



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

**USO DE SIMULACIÓN PARA MEDIR EL IMPACTO ECONÓMICO EN UNA
RECONCILIACIÓN DE MINERAL**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN MINERÍA

JOSÉ LUIS ZAVALETA VELAZCO

PROFESOR GUÍA:
JOSÉ CHARANGO FERNANDO MUNIZAGA ROSAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS
CRISTIAN ESPINOZA CAMUS
JUAN MAYHUA PALOMINO

SANTIAGO DE CHILE

2022

USO DE SIMULACION PARA MEDIR EL IMPACTO ECONOMICO EN UNA RECONCILIACION DE MINERAL

La minería es una industria que se basa en la extracción de los recursos minerales mediante procesos que constantemente vienen siendo optimizados o mejorados para llegar a la excelencia operacional, es por ello que la representación de la realidad mediante modelos computacionales se torna vital para lograr una predicción acertada de lo que va a pasar en el futuro.

Existen muchas técnicas y softwares especializados en el mercado que permiten poder realizar predicciones, pero de forma general y resulta complicado adaptar estas herramientas a la realidad de una mina en específico, por lo que este trabajo busca proponer una metodología robusta para realizar una reconciliación operacional midiendo el impacto económico de un proceso de manejo de materiales en una mina a cielo abierto.

En la actualidad la manera de gestionar el cumplimiento de los objetivos de un plan minero, se basa en la comparación de kpi's planeados vs reales, pero la limitación de los modelos existentes es que solo consideran riesgo e incertidumbre en los procesos geológicos y metalúrgicos, pero no en el proceso de producción mina y de movimiento de materiales, por lo que este trabajo realizara una reconciliación operacional basada en el uso de simulación de eventos discretos para poder minimizar el impacto económico que se pueda producir por una desviación en el proceso.

El objetivo principal de este trabajo es poder predecir la ley y el tonelaje que se va enviar a la chancadora primaria para planes de minado a corto plazo, de una semana de duración y realizar una reconciliación operacional para evaluar los resultados obtenidos en una mina a cielo abierto.

Finalmente, la reconciliación operacional no es contabilidad, el objetivo no es lograr que dos conjuntos de números se equilibren, lo que a menudo es visto como un fin en sí mismo por quienes se enfocan en factores. Sin embargo, las métricas como los factores son extremadamente útiles si se desarrollan de manera consistente y se utilizan como base para un programa de mejora continua.

Abstract

Mining is an industry that based on the extraction of mineral resources through processes that are constantly being optimized or improved to reach operational excellence, which is why the representation of reality through computer models becomes vital to achieve a prediction. Accurate of what is going to happen in the future.

There are many specialized techniques and software on the market that allow making predictions, but in a general way and it is difficult to adapt these tools to the reality of a specific mine, so this work seeks to propose a robust methodology for operational reconciliation measuring the impact economics of a material handling process in an open pit mine.

Currently, the way to manage the fulfillment of the objectives of a mining plan is based on the comparison of planned vs. real kpi's, but the limitation of the existing models is that they only consider risk and uncertainty in geological and metallurgical processes, but not in the mine production and materials movement process, so this work will carry out an operational reconciliation based on the use of discrete event simulations in order to minimize the economic impact that may be produced by a deviation in the process.

The main objective of this work is to be able to predict the grade and tonnage that will be sent to the primary crusher for short-term mining plans, lasting one week, and to carry out an operational reconciliation to evaluate the results obtained in a open pit mine.

Finally, operational reconciliation is not accounting, the goal is not to get two sets of numbers to balance, which is often seen as an end in itself by those who focus on factors. However, metrics like factors are extremely useful if they are developed consistently and used as the basis for a continuous improvement program.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi hermosa familia, Cinthya, Fausto y Fernanda por ser el pilar de mi vida y la inspiración para poder ser el mejor cada día.

A mis padres Jose y Luz por darme la vida, apoyarme y creer en mi desde siempre y para siempre

A Charango, por ser un excelente guía, gran amigo y la persona que confió en mi sin dudarlo, es un extraordinario profesor y estoy muy agradecido de haberlo conocido y ser su alumno.

Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCION.....	1
1.1.	Hipótesis	1
1.2.	Objetivos	1
1.2.1.	Objetivo general	1
1.2.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Alcance	2
1.3.1.	Alcance General	2
1.3.2.	Alcance del modelo de Simulación.....	2
1.3.3.	Alcance de la reconciliación operacional.....	3
1.4.	Contenido por Capitulo.....	3
2.	ANTECEDENTES	5
2.1.	Simulación	5
2.1.1.	Tipos de Simulación.....	5
2.1.1.1.	En función de tiempo.....	5
2.1.1.2.	En función a la aleatoriedad de datos.	6
2.1.1.3.	En función a las variables de estado del sistema	6
2.1.2.	Simulación en minería.....	6
2.1.3.	Metodología para construir un Modelo de Simulación.....	9
2.2.	Reconciliación en minería.....	10
3.1.	Desarrollo del modelo de simulación	15
3.2.	Desarrollo del método de reconciliación.....	15
3.3.	Desarrollo de un caso de estudio	16
4.	DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACION	17

4.1.	Formulación del problema	17
4.2.	Establecimiento de objetivos y plan de proyecto	18
4.3.	Modelo conceptual	18
4.4.	Recolección y análisis de datos	21
4.5.	Codificación	24
4.5.1.	Componentes del modelo de simulación.....	24
4.5.1.1.	Camiones	25
4.5.1.2.	Rajo	26
4.5.1.3.	Stock.....	28
4.5.1.4.	Crusher	29
4.5.2.	Descripción del código de optimización	30
4.5.2.1.	Definición de variables.....	31
4.5.2.2.	Función objetivo.....	31
4.5.2.3.	Restricciones	31
4.6.	Verificación de modelo	33
4.7.	Validación de modelo.....	33
4.8.	Diseño de experimento.....	33
4.9.	Corridas de producción y análisis	33
4.10.	Documentación del programa y reporte de resultados	33
4.11.	Implementación	34
5.	DESARROLLO DEL METODO DE RECONCILIACION	35
5.1.	Kpi's a comparar.....	35
5.2.	Calculo del impacto económico.....	35
6.	CASO DE ESTUDIO	36
6.1.	Aspectos generales.....	37

6.2.	Inputs de Simulación	39
6.2.1.	Input general.....	39
6.2.2.	Input de camiones.....	40
6.2.3.	Input de palas	40
6.2.4.	Input del frente de minado	41
6.2.5.	Input de stocks.....	42
6.2.6.	Input del tiempo de ciclo.....	43
6.3.	Resultados del modelo de simulación.....	43
6.3.1.	Plan de envío a chancadora primaria.....	44
6.3.2.	Plan de camiones	45
6.3.3.	Plan de Palas.....	46
6.4.	Análisis y resultados usando la metodología de reconciliación	47
6.4.1.	Reconciliación espacial	48
6.4.2.	Reconciliación de parámetros de operación mina.....	48
6.4.2.1.	Reconciliación de camiones	49
6.4.2.2.	Reconciliación de palas	50
6.4.3.	Reconciliación de parámetros geológicos y metalúrgicos	50
6.4.3.1.	Reconciliación de molinos	51
6.4.3.2.	Reconciliación de chancadora primaria.....	51
6.4.3.3.	Reconciliación de ley de cabeza (CuT)	52
6.4.3.4.	Reconciliación de recuperación.....	52
6.4.3.5.	Reconciliación de cobre fino	53
6.4.4.	Impacto económico	53
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	54
7.1.	Conclusiones.....	54

7.2. Trabajo futuro	55
8. BIBLIOGRAFIA.....	57
ANEXO	58

Índice de Ilustraciones

Ilustración 2-1. Discrete and continuous System (Banks, 1984).....	6
Ilustración 2-2. Procedimiento para construcción de un modelo de simulación	9
Ilustración 2-3. Pirámide reconciliación (Riske et al 2010)	11
Ilustración 2-4. Mine Call Factors (Parker, 2012).....	12
Ilustración 2-5. Proceso de reconciliación (Parker, 2012).....	12
Ilustración 2-6. Etapas de reconciliación (Parker, 2012).....	13
Ilustración 4-1. Flujo del modelo conceptual (Zavaleta, 2020).....	19
Ilustración 4-2. Modelo conceptual (Zavaleta, 2020).....	20
Ilustración 4-3. Tiempo de ciclo en el sistema Dispatch (Modular Mining, 2012).....	23
Ilustración 4-4. Descripción de los objetos del modelo de simulación (Zavaleta, 2020).....	25
Ilustración 4-5. Descripción del flujo de camiones (Zavaleta, 2020).....	26
Ilustración 4-6. Descripción del flujo en el rajo (Zavaleta, 2020).....	27
Ilustración 4-7. Incertidumbre en el tiempo de carguío (Zavaleta, 2020)	28
Ilustración 4-8. Descripción del manejo de minerales en los stocks	29
Ilustración 4-9. Descripción del ingreso de mineral a chancadora primaria	30
Ilustración 4-10. Reportabilidad del modelo de simulación (Zavaleta, 2020)	34
Ilustración 6-1. Ubicación mina Antapaccay (Zavaleta, 2020).....	36
Ilustración 6-2. Componentes del modelo de simulación de la mina Antapaccay (Zavaleta, 2020).....	38
Ilustración 6-3. Topografía y rutas del modelo de simulación de la mina Antapaccay (Zavaleta, 2020).....	39
Ilustración 6-4. Frente y cortes de minado por día de la semana 50 (Zavaleta, 2020).....	41
Ilustración 6-5. Reconciliación espacial semana 50 (Zavaleta, 2020)	48
Ilustración 6-6. Reconciliación de molinos (Zavaleta, 2020).....	51
Ilustración 6-7. Reconciliación de envío a chancadora primaria (Zavaleta, 2020)	51
Ilustración 6-8. Reconciliación de ley de cobre total (Zavaleta, 2020).....	52
Ilustración 6-9. Reconciliación de recuperación (Zavaleta, 2020).....	52
Ilustración 6-10. Reconciliación de cobre fino (Zavaleta, 2020)	53

Índice de Tablas

Tabla 6-1. Input de chancadora primaria.....	39
Tabla 6-2. Input de camiones	40
Tabla 6-3. Input de palas	41
Tabla 6-4. Input de frente de minado	42
Tabla 6-5. Input de stocks	42
Tabla 6-6. Input del tiempo de ciclo.....	43
Tabla 6-7. Plan de envío a chancadora primaria semana 50	44
Tabla 6-8. Plan de camiones semana 50.....	46
Tabla 6-9. Plan de palas semana 50.....	47
Tabla 6-10. Reconciliación de camiones semana 50.....	49
Tabla 6-11. Reconciliación de palas semana 50.....	50

1. INTRODUCCION

La minería es una industria que se basa en la extracción de los recursos minerales mediante procesos que constantemente vienen siendo optimizados o mejorados para llegar a la excelencia operacional, es por ello que la representación de la realidad mediante modelos computacionales se torna vital para lograr una predicción acertada de lo que va a pasar en el futuro.

La reconciliación en minería es el proceso de identificación, análisis y gestión de la variación entre resultados planificados y reales de tal manera que se pueda observar oportunidades de mejora. (Riske et al, 2010).

En la actualidad la manera de gestionar el cumplimiento de los objetivos de un plan minero, se basa en la comparación de kpi's planeados vs reales, pero la limitación de los modelos existentes es que solo consideran riesgo e incertidumbre en los procesos geológicos y metalúrgicos, pero no en el proceso de producción mina y de movimiento de materiales, por lo que este trabajo realizara una reconciliación operacional basada en el uso de simulación de eventos discretos para poder minimizar el impacto económico que se pueda producir por una desviación en el proceso.

1.1. Hipótesis

Un modelo de simulación parametrizado en kpi's operacionales facilita la reconciliación de material.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Proponer una metodología robusta para reconciliación operacional midiendo el impacto económico.

1.2.2. Objetivos específicos

- Hallar los principales factores que influyen al realizar una reconciliación operacional.
- Comparación de kpi's operacionales planificados versus reales, sobre la base de metodologías de reconciliación existentes.
- Construir un modelo simulación para replicar el comportamiento operacional.
- Simular diversos escenarios, analizar los resultados y generar conclusiones.
- Hallar el impacto económico de en un plan semanal implementado en un caso de estudio.

1.3. Alcance

El alcance de este trabajo se basa en:

1.3.1. Alcance General

- Se desarrollará para una mina a cielo abierto de extracción de cobre.
- Se desarrollará para planes de minado a corto plazo (semanales).
- El proceso para mineral empieza después de la tronadura y termina en la chancadora primaria.
- El envío de minerales a chancadora primaria, se realizará desde los stocks mediante fajas transportadoras, esta faja al tener menos de 200 metros de longitud se considera un tiempo insignificante de alimentación.
- El envío de minerales a stock se realizará desde un frente de mineral mediante un sistema Pala-Camión.

1.3.2. Alcance del modelo de Simulación

- Se desarrollará para el sistema de transporte de materiales, Pala - Camión.
- No se considerará incertidumbre por interferencias operacionales o por caída de equipos no programados.
- Se construirá el modelo con Ptolemy II.
- Se considera un algoritmo de optimización con programación lineal para cumplir el envío de tonelaje y ley planificada a la chancadora primaria.

1.3.3. Alcance de la reconciliación operacional

- Comparar los parámetros geológicos y metalúrgicos reales versus planificados, enviados al proceso.
- Comparar los Kpi's de producción planeada real versus planeada.
- Basaremos la reconciliación operacional en el trabajo realizado por Parker 2012, dando énfasis en el F3 y F2.

1.4. Contenido por Capitulo

El presente trabajo está compuesto por 8 capítulos más anexos.

- El capítulo 1 contiene el tema principal, la introducción, los objetivos y alcances de la tesis a desarrollar.
- El capítulo 2 contiene el estado del arte, los antecedentes bibliográficos en los cuales se basa esta tesis, se da énfasis a los métodos de simulación y reconciliación utilizados en minería.
- El capítulo 3 contiene la metodología propuesta para desarrollar la tesis, la cual permitirá obtener los resultados y conclusiones de este trabajo.
- El capítulo 4 contiene la construcción y desarrollo del modelo de simulación así como todos los parámetros utilizados para el desarrollo de este.
- El capítulo 5 contiene el desarrollo del método de reconciliación propuesto basado en el trabajo de Parker (2012).
- El capítulo 6 contiene el estudio caso, viene a ser la implementación de la metodología de simulación y reconciliación propuesta en esta tesis, en una mina al sur de Perú.

- El capítulo 7 contiene los resultados, conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.
- El capítulo 8 contiene la bibliografía utilizada para la realización de la presente tesis.

2. ANTECEDENTES

A continuación, se busca explicar el estado del arte de la simulación de transporte de materiales y la reconciliación utilizadas en minería.

