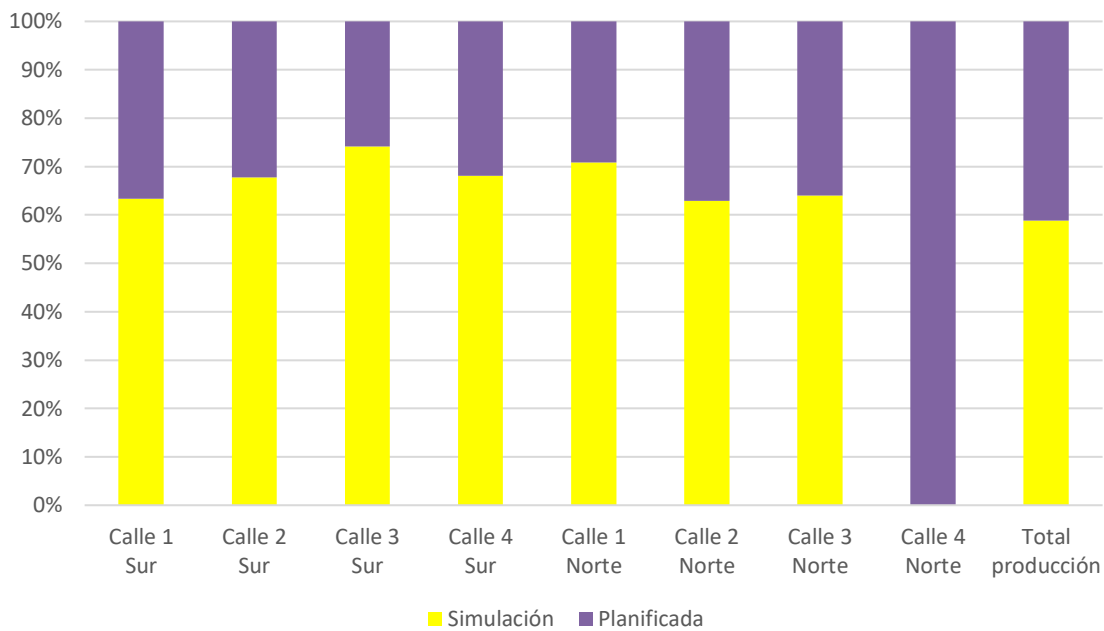
En este caso cabe recordar que se utilizarán 7 calles de producción siendo las 1S, 2S, 3S, 4S, 1N, 2N y 3N. Esto para ver el comportamiento de los equipos y su distribución de tonelaje bajo los parámetros anteriormente mencionados, aportando la siguiente tabla de resultados:

**Tabla 14. Cuadro de resumen resultados simulación Proto caso.**

Calle/Baldadas	Planificadas	Simulación
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	6.078,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	6.501,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	7.115,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	6.535,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	6.436,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	5.975,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	5.945,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	-
<b>Total producción</b>	75.780,00	44.585,00
<b>Δ producción</b>	-31.195,00	-

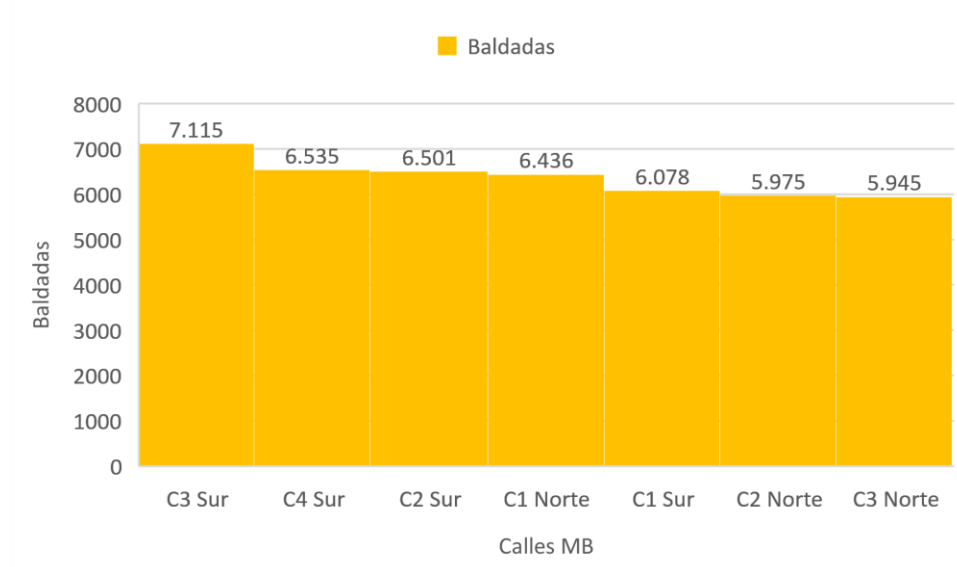
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 11. Porcentaje de cumplimiento Proto caso.**



**Fuente: Elaboración propia.**

**Gráfico 12. Histograma baldadas simulación Proto caso.**



**Fuente: Elaboración propia.**

A raíz del gráfico 12, podemos saber el orden de asignación de equipos LHD para brindar servicio a la calle 4 Norte para posteriores simulaciones.

#### IV.4 Caso base 1

El orden asignado por el gráfico 12 para desarrollar este caso quedará de la siguiente forma:

- Calle 3 Sur
- Calle 4 Sur
- Calle 2 Sur
- Calle 1 Norte
- Calle 1 Sur
- Calle 2 Norte
- Calle 3 Norte

La distribución por calle del gráfico 12 muestra una tendencia de mayores baldadas a menores distancias. La calle 4 norte es la ruta que presenta mayores distancias, es por ello que podemos predecir una cantidad de baldadas aproximadas para dicha calle. Además, poder establecer una cantidad de baldadas que deberá trabajar cada uno de los equipos en dicha calle. Para ello se establece la siguiente relación lineal de datos:

$$y = -180,46x + 7091,10$$

**Ecuación 4. Distribución de baldadas Proto caso.**

La ecuación 4 representa la distribución actual de baldadas (Proto caso), con ella podremos establecer una referencia en el comportamiento del modelo de simulación para el Caso base 1, donde se requiere de la utilización de las 8 calles, debiendo asignar una cantidad específica de baldadas para cada equipo, con el fin de que este tenga un parámetro para así poder cambiar de calle (Calle 4 Norte). Dicho valor específico de baldadas, se calcula respetando la pendiente de la ecuación 4 siendo este del orden de 706,00 baldadas a descontar por calle, quedando la siguiente proyección de distribución de baldadas:

**Tabla 15. Cuadro resumen proyección Caso Base 1.**

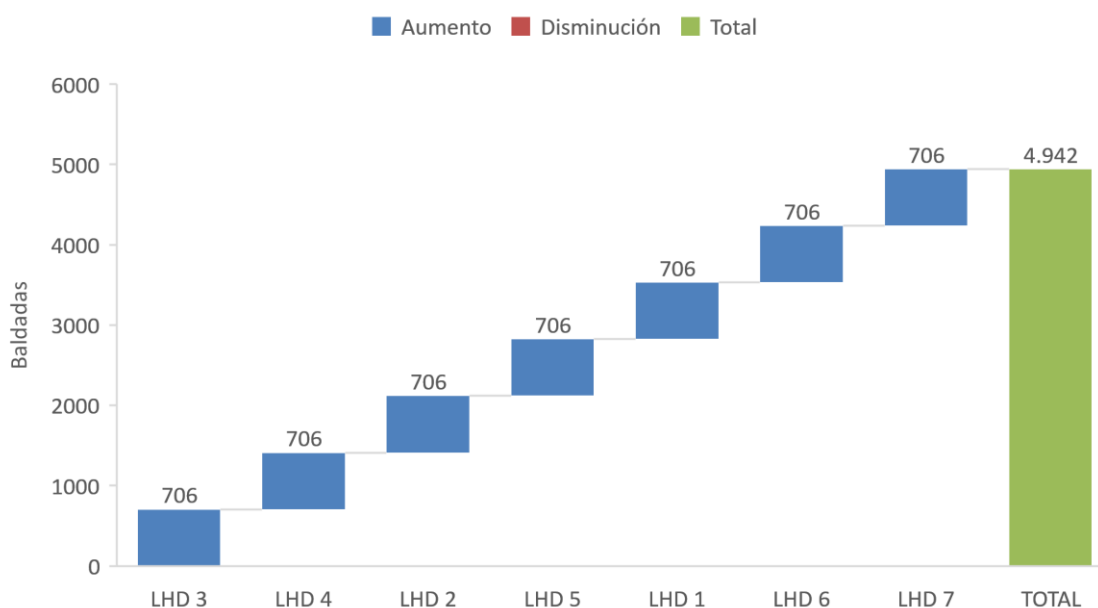
<b>Calle/Baldadas</b>	<b>Proyectadas</b>
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	5.483,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	5.844,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	6.205,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	6.025,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	5.664,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	5.303,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	5.123,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	4.942,00
<b>Total producción esperada</b>	<b>44.589,00</b>

**Fuente: Elaboración propia.**

#### IV.4.1 Resultados Caso base 1

A diferencia del Proto caso, el Caso base 1 contempla que se utilizarán 8 calles de producción siendo las 1S, 2S, 3S, 4S, 1N, 2N, 3N y 4N. Esto para ver el comportamiento de los equipos y su distribución de tonelaje en una condición de operación total, donde como se señaló se extraerá de todas las calles de producción, se simulará la siguiente estrategia de secuenciamiento de equipos:

**Gráfico 13. Aporte por equipo LHD a calle 4 Norte.**



Fuente: Elaboración propia.

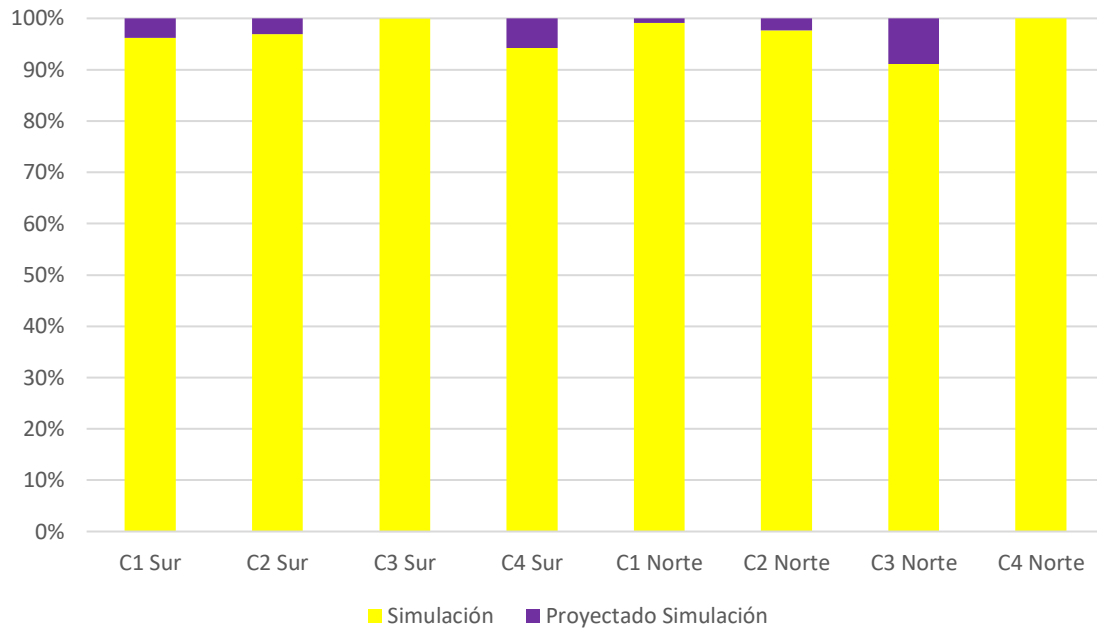
**Tabla 16. Cuadro resumen resultados simulación Caso base 1.**

Calle/Baldadas	Planificadas	Simulación
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	5.276,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	5.664,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	6.206,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	5.677,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	5.616,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	5.181,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	4.666,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	4.942,00
<b>Total producción</b>	75.780,00	43.228,00
<b>Δ producción</b>	-32.552,00	-

Fuente: Elaboración propia.