2.1. Simulación

- Law y Kelton (1982). Define la simulación como una técnica para usar computadoras para imitar, o reproducir las operaciones de diversos procesos del mundo real.
- Kelton y Sadowski (2004). Define la simulación como una amplia colección de métodos y aplicaciones que imitan el comportamiento de sistemas reales, usualmente en una computadora con el software adecuado.
- Winston (2005). Define la simulación como una técnica que imita la operación de un sistema del mundo real a medida que evoluciona con el tiempo.

En conclusión, la simulación representa un proceso del mundo real que evoluciona en el tiempo y permite entender el funcionamiento del sistema que estamos estudiando.

2.1.1. Tipos de Simulación

Los modelos pueden ser clasificados en modelos físicos y modelos matemáticos

2.1.1.1. En función de tiempo

- **Estática.**- Representación de un sistema en un instante en el tiempo en particular. Un ejemplo de esta simulación son los modelos de simulación de Monte Carlo.
- **Dinámica.**- Representan el sistema tal cual cómo cambia a lo largo del tiempo. Por ejemplo: Una entidad bancaria durante un horario de atención de las 14:00 horas a las 16:00 horas

2.1.1.2. En función a la aleatoriedad de datos.

- **Determinística.-** Este modelo de simulación no usa variables aleatorias, para cada conjunto de datos de entrada, existirá solamente una respuesta.
- **Estocástica.-** Este modelo de simulación contiene una o más variables aleatorias, en este escenario solo se puede estimar la respuesta.

2.1.1.3. En función a las variables de estado del sistema

- **Discreta.-** Es un modelo de simulación en el cual las variables de estado cambian en un numero entero de puntos en el tiempo.
- **Continua.-** Es un de simulación en el cual las variables de estado cambian continuamente respecto al tiempo.

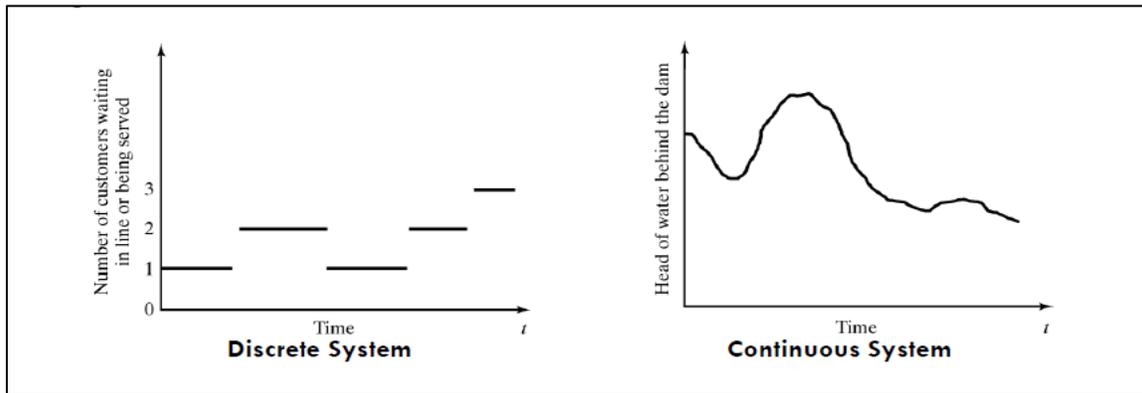


Ilustración 2-1. Discrete and continuous System (Banks, 1984)

2.1.2. Simulación en minería

En la década del 1960, se da lugar a las primeras publicaciones de construcción de modelos de simulación en minería, con el propósito de replicar la realidad de los diferentes procesos de una mina, es por ello que cuando Bekir Genc publica en 2019 el artículo “Dynamic simulation of an opencast coal mine” en el International Journal of Coal Science & Technology, afirma en su investigación que la primera publicación de un modelo de simulación para determinar el número óptimo de trenes en una mina subterránea de molibdeno, fue realizada en fortran por Karsten Risten en 1961, el cual daría inicio para que muchos investigadores profundicen en el mundo de la simulación en minería.

En 1963, Falkie y Mitchell realizaron un trabajo similar para una mina subterránea al cual le incluyeron la simulación de Montecarlo en modelos de simulación estocástica.

En 1965 Sanford realizó una simulación de fajas transportadoras en fortran.

En 1968 Morgan y Peterson por primera vez construyeron un modelo de simulación estocástica de una operación de minería a cielo abierto.

En 1969 Cross y Williamson construyeron un modelo de en una operación minera a tajo abierto de cobre la cual consideraba el sistema Pala-Camión con 5 palas que cargaban a los camiones con mineral o desmonte para que sean trasladados a la chancadora, botadero de desmonte o al área de lixiviación la programación fue hecha en fortran.

En 1972 Bauer y Calder utilizaron el Sistema de Simulación de Propósito General (GPSS) para simular la actividad minera de carga, transporte y descarga para minas a cielo abierto.

En 1987 Sturgul y Yi realizaron un modelo más complicado, tomando como base la publicación de Cross y Williamson, en donde consideraban la aleatoriedad estocástica de los tiempos en la operación. A diferencia del trabajo anterior, esta simulación se realizó en el lenguaje GPSS.

En 1999 Turner simula la mina de carbón sudafricana Twistdraai en la que se optimizo el transporte de carbón, el apilado, la mezcla y los diseños de plantas de beneficio.

En 2012 Herbst et al. utilizaron MetroProSim para simular una planta de procesamiento de minerales y recomendaron que las simulaciones incluyan el impacto de discretos y recomendaron que las simulaciones incluyan el impacto de eventos estocásticos discretos, como el mantenimiento programado y no programado, lo que hizo posible analizar las relaciones entre la disponibilidad y el tamaño de los equipos, y capacidad de la planta.

En 2018 Camargo et al. propuso un método de simulación de proceso integrado para simular una mina de rajo abierto de hierro, el cual tomo como alcance las características estocásticas, dinámicas y sistémicas de la operación.

El simposio anual APCOM (Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry) es la principal fuente de referencia para encontrar modelos de simulación aplicados en minería.

Los principales procesos que son modelados y simulados en la industria minera son:

- Panta de procesamiento de minerales.
- Fajas transportadoras.
- Transporte de materiales.
- Confiabilidad de equipos mineros.

En la actualidad la simulación para movimiento de materiales en una mina se basa en una simulación dinámica de datos aleatorios y de eventos discretos, el lenguaje más utilizado para realizar simulación en operaciones mineras es el GPSS/H, así como los paquetes comerciales que nos brinda el mercado como, Arena, Talpac, Haulsim, Vulcan, Mineplan, Deswik, la universidad de Chile también posee su propio simulador el DSIM Open Pit que ha sido desarrollado en el laboratorio de planificación minera DELPHOS.

2.1.3. Metodología para construir un Modelo de Simulación

En la actualidad el procedimiento más utilizado para construir un modelo de simulación es el que elaboró Banks (1999) y se muestra en la ilustración # a continuación.

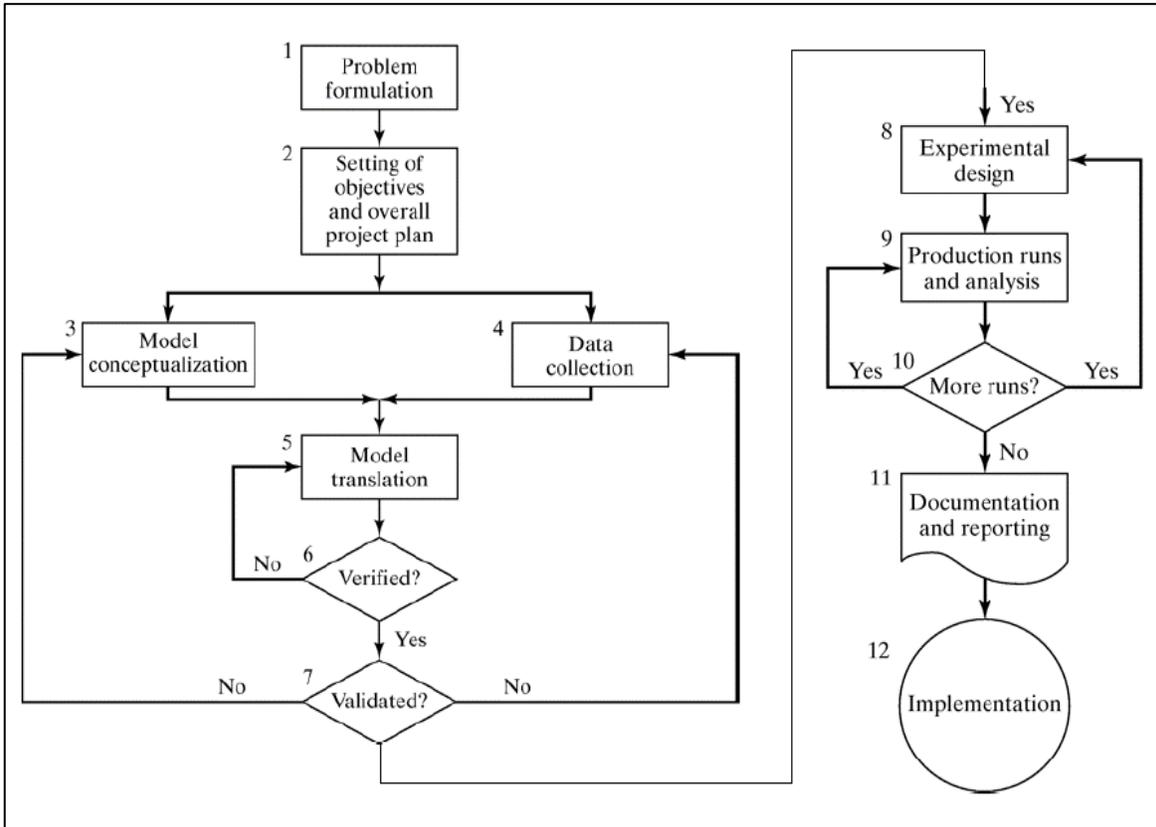


Ilustración 2-2. Procedimiento para construcción de un modelo de simulación (Banks, 1999)

Las etapas del procedimiento de Banks (1999) son.

- Formulación del problema.
- Establecimiento de objetivos y plan general de trabajo.
- Modelo Conceptual.
- Recolección y análisis de datos.
- Codificación del modelo de simulación.
- Verificación del modelo de simulación.
- Validación del modelo de simulación.
- Diseño de experimentos.

- Corridas de producción y análisis.
- Documentación del programa y reporte de resultados.
- Implementación del modelo de simulación.

2.2. Reconciliación en minería

- Parhizkar et al (2010). define la reconciliación de la ley de mineral como la comparación de los valores de la ley estimada en la etapa de exploración con la ley real obtenida a partir de la data de los de blasthole.
- Riske et al (2010). en su definición, también se refiere a la reconciliación como el proceso de identificación, análisis y gestión de la variación entre resultados planificados y reales de tal manera que se pueda observar oportunidades de mejora.

La reconciliación viene a ser la comparación de la planificación con la producción real, así mismo con este proceso se puede identificar el impacto de los errores en el proceso. La reconciliación es un método científico y objetivo que sirve para determinar si las suposiciones incorporadas en sus predicciones son válidas.

Los principales objetivos de una reconciliación en minería (Khosrowshahi, S., and Shaw, W.J. (2001) son:

- Aumentar la precisión de la planificación anticipada.
- Mejorar el conocimiento del yacimiento.
- Explicar problemas.
- Justificar mejoras practicas operativas.
- Comparación de Kpi's claves de desempeño.

2.2.1. Tipos de reconciliación en minería (Riske et al, 2010)

- **Reconciliación temporal.-** Compara el rendimiento a través de la operación minera en la secuencia basada en el tiempo, cubre periodos como turnos, semanas, meses, años etc. lo recomendable es realizarlo para periodos largos.

- **Reconciliación espacial.-** Es una reconciliación en forma tridimensional, compara el rendimiento entre los modelos de predicción y los resultados reales del mapeo y mediciones de muestras se podría tener un impacto significativo si es que no se toma en cuenta las consideraciones espaciales.
- **Reconciliación física.-** Compara las características físicas de un modelo de bloques como la producción de metal fino, así como varios parámetros de calidad y volúmenes,

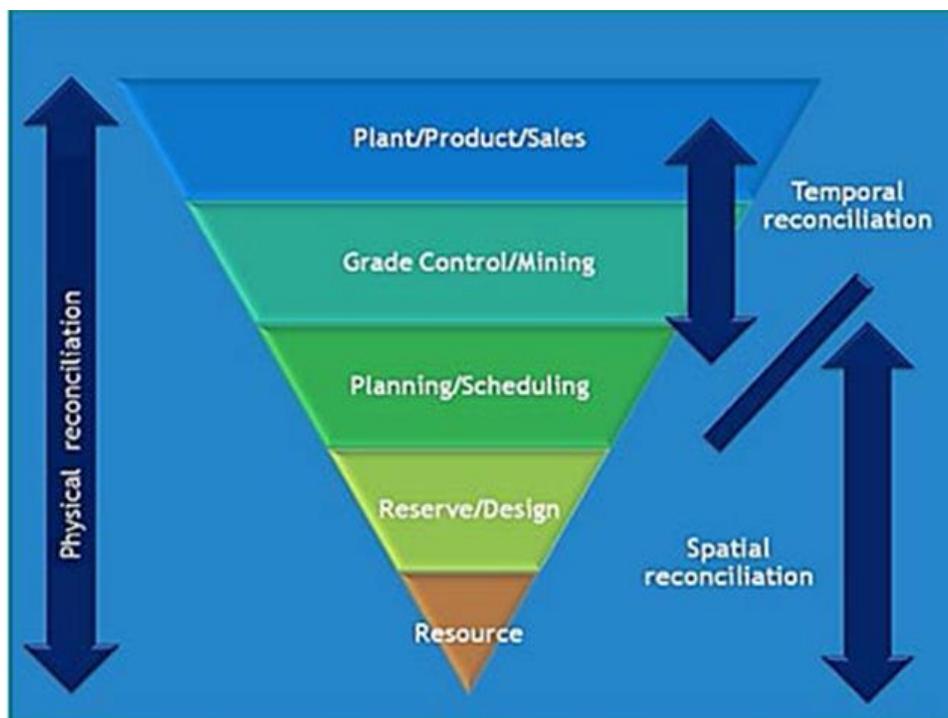


Ilustración 2-3. Pirámide reconciliación (Riske et al 2010)

2.2.2. Factores de reconciliación (Parker, 2012)

Parker en 2012, publica el paper “Reconciliation principles for the mining industry”, donde establece las bases para realizar una correcta reconciliación en minería introduciendo los “Mine Call Factors”, el cual es el método más utilizado en la industria minera para realizar reconciliaciones en la actualidad, para cada etapa de la cadena de producción.