El modelo lineal predictivo para la simulación (Tabla 16), logró demostrar una gran eficiencia en cuanto a datos esperados por la simulación, pudiendo verse en el siguiente gráfico.

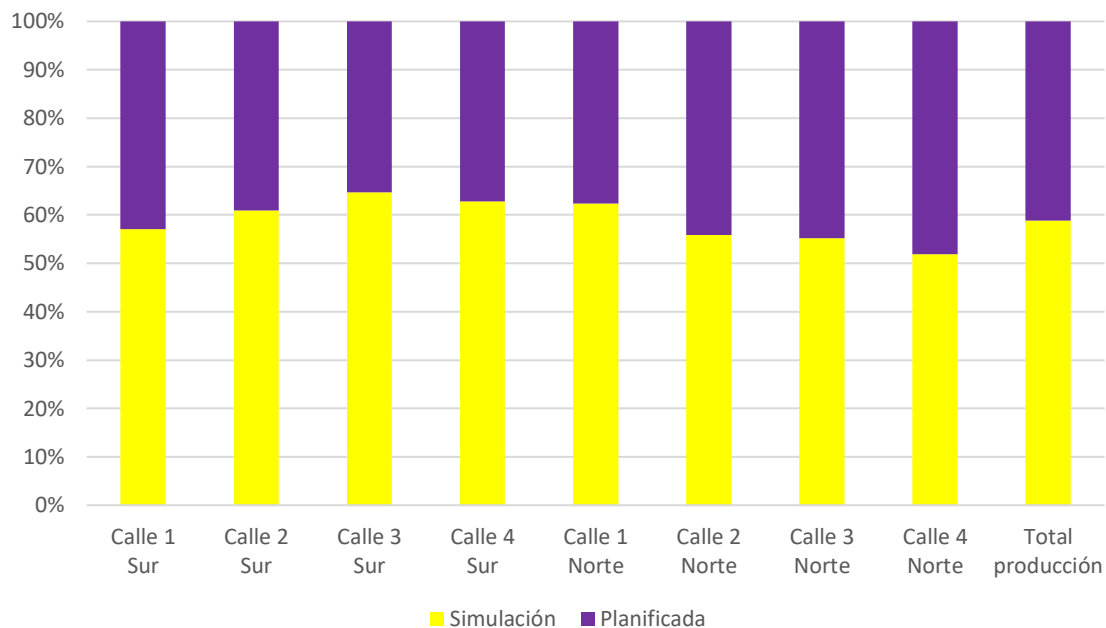
**Gráfico 14. Modelo predictivo de simulación.**



**Fuente: Elaboración propia.**

En el gráfico 14 se logra apreciar valores muy cercanos a los proyectado corroborando la validez de la simulación, indicando que el modelo se adecua en aproximadamente por sobre el 90,00% en el macrobloque Sur - Norte, incluso llegando al 100% en las calles 3 Sur y 4 Norte. No obstante, mediante la simulación de este caso, se observó que la calle 3 Norte tuvo un menor cumplimiento dado que sus distancias son más grandes, que el resto del modelo, sin embargo, la calle 4 Norte posee un 100% de cumplimiento (Distancias aún más grandes), esto justificado ya que la meta impuesta por la proyección es capaz de cumplirse antes del término de la simulación.

**Gráfico 15. Resultados simulación contra carta de producción (CP).**



**Fuente: Elaboración propia.**

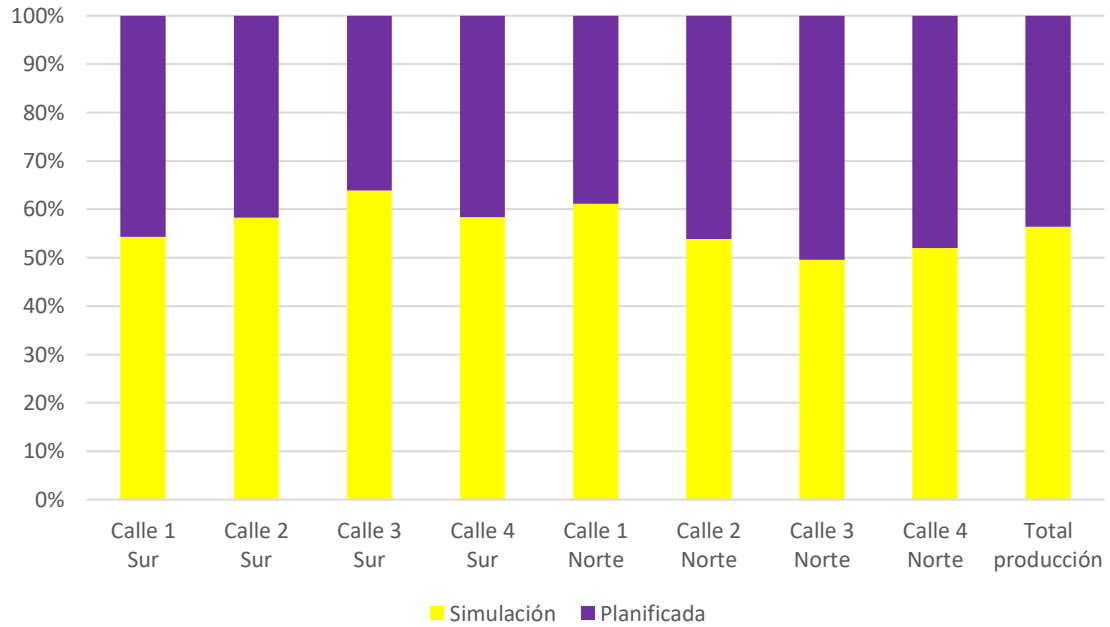
## IV.5 Caso 3 – Caso base 1 + frecuencia de colgadura

### IV.5.1 Validación de inputs

La estructura del modelo se conserva del anterior, además del modelo predictivo debido al cambio de calle de los equipos, variando en las horas de simulación, con ello representar lo estipulado en la tabla 9.

#### IV.5.2 Resultados

Gráfico 16. Grafico simulación Caso 3 contra CP.



Fuente: Elaboración propia.

Como se demuestra en el caso anterior y en este, no es posible lograr la meta productiva, ya sea por la velocidad de los equipos, congestión del sector productivo particularmente en cabeceras o bien por la reducción secundaria.

Tabla 17. Resultados Caso 3.

Calle/Baldadas	Planificadas	Simulación
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	5.210,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	5.595,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	6.137,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	5.610,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	5.551,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	5.118,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	4.607,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	4.942,00
<b>Total producción</b>	<b>75.780,00</b>	<b>42.770,00</b>
<b>Δ producción</b>	<b>-33.010,00</b>	<b>-</b>

Fuente: Elaboración propia.



## IV.6 Caso 4 – Caso base 1 + frecuencia de colgadura + uso de combustible

### IV.6.1 Validación

Esta simulación incluirá el uso de combustible, para observar el comportamiento de los equipos LHD y como este logra afectar la meta de producción en función de variables de operación propios del equipo como se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla 18. Cuadro resumen de operación para Caso 4.**

Ítem	Unidad	Valor
Número de equipos (1)	#	7,00
Velocidad equipo cargado	km/hr	7,00
Velocidad equipo descargado	km/hr	11,50
Horas de simulación mensual	horas/mes	458,59
Consumo cargado (1)	litros/hr	47,00
Consumo descargado (1)	litros/hr	15,00
Consumo descargado en espera (1)	litros/hr	10,00
Reponer combustible 50% Estanque	litros	242,50

Fuente: Elaboración propia.

### IV.6.2 Resultados

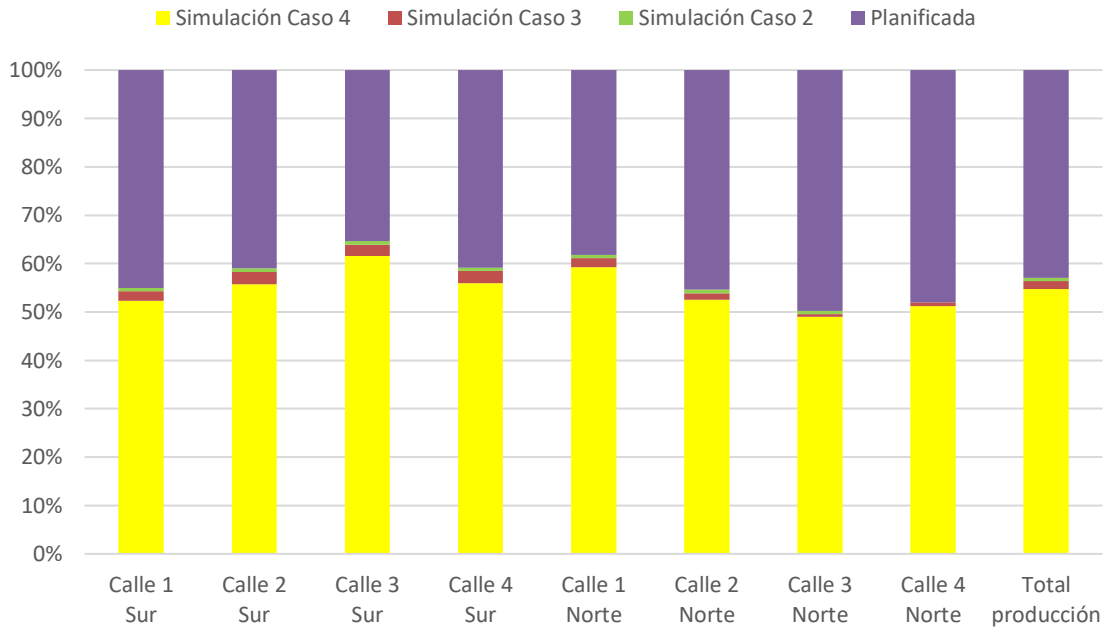
Este es el escenario real de operación, en donde se observan los siguientes resultados.