$$F1 = \frac{\text{short range model depletions}}{\text{long range model depletions}} \text{ ie } F1 = \frac{\text{GRADE CONTROL (PREDICTION)}}{\text{ORE RESERVE (PREDICTION)}}$$

and

$$F2 = \frac{\text{received at mill}}{\text{delivered to mill}} \text{ ie } F2 = \frac{\text{MILL (PRODUCTION)}}{\text{GRADE CONTROL (PREDICTION)}}$$

and

$$F3 = \frac{\text{received at mill}}{\text{long range model depletions}} \text{ ie } F3 = \frac{\text{MILL (PRODUCTION)}}{\text{ORE RESERVE (PREDICTION)}}$$

then it is now obvious that $F3 = F1 * F2$

Ilustración 2-4. Mine Call Factors (Parker, 2012)

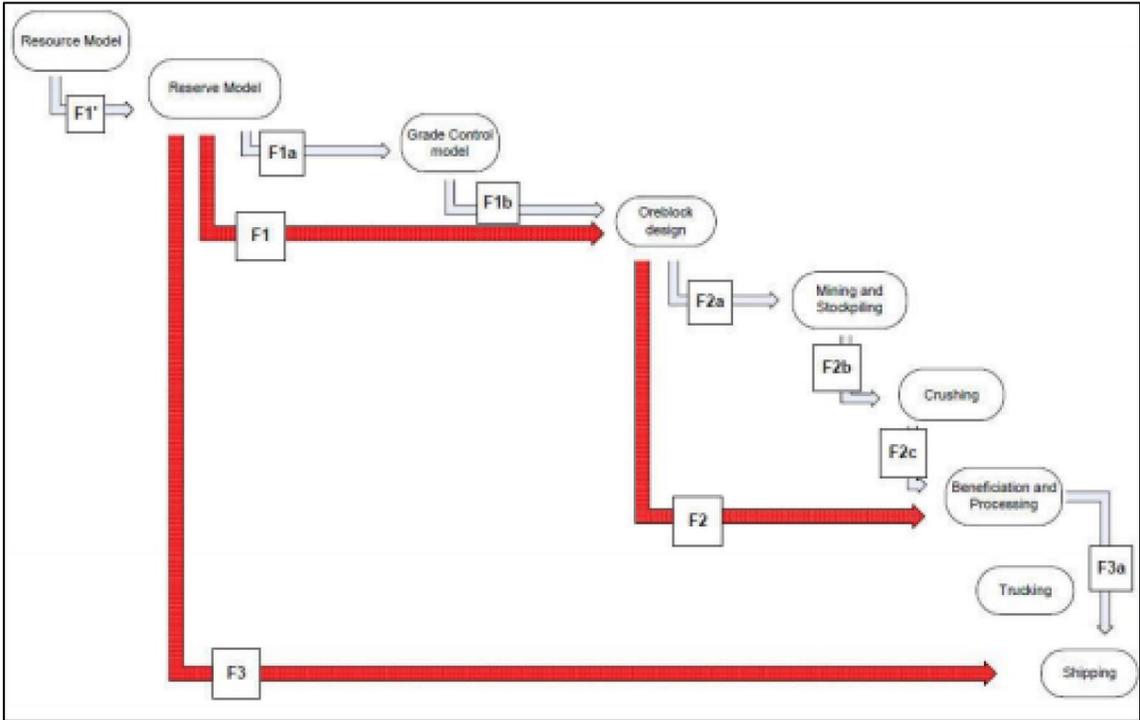


Ilustración 2-5. Proceso de reconciliación (Parker, 2012)

Reconciliation Stage	Used in Factor	Subcomponents	Data Inputs
ORE RESERVE (prediction)	F1 and F3	Mineral Resource model mine plan geometallurgical parameters expected mill recovery	resource model exploration data original topography mining surface (start) mining surface (end)
GRADE CONTROL (prediction)	F1 and F2	F1a short term model	geological mapping grade control sampling
		F1b planned ore blocks and/or designed stopes	ore block polygons stope design grade and density estimation geotechnical criteria mining widths and efficiencies
MINING (production)	F2 and F3	F2a digging	blast movement ore and waste haulage
		F2b stockpiling	truck counts and surveys
		F2c crushing	weightometer
MILLING (production)	F2 and F3	F3a beneficiation	processing records metal balance
		shipping	surveys metal sales.

Ilustración 2-6. Etapas de reconciliación (Parker, 2012)

La limitación del modelo de Parker es que solo considera riesgo e incertidumbre en los procesos geológicos y metalúrgicos, pero no en el proceso de producción mina el cual puede generar algún impacto económico.

Este impacto económico en un plan de minado semanal puede ser insignificante, pero totalizado a un año puede arrojar importantes variaciones frente a lo presupuestado y se requiere darle la importancia necesaria.

La reconciliación en minería puede realizarse para:

- Reservas de minerales.
- Producción minera.
- Inventarios de stockpile.
- Producción de molinos.
- Perímetros de ore control
- Envío de mineral a chancadora primaria.

La reconciliación no es contabilidad. el objetivo no es lograr que dos conjuntos de números se equilibren, lo que a menudo es visto como un fin en sí mismo por quienes se enfocan en factores. Sin embargo, las métricas como los factores son extremadamente útiles si se desarrollan de manera consistente y se utilizan como base para un programa de mejora continua.

3. METODOLOGIA

Este capítulo describe la metodología utilizada en el presente trabajo para medir el impacto económico al realizar una reconciliación operacional utilizando simulación de eventos discretos

3.1. Desarrollo del modelo de simulación

Para la construcción del modelo de simulación me basare en el procedimiento elaborado por Banks (1999), cabe resaltar que este transporte de materiales se realizará para minas a cielo abierto de extracción de cobre, se tomará bastante énfasis en el proceso de producción, el cual empieza después de la tronadura de rocas y termina en la chancadora primaria

Se tomará el sistema Pala-Camión para el transporte de materiales a los stocks y mediante fajas transportadoras de los stocks hacia la chancadora primaria.

3.2. Desarrollo del método de reconciliación

Para realizar una correcta comparación de kpi's planeados vs reales, tomare como base el trabajo realizo Parker en 2012, donde establece las bases para realizar una correcta reconciliación en minería introduciendo los "Mine Call Factors".

La limitación del modelo de Parker es que solo considera riesgo e incertidumbre en los procesos geológicos y metalúrgicos, por lo que centrare este trabajo en el proceso de producción mina el cual puede generar impactos económicos, asumiendo que los procesos geológicos y metalúrgicos están controlados.

El objetivo final de esta tesis es poder calcular el impacto económico causado por una desviación de factores, es por ello que se tomara el impacto económico en dólares por tonelada.

3.3. Desarrollo de un caso de estudio

Es necesario aplicar el modelo de simulación y del método de reconciliación propuestos en un plan de minado semanal de corto plazo en una operación a cielo abierto.

El sistema Pala-Camión debe utilizarse para el el movimiento de materiales en la mina, así como el uso de fajas transportadoras,

El objetivo principal es poder determinar el impacto económico producido por las desviaciones generadas de un plan de minado semanal de corto plazo versus los resultados reales.

4. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACION

Este capítulo describe todos los componentes y la construcción del modelo de simulación, basado en el procedimiento elaborado por Banks (1999), cabe resaltar que este transporte de materiales se realizara para minas a cielo abierto.

Para la construcción del modelo de simulación se tomará bastante énfasis en el proceso de producción, el cual empieza después de la tronadura de rocas y termina en la chancadora primaria.

Se tomará el sistema Pala-Camión para el transporte de materiales a los stocks y mediante fajas transportadoras de los stocks hacia la chancadora primaria.

4.1. Formulación del problema

El objetivo principal es poder predecir la ley y el tonelaje que se va enviar a la chancadora primaria para planes de minado a corto plazo, de una semana de duración, considerando que el blending enviado a la chancadora primaria se realizara de los stockpiles mediante fajas transportadoras, que al tener menos de 200 metros de longitud se considera un tiempo insignificante de alimentación.

El control de leyes de procesamiento en tiempo real en planta, se realiza con la toma de muestras de un analizador, cada 2 horas y estas son enviadas al laboratorio químico para su procesamiento, es por ello que para replicar la realidad en un modelo de simulación se considerara un algoritmo de optimización con programación lineal para cumplir el envío de tonelaje y le ley planificada a la chancadora primaria y este proceso se realizara cada 2 horas.

La alimentación de material hacia los stocks se hará desde los frentes de minado planificados en la semana correspondiente mediante un sistema Pala-Camión.

4.2. Establecimiento de objetivos y plan de proyecto

- Para la construcción del modelo de simulación, se realizará mediante una simulación dinámica, de datos aleatorios y de eventos discretos.
- Se desarrollará con Ptolemy II.
- Se desarrollará para una mina a Cielo abierto de extracción de cobre.
- Se desarrollará para planes de minado a corto plazo (Semanales de 7 días de duración).
- El proceso para mineral empieza después de la tronadura de rocas y termina en la chancadora primaria.
- No se considerará incertidumbre por interferencias operacionales o por caída de equipos no programados.
- El control de leyes de laboratorio químico se realiza cada 2 horas por lo que, para replicar la realidad en el modelo de simulación, se considerara un algoritmo de optimización con programación lineal para cumplir el envío de ley y tonelaje planificado.

4.3. Modelo conceptual

El modelo debe abarcar 4 componentes importantes y esenciales:

- Camiones.- Transportaran el mineral desde los frentes de minado planificados para la semana en curso hacia los stocks.
- Rajo.- Viene dado por el rajo donde se encuentran los frentes de minado del cual se extraen los minerales mediante una pala que realiza el proceso de carguío de camiones mineros.
- Stocks.- Son los depósitos donde almacenaremos el mineral salido de la mina, los stocks estarán divididos en:
 - 2 stocks de alta ley.
 - 1 stock de baja ley.
 - 1 stock de marginales

Estos stocks son piezas fundamentales del modelo simulación, porque son los que realizaran la alimentación a la chancadora primaria con un blending adecuado para cumplir con el tonelaje y ley planificada.

- Chancadora primaria.- Viene dado por la planta de chancado primario donde termina el envío de minerales de los stocks, se deberá tener una ley, tonelaje y recuperación objetivo de cumplimiento de plan de minado.

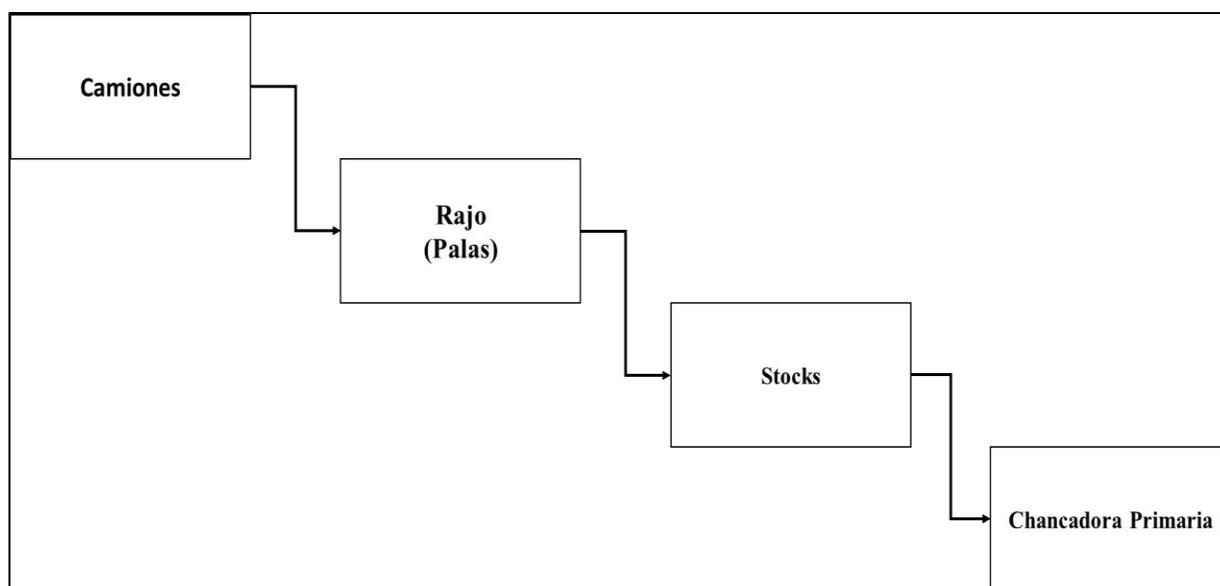


Ilustración 4-1. Flujo del modelo conceptual (Zavaleta, 2020)

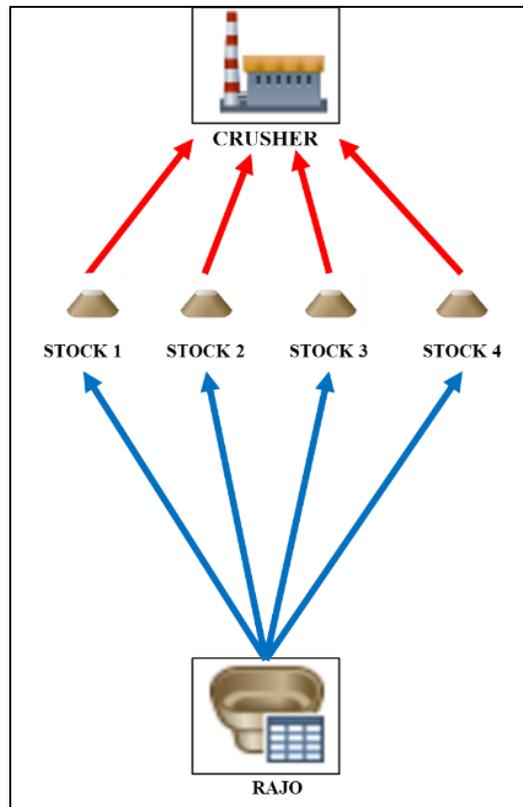


Ilustración 4-2. Modelo conceptual (Zavaleta, 2020)

A todos los elementos que existirán en este modelo de simulación se le denominarán objetos, se asumirá que todos estos objetos se encuentran operativos y listos para trabajar.

- Periodo de tiempo a simular.
- Rajo.- Frente de donde se va enviar el mineral a los stocks.
- Truckid.- Definido por el número de camiones que van a operar en el periodo de tiempo a simular.
- Factor de carga.- Definido por el factor de llenado de los camiones.
- Shovel.- Definido por el número de palas que van a operar en el periodo de tiempo a simular.

- Ley Objetivo. - Definido por la ley planificada de acuerdo a los cortes propuestos en el periodo de tiempo a simular.
- Stock.- Stocks de acopio de mineral.
- Crusher.

4.4. Recolección y análisis de datos

Este modelo tiene como objetivo ser utilizado para planes de minado a corto plazo (semanales de 7 días), pero también podría adecuarse para planes diarios y mensuales.

La principal fuente para la recolección de datos reales de la operación será mediante el sistema Dispatch, estos datos serán utilizados e ingresados al modelo de simulación.