**Tabla 19. Resultados Caso 4.**

Calle/Baldadas	Planificadas	Simulación
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	5.017,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	5.352,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	5.914,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	5.371,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	5.378,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	4.989,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	4.557,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	4.876,00
<b>Total producción</b>	75.780,00	41.454,00
<b>Δ producción</b>	-34.326,00	-

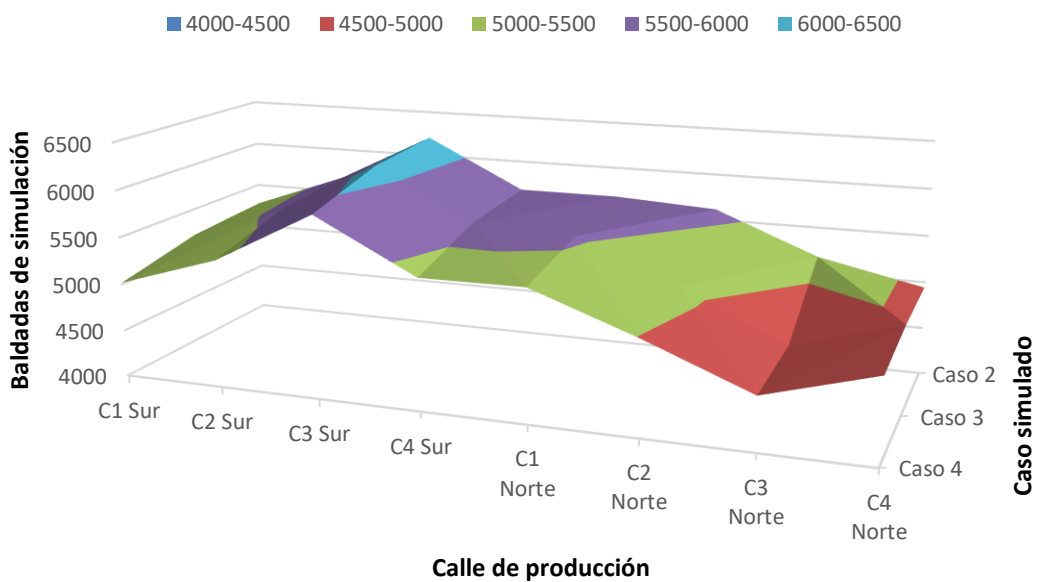
Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 17. Cuadro resumen de simulaciones velocidades 7,00 y 11,50 kph vs carta de producción (CP).**



Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 18. Área comparativa solo simulaciones velocidades 7,00 y 11,50 kph por rango de baldadas.**



Fuente: Elaboración propia.

#### IV.7 Valoración Caso 4

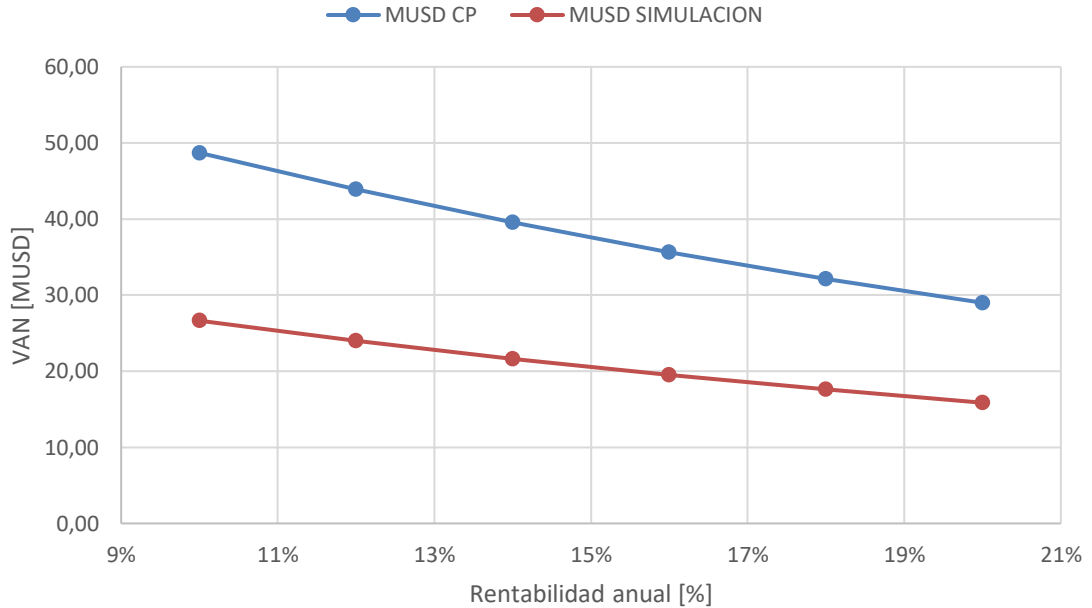
Para el periodo simulado, se tiene una ley promedio Cu de 1,18% con tonelaje asociado aproximadamente de 1,14 Mton. Como ya se pudo observar en acápite anteriores, no se logra el 100% de extracción dada cierta carta de producción (CP). El caso 4 es el más completo de los cuales utilizan velocidades de 7,00 y 11,50 kph. La valorización se realizará mediante VAN, para así determinar las pérdidas de operación, con varias rentabilidades del proyecto para así sensibilizar dicha valoración.

**Tabla 20. Parámetros valorización Caso 4.**

Ítem	Unidades	Valor
Tonelaje CP	ton	1.136.700,00
Ley Cu	%	1,18
Precio del cobre (Noviembre 2017)	USD/lb	3,09
Precio del cobre (Noviembre 2017)	USD/ton	6.812,29
Recuperación metalúrgica	%	90,00
Rentabilidad anual 1	%	10,00
Rentabilidad anual 2	%	12,00
Rentabilidad anual 3	%	14,00
Rentabilidad anual 4	%	16,00
Rentabilidad anual 5	%	18,00
Rentabilidad anual 6	%	20,00
Toneladas de cobre CP	ton	12.071,75
Tonelaje simulado	ton	621.810,00
Toneladas de cobre simulado	ton	6.603,62
Ingresos mes CP	MUSD	82,24
Ingresos mes simulado	MUSD	44,99
Δ de ingresos mes	MUSD	37,25
Costo unitario mina	US/tms	6,90
Costo mina mes CP	USD	83.295,08
Costo mina mes simulado	USD	45.564,98
Beneficio CP	MUSD	82,15
Beneficio simulación	MUSD	44,94
VAN mes/Rentabilidad 1 CP	MUSD	48,70
VAN mes/Rentabilidad 2 CP	MUSD	43,89
VAN mes/Rentabilidad 3 CP	MUSD	39,56
VAN mes/Rentabilidad 4 CP	MUSD	35,66
VAN mes/Rentabilidad 5 CP	MUSD	32,15
VAN mes/Rentabilidad 6 CP	MUSD	29,00
VAN mes/Rentabilidad 1 simulado	MUSD	26,64
VAN mes/Rentabilidad 2 simulado	MUSD	24,01
VAN mes/Rentabilidad 3 simulado	MUSD	21,64
VAN mes/Rentabilidad 4 simulado	MUSD	19,51
VAN mes/Rentabilidad 5 simulado	MUSD	17,59
VAN mes/Rentabilidad 6 simulado	MUSD	15,86

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 19. Valorización de la carta de producción (CP) vs simulación.



Fuente: Elaboración propia.

## IV.8 Caso base 2

### IV.8.1 Validación de inputs

En contra parte al primer caso base, este caso toma como filosofía el cambio de velocidades del equipo estando cargado y descargado, según la siguiente tabla de recuento:

Tabla 21. Variables de operación Caso base 2.

Ítem	Unidad	Valor
Número de equipos	#	7,00
Velocidad equipo cargado	km/hr	12,00
Velocidad equipo descargado	km/hr	12,00
Horas de simulación mensual	horas/mes	463,42
Consumo cargado	litros/hr	-
Consumo descargado	litros/hr	-
Consumo descargado en espera	litros/hr	-

Fuente: Elaboración propia.

#### IV.8.2 Resultados Caso base 2

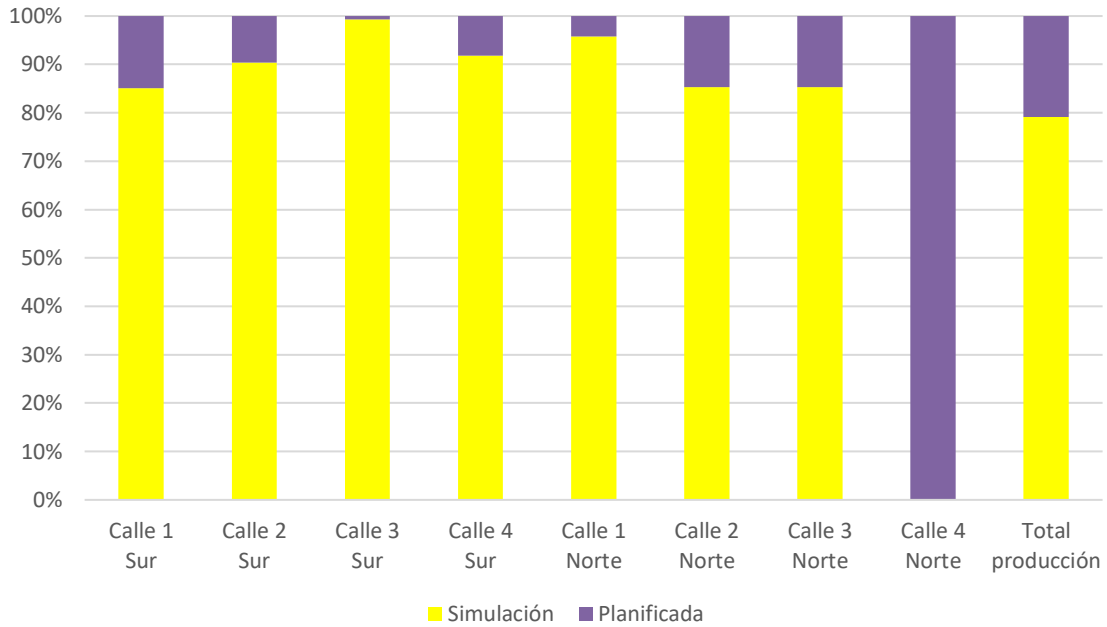
Como el Caso base 1, este caso también necesita una especie de rump-up, conforme al secuenciamiento de equipos que brindarán servicio a la calle 4 Norte, es por ello que inicialmente en este caso se analizará mediante la utilización de 7 calles de producción siendo las 1S, 2S, 3S, 4S, 1N, 2N y 3N. Cuya simulación, aporta la siguiente tabla de resultados:

**Tabla 22. Preparación Caso base 2.**

<b>Calle/Baldadas</b>	<b>Planificadas</b>	<b>Simulación</b>
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	8.166,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	8.681,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	9.536,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	8.815,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	8.703,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	8.104,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	7.926,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	-
<b>Total producción</b>	<b>75.780,00</b>	<b>59.931,00</b>
<b><math>\Delta</math> producción</b>	<b>-15.849,00</b>	<b>-</b>

**Fuente: Elaboración propia.**

**Gráfico 20. Porcentaje de cumplimiento Caso base 2 inicial.**



**Fuente: Elaboración propia.**

El gráfico 20, demuestra que no es posible cumplir la producción (Dejando 15.849,00 baldadas menos que el target CP) bajo las velocidades crucero de los equipos SA. Cabe destacar que esta simulación contempla congestiones del nivel de producción en solo 7 calles, no obstante, el diseño del nivel contribuye a que se produzcan dichas congestiones. Además, el hecho de redirigir los equipos a trabajar 8 calles, producirá una disminución en la cantidad total de baldadas a extraer ya que los equipos más lejanos deberán atravesar la cabecera de extremo a extremo, interrumpiendo las operaciones de los equipos vecinos. Por lo tanto, tomando lo anteriormente señalado, no es conveniente seguir adentrándose en simular bajo dichos parámetros de velocidad, ya que se encontraría dentro de la brecha del Caso base 1.

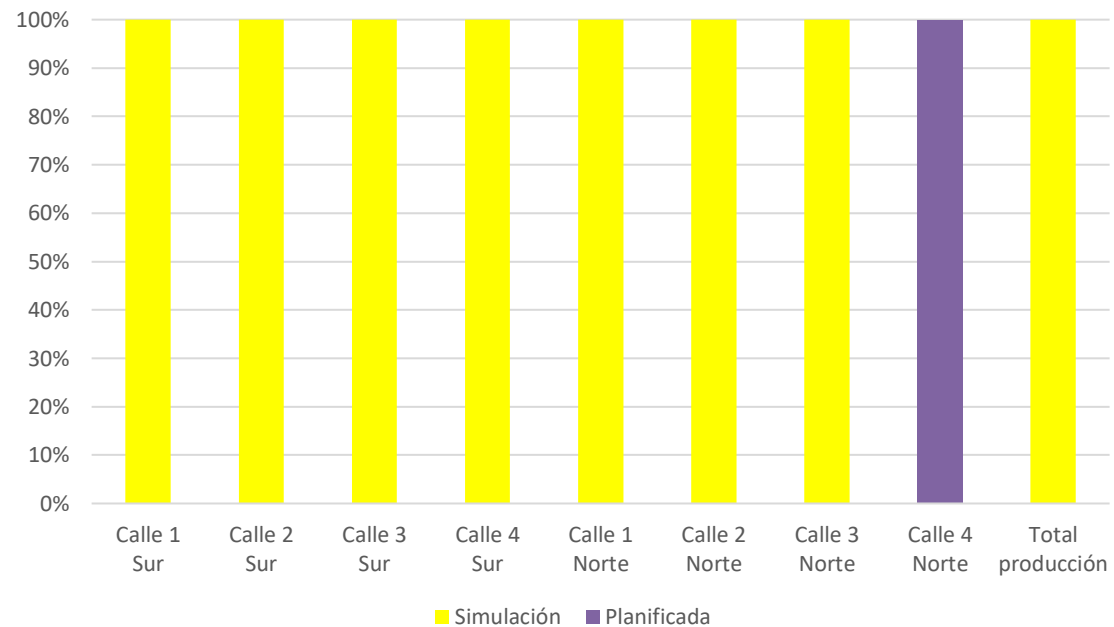
En la búsqueda de hallar el óptimo de velocidad, que pueda satisfacer el CP, se lograron los siguientes datos:

**Tabla 23. Preparación Caso base 2, 17 kph cargado - descargado.**

<b>Calle/Baldadas</b>	<b>Planificadas</b>	<b>Simulación</b>
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	11.129,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	11.826,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	12.959,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	11.888,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	11.916,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	11.151,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	10.814,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	-
<b>Total producción</b>	<b>75.780,00</b>	<b>81.683,00</b>
<b>Δ producción</b>	<b>+5.903,00</b>	<b>-</b>

Fuente: Elaboración propia.

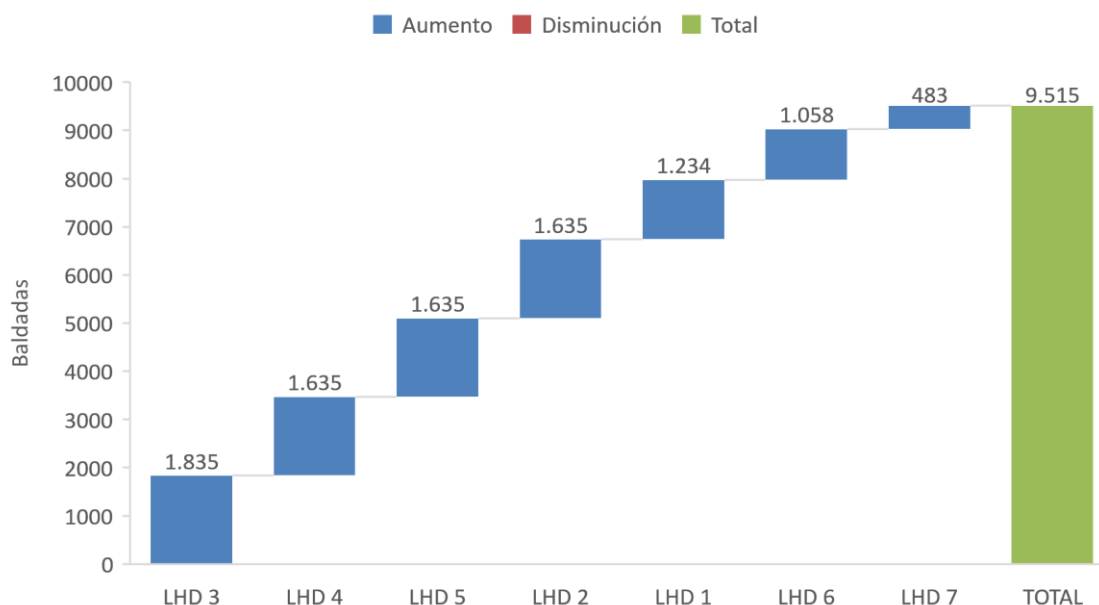
**Gráfico 21. Cumplimiento velocidades optimas 17 kph.**



Fuente: Elaboración propia.

Para poder asignar los equipos a las distintas calles, se dejará un margen de 200 baldadas por equipo, salvo el equipo de la calle 3 Norte, ya que en el caso de preparación del caso no presentó interferencias por congestión al momento de ir a descargar material, dejando un margen especial de 400 baldadas, quedando la siguiente distribución de aporte por equipos para trabajar la calle 4 Norte:

**Gráfico 22. Distribución de baldadas por equipo Caso base 2 final.**



**Fuente: Elaboración propia.**

Ya una vez simulado dichos parámetros, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 24. Resultados simulación Caso base 2, 17 kph.**

Calle/Baldadas	Planificadas	Simulación
Macro Bloque 1 Sur Calle 1 Sur	9.600,00	9.763,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 2 Sur	9.600,00	9.902,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 3 Sur	9.600,00	10.595,00
Macro Bloque 1 Sur Calle 4 Sur	9.600,00	9.942,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 1 Norte	9.082,00	9.862,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 2 Norte	9.494,00	9.998,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 3 Norte	9.289,00	9.446,00
Macro Bloque 1 Norte Calle 4 Norte	9.515,00	9.515,00
<b>Total producción</b>	75.780,00	79.023,00
<b>Δ producción</b>	+3.243,00	-

**Fuente: Elaboración propia.**

La valoración de este caso, ya fue valorada en el gráfico 19, mediante la serie MUSD CP, ya que este caso si es capaz de replicar la planificación al 100%, con un margen de 3.243 baldadas para imprevistos que puedan existir, además de las demoras operacionales ya vistas con anterioridad.



## **V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES**

El diseño del MB 1 SUR y MB 1 NORTE es bien controversial, dada la serie de modificaciones que se le ha realizado a lo largo de la vida del proyecto, desde la operatividad de 8 equipos en el sector, asignándose uno por calle, equipos operando simultáneamente en una calle, y por último 7 equipos para 8 calles de producción. Dado todo lo anteriormente simulado, vale recalcar los siguientes aspectos:

- Diseño del nivel.
- Velocidades de operación.
- Congestión y demoras.
- Propuestas.

### **VI.1.1 Diseño del nivel**

A lo largo de este trabajo, se han observado dos tipos de diseños para el nivel de producción, el primero se basa en lo trabajado en este proyecto, donde una cantidad de equipos descargan sobre un punto de vaciado, ubicados en la cabecera este. Por otra parte, el segundo daba la facilidad de utilizar dos cabeceras para descargar, posibilitando la incorporación de dos equipos por calle.

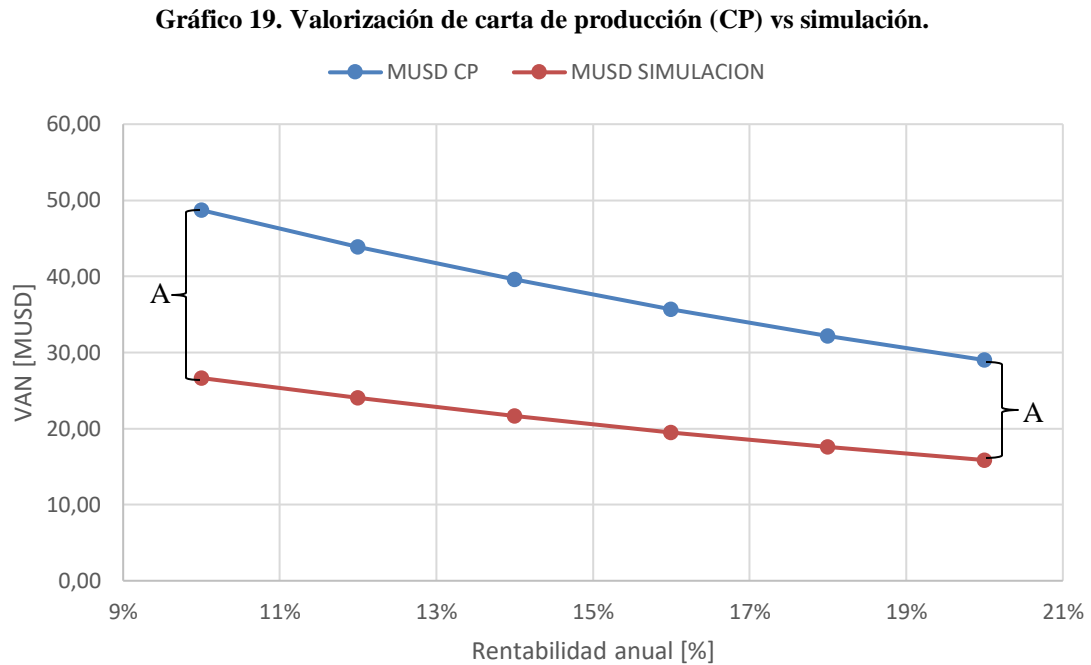
Si bien el diseño presenta dificultades notables en cuanto a distancias, no olvidemos que proponer uno nuevo no cambiará mucho la situación actual, ya que el layout de producción se encuentra en desarrollo, teniendo en si un alto costo para corregir los errores del mismo. Además, pensar que estas infraestructuras, están diseñadas para ser operadas a un horizonte de largo plazo, descartando aún más la posibilidad de cambiar el diseño a uno que utilice menores distancias, por lo menos en el sector de vaciado.