Otra fuente de información utilizada serán los modelos geológicos y geometalúrgicos para conocer todos los parámetros de los minerales que se van a transportar y procesar.

Los planes de minado semanales deben estar alineados al forecast, y deben estar planificados por día.

Los principales datos a recolectar serán:

- Periodo de tiempo a simular. - Se va realizar para una semana (7 dias) y la unidad de medida será en minutos (min).
- Rajo.- Se debe proporcionar el frente de minado, cortes por día de la semana y la humedad del material del frente de minado.

- Truckid.- Se debe proporcionar el tipo de flota, el payload, el factor de carga, disponibilidad, utilización y la productividad máxima de los camiones que van a trabajar esa semana.
- Shovel.- Se debe proporcionar el tipo de flota, capacidad de balde, disponibilidad, utilización y la productividad máxima de la pala que va a trabajar en esa semana.
- Ley Objetivo. Se debe proporcionar la ley planificada de esa semana y debe estar alineada al forecast.
- Recuperación objetivo.- Se debe proporcionar la recuperación planificada de esa semana y debe estar alineada al forecast.
- Stocks.- Se debe proporcionar la ley, recuperación de inicio proporcionado el modelo del stock, así como el tonelaje de inicio de los stocks
- Crusher se debe proporcionar el tonelaje a pasar por chancado primario y el mantenimiento de la chancadora primaria, si es que hubiese en la semana.
- Tiempo de ciclo.- Se debe proporcionar el tiempo de cada uno de los elementos que conforman el tiempo de ciclo, mediante una recopilación de datos del sistema Dispatch, realizando estudios estadísticos e indicando el tipo de distribución de datos que posee.

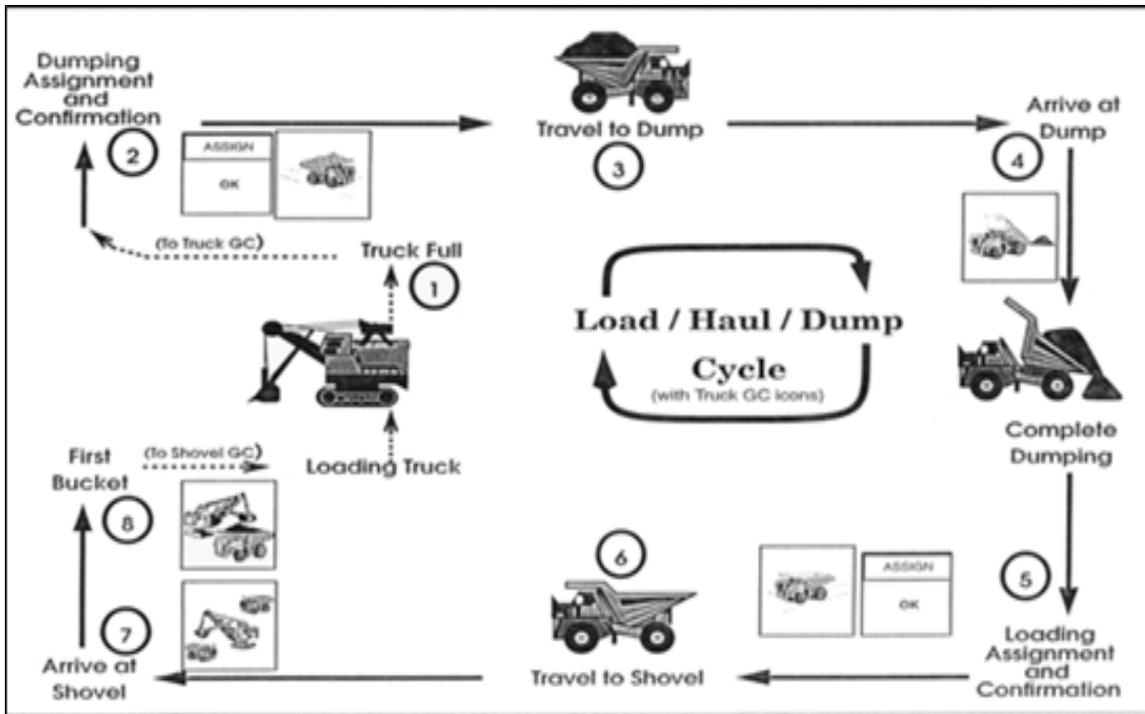


Ilustración 4-3. Tiempo de ciclo en el sistema Dispatch (Modular Mining, 2012)

$$\text{Cycle Time} = \text{Loading time} + \text{Queue Time} + \text{Spot Time} + \text{Loaded Haul Time} + \text{Dump Time} + \text{Empty Haul Time}$$

Donde:

- Cycle Time: Tiempo de ciclo(min).
- Loading time: Tiempo de carguío(min).
- Queue Time: Tiempo de espera o cola(min).
- Spot Time: Tiempo de cuadro(min).
- Loaded Haul: Time: Tiempo de viaje cargado(min).
- Dump Time: Tiempo de descarga(min).
- Empty Haul: Time: Tiempo de viaje vacío(min).

4.5. Codificación

La codificación y configuración del modelo de simulación está hecha con Ptolemy II, que es un software libre que permite realizar el modelado, la simulación y el diseño de sistemas embebidos concurrentes en tiempo real.

El foco está en el ensamblaje de componentes concurrentes, el principio fundamental es el uso de modelos de cálculo bien definidos que gobiernan la interacción entre los componentes. Un área de problemas importante que se aborda con Ptolemy II es el uso de mezclas heterogéneas de modelos de cálculo.

Ptolemy II se ha llevado se ha construido en el Industrial Cyber-Physical Systems Center (iCyPhy) en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de California en Berkeley. Este proyecto está dirigido por el Prof. Edward Lee y lleva el nombre de Claudius Ptolemaeus, el astrónomo, matemático y geógrafo griego del siglo II.

4.5.1. Componentes del modelo de simulación

Para la construcción del modelo de Simulación se tiene 4 componentes esenciales a los que llamare objetos y seguimos el modelo conceptual propuesto.

Cada objeto tiene parámetros característicos que definen el funcionamiento de cada uno, y que serán datos debemos recolectar en terreno para poder ingresarlos al modelo de simulación.

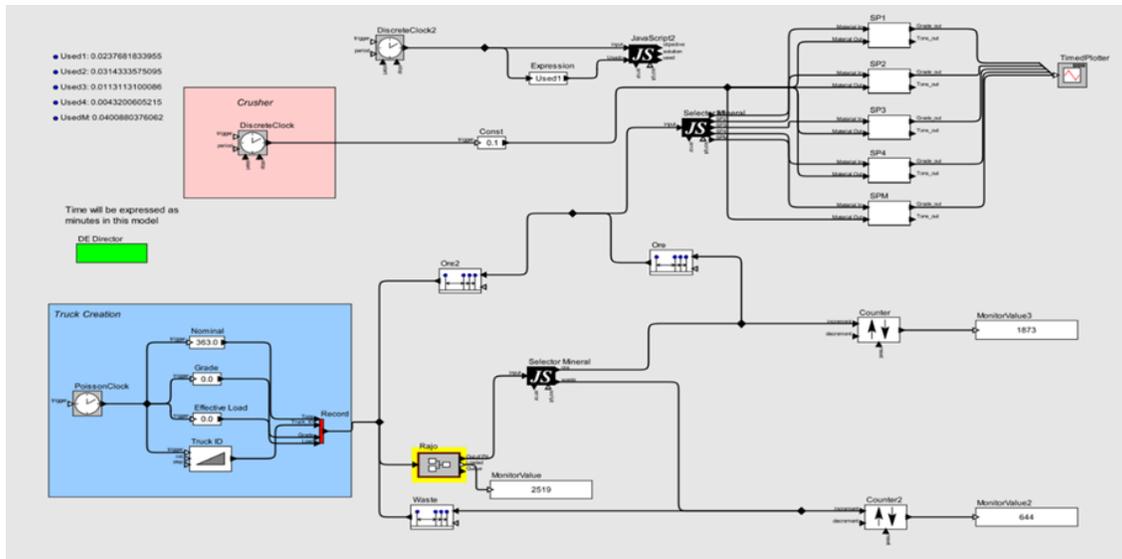


Ilustración 4-4. Descripción de los objetos del modelo de simulación (Zavaleta, 2020)

4.5.1.1. Camiones

El objeto camiones es el inicio para la construcción del modelo de simulación, por ello se creó una sección en el modelo simulación que viene dada por la información de los camiones que van a trabajar en la semana,

Los datos que deben ingresarse al modelo serán:

- Flota de Camiones.
- Payload.
- Disponibilidad de Camiones.
- Utilización de camiones.
- Productividad de camiones.
- Factor de carga.
- Tiempo de ciclo

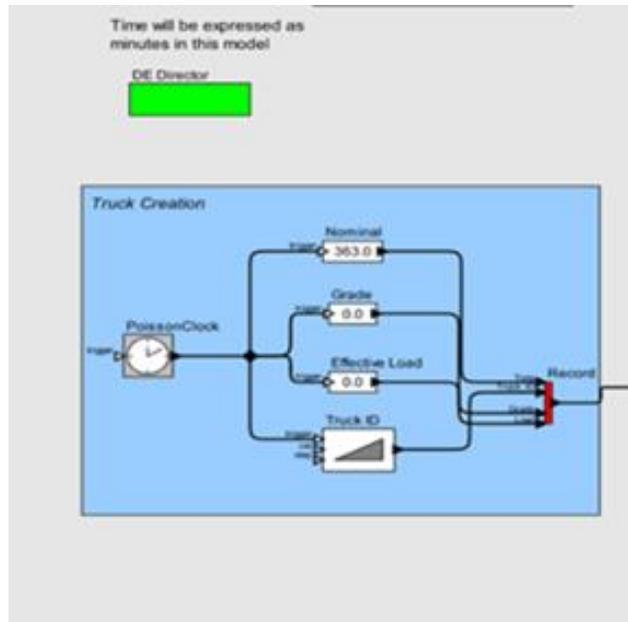


Ilustración 4-5. Descripción del flujo de camiones (Zavaleta, 2020)

Los datos del tiempo de ciclo vienen hacer los datos recolectados del sistema Dispatch, a los cuales se les debe realizar un análisis estadístico y se determinara la distribución de datos, por ejemplo, el tiempo de carguío de una pala a un camión tiene una distribución de comportamiento normal.

4.5.1.2. Rajo

Una vez que los camiones comienza a rodar, estos pasan por el rajo, que es una sección del modelo de simulación que contiene al frente de minado, a la pala que está trabajando en ese momento.

En el rajo se debe considerar un solo frente de minado con una sola pala, capaz de alimentar a los stocks de mineral, no se considerará mantenimientos no programados de la pala ni interferencias operacionales y por efectos del trabajo se considerará tener una pala en backup por si hubiera una caída de equipo, para que pueda reemplazar rápidamente el minado del frente de minado.

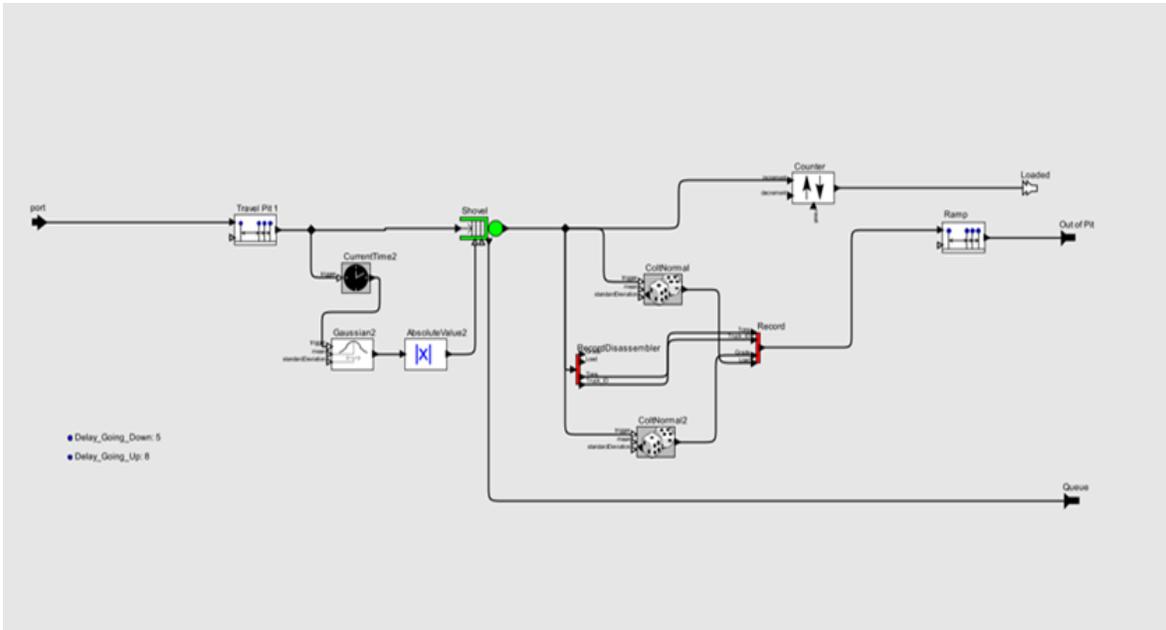


Ilustración 4-6. Descripción del flujo en el rajo (Zavaleta, 2020)

Los datos que deben ingresarse al modelo serán:

- Flota de pala
- Disponibilidad de pala.
- Utilización de pala.
- Productividad de pala.
- Frentes de minado (banco).
- Capacidad de balde.
- Humedad del material.
- Ley y toneladas por día en el frente de minado.

Cabe resaltar que la interacción que tendrán los camiones con la pala, con los stocks, con el traslado de mineral, el carguío etc., es donde va realizar iteraciones que incluirán probabilidades e incertidumbre y serán gobernadas por distribuciones, por ejemplo, en la ilustración #, se observa que el tiempo de carguío de una pala a un camión está gobernada por una distribución normal o Gaussiana y permite incorporar incertidumbre en el cálculo del modelo de simulación.

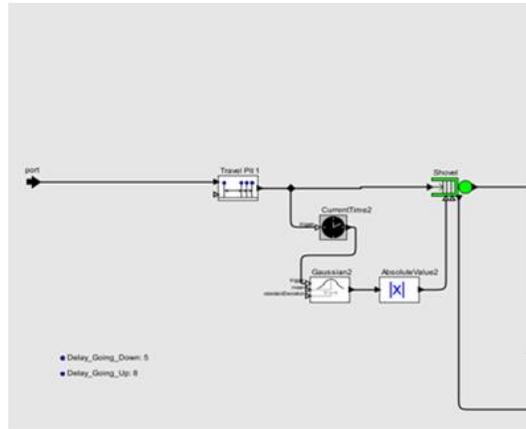


Ilustración 4-7. Incertidumbre en el tiempo de carguío (Zavaleta, 2020)

De igual manera que el tiempo de carguío se procede a tener incertidumbre en todos los tiempos que componen el tiempo de ciclo de los camiones.