Un diseño más eficiente es el segundo, donde uno de los dos equipos trabaja la mitad de la calle, reduciendo así congestiones que puedan producirse.

Haciendo una revisión al diseño actual, solo se observó que, por congestiones del sector, estas representan un total de 458 baldadas, cifra que mediante un diseño que no interrumpa la producción de equipos aledaños, puede disminuir a las 66 baldadas, en otras palabras, un 85,59%.

## VI.1.2 Velocidades de operación

En materia de velocidades de sistema, el gráfico 19 dejó en claro en que rango se deben mover, en función del caso 2 final con velocidades de 17kph.



**Fuente: Elaboración propia.**

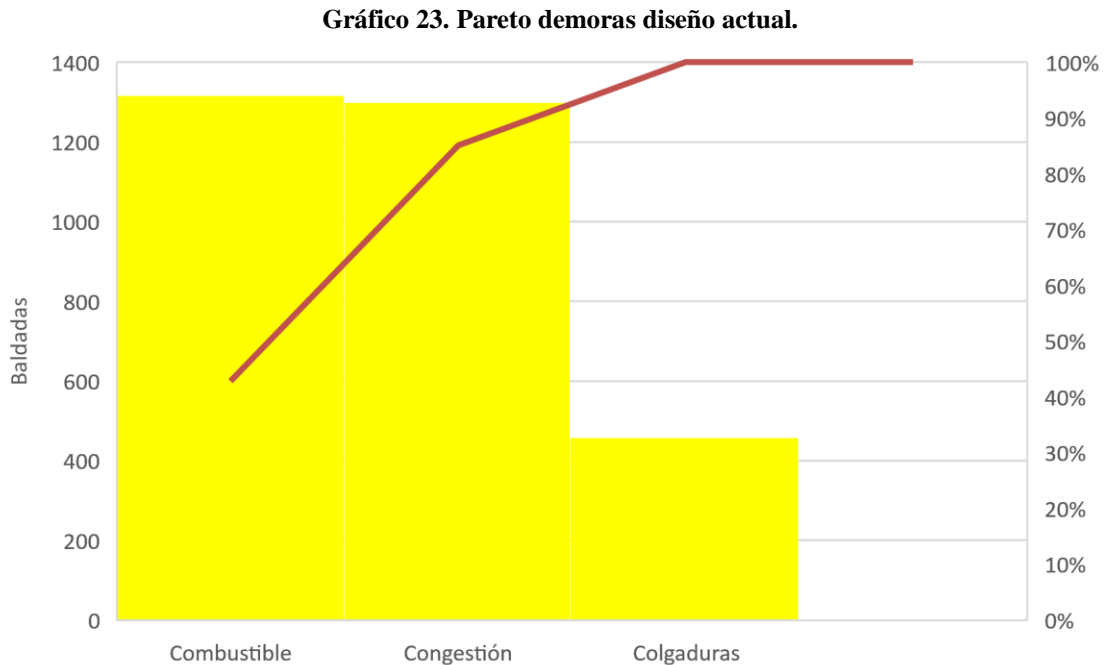
Donde para conseguir el máximo beneficio (MUSD CP), es necesario operar a 17 kph, dejando un área entre las curvas del gráfico (Área A) de velocidades de operación que generarán pérdidas, cuyo límite inferior contiene valores de 7 kph y 11 kph para cargado y descargado.

Operar a grandes velocidades en el sistema implica además un mayor desgaste apresurado de neumáticos, por tanto, se gana por el lado del VAN, pero se pierde la disponibilidad física del equipo dada las horas mantenimiento del equipo.

Además, el riesgo que significa para la operación a grandes velocidades para las infraestructuras y equipos. Ya que al tener un balde más grande (20 yd<sup>3</sup>), se tiene que tener mayor precaución al momento de realizar maniobras. La simulación contempla este apartado de manera idealizada ya que el equipo sigue una guía. Un escenario distinto sería con la utilización de equipos de menor capacidad, ya que tienen mejor maniobrabilidad. Lamentablemente el diseño empuja a operar a grandes velocidades para lograr el target de producción.

### VI.1.3 Congestión y demoras

Como se mencionó con anterioridad el diseño del nivel facilita las congestiones y demoras en la operatividad de los equipos, cuantificadas en el siguiente gráfico.



**Fuente: Elaboración propia.**

La mayor demora se produce por combustible, aunque podría disminuir si se establece un criterio menor al 50% de combustible que queda en el estanque para ir a repostar combustible. Sin embargo, la congestión es evidente por sobre las colgaduras, dando en evidencia el primer punto tratado en el diseño del nivel.

Las congestiones del sector, son tan importantes como lo analizado por el combustible, esto debido a la constante utilización de recursos que interrumpen la operación de equipos contiguos. Según el gráfico 17 las mayores congestiones se presentan en el MB SUR, y menores en el MB NORTE. Esto a pesar de que el MB SUR posee menores distancias, el MB NORTE posee mejor acceso a recursos dada su disposición espacial. No obstante, es más fácil llegar al target de producción en el MB SUR por sus menores distancias.

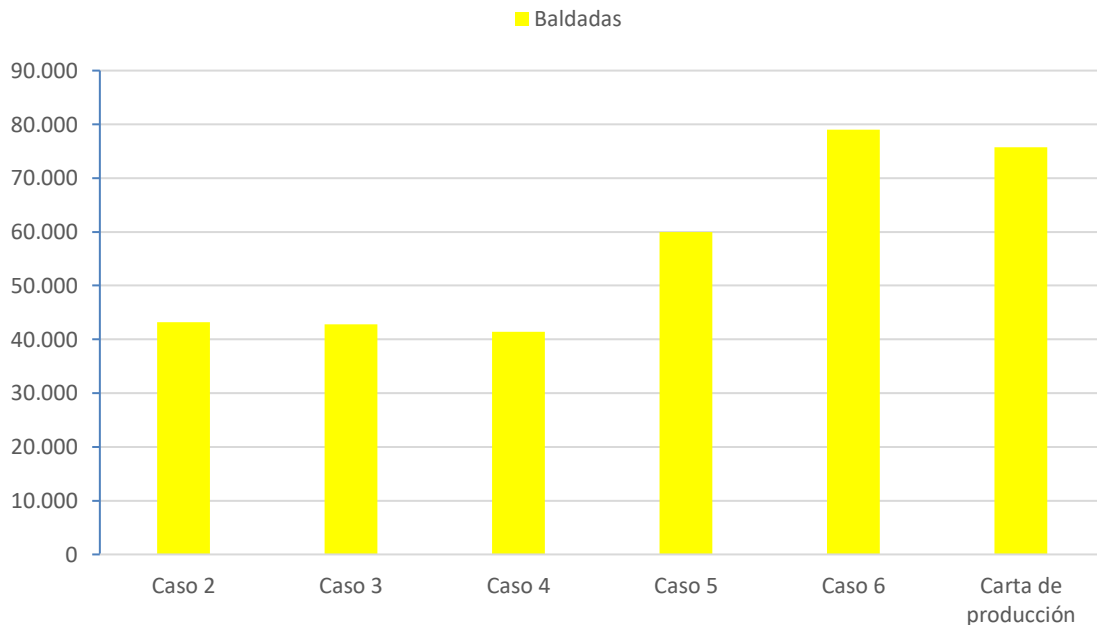
**Tabla 25. Cuadro resumen simulaciones realizadas.**

<b>Simulación</b>	<b>Baldadas</b>	<b>Vel. Carg kph</b>	<b>Vel. Desc kph</b>
Caso 2 – Caso base 1	43.228	7	11
Caso 3 – Caso base 1 + Colgaduras	42.770	7	11
Caso 4 – Caso base 1 + Colg + Comb	41.454	7	11
Caso 5 – Caso base 2 inicial	59.931	12	12
Caso 6 – Caso base 2 final	79.023	17	17
Carta de producción	75.780	-	-

**Fuente: Elaboración propia.**

La tabla 25 muestra a grandes rasgos los resultados de cada uno de los escenarios, donde se emplearon distintas velocidades. El caso 5, ofrece una aproximación más fiel a las condiciones de operación de PMCHS para equipos LHD S.A., sin embargo, está muy lejos del target productivo, cuya valorización se encuentra dentro del “Área A” del gráfico 19, anteriormente revisado, dando una clara evidencia que el diseño del nivel de producción posee una mala distribución en las distancias para concretar el proceso de descarga de los equipos.

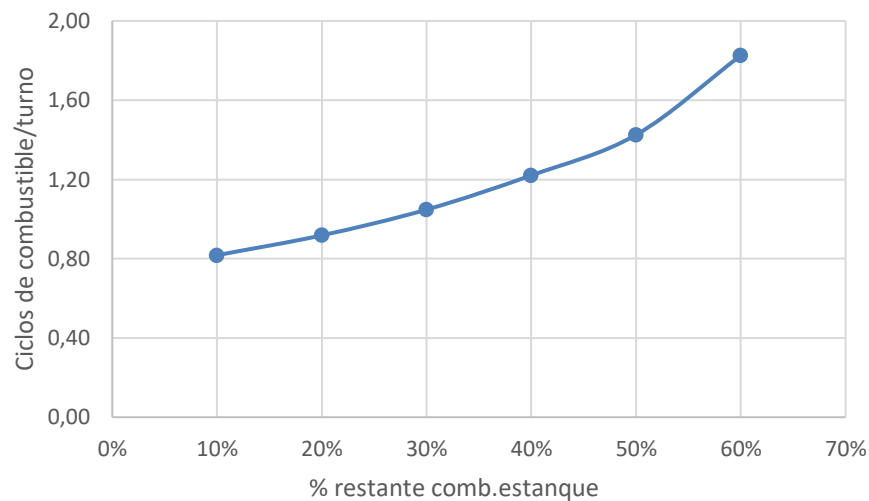
**Gráfico 24. Comparación simulaciones vs Carta de producción.**



**Fuente: Elaboración propia.**

Las simulaciones en general mostraron que en función de la velocidad se pueden obtener diversos resultados de producción, unos más favorables que otros, sin embargo, el uso de combustible, juega un rol preponderante dado el cese de producción por reabastecer el volumen de combustible. El gráfico 23 resume en su totalidad el promedio de los valores que involucran este proceso, dando a ver que mediante el criterio de un 50% para realizar dicha recarga, no es capaz de ofrecer una autonomía para desarrollar el objetivo productivo, es por ello que una solución a dicho problema sería la incorporación de LHD eléctricos, ya que no dependen de este proceso, ofreciendo una mejor autonomía que un equipo de combustión, teniendo mayores beneficios, tanto para la producción como a la ventilación del nivel, ya que al ser eléctricos no producen emisiones de CO2.

**Gráfico 25. Distribución de ciclos de repostaje en función del llenado del estanque.**



**Fuente: Elaboración propia.**

Por otro lado, la congestión demostró ser más preponderante que las colgadas. Si bien las colgadas fueron parametrizadas en el modelo, estas si acotan las horas de simulación dando una aproximación del grado en que estas inciden a la producción. La congestión por otro lado, limita el ingreso de equipos, tanto como la retirada de los mismos, produciendo un atochamiento por la utilización de recursos, produciendo una mayor incidencia que las colgadas.

## GLOSARIO

- **Análisis de sensibilidad.** Estudio que se realiza para conocer que tan volátiles son los datos frente a cambios de sus valores.
- **Atributo.** Característica intransferible que es propia de una entidad, posibilitando de distinción de una de otra.
- **Block Caving.** Método de explotación masivo subterráneo, cuyo flujo de material es inducido verticalmente mediante la gravedad y su extracción puede realizarse por puntos independientes uno de otro.
- **Botadero.** Zona destinada para acopio de material, para PMCHS, es referido a los puntos de vaciado de material.
- **Cabecera.** Infraestructura del nivel de producción, que posibilita el tránsito de personas como de equipos (Preferencialmente), que conecta todas las calles del nivel de producción.
- **Carguío.** Operación unitaria que está enfocada a la recolección de mineral mediante puntos de extracción.
- **CARTIR.** Herramienta de planificación corto plazo, que se emplea para asignar una cantidad de producción medida en baldadas a los operadores de los LHD.
- **Ciclo de acarreo.** Periodo de tiempo, en donde un equipo de carguío y transporte, cumple su función de diseño, cuyo proceso consta en cargar, transportar y vaciar, repitiéndose el periodo.
- **Colgadura.** Fenómeno producido a un fracturamiento fino o grueso, que obstaculiza la extracción del mineral de los puntos de extracción.
- **Congestión de equipos.** Fenómeno de operación, en donde muchos equipos producen pérdidas de tiempo uno a los otros, provocando un atochamiento por teoría de colas.
- **Cruzado de producción.** Infraestructura del nivel de producción, cuya finalidad es dar acceso a las zanjas para poder realizar la extracción del mineral mediante equipos electromecánicos.
- **Cuadrilla de reducción.** Personal especializado, encargado de realizar el fracturamiento secundario mediante explosivos.
- **Disponibilidad física.** Es un tipo de indicador, cuya razón entre las horas disponibles de operación y horas nominales, indican la cantidad de tiempo en el cual un equipo está en condiciones de operación.
- **Enyampe.** Material fino compactado en las paredes de infraestructuras principales de traspaso de mineral, cuyo impacto es negativo dada la reducción del área por donde circula el mineral.
- **Estanque.** Volumen metálico definido, cuya finalidad es confinar un volumen de combustible.
- **Fragmentación primaria.** Fenómeno inducido por la propagación del hundimiento (Caving), produciendo una reducción granulométrica de las rocas circundantes.

- **Fragmentación secundaria.** Labor de destranque, que se realiza barrenando y explotando un volumen de roca categorizada por sobretamaño.
- **Interferencia operacional.** Incidencia que es producida por la operación, cuya incidencia se ve reflejada en los niveles de producción y cumplimiento de metas.
- **KPI.** Instrumento de medición que da una orientación numérica, cuyo propósito es poder estandarizar y controlar procesos productivos.
- **LHD.** Equipo de bajo perfil, con una función de diseño específica, relacionada con el carguío, transporte y vaciado de material.
- **Petróleo.** Combustible en estado líquido, de composición orgánica, que es empleado para sustentar la combustión interna de los vehículos mineros.
- **Planificación CP.** Manera de organizar la productividad, con una base de corto plazo, generalmente diaria.
- **Planificación MP.** Manera de organizar la productividad, con una base de tiempo en periodo de 1 a 2 meses.
- **Planificación LP.** Manera de organizar la productividad, con una base de tiempo anual.
- **Proyecto.** Conjunto de actividades y recursos que logran materializar una idea, teniendo un inicio y fin.
- **Punto de extracción.** Infraestructura que sirve de acopio al mineral que cae descendente por efecto de la gravedad.
- **Recurso.** Bien tangible o intangible que tiene como finalidad aportar a la producción.
- **Simulación.** Serie de procesos que pueden modelarse en un tiempo acotado, cuyo objetivo es comprender riesgos y variables de un sistema.
- **Transporte.** Operación unitaria, con el propósito de trasladar mineral de un punto a otro, mediante un equipo especializado.
- **VAN.** Valorización de flujos futuros a un valor actual neto.
- **Variable.** Propiedad característica de un sistema, que puede ser manipulada por entidades del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BÓRQUEZ, S. H. (2006). *SIMULACIÓN DEL IMPACTO DE INTERFERENCIAS OPERACIONALES PARA LA PLANIFICACIÓN DE PRODUCCIÓN*. UNIVERSIDAD DE CHILE, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS. SANTIAGO DE CHILE: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- CODELCO. (2017). *ENTREGA DE RESULTADOS TERCER TRIMESTRE DE 2017*. CODELCO.
- CORREA, C. H. (2016). *INCLUSIÓN DE INTERFERENCIAS OPERACIONALES DE ORIGEN GEOTÉCNICO EN PLANIFICACIÓN MINERA DE PANEL CAVING*. UNIVERSIDAD DE CHILE, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS. SANTIAGO DE CHILE: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- FORTE, J. F. (2005). *GUIA PRÁCTICA PARA LA SIMULACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES*. CENTRO TECNOLÓGICO DEL MUEBLE Y LA MADERA DE LA REGIÓN DE MURCIA.
- JEREZ, F. A. (2016). *ASIGNACIÓN DINÁMICA DE OPERADORES DE LHD PARA OPERACIÓN A DISTANCIA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA*. UNIVERSIDAD DE CHILE, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL. SANTIAGO DE CHILE: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- RUBIO, E. (2006). *BLOCK CAVE MINE INFRASTRUCTURE RELIABILITY APPLIED TO PRODUCTION PLANNING*. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, THE FACULTY OF GRADUATE STUDIES. CANADA: THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.
- SABATER, J. P. (2016). *APLICANDO TEORÍA DE COLAS EN DIRECCIÓN DE OPERACIONES*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA , DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS. VALENCIA: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- SANDVIK. (2013). *TECHNICAL SPECIFICATION SANDVIK LH517*. SANDVIK MINING AND CONSTRUCTION. TURKU FINLAND: SANDVIK MINING AND CONSTRUCTION.
- VOLVO PENTA INDUSTRIAL DIESEL. (2013). *TAD1341VE*. AB VOLVO PENTA. GÖTEBORG, SWEDEN: AB VOLVO PENTA.



VOLVO PENTA. (s.f.). *TAD1341VE TECHNICAL DATA*. AB VOLVO PENTA. AB VOLVO PENTA.

WRIGHTON, M. B. (2016). *FORMULACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN OPERACIONAL PARA LA CONTRUCCIÓN DE LA FUTURA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA*. UNIVERSIDAD DE CHILE, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL. SANTIAGO DE CHILE: UNIVERSIDAD DE CHILE.

## **ANEXOS**

### **Anexo 1. Teoría de colas**

Básicamente un sistema de colas es la manera de gestionar un conjunto de recursos, teniendo características propias siendo:

- Patrón de llegada de los clientes.
- Patrón de servicio de los servidores.
- Disciplina de cola.
- Capacidad del sistema.
- Número de canales de servicio.
- Número de etapas de servicio.

El patrón de llegada de los clientes, es estocástica, es decir la llegada depende de una cierta variable aleatoria, teniendo en cuenta si dicha variable llega individualmente o simultáneamente. Para los efectos de la simulación cada variable anteriormente descrita, es símil a una entidad LHD, ya que van utilizando recursos, siempre atendándose de manera individual. Por ejemplo, para hacer el cambio de calle, el equipo LHD 1 debe solicitar un recurso que es entregado por una especie de casilla, quien una vez entregado el recurso al LHD 1, ningún otro equipo podrá solicitar dicho recurso en la casilla, ya que este se encuentra siendo ocupado por el LHD 1, logrando así un orden del sistema, además de prever incidentes operacionales como el contacto entre equipos. Teniendo eso ya aclarado, dentro del mismo ejemplo el equipo debe atravesar el nivel de producción desde el extremo izquierdo al derecho, teniendo que interrumpir las operaciones de vaciado de todas las calles por donde el equipo deba pasar, teniendo preferencia avance, el equipo que tome primero el recurso. La filosofía del patrón de llegada en los equipos del modelo va orientada a variables como velocidad de equipos y uso de combustible principalmente, ya que esas variables las que inician el proceso de colas en el sistema, pudiendo ser atendidas antes o después.

El patrón de servicio de cola, se define como el tiempo en el cual un “cliente” hace uso de un recurso, pudiendo aplazar la entrega del mismo recurso a otro “cliente”. En la práctica, los tiempos en los cuales un equipo atraviesa la cabecera, no son los mismos, como si fuese otro equipo quien atravesase la cabecera, esto se debe por el hecho de que, al momento de querer atravesarla, existe una cantidad de equipos en producción, que toman y liberan recursos. Los cuales representan para el equipo una demora para él, dado que puede haberse no liberado un recurso y este no pueda seguir su camino, entrando en una espera constante hasta que se libere dicho recurso, es por eso que, bajo esa premisa, todos los equipos presentan tiempos de servicio distintos entre si. Un caso más extremo se produce cuando un equipo quiere ir a cargar combustible y no puede realizar esa tarea, dado que

hay otro equipo que utiliza dicho recurso, produciendo que el equipo en espera no pueda abandonar dicha posición, produciendo demoras a los equipos que quieran ir a vaciar mineral a los puntos de vaciado. Teniendo ya liberado el recurso este podrá ir a cargar combustible.

La disciplina de la cola, se define como la manera en que se ordenan los “clientes” 1 momento de ser atendidos, pudiendo encontrarse diferentes modelos que logran conseguir dicho orden. El primero es el modelo FIFO, que distribuye el recurso al primero que llega, esto basado en la filosofía First in – First out, además de este modelo se encuentra el LIFO, atendiendo primero al último que quiera tomar el recurso, Last in – First out. Por lo tanto, en la simulación el modelo a utilizar es el FIFO, para dar prioridad a los LHD, medida vayan tomando tareas.