4.5.1.3. Stock

Es el objeto del modelo de simulación que contiene a los 4 stocks ya descritos anteriormente, este el punto de partida para la alimentación directa de la chancadora primaria.

Es en esta parte del modelo de simulación donde se construyó un algoritmo de optimización para poder cumplir con la ley y tonelaje objetivo de la semana.

Debido a que las fajas transportadoras tienen menos de 200 metros se considera un tiempo insignificante y no se tomara en cuenta para el blending del mineral enviado a la chancadora primaria.

Es vital poder tener información de los stocks al inicio de la semana, como es el tonelaje, ley y recuperación por cada stock, ya que el modelo primeramente hará la acumulación de estos Kpi's por la entrada y salida de los minerales y adicionalmente tendremos un algoritmo de optimización que permitirá cada 2 horas controlar la ley y tonelaje enviado a chancadora primaria y poder ajustar el blending para lograr el objetivo.

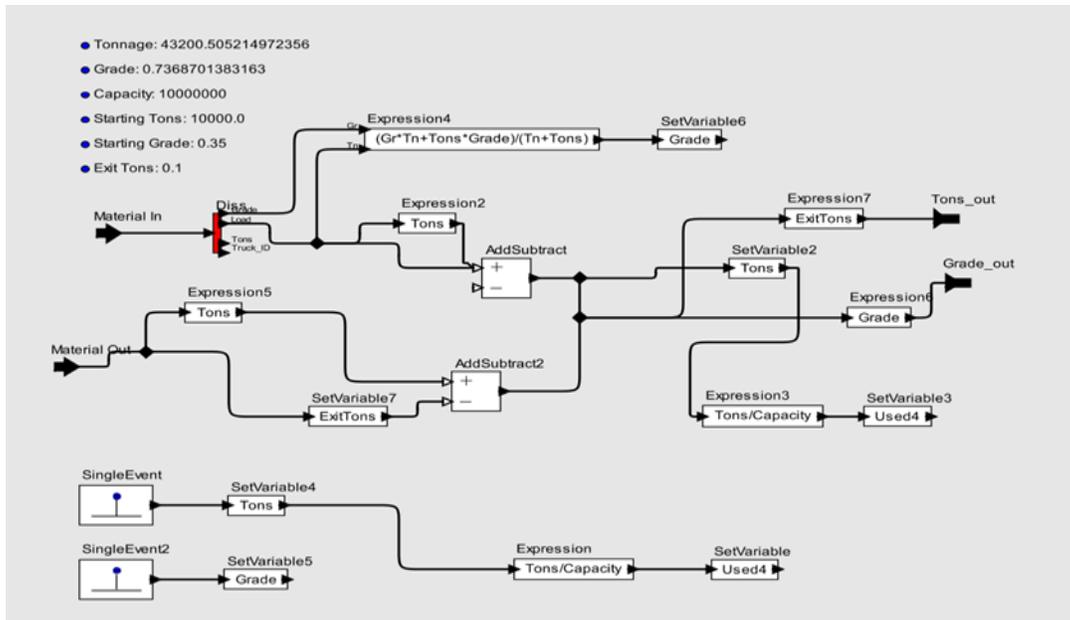


Ilustración 4-8. Descripción del manejo de minerales en los stocks
(Zavaleta, 2020)

Los datos que deben ingresarse al modelo serán:

- Ley, recuperación y tonelaje inicial por cada stock.
- Capacidad de stocks.
- Operatividad de los stocks.

4.5.1.4. Crusher

Esta es el objeto de la simulación más importante ya que da los lineamientos para poder realizar la simulación y cumplir los objetivos de la semana.

Se debe tener en cuenta el mantenimiento que va tener la chancadora primaria durante la semana en que se va realizar estudio, ya que esto limitaría el envío de mineral de los stocks, esta información la debe proporcionar procesos.

Se considera ilimitado el ingreso de mineral a la chancadora primaria y no se considerará paradas por interrupciones operacionales como por ejemplo atasco de material, ingreso de material inchancable a ala chancadora primaria etc.

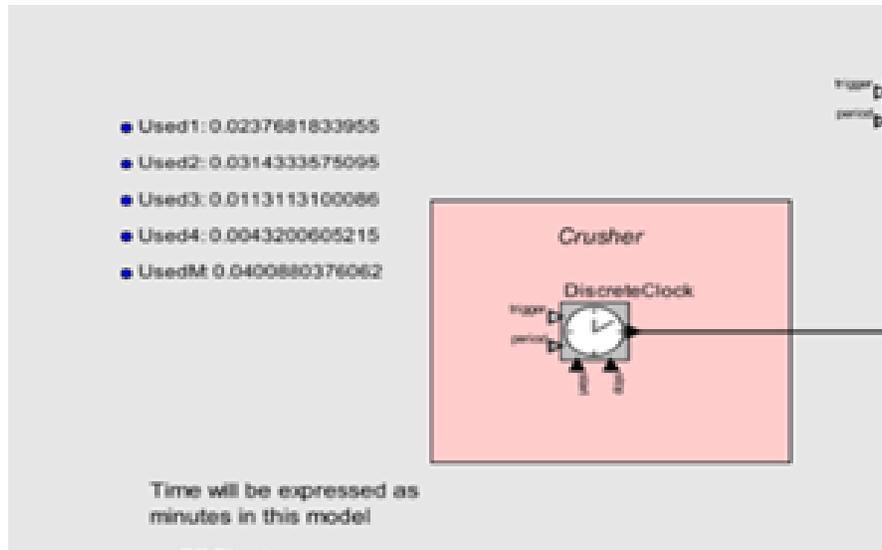


Ilustración 4-9. Descripción del ingreso de mineral a chancadora primaria (Zavaleta, 2020)

Los datos que deben ingresarse al modelo serán:

- Ley objetivo.
- Recuperación objetivo.
- Tonelaje de envío a Chancadora primaria.
- Cobre producido requerido por la semana.

4.5.2. Descripción del código de optimización

El control de leyes de laboratorio químico se realiza cada 2 horas por lo que, para replicar la realidad en el modelo de simulación, se considerara un algoritmo de optimización con programación lineal para cumplir el envío de ley y tonelaje planificado.

Este modelo debe decidir en cada período cuanto material sacar desde cada Stock, el modelo hará la acumulación de tonelaje y ley por la entrada y salida de los minerales.

Se debe considerar además que hay una capacidad global máxima de producción por período y hay una ley deseada que se quiere obtener desde la producción (no necesariamente será la ley que resultará, pero la idea es obtener aquella ley que se aleje lo menos posible de esta ley esperada.

4.5.2.1. Definición de variables

Para este problema definiremos las siguientes variables de decisión:

$$X_i = \text{Cantidad de Material a extraer desde el Stockpile } i$$

4.5.2.2. Función objetivo

Este problema trata de Minimizar desviaciones con respecto a una promesa de producción, por lo tanto, es posible medir dicha desviación utilizando restricciones y a partir de ahí colocar el valor resultante de la desviación en la función objetivo.

La función objetivo es entonces la función trivial:

$$\min_{y \geq 0} y$$

4.5.2.3. Restricciones

Las restricciones juegan un rol clave en el problema, asumiremos que en cada momento conocemos el tonelaje total T_i y la ley λ_i para cada Stockpile i . También asumiremos que conocemos la cantidad de metal deseado por período M

De esta manera tenemos las siguientes restricciones:

- $X_i \leq T_i$: Es decir, no superamos la capacidad actual de cada Stockpile i
- $\sum_i^n X_i \cdot \lambda_i - M \leq y$: Es decir, somos capaces de generar tanto material como se necesita por período, salvo claro que falte un poco (medido a través de y)
- $X_1 + X_2 \leq T$: Es decir, las toneladas a mover en un periodo dado están acotadas superiormente por un tope máximo

El código JavaScript que implementa esto viene dado por:

```
exports.setup = function() {
  this.input('input');
  this.input('T1');
  this.input('L1');
  this.input('T2');
  this.input('L2');
  this.output('usedT1');
  this.output('usedT2');
}

exports.fire = function() {
  var value = this.get('input');
  var L1 = this.get('L1');
  var T1 = this.get('T1');
  var L2 = this.get('L2');
  var T2 = this.get('T2');
  var M = 350;
  var T = 1000;

  var Modelo = new Object();
  Modelo.c = [0, 0, 1];
  Modelo.b = [M];
  Modelo.A = [[L1, L2, -1]
];

  Modelo.m = 1;
  Modelo.n = 3;
  Modelo.xLB = [0, 0, 0];
  Modelo.xUB = [T1, T2, 10];
  SimplexJS.PrimalSimplex(Modelo);

  if (parseFloat(Modelo.x[0]) > 0) {
    this.send('usedT1', parseFloat(Modelo.x[0]));
  }

  if (parseFloat(Modelo.x[1]) > 0) {
    this.send('usedT2', parseFloat(Modelo.x[1]));
  }
}
```

4.6. Verificación de modelo

Con los datos obtenidos de una mina que luego servirá para la evaluación del estudio caso, se pudo verificar que el modelo de simulación realiza los cálculos deseados, realiza incertidumbre en los tiempos de ciclo, se llega a verificar que calcula tonelaje, ley y los diferentes kpi's de equipos.

4.7. Validación de modelo

Con los datos obtenidos de una mina que luego servirá para la evaluación del estudio caso, se pudo validar el modelo con mucha semejanza a la realidad, se implementó alrededor de de en 10 planes semanales para lograr una validación acertada.

4.8. Diseño de experimento

Para poder validar y dar conformidad al modelo como mínimo se deberían realizar en 5 planes semanales como mínimo.

4.9. Corridas de producción y análisis

Se corrieron 10 planes semanales con los cuales se pudieron verificar, validar y dar conformidad al modelo de simulación

4.10. Documentación del programa y reporte de resultados

El modelo de simulación cuenta con la documentación del programa propuesto como se puede ver en la sección de codificación del modelo adicional a eso se ha generado reportes específicos que luego servirán para la reconciliación de kpi's en el siguiente proceso de esta tesis.

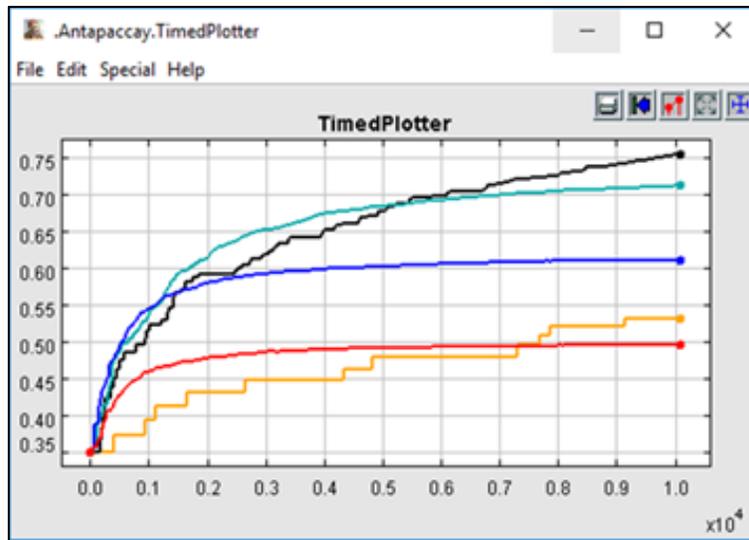


Ilustración 4-10. Reportabilidad del modelo de simulación (Zavaleta, 2020)

4.11. Implementación

Con los datos obtenidos de una mina que luego servirá para la evaluación del estudio caso, se pudo implementar el modelo de manera satisfactoria.

5. DESARROLLO DEL METODO DE RECONCILIACION

Para realizar una correcta comparación de kpi's planeados vs reales, tomare como base el trabajo realizado Parker en 2012, donde establece las bases para realizar una correcta reconciliación en minería introduciendo los "Mine Call Factors".

La limitación del modelo de Parker es que solo considera riesgo e incertidumbre en los procesos geológicos y metalúrgicos, por lo que centrare este trabajo en el proceso de producción mina el cual puede generar impactos económicos, asumiendo que los procesos geológicos y metalúrgicos están controlados.

Este trabajo se procedimiento se centrará en los Factores F2 y F3.

5.1. Kpi's a comparar

- Disponibilidad de equipos.
- Utilización de equipos.
- Productividad de equipos.
- Humedad de los frentes.
- Tiempo de ciclo.
- Velocidad de camiones
- Distancia inclinada e equivalente.
- Ley de mineral entregada a la Chancadora.
- Tonelaje enviado a la Chancadora primaria.
- Recuperación enviada chancadora primaria.
- Cobre fino producido.

5.2. Calculo del impacto económico

El objetivo final de esta tesis es poder calcular el impacto económico causado por una desviación de factores, es por ello que se tomara el impacto económico en dólares por tonelada.

6. CASO DE ESTUDIO

El presente capítulo describe la aplicación del modelo de simulación del capítulo 4 y la reconciliación operacional del capítulo 5, para un plan de minado semanal de corto plazo en la mina de cobre Antapaccay de Glencore, que es una operación a cielo abierto y se encuentra ubicada en la provincia de Espinar a 4,100 metros sobre el nivel del mar, aproximadamente a 260 kilómetros de las ciudades de Cusco y Arequipa en Perú.

Produce alrededor de 204 ktn de cobre fino anual, con una ley promedio de yacimiento de 0.55, una producción mina de 450 ktn/día, una capacidad de molinos de 115 ktn/día y una capacidad de chancadora primaria de 120 ktn/día.

El sistema Pala-Camión gobierna el movimiento de materiales en la mina, así como el uso de fajas transportadoras,



Ilustración 6-1. Ubicación mina Antapaccay (Zavaleta, 2020)

El objetivo del presente trabajo es poder determinar el impacto económico producido por las desviaciones generadas de un plan de minado semanal de corto plazo versus los resultados reales.

Este plan de minado semanal deberá estar alineado al plan forecast que se presenta mensualmente.

6.1. Aspectos generales

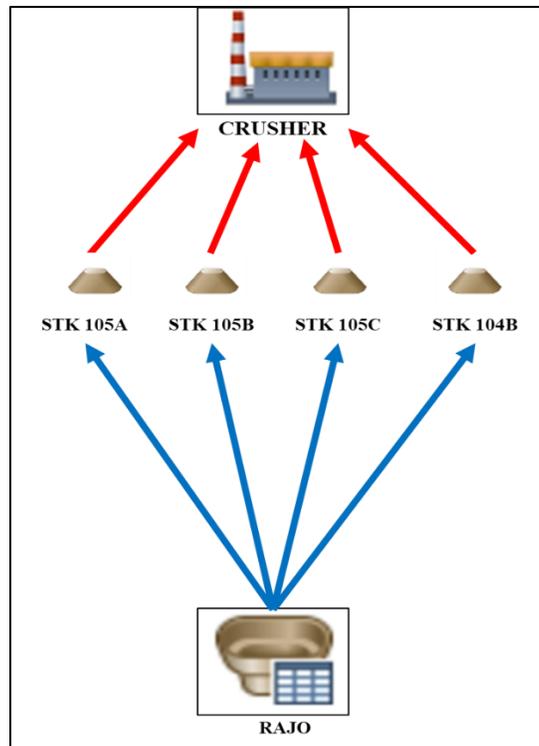
Para la construcción del modelo de simulación y reconciliación se tuvo un levantamiento de información de la mina in situ, identificando todos los factores importantes para poder replicar la realidad lo más detalladamente posible.