El sistema de colas posee un límite en cuanto al número de “clientes” que pueda tomar, esto puede producir una saturación del sistema si es mal operada. Para el caso de la simulación lo que se busca es recrear las condiciones reales de operación, siendo este el motivo por el cual se producen demoras de tiempo en el nivel de producción. Lo anterior no va directamente relacionado a las distancias de transporte de material, sino más bien, a un problema de congestión al momento de realizar el proceso de descarga de mineral, donde inevitablemente un equipo deberá esperar su turno para poder descargar. Además, en materia de repostaje de combustible, solo un equipo puede realizar dicho proceso a la vez.

Los números de canales de servicio, hacen referencia a cuantas colas se tienen para un cierto número de canales. Un canal en un ejemplo práctico, puede ser una cantidad determinada de cajeros en un supermercado, pudiendo existir diferentes configuraciones de cola/canal, una cola - 3 cajeros, 3 colas – 3 cajeros. En la simulación esto se orienta más al segundo ejemplo, ya que solo un canal (Punto de vaciado) posee la habilidad de orientar una final de equipos LHD en el sentido de botada.

Finalmente, las etapas del servicio, se describe como las etapas que pueda presentar una cola, pudiendo ser unietapa o multietapa. Las primeras son las más simples, pudiendo ser atendidos por un solo canal, por el contrario, las multietapas son más complejas, ya que requieren la utilización de más de un canal para ser resueltas. Por ejemplo, esta simulación cuenta con un servicio de una etapa, donde se asigna un recurso al LHD hasta que abandona el punto de vaciado. Diferente sería si al mismo ejemplo se le añade al sistema una revisión del equipo por cada descarga que haga, o algún añadido similar que signifique una segunda intervención del equipo.

## Anexo 2. Validación del modelo de simulación mediante NETWORK

Para poder corroborar la validez del modelo en cuanto a las dimensiones del nivel de producción se deben contrastar las respectivas distancias del plano DWG con la NETWORK. A continuación, se dejará la tabla de valores de distancia indexada a la NETWORK.

**Tabla 26. NETWORK PMCHS.**

Name	Type	Beginning Intersection	Ending Intersection	Nar	Begin	Endir	Number Of Zones	Zone Length
nlimb1SCalle1SZanja26Saimb1SCalle1SZanja26C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja26S	imb1SCalle1SZanja26C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja26Caimb1SCalle1SZanja25C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja26C	imb1SCalle1SZanja25C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja25Saimb1SCalle1SZanja25C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja25S	imb1SCalle1SZanja25C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja25Caimb1SCalle1SZanja24C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja25C	imb1SCalle1SZanja24C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja24Saimb1SCalle1SZanja24C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja24S	imb1SCalle1SZanja24C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja24Caimb1SCalle1SZanja24N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja24C	imb1SCalle1SZanja24N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja24Caimb1SCalle1SZanja23C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja24C	imb1SCalle1SZanja23C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja23Saimb1SCalle1SZanja23C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja23S	imb1SCalle1SZanja23C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja23Caimb1SCalle1SZanja23N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja23C	imb1SCalle1SZanja23N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja23Caimb1SCalle1SZanja22C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja23C	imb1SCalle1SZanja22C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja22Saimb1SCalle1SZanja22C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja22S	imb1SCalle1SZanja22C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja22Caimb1SCalle1SZanja22N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja22C	imb1SCalle1SZanja22N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja22Caimb1SCalle1SZanja21C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja22C	imb1SCalle1SZanja21C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja21Saimb1SCalle1SZanja21C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja21S	imb1SCalle1SZanja21C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja21Caimb1SCalle1SZanja21N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja21C	imb1SCalle1SZanja21N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja21Caimb1SCalle1SZanja20C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja21C	imb1SCalle1SZanja20C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja20Saimb1SCalle1SZanja20C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja20S	imb1SCalle1SZanja20C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja20Caimb1SCalle1SZanja20N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja20C	imb1SCalle1SZanja20N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja20Caimb1SCalle1SZanja19C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja20C	imb1SCalle1SZanja19C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja19Saimb1SCalle1SZanja19C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja19S	imb1SCalle1SZanja19C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja19Caimb1SCalle1SZanja19N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja19C	imb1SCalle1SZanja19N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja19Caimb1SCalle1SZanja18C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja19C	imb1SCalle1SZanja18C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja18Saimb1SCalle1SZanja18C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja18S	imb1SCalle1SZanja18C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja18Caimb1SCalle1SZanja18N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja18C	imb1SCalle1SZanja18N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja18Caimb1SCalle1SZanja17C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja18C	imb1SCalle1SZanja17C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja17Saimb1SCalle1SZanja17C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja17S	imb1SCalle1SZanja17C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja17Caimb1SCalle1SZanja17N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja17C	imb1SCalle1SZanja17N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja17Caimb1SCalle1SZanja16C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja17C	imb1SCalle1SZanja16C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja16Saimb1SCalle1SZanja16C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja16S	imb1SCalle1SZanja16C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja16Caimb1SCalle1SZanja16N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja16C	imb1SCalle1SZanja16N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja16Caimb1SCalle1SZanja15C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja16C	imb1SCalle1SZanja15C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja15Saimb1SCalle1SZanja15C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja15S	imb1SCalle1SZanja15C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja15Caimb1SCalle1SZanja15N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja15C	imb1SCalle1SZanja15N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja15Caimb1SCalle1SZanja14C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja15C	imb1SCalle1SZanja14C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja14Saimb1SCalle1SZanja14C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja14S	imb1SCalle1SZanja14C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja14Caimb1SCalle1SZanja14N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja14C	imb1SCalle1SZanja14N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja14Caimb1SCalle1SZanja13C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja14C	imb1SCalle1SZanja13C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja13Saimb1SCalle1SZanja13C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja13S	imb1SCalle1SZanja13C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja13Caimb1SCalle1SZanja13N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja13C	imb1SCalle1SZanja13N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja13Caimb1SCalle1SZanja12C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja13C	imb1SCalle1SZanja12C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja12Saimb1SCalle1SZanja12C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja12S	imb1SCalle1SZanja12C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja12Caimb1SCalle1SZanja12N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja12C	imb1SCalle1SZanja12N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja12Caimb1SCalle1SZanja11C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja12C	imb1SCalle1SZanja11C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja11Saimb1SCalle1SZanja11C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja11S	imb1SCalle1SZanja11C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja11Caimb1SCalle1SZanja11N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja11C	imb1SCalle1SZanja11N		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja11Caimb1SCalle1SZanja10C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja11C	imb1SCalle1SZanja10C		0		16,00	1
nlimb1SCalle1SZanja10Saimb1SCalle1SZanja10C	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja10S	imb1SCalle1SZanja10C		0		9,00	1
nlimb1SCalle1SZanja10Caimb1SCalle1SZanja10N	Bidirectional	imb1SCalle1SZanja10C	imb1SCalle1SZanja10N		0		9,00	1