El problema principal a solucionar es el movimiento de materiales desde el tajo hacia los stocks, ya que los softwares comerciales con los que se trabajaban no daban buenos resultados y eran muy cerrados para la configuración que presenta la mina.

Es por ello que se implementó esta metodología y se empezó con las primeras corridas del modelo simulación a partir de la semana 40 (30/09 al 06/10 de 2020) y recién se pudo validar un buen resultado en la semana 50 (09/12 al 15/12 de 2020).

Para la semana 50 se tomaron las siguientes consideraciones:

- 1 pala CAT 7495 con código S2160,
- 17 Camiones CAT797F.
- Frente de minado: Banco 3870 del rajo norte.
- Stock 105A (Alta Ley), Stocks 105C (alta Ley), Stock 105B (baja ley) y Stock 104B (marginales)
- 1 Chancadora primaria (Crusher) con una capacidad máxima de 6500 tms/hr.



**Ilustración 6-2. Componentes del modelo de simulación de la mina Antapaccay
(Zavaleta, 2020)**

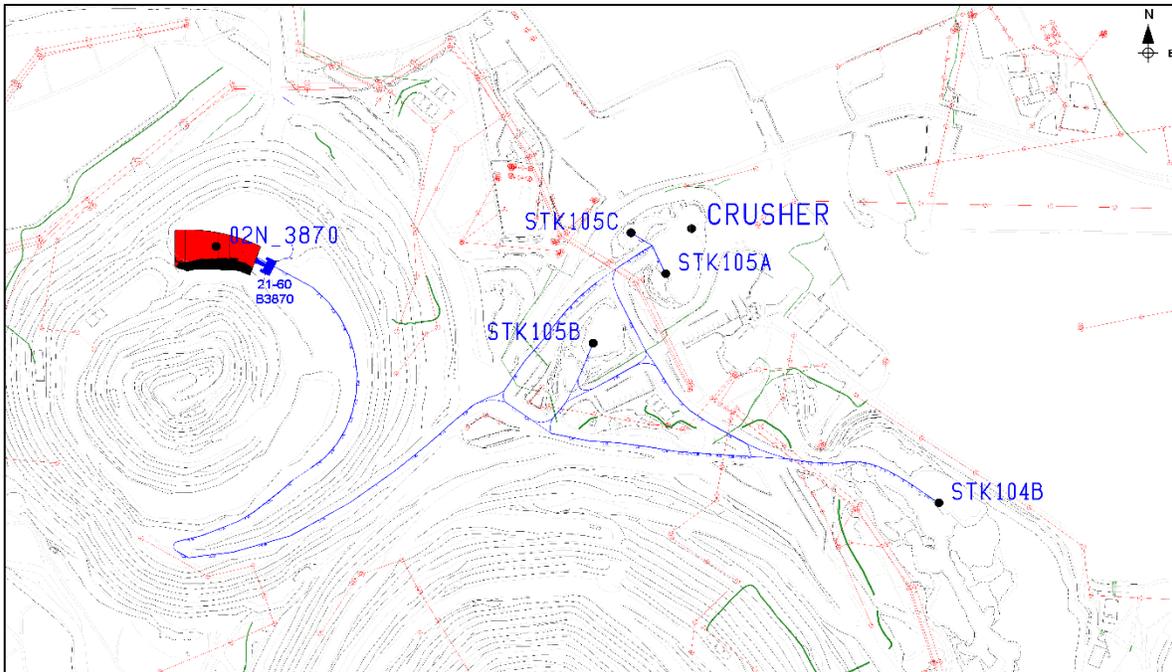


Ilustración 6-3. Topografía y rutas del modelo de simulación de la mina Antapaccay (Zavaleta, 2020)

6.2. Inputs de Simulación

6.2.1. Input general

Son los objetivos principales de la semana, se alinea al plan forecast de la semana 50, el área de procesos envía los mantenimientos de chancadora primaria y molinos para considerar en el plan semanal.

Tabla 6-1. Input de chancadora primaria

Chancadora Primaria	Plan_Fct
CuT (%)	0.51
Envío a chancadora primaria (ktms)	840
Envío a molinos (ktms)	803
Recuperación (%)	86.7%
CuF (tms)	3,521

6.2.2. Input de camiones

Son los inputs de los camiones que van a trabajar en la semana 50, alimentando mineral a los stocks, cabe resaltar que la disponibilidad la entrega mantenimiento en forma semanal y por día, adicional a esto operaciones entrega una utilización y productividad máxima como referencia, para que cuando hagamos la corrida de la simulación no sobrepase estos valores.

Tabla 6-2. Input de camiones

Camiones	C797F
Flota (#)	19
Payload (tmh)	363
Factor de Carga (#)	1
Disponibilidad (%)	84.4%
Utilización Máxima (%)	90.0%
Productividad máxima (tms/hr)	550

6.2.3. Input de palas

Es el input de la pala que va alimentar de mineral a los stocks en la semana 50, cabe resaltar que la disponibilidad la entrega mantenimiento en forma semanal y por día, adicional a esto operaciones entrega una utilización y productividad máxima como referencia, para que cuando hagamos la corrida de la simulación no sobrepase estos valores, debemos tomar en cuenta que no se considera fallas operacionales o mantenimientos no programados, ya que se tiene una pala en standby como backup.

Tabla 6-3. Input de palas

Input de Palas	CAT 7495
Flota (#)	1
Payload (tmh)	110
Factor de Carga (#)	1
Disponibilidad (%)	92.1%
Utilización máxima (%)	90.0%
Productividad máxima (tms/hr)	7,500

6.2.4. Input del frente de minado

Los inputs del frente de minado son de acuerdo a la posición espacial de los cortes de la semana 50 por día, estos tienen información del modelo de bloques como son el cobre total, la recuperación y la humedad.

Estos cortes deben estar alineados a los cortes presentados en el plan forecast a inicio de mes, deben ser cortes operativos, se debe cumplir con la política de mineral quebrado (90% de material quebrado para reconocer los minerales y mínimo 500 ktn de material quebrado al inicio de la semana por pala),

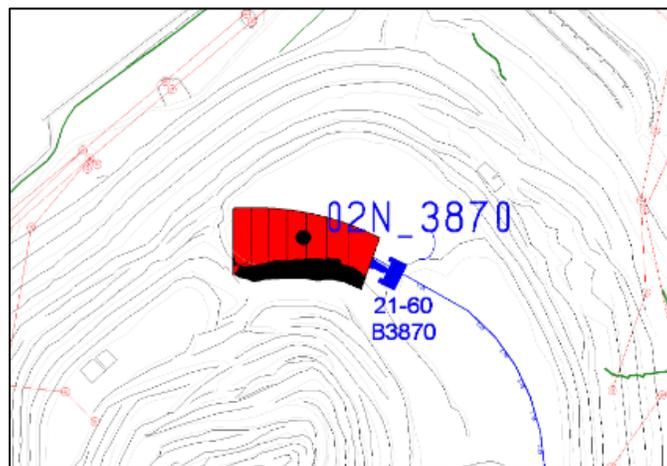


Ilustración 6-4. Frente y cortes de minado por día de la semana 50 (Zavaleta, 2020)

Tabla 6-4. Input de frente de minado

B3870	9-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic	14-Dic	15-Dic
CuT(%)	0.65	0.43	0.55	0.46	0.61	0.45	0.43
Rec (%)	90.7	87.8	88.5	87.1	87.0	89.0	87.1
Humedad (%)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

6.2.5. Input de stocks

Para los inputs de stocks se debe considerar como inician en la semana 50, es la parte más importante para realizar el blending correcto de envío a la chancadora primaria, esta información es proporcionada por el área de ore control basada en el modelo de stocks y muestreos en el frente de los stocks que se realizan diariamente.

Tabla 6-5. Input de stocks

Stock	ktms	CuT(%)	Rec(%)
Stock 105A	1,050	0.55	87.1
Stock 105B	850	0.45	88.0
Stock 105C	1,125	0.60	86.9
Stock 104B	15,300	0.30	83.5

Los stocks se dividen en:

- Stock de alta Ley $\text{CuT} \geq 0.50$
- Stock de Baja ley $0.30 < \text{CuT} < 0.50$
- Stock de marginales $0.15 \leq \text{CuT} \leq 0.30$

6.2.6. Input del tiempo de ciclo

Todos los tiempos que conforman el tiempo de ciclo fueron calculados por el sistema Dispatch y se realizó un análisis estadístico para poder determinar la distribución de datos mediante una curva conocida y posteriormente ingresar el riesgo y probabilidad en el modelo de simulación.

Tabla 6-6. Input del tiempo de ciclo

Tiempo de Ciclo	Media	Desviación Estándar	Distribución de datos
Tiempo de espera (min)	3.68	2.48	Normal
Tiempo de cuadro (min)	1.13	0.51	Log Normal
Tiempo de carguío (min)	1.99	0.60	Normal
Tiempo de viaje cargado (min)	32.60	5.10	Normal
Tiempo de descarga (min)	1.30	0.79	Normal
Tiempo de viaje vacío (min)	16.00	3.23	Normal

Nota: El sistema Dispatch considera el tiempo de descarga como la suma de la espera en descarga y el cuadro.

$$\text{Tiempo descarga} = \text{Tiempo de espera} + \text{Tiempo de cuadros} + \text{Tiempo de descarga}$$

6.3. Resultados del modelo de simulación

Se ingresaron todos los inputs al modelo de simulación de Antapaccay para la semana 50, se realizó 100 corridas para dar con un plan de minado que se asemeje a la realidad.

Con los resultados obtenidos del modelo de simulación, se procedió a comparar con los objetivos principales de la semana 50 según el forecast, se pudo validar que todos los valores

estaban en el rango de error permitido (5%) y se procedió a emitir el plan de minado de la semana 50,

6.3.1. Plan de envío a chancadora primaria

Con el modelo simulación se buscó que nos pueda entregar parámetros de planificación de forma diaria y que estén alineados con el plan forecast de la semana 50.

En la tabla 6-7 se muestra el plan de envío con los objetivos principales de la planta, se pudo obtener la ley, tonelaje y recuperación de forma diaria y acorde a los parámetros iniciales requeridos.

El modelo de considero el algoritmo de optimización cada 2 horas obteniendo leyes y recuperaciones diferentes para cada día, esto indica que la incertidumbre y el riesgo calculado estuvo acorde a lo requerido.

Se debe considerar que el tonelaje de tratamiento para la chancadora primaria y molinos viene dado por el área de procesos, para la semana 50 las dos plantas no presentan mantenimiento programado.

Tabla 6-7. Plan de envío a chancadora primaria semana 50

Plan semana 50	9-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic	14-Dic	15-Dic	Total
Crusher (Ktms)	120	120	120	120	120	120	120	840
Mill (Ktms)	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	803
CuT (%)	0.54	0.48	0.50	0.48	0.54	0.48	0.53	0.51
Rec (%)	88.2	86.7	86.8	84.8	88.7	87.0	84.8	86.7
Humedad (%)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

6.3.2. Plan de camiones

En la tabla 6-8 se muestran el plan de camiones de la semana 50 por día, no se considera interrupciones por interferencias operacionales ni por mantenimiento no programados de los camiones.

Se toma una distancia promedio a los stocks de acuerdo a las rutas donde van a trabajar los camiones para semana 50.

En el modelo de simulación se considera incertidumbre en todos los componentes del tiempo de ciclo estos datos fueron calculados por el sistema Dispatch y se encuentran en el capítulo de anexos de la presente tesis.

Para calcular las velocidades de los camiones, se basan de la curva de velocidades por pendiente que entrego el sistema Dispatch y se encuentra en el capítulo de anexos de la presente tesis, aquí se realizó un tratamiento estadístico de los datos.

La disponibilidad la entregó el área de mantenimiento para la semana 50, la utilización, productividad y producción de los camiones, lo calculo el modelo de simulación basado en el tratamiento del tiempo en Antapaccay, esta información se encuentra en el capítulo de anexos de la presente tesis.

Tabla 6-8. Plan de camiones semana 50

Plan Semana 50	9-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic	14-Dic	15-Dic	Sem50
Distancia Promedio (km)	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Tiempo Ida (min)	32.7	32.3	32.5	32.6	33.0	32.6	32.8	32.6
Tiempo Retorno (min)	16.1	15.8	15.9	16.0	16.4	15.8	15.8	16.0
Tiempos Fijos (min)	7.5	7.1	7.4	7.3	7.9	7.3	7.1	7.4
Tiempo de Ciclo (min)	56.3	55.2	55.8	55.9	57.3	55.7	55.7	56.0
Velocidad Ida (min)	11.4	11.6	11.5	11.5	11.3	11.5	11.4	11.5
Velocidad Retorno (min)	23.2	23.6	23.5	23.4	22.8	23.6	23.6	23.4
Productividad (tms/hr)	373	381	377	376	367	377	377	376
Disponibilidad (%)	83.2	83.3	86.4	88.2	81.7	85.2	82.4	84.4
Utilización (%)	88.1	86.4	83.8	87.2	85.3	84.7	85.1	85.81
Producción (tms)	125	125	124	125	117	124	121	861

6.3.3. Plan de Palas

En la tabla # se muestran el plan de palas de la semana 50 por día, no se considera interrupciones por interferencias operacionales ni por mantenimiento no programados de las palas, solo trabajara una pala S2160 en el frente de mineral, alimentando de mineral a los stocks.

La disponibilidad la entregó el área de mantenimiento para la semana 50, la utilización, productividad y producción de la pala, lo calculo el modelo de simulación basado en el tratamiento del tiempo en Antapaccay, esta información se encuentra en el capítulo de anexos de la presente tesis.

Se debe considerar que el mejor match pala camiones en la mina Antapaccay está dado por la pala CAT7495 y los camiones CAT797F, alrededor de 4 pases.

Se tiene una productividad de pala debido a que las voladuras en mineral tienen como objetivo un 0.47 de Factor de potencia, con una fragmentación mínima de 50% de finos mayor a 1 pulgada.