nlimb1NCalle4NZanja6Caib1NCalle4NZanja5C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja6C	imb1NCalle4NZanja5C	0	16,00	1
nlimb1NCalle4NZanja5Saib1NCalle4NZanja5C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja5S	imb1NCalle4NZanja5C	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja5Caib1NCalle4NZanja5N	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja5C	imb1NCalle4NZanja5N	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja5Caib1NCalle4NZanja4C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja5C	imb1NCalle4NZanja4C	0	16,00	1
nlimb1NCalle4NZanja4Saib1NCalle4NZanja4C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja4S	imb1NCalle4NZanja4C	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja4Caib1NCalle4NZanja4N	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja4C	imb1NCalle4NZanja4N	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja4Caib1NCalle4NZanja3C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja4C	imb1NCalle4NZanja3C	0	16,00	1
nlimb1NCalle4NZanja3Saib1NCalle4NZanja3C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja3S	imb1NCalle4NZanja3C	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja3Caib1NCalle4NZanja3N	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja3C	imb1NCalle4NZanja3N	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja3Caib1NCalle4NZanja2C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja3C	imb1NCalle4NZanja2C	0	16,00	1
nlimb1NCalle4NZanja2Saib1NCalle4NZanja2C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja2S	imb1NCalle4NZanja2C	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja2Caib1NCalle4NZanja2N	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja2C	imb1NCalle4NZanja2N	0	9,00	1
nlimb1NCalle4NZanja2Caib1NCalle4NZanja1C	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja2C	imb1NCalle4NZanja1C	0	16,00	1
nlimb1NCalle4NZanja1Caib1NCalle4NZanja1N	Bidirectional	imb1NCalle4NZanja1C	imb1NCalle4NZanja1N	0	9,00	1
nlimb1SCalle1SConect1Saib1SCalle1SZanja26C	Bidirectional	imb1SCalle1SConect1S	imb1SCalle1SZanja26C	0	11,00	1
nlimb1SCalle2SCabeceraaib1SCalle2SConect2S	Bidirectional	imb1SCalle2SCabecera	imb1SCalle2SConect2S	0	10,00	1
nlimb1NCalle3NCabeceraaib1NCalle3NConect3	Bidirectional	imb1NCalle3NCabecera	imb1NCalle3NConect3	0	14,00	1
nlimb1NCalle4NConect4Naib1NCalle4NZanja18	Bidirectional	imb1NCalle4NConect4	imb1NCalle4NZanja18C	0	11,00	1
nlimbPuntoChancadoAaibPuntoChancadoB	Bidirectional	imbPuntoChancadoA	imbPuntoChancadoB	0	15,00	1
nlimbPuntoChancadoCaibPuntoChancadoD	Bidirectional	imbPuntoChancadoC	imbPuntoChancadoD	0	40,00	1
nlimbPuntoChancadoFaibPuntoChancadoG	Bidirectional	imbPuntoChancadoF	imbPuntoChancadoG	0	15,00	1
nlimbPuntoChancadoHaibPuntoChancadoI	Bidirectional	imbPuntoChancadoH	imbPuntoChancadoI	0	24,00	1
nlimb1SCalle1SConect1SaibEspera1	Bidirectional	imb1SCalle1SConect1S	imbEspera1	0	32,00	1
nlimbEspera1aib1SCalle2SConect2S	Bidirectional	imbEspera1	imb1SCalle2SConect2S	0	5,00	1
nlimb1SCalle2SZanja25CaibEspera2	Bidirectional	imb1SCalle2SZanja25C	imbEspera2	0	22,00	1
nlimbEspera2aib1SCalle2SConect2S	Bidirectional	imbEspera2	imb1SCalle2SConect2S	0	5,00	1
nlimb1SCalle2SCabeceraaibEspera3	Bidirectional	imb1SCalle2SCabecera	imbEspera3	0	5,00	1
nlimbEspera3aibPuntoChancadoA	Bidirectional	imbEspera3	imbPuntoChancadoA	0	59,00	1
nlimb1SCalle2SCabeceraaibEspera4	Bidirectional	imb1SCalle2SCabecera	imbEspera4	0	5,00	1
nlimbEspera4aibLoop1	Bidirectional	imbEspera4	imbLoop1	0	22,00	1
nlimbLoop1aib1SCalle3SCabecera	Bidirectional	imbLoop1	imb1SCalle3SCabecera	0	5,00	1
nlimbEspera5aib1SCalle3SCabecera	Bidirectional	imbEspera5	imb1SCalle3SCabecera	0	5,00	1
nlimbEspera5aib1SCalle3SZanja24C	Bidirectional	imbEspera5	imb1SCalle3SZanja24C	0	31,00	1
nlimbEspera6aib1SCalle3SCabecera	Bidirectional	imbEspera6	imb1SCalle3SCabecera	0	5,00	1
nlimbEspera6aibEspera7	Bidirectional	imbEspera6	imbEspera7	0	22,00	1
nlimb1SCalle4SCabeceraaibEspera7	Bidirectional	imb1SCalle4SCabecera	imbEspera7	0	5,00	1
nlimbPuntoChancadoJaibAccesoProduccionT	Bidirectional	imbPuntoChancadoJ	imbAccesoProduccionT	0	81,00	1
nlimbPetroleraPuntoAaibPetroleraPuntoB	Bidirectional	imbPetroleraPuntoA	imbPetroleraPuntoB	0	81,00	1
nlimbCruzadoProduccionPrincipalTramoAaibPe	Bidirectional	imbCruzadoProduccion	imbPetroleraPuntoA	0	19,00	1
nlimbAccesoProduccionTramoAaibCruzadoProd	Bidirectional	imbAccesoProduccionT	imbCruzadoProduccion	0	223,00	1
nlimbPetroleraPuntoAaibPetroleraPuntoC	Bidirectional	imbPetroleraPuntoA	imbPetroleraPuntoC	0	28,00	1
nlimbPetroleraPuntoCaibPetroleraPuntoD	Bidirectional	imbPetroleraPuntoC	imbPetroleraPuntoD	0	35,00	1
nlimbPetroleraPuntoDaibPetroleraPuntoB	Bidirectional	imbPetroleraPuntoD	imbPetroleraPuntoB	0	28,00	1
nlimbPetroleraPuntoBaibCruzadoProduccionPri	Bidirectional	imbPetroleraPuntoB	imbCruzadoProduccion	0	96,00	1
nlimbCruzadoProduccionPrincipalTramoBaibEst	Bidirectional	imbCruzadoProduccion	imbEstacionamientos1	0	90,00	1
nlimbEstacionamientos1aibLoteA	Bidirectional	imbEstacionamientos1	imbLoteA	0	76,00	1
nlimbLoteAaibLoteB	Bidirectional	imbLoteA	imbLoteB	0	28,00	1
nlimbLoteBaibLoteC	Bidirectional	imbLoteB	imbLoteC	0	28,00	1
nlimbLoteCaibLoteD	Bidirectional	imbLoteC	imbLoteD	0	28,00	1
nlimbEstacionamientos1aibEstacionamientos2	Bidirectional	imbEstacionamientos1	imbEstacionamientos2	0	58,00	1
nlimbEstacionamientos2aibLoteE	Bidirectional	imbEstacionamientos2	imbLoteE	0	80,00	1
nlimbLoteEaibLoteF	Bidirectional	imbLoteE	imbLoteF	0	28,00	1
nlimbLoteFaibLoteG	Bidirectional	imbLoteF	imbLoteG	0	28,00	1
nlimbLoteGaibLoteH	Bidirectional	imbLoteG	imbLoteH	0	28,00	1
nlimbLoteAaibEstacionLHD1	Bidirectional	imbLoteA	imbEstacionLHD1	0	25,00	1
nlimbLoteBaibEstacionLHD2	Bidirectional	imbLoteB	imbEstacionLHD2	0	25,00	1
nlimbLoteCaibEstacionLHD3	Bidirectional	imbLoteC	imbEstacionLHD3	0	25,00	1
nlimbLoteDaibEstacionLHD4	Bidirectional	imbLoteD	imbEstacionLHD4	0	25,00	1
nlimbLoteEaibEstacionLHD5	Bidirectional	imbLoteE	imbEstacionLHD5	0	25,00	1
nlimbLoteFaibEstacionLHD6	Bidirectional	imbLoteF	imbEstacionLHD6	0	25,00	1
nlimbLoteGaibEstacionLHD7	Bidirectional	imbLoteG	imbEstacionLHD7	0	25,00	1

nlimbLoteHaimbEstacionLHD8	Bidireccional	imbLoteH	imbEstacionLHD8	0	25,00	1	1.0
nlimb1SCalle4SCabeceraimbEspera28	Bidireccional	imb1SCalle4SCabecera	imbEspera28	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera28aimbEspera8	Bidireccional	imbEspera28	imbEspera8	0	22,00	1	1.0
nlimbEspera8aimb1NCalle1NCabecera	Bidireccional	imbEspera8	imb1NCalle1NCabecera	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoCaimbEspera26	Bidireccional	imbPuntoChancadoC	imbEspera26	0	7,00	1	1.0
nlimbEspera26aimb1SCalle3SCabecera	Bidireccional	imbEspera26	imb1SCalle3SCabecera	0	5,00	1	1.0
nlimb1NCalle1NCabeceraimbEspera9	Bidireccional	imb1NCalle1NCabecera	imbEspera9	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera9aimb1NCalle1NZanja21C	Bidireccional	imbEspera9	imb1NCalle1NZanja21C	0	42,00	1	1.0
nlimb1NCalle1NCabeceraimbEspera10	Bidireccional	imb1NCalle1NCabecera	imbEspera10	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera10aimbEspera12	Bidireccional	imbEspera10	imbEspera12	0	22,00	1	1.0
nlimbEspera12aimb1NCalle2NCabecera	Bidireccional	imbEspera12	imb1NCalle2NCabecera	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoEaimbEspera11	Bidireccional	imbPuntoChancadoE	imbEspera11	0	30,00	1	1.0
nlimbEspera11aimb1NCalle1NCabecera	Bidireccional	imbEspera11	imb1NCalle1NCabecera	0	5,00	1	1.0
nlimb1NCalle2NCabeceraimbEspera13	Bidireccional	imb1NCalle2NCabecera	imbEspera13	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera13aimb1NCalle2NZanja20C	Bidireccional	imbEspera13	imb1NCalle2NZanja20C	0	40,00	1	1.0
nlimb1NCalle2NCabeceraaimbEspera14	Bidireccional	imb1NCalle2NCabecera	imbEspera14	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera14aimbEspera16	Bidireccional	imbEspera14	imbEspera16	0	22,00	1	1.0
nlimbEspera16aimb1NCalle3NCabecera	Bidireccional	imbEspera16	imb1NCalle3NCabecera	0	5,00	1	1.0
nlimb1NCalle3NConect3NaimbEspera17	Bidireccional	imb1NCalle3NConect3	imbEspera17	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera17aimb1NCalle3NZanja19C	Bidireccional	imbEspera17	imb1NCalle3NZanja19C	0	25,00	1	1.0
nlimb1NCalle3NConect3NaimbEspera18	Bidireccional	imb1NCalle3NConect3	imbEspera18	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera18aimb1NCalle4NConect4N	Bidireccional	imbEspera18	imb1NCalle4NConect4N	0	31,00	1	1.0
nlimb1NCalle3NCabeceraaimbEspera19	Bidireccional	imb1NCalle3NCabecera	imbEspera19	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera19aimbPuntoChancadoL	Bidireccional	imbEspera19	imbPuntoChancadoL	0	19,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoLaimbEspera20	Bidireccional	imbPuntoChancadoL	imbEspera20	0	31,00	1	1.0
nlimbEspera20aimbPuntoChancadoH	Bidireccional	imbEspera20	imbPuntoChancadoH	0	5,00	1	1.0
nlimb1NCalle2NCabeceraaimbEspera15	Bidireccional	imb1NCalle2NCabecera	imbEspera15	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera15aimbEspera21	Bidireccional	imbEspera15	imbEspera21	0	32,00	1	1.0
nlimbEspera21aimbPuntoChancadoH	Bidireccional	imbEspera21	imbPuntoChancadoH	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoLaimbEspera25	Bidireccional	imbPuntoChancadoL	imbEspera25	0	8,00	1	1.0
nlimbEspera25aimbPuntoChancadoJ	Bidireccional	imbEspera25	imbPuntoChancadoJ	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoKaimbEspera23	Bidireccional	imbPuntoChancadoK	imbEspera23	0	29,00	1	1.0
nlimbEspera23aimbPuntoChancadoJ	Bidireccional	imbEspera23	imbPuntoChancadoJ	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoFaimbEspera24	Bidireccional	imbPuntoChancadoF	imbEspera24	0	26,00	1	1.0
nlimbEspera24aimbPuntoChancadoE	Bidireccional	imbEspera24	imbPuntoChancadoE	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoEaimbEspera27	Bidireccional	imbPuntoChancadoE	imbEspera27	0	15,00	1	1.0
nlimbEspera27aimbPuntoChancadoJ	Bidireccional	imbEspera27	imbPuntoChancadoJ	0	5,00	1	1.0
nlimbPuntoChancadoJaimbEspera22	Bidireccional	imbPuntoChancadoJ	imbEspera22	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera22aimbAccesoProduccionTramoA	Bidireccional	imbEspera22	imbAccesoProduccionT	0	76,00	1	1.0
nlimb1SCalle4SCabeceraaimbEspera29	Bidireccional	imb1SCalle4SCabecera	imbEspera29	0	5,00	1	1.0
nlimbEspera29aimb1SCalle4SZanja23C	Bidireccional	imbEspera29	imb1SCalle4SZanja23C	0	29,00	1	1.0

Fuente: Elaboración propia.

### Anexo 3. Valor actual neto (VAN)

El cálculo de la valorización se realizó mediante el VAN del flujo en el periodo estudiado. Cabe resaltar que el cálculo de VAN no contempla inversión inicial, ni los demás periodos del proyecto.

El VAN, es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder en esa inversión. Su estructura es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t}$$

Ecuación 5. VAN

Dónde:

- $I_0$  es la inversión inicial del proyecto ( $t = 0$ ).
- $n$  es el número de periodos a actualizar.
- $F_t$  es el flujo de dinero para cada periodo de tiempo.
- $k$  es el tipo de descuento a aplicar.

Como es una herramienta de evaluación se tienen los siguientes escenarios:

- $VAN > 0$ , dando a ver que el proyecto es viable según los beneficios obtenidos.
- $VAN = 0$ , donde el proyecto no generará ganancias ni pérdidas.
- $VAN < 0$ , el proyecto no es viable ya que generará pérdidas a corto y largo plazo, debiendo ser rechazado.