Tabla 6-9. Plan de palas semana 50

Plan Semana 50	9-Dic	10-Dic	11-Dic	12-Dic	13-Dic	14-Dic	15-Dic	Sem50
Disponibilidad (%)	92.1	92.1	92.1	92.1	92.1	92.0	92.1	92.1
Utilización (%)	88.3	89.0	88.5	88.6	87.2	87.2	86.0	87.8
Horas Efectivas(hr)	19.5	19.7	19.6	19.6	19.3	19.3	19.0	135.9
Productividad (tms/hr)	6,400	6,350	6,360	6,380	6,050	6,450	6,350	6,334
Total	125	125	124	125	117	124	121	861

6.4. Análisis y resultados usando la metodología de reconciliación

Una vez emitido el plan semanal de la semana 50, la implementación y seguimiento son pieza fundamental para para lograr el éxito de este, es por ello que la metodología de reconciliación propuesta contempla realizar un cumplimiento en forma diaria y así evitar desviación para el término de la semana.

La tolerancia de una desviación en los parámetros comprados debe estar en un rango de +/- 5 % de cumplimiento.

Para la reconciliación de los parámetros tomaremos los datos reales del sistema Dispatch, el modelo geológico, geometalúrgico, la topografía de mina, digline de la pala, resultados de laboratorio químico, el Pi Vision de procesos, esto se realizará en forma diaria, por turno y en tiempo real de acuerdo al parámetro que se necesita comparar.

6.4.1. Reconciliación espacial

Según los cortes planificados se realizó una reconciliación espacial del minado de la pala S2160, utilizando la topografía levantada y el avance de pala (digline) obtenido del sistema de alta precisión Provision 3.4 en forma diría.

En la ilustración # se puede observar el avance por día de la pala S2160, donde vemos un avance con una desviación menor al 5%, que está dentro de lo esperado, cabe resaltar que la pala S2160 en la semana 50 no tuvo mantenimientos programados ni programados y las interferencias operacionales fue insignificantes, por ejemplo, el traslado de pala, limpieza de frente con tractor, corte límite de la cresta etc.

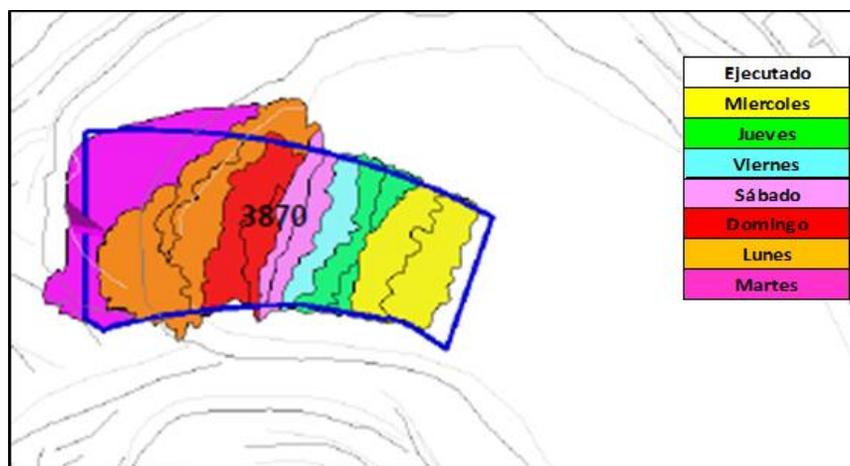


Ilustración 6-5. Reconciliación espacial semana 50 (Zavaleta, 2020)

6.4.2. Reconciliación de parámetros de operación mina

Para realizar una correcta comparación de parámetros de operación mina enfocado en el transporte de materiales y la alimentación a chancadora primaria, se dividió en 2 tipos de reconciliación de parámetros, los que vienen dados por los camiones y la pala S2160, para poder analizar los resultados.

Para lo que son parámetros operacionales se tomara el F2 como comparación principal, esto basado en los mine call factor de Parker (2012).

6.4.2.1. Reconciliación de camiones

En la tabla # se puede observar:

El tiempo ciclo tiene un cumplimiento de 99%, con una desviación de 1 % que está acorde con la desviación esperada, cabe resaltar que los camiones tuvieron velocidades de ida menores y velocidades de retorno mayores, los tiempos fijos estuvieron acorde con en el plan de la semana 50.

La disponibilidad, utilización y la productividad de los camiones están acorde con lo planificado teniendo una desviación de +/- 2% de lo planificado.

Tabla 6-10. Reconciliación de camiones semana 50

Kpi	Plan	Real	Cumplimiento
Distancia Promedio (km)	6.23	6.25	100%
Tiempo Ida (min)	32.6	33.1	98%
Tiempo Retorno (min)	16.0	15.8	101%
Tiempos Fijos (min)	7.4	7.5	99%
Tiempo de Ciclo (min)	56.0	56.4	99%
Velocidad Ida (min)	11.5	11.3	101%
Velocidad Retorno (min)	23.4	23.5	100%
Productividad (tms/hr)	376	380	101%
Disponibilidad (%)	84.4	85.0	101%
Utilización (%)	85.2	84.9	100%
Producción (ktms)	862	875	102%

6.4.2.2. Reconciliación de palas

En la tabla # se puede observar:

La disponibilidad, utilización y la productividad de los camiones están acorde con lo planificado teniendo una desviación de +/- 2% de lo planificado.

La fragmentación de material enviado a los stocks ha estado con un factor de potencia de 0.45 kg/tms y con un porcentaje de finos de 52% de granulometría menor a 1 pulgada.

Tabla 6-11. Reconciliación de palas semana 50

Kpi	Plan	Real	Cumplimiento
Disponibilidad (%)	92.1	94.1	102%
Utilización (%)	87.8	88.7	101%
Horas Efectivas (hr)	135.9	140.2	103%
Productividad (tms/hr)	6,345	6,240	98%
Producción (ktms)	862	875	101%

6.4.3. Reconciliación de parámetros geológicos y metalúrgicos

Para realizar una correcta comparación de parámetros geológicos y metalúrgicos de material enviado a chancadora primaria y molinos, se tomó 5 aspectos fundamentales, la ley de cobre total, la recuperación, el cobre fino producido, el tonelaje enviado a chancadora primaria y molinos, eso con el objetivo de poder analizar los resultados.

Las alimentaciones a chancadora primaria se van a dar de los 4 stocks de mineral que se tiene disponible para la semana 50.

Para lo que son parámetros geológicos y metalúrgicos se tomara el F3 como comparación principal, esto basado en los mine call factor de Parker (2012).

6.4.3.1. Reconciliación de molinos

En la ilustración # se puede observar que el cumplimiento de envío a chancadora primaria nos tiene un cumplimiento de 100.3 % para la semana 50 cumpliendo con lo planificado.

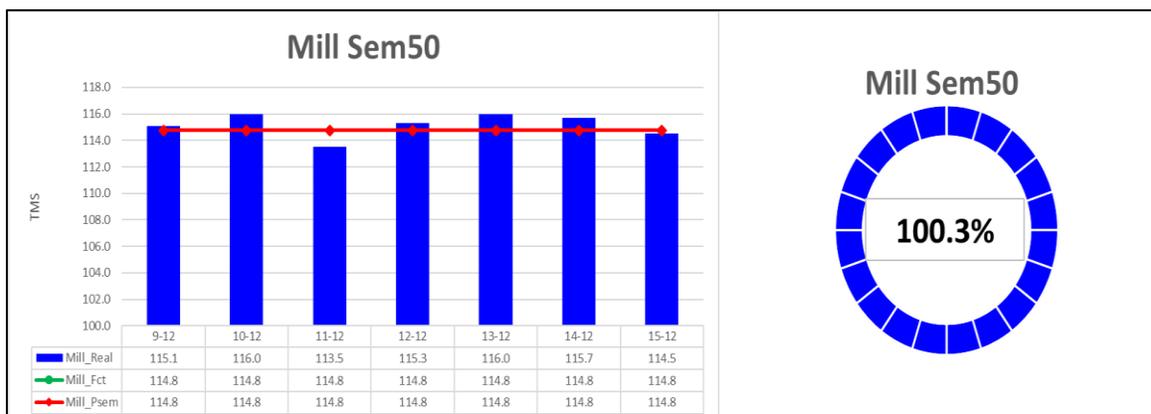


Ilustración 6-6. Reconciliación de molinos (Zavaleta, 2020)

6.4.3.2. Reconciliación de chancadora primaria

En la ilustración # se puede observar que se ha enviado el cumplimiento de envío a molinos tiene un cumplimiento de 102.1 % para la semana 50 cumpliendo con lo planificado.

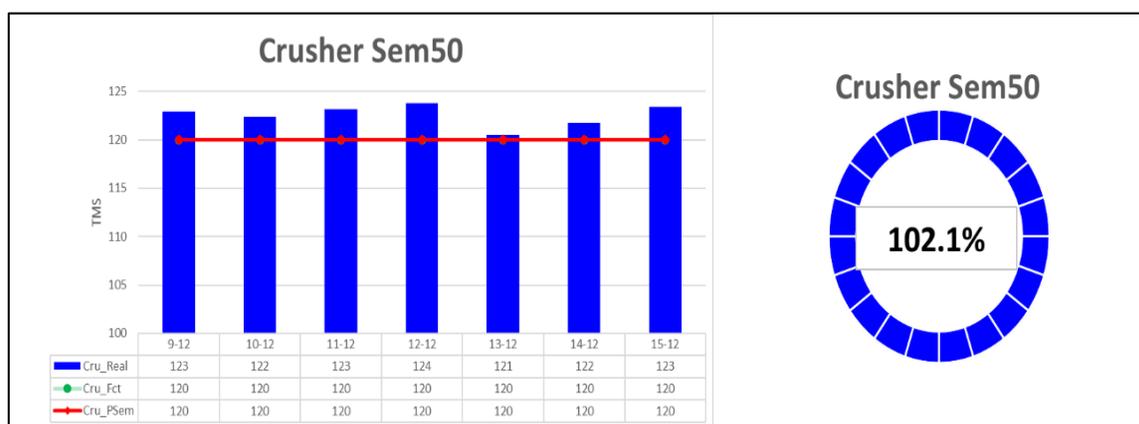


Ilustración 6-7. Reconciliación de envío a chancadora primaria (Zavaleta, 2020)

6.4.3.3. Reconciliación de ley de cabeza (CuT)

En la ilustración # se puede observar que el cumplimiento de envío a molinos tiene un cumplimiento de 102.1 % para la semana 50.

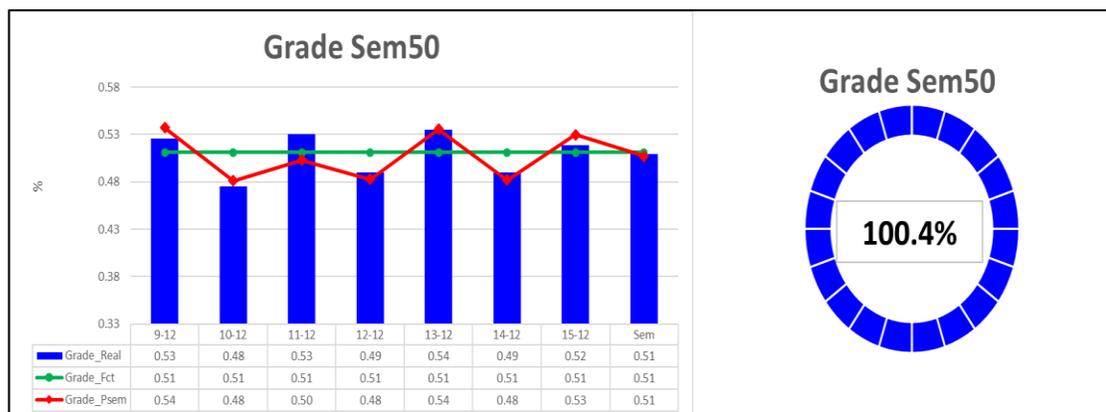


Ilustración 6-8. Reconciliación de ley de cobre total (Zavaleta, 2020)

6.4.3.4. Reconciliación de recuperación

En la ilustración # se puede observar que el cumplimiento de envío a molinos tiene un cumplimiento de 102.1 % para la semana 50.

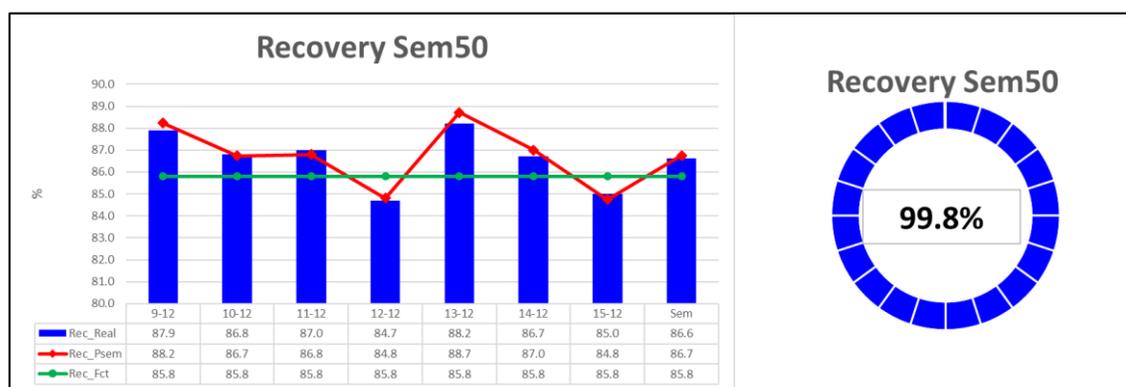


Ilustración 6-9. Reconciliación de recuperación (Zavaleta, 2020)

6.4.3.5. Reconciliación de cobre fino

En la ilustración # se puede observar que el cumplimiento de envío a molinos tiene un cumplimiento de 102.1 % para la semana 50.

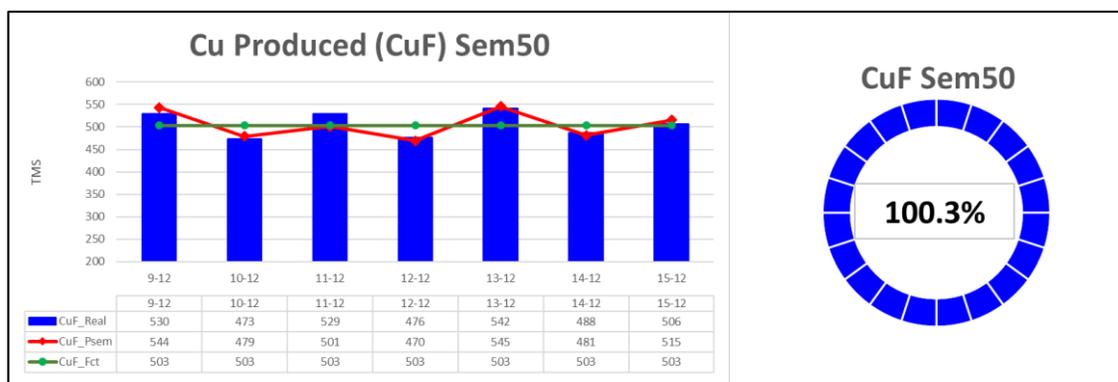


Ilustración 6-10. Reconciliación de cobre fino (Zavaleta, 2020)

6.4.4. Impacto económico

Se ha tenido una diferencia mayor de 13, 000 toneladas de producción de pala, el costo por extracción de una libra de mineral en Antapaccay de 2.1 dólares, por lo que se tiene un costo de 60,186,126 dólares.

El cobre fino producido fue de 9,000 toneladas superior al planificado para la semana 50, el precio de cobre fino de una libra de mineral fue de 3.2 dólares para la semana 50, teniendo un valor de venta de 63,493,056 dólares

Para hallar el impacto económico y la utilidad restamos las el precio de venta final y el costo total de la semana 50, el cual fue de 3,306,930 dólares en positivo.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1. Conclusiones

El presente trabajo trata de como hallar el impacto económico de un plan semanal a corto plazo, para ello se construyó un modelo simulación que nos diera parámetros de minado, para luego compararlos con una metodología de reconciliación basada en los principios de los mine call factor Parker 2012, dando énfasis en los factores F2 y F3 y finalmente poder hallar el impacto económico del plan semanal.

A continuación, se detallan las principales conclusiones:

- La metodología propuesta para hallar el impacto económico de un plan de minado semanal a corto plazo se ha podido probar con éxito en un estudio de caso, la limitación de los mine call factor de Parker 2012 es que solo considera incertidumbre en los procesos geológicos y metalúrgicos, en este trabajo se dio énfasis en el proceso producción mina y movimiento de materiales dando énfasis en el F2 y F3.
- Para poder replicar la realidad del proceso productivo y movimiento de materiales en operaciones mina, se requirió construir un modelo de simulación dinámico, de datos aleatorios, con el cual se pudo predecir los principales kpi's para planes de minado de corto plazo.
- Para el control de leyes en planta se toman muestras de un analizador cada 2 horas y estas son enviadas al laboratorio químico para su procesamiento, es por ello que en este trabajo se demostró que si es posible agregarle un algoritmo de optimización a un modelo de simulación y sirve como aporte para futuros estudios que se requieran hacer con simulación.
- La data extraída del Dispatch es una data dura, poco flexible, por ello que es necesario hacerle un tratamiento un tratamiento estadístico y poder determinar el comportamiento de estos datos para luego ingresarlos al modelo de simulación.

- Es necesario realizar una reconciliación espacial para poder identificar la adherencia del plan de minado semanal a corto plazo.
- Los impactos económicos en diferentes minas recién toman relevancia cuando se realiza cierres de mes y ya es tarde para mejorar u optimizar algún proceso, es por eso que esta metodología se aplica a planes de minado semanal a corto plazo y tiene resultados positivos para el proceso minero.
- Es necesario calibrar constantemente el modelo simulación para obtener predicciones de kpi's acordes a la realidad de la mina en la que se va implementar esta metodología.
- Los resultados obtenidos son muy útiles para poder dar feedback al proceso de planificación a largo plazo.

7.2. Trabajo futuro

A partir de este trabajo se podrán realizar las siguientes extensiones:

- El modelo de simulación tiene la limitación de utilizar fajas transportadoras desde los stocks a la chancadora primaria, se podría aplicar a stocks dinámicos cuyo movimiento de material se realice con el sistema Pala-Camión.
- El modelo de simulación se limita a utilizar 1 pala y 1 flota de camiones, este trabajo se podría ampliar desarrollando la metodología a un sistema Pala-Camión con más de una pala y diferentes flotas de camiones.
- La ley de los stocks se considera como promedio, para un futuro trabajo se recomienda que se tenga un modelo geológico de los stocks y realizar polígonos para tener una mejor estimación de los diferentes kpi's geometalúrgicos.

- Es necesario incluir interferencias operacionales en el modelo de simulación propuesto.
- El modelo de reconciliación y simulación se debería aplicar para otro tipo de yacimiento que no sea cobre y probar en yacimientos polimetálicos.
- Para estimar el impacto económico se debería desarrollar un modelo de estimación del precio del cobre el cual deba incluir riesgo e incertidumbre para obtener mayor precisión y no solo tomar promedios de precio del cobre.
- Una mejora para el método de reconciliación es que la mina donde se aplique pueda definir sus propios mine call factors.

8. BIBLIOGRAFIA

Parker, H. (2012). Reconciliation principles for the mining industry. *Mining Technology*. v. 121.

Shaw, W. et al (2013). Reconciliation-Delivering on Promises, APCOM.

Amoako, R., Al-Hassan, S. (2015), Ore Grade Reconciliation Techniques – A Review, *Journal of Geosciences and Geomatics*, Vol. 3, No. 5.

Riske, R., Mark, P.D. And Helm, S. (2010). Mine Reconciliation for better or worse, Snowden mining, Canada.

Parhizkar A., Ataee, M., Moarefvand, P., Rasouli V. and Bangian, A.H. (2010). “A New Model to Improve Ore Grade Reconciliation between the Exploration Model and the Mine”, *Proceedings of Mine Planning and Equipment Selection (MPES) Conference*, Fremantle, Western Australia

Gilfillan, J. and Levy, I. W. (2001). “Monitoring the Reserve”, in *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation, The AusIMM Guide to Good Practice*.

Law, A. and Kelton (2000). *Simulation Modeling and Analysis* (3ed.). Boston, Mc Graw-Hill Higher Education.

Sturgul, 2000. *Mine Design Examples Using Simulation*. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Kelton, W., Sadowski, R. And Sturrock, D. (2004). *Simulation with Arena* (4 ed.). Boston, Mc Graw-Hill Higher Education.

ANEXO

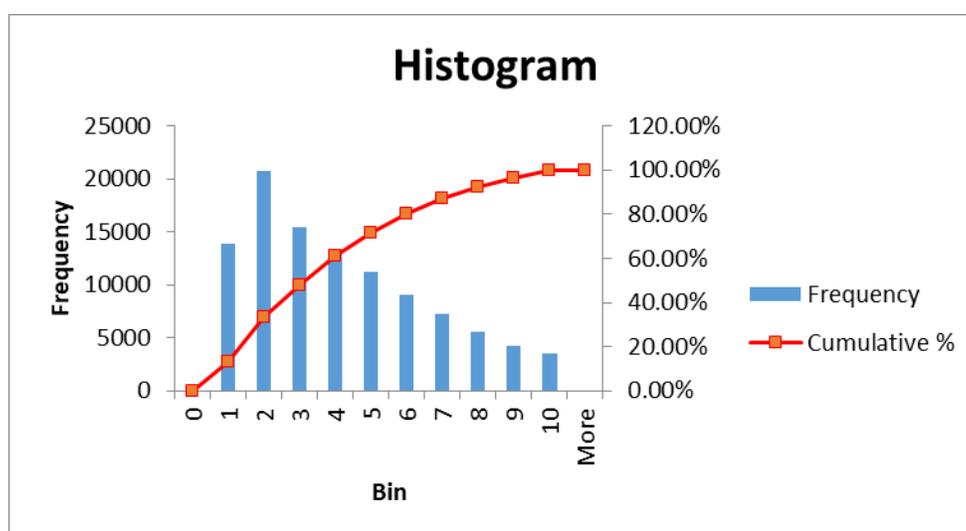
Tiempo de espera de camiones

FCamión	FPala	TEspPala(Min)
CAT 797	B 495HR2	9.42
CAT 797	B 495HR2	2.93
CAT 797	B 495HR2	0.55
CAT 797	B 495HR2	3.70
CAT 797	B 495HR2	2.58
CAT 797	B 495HR2	5.37
CAT 797	B 495HR2	5.40
CAT 797	B 495HR2	2.65
CAT 797	B 495HR2	1.70
CAT 797	B 495HR2	5.75
CAT 797	B 495HR2	3.62
CAT 797	B 495HR2	2.42
CAT 797	B 495HR2	2.83
CAT 797	B 495HR2	9.52
CAT 797	B 495HR2	5.63
CAT 797	B 495HR2	8.75
CAT 797	B 495HR2	1.13
CAT 797	B 495HR2	1.55
CAT 797	B 495HR2	5.07
CAT 797	B 495HR2	2.45
CAT 797	B 495HR2	8.67
CAT 797	B 495HR2	5.22
CAT 797	B 495HR2	2.40
CAT 797	B 495HR2	1.38
CAT 797	B 495HR2	2.78
CAT 797	B 495HR2	5.93

CAT 797	B 495HR2	0.90
CAT 797	B 495HR2	5.93
CAT 797	B 495HR2	5.98
CAT 797	B 495HR2	9.70
CAT 797	B 495HR2	4.72
CAT 797	B 495HR2	9.75
CAT 797	B 495HR2	1.88
CAT 797	B 495HR2	4.53
CAT 797	B 495HR2	3.30
CAT 797	B 495HR2	1.53
CAT 797	B 495HR2	4.90
CAT 797	B 495HR2	4.40
CAT 797	B 495HR2	6.12
CAT 797	B 495HR2	1.10
CAT 797	B 495HR2	3.73
CAT 797	B 495HR2	1.90
CAT 797	B 495HR2	2.25
CAT 797	B 495HR2	7.50
CAT 797	B 495HR2	0.98
CAT 797	B 495HR2	0.92
CAT 797	B 495HR2	3.82
CAT 797	B 495HR2	6.30
CAT 797	B 495HR2	4.80
CAT 797	B 495HR2	2.20
CAT 797	B 495HR2	3.20
CAT 797	B 495HR2	2.52
CAT 797	B 495HR2	1.58
CAT 797	B 495HR2	2.83
CAT 797	B 495HR2	8.45

Descripción estadística del tiempo de espera de camiones

Descriptive Statistics	
Mean	3.68
Standard Error	0.01
Median	3.15
Mode	0.72
Standard Deviation	2.48
Sample Variance	6.15
Kurtosis	-0.52
Skewness	0.68
Range	9.50
Minimum	0.50
Maximum	10.00
Sum	383,775.22
Count	104,226.00
Confidence Level(95.0%)	0.02



Histograma del tiempo de espera de camiones (Zavaleta, 2020)

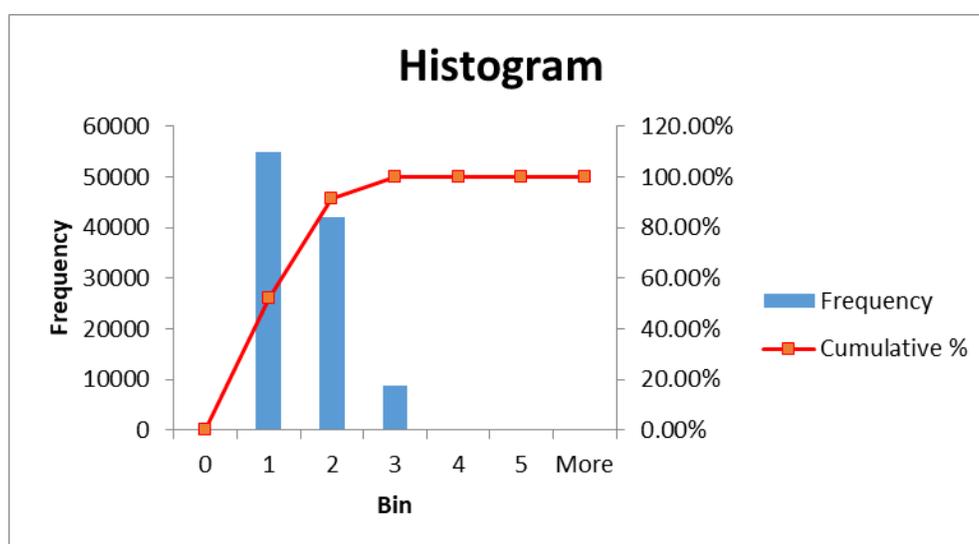
Tiempo de cuadro de camiones

FCamión	FPala	Spot(Min)
CAT 797	B 495HR2	0.82
CAT 797	B 495HR2	0.87
CAT 797	B 495HR2	0.55
CAT 797	B 495HR2	1.62
CAT 797	B 495HR2	0.72
CAT 797	B 495HR2	2.07
CAT 797	B 495HR2	1.20
CAT 797	B 495HR2	0.83
CAT 797	B 495HR2	0.83
CAT 797	B 495HR2	2.53
CAT 797	B 495HR2	1.42
CAT 797	B 495HR2	1.12
CAT 797	B 495HR2	0.45
CAT 797	B 495HR2	2.13
CAT 797	B 495HR2	1.10
CAT 797	B 495HR2	0.80
CAT 797	B 495HR2	1.43
CAT 797	B 495HR2	1.13
CAT 797	B 495HR2	0.95
CAT 797	B 495HR2	1.50
CAT 797	B 495HR2	0.87
CAT 797	B 495HR2	2.10
CAT 797	B 495HR2	0.45
CAT 797	B 495HR2	0.73
CAT 797	B 495HR2	2.15
CAT 797	B 495HR2	2.65
CAT 797	B 495HR2	0.90
CAT 797	B 495HR2	1.12

CAT 797	B 495HR2	0.95
CAT 797	B 495HR2	1.87
CAT 797	B 495HR2	2.00
CAT 797	B 495HR2	1.15
CAT 797	B 495HR2	2.72
CAT 797	B 495HR2	1.90
CAT 797	B 495HR2	1.53
CAT 797	B 495HR2	1.28
CAT 797	B 495HR2	1.25
CAT 797	B 495HR2	0.70
CAT 797	B 495HR2	0.83
CAT 797	B 495HR2	0.83
CAT 797	B 495HR2	0.88
CAT 797	B 495HR2	0.62
CAT 797	B 495HR2	0.80
CAT 797	B 495HR2	0.88
CAT 797	B 495HR2	1.68
CAT 797	B 495HR2	0.90
CAT 797	B 495HR2	0.98
CAT 797	B 495HR2	0.68
CAT 797	B 495HR2	1.18
CAT 797	B 495HR2	2.57
CAT 797	B 495HR2	0.97
CAT 797	B 495HR2	2.20
CAT 797	B 495HR2	2.15
CAT 797	B 495HR2	0.90
CAT 797	B 495HR2	1.75
CAT 797	B 495HR2	1.58
CAT 797	B 495HR2	2.00
CAT 797	B 495HR2	2.03

Descripción estadística del tiempo de cuadro de camiones

Descriptive Statistics	
Mean	1.13
Standard Error	0.00
Median	0.98
Mode	0.77
Standard Deviation	0.51
Sample Variance	0.26
Kurtosis	0.64
Skewness	1.10
Range	2.37
Minimum	0.40
Maximum	2.77
Sum	119,735.52
Count	105,689.00
Confidence Level(95.0%)	0.003



Histograma del tiempo de cuadro de camiones (Zavaleta, 2020